일반사업 2023-15-02

해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 조사·분석

- 해운·항만 부문

Analysis on International cooperation conditions for Marine Carbon-Neutral science and technology

안용성 · 김경신 · 김주형 · 이상혁 · 이혜령

정병욱 · 김형주 · 염구섭 · 하승만 · 박치병 · 장하영 · 김중원 · 황인식 · 최수원

KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	**안용성, 김경신, 김주형, 이상혁, 이혜령 정병욱, 김형주, 염구섭, 하승만, 박치병, 장하영, 김중원, 황인식, 최수원**
내부연구진	연구책임자 안용성 한국해양수산개발원 해양연구본부 부연구위원 공동연구원 김경신 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원 공동연구원 김주형 한국해양수산개발원 해양연구본부 전문연구원 공동연구원 이상혁 한국해양수산개발원 해양연구본부 전문연구원 공동연구원 이혜령 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
외부연구진	공동연구원 정병욱 University of Strathclyde Associate Professor 공동연구원 김형주 Norwegian University of Science and Technology Associate Professor 공동연구원 염구섭 SINTEFF, OCEAN Senior Research Scientist 공동연구원 하승만 University of Strathclyde Research Assistant 공동연구원 박치병 University of Strathclyde Research Associate 공동연구원 장하영 University of Strathclyde Research Associate 공동연구원 김중원 University of Strathclyde Research Assistant 공동연구원 황인식 University of Strathclyde Research Assistant 공동연구원 최수원 University of Strathclyde Research Assistant

연구기간	2023. 1. 1. ~ 2023. 12. 31.

보고서 집필내역

연구책임자	안용성 연구총괄, 제1장, 제2장 2절 일부, 3절, 제3장 1절,2절 일부, 3절, 제4장, 제5장
내부연구진	김경신 제2장 2절 일부 김주형 제2장 1절 일부 이상혁 제2장 2절 이혜령 제2장 1절 일부
외부연구진	정병욱 제3장 2절 일부 김형주 제3장 2절 일부 황인식 제3장 2절 일부 염구섭 부록1 일부 하승만 부록1 일부 박치병 부록1 일부 장하영 부록1 일부 김중원 부록1 일부 최수원 부록1 일부

산·학·연·정 연구자문위원	김진형 한국선급 책임연구원 이향숙 인천대학교 교수 안진우 해양수산부 해양환경정책과 사무관

※순서는 산·학·연·정 순임

목차

정책제안 _i

요약 _vii

Executive Summary_xxix

01 서론 _1

제1절 연구 배경 및 목적 1
1. 연구의 배경 및 필요성 1
2. 연구 목적 7

제2절 연구 내용 및 방법 9
1. 연구 범위 및 주요내용 9
2. 연구 방법 13

제3절 선행 연구 16
1. 선행 연구 16
2. 본 연구의 차별성 27

02 해양 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 관련 동향 _31

제1절 탄소중립 과학기술 관련 국내외 법령·정책 동향 32
1. 국제해사기구(IMO) 32
2. 유럽 35
3. 미국 39
4. 국내 43

제2절 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 동향 58
1. 탄소중립 관련 국제협력 정책 동향 58
2. 해운·항만 부문 과학기술 협력 체계 61
3. 해운·항만 과학기술 국제협력 사례 73

제3절 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성 78
1. 해양 탄소중립 과학기술 정책 패러다임의 한계 78
2. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성 84

03 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석 _89

제1절 설문-분석모형의 구성 90
1. 해양 탄소중립 과학기술의 유형 분류 90
2. 설문·분석모형의 구성 115
3. 설문-분석모형의 적용 118

제2절 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석 121
1. 기술유형·항목별 기술격차 분석 121
2. 해양 탄소중립 관련 현안 분석 130
3. 종합 분석 140

제3절 국제협력 대상 기술항목의 식별 154
1. 국제협력 대상 유형의 구분 154
2. 평가지표별 수준급간의 설정 156
3. 국제협력 대상 기술항목의 식별 159

04 해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력방안 _165

제1절 해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력 방안 165
1. 전략적 국제협력·공조 체계 구축 165
2. 한-유럽 탄소중립 공동 연구개발 플랫폼 구축 170

제2절 정책·사업화 제안 172
1. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업 172
2. 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램 176

05 결론 _179

제1절 주요 연구결과 요약 179

제2절 정책 제언 182

1. 혁신기술 시장 주도를 위한 전략적 접근 182

2. 연구개발 국제협력 주도·지원을 위한 재원 마련 183

제3절 연구의 한계 및 향후과제 184

참고문헌 _187

부록 _207

부 록 1. 해양 탄소중립 과학기술 동향 207

1. 해운 부문 탄소중립 과학기술 207

2. 항만 부문 탄소중립 과학기술 242

부 록 2. 국내외 전문가 설문조사 양식 275

표 목차

〈표 1-1〉 연구의 목적 ····· 8
〈표 1-2〉 해양 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 관련 동향 조사,분석 ····· 11
〈표 1-3〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석 ····· 12
〈표 1-4〉 해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력 방안 도출 ····· 13
〈표 1-5〉 탄소중립 구현의 핵심기술 선별의 사례 ····· 17
〈표 1-6〉 선행 연구 검토 ····· 18
〈표 1-7〉 본 연구의 차별성 ····· 28
〈표 2-1〉 IMO: 선박의 온실가스 배출 저감 기술 분류 ····· 34
〈표 2-2〉 영국: 탄소중립 구현을 위한 10대 중점분야 ····· 37
〈표 2-3〉 영국: 해운 부문 배출제로 구현을 위한 기술적 방안 ····· 38
〈표 2-4〉 미국: 기후 혁신 실무 그룹 선정 10대 혁신기술영역 ····· 40
〈표 2-5〉 미국: Net-Zero 탄소중립 유망 기술 ····· 41
〈표 2-6〉 미국: 해양 탈탄소화 지원을 위한 유망 연료 및 기술 ····· 42
〈표 2-7〉 제1차 친환경선박 기본계획('21~30) 상 개발로드맵 ····· 44
〈표 2-8〉 수소항만 선도 사업 ····· 49
〈표 2-9〉 한국형 탄소중립 100대 핵심기술 목록 ····· 53
〈표 2-10〉 탄소중립 에너지기술 로드맵 13대 분야 및 탄소중립 산업·에너지 R&D 전략 17대 분야 중 관련 분야 ····· 55
〈표 2-11〉 과학기술 국제협력 관련 국내법과 주요 내용 ····· 59
〈표 2-12〉 EU 자금지원 부문 및 세부 프로그램 (2021-2027) ····· 62
〈표 2-13〉 Horizon Europe 프로그램 구조 및 전략 ····· 67
〈표 2-14〉 IMO DDP 프로젝트 목록 ····· 72
〈표 2-15〉 PIONEER 핵심 분야 및 세부 기술 ····· 75
〈표 2-16〉 Green C Port 프로젝트의 구체적 목표 ····· 76
〈표 2-17〉 기후기술 감축 분야 국가별 기술수준, 기술격차 및 연구역량 ····· 84
〈표 3-1〉 유럽연합 녹색기술 분류체계의 환경목표 ····· 91
〈표 3-2〉 유럽연합 녹색기술 분류체계의 판단 조건 ····· 91
〈표 3-3〉 경제활동 유형 분류 ····· 92
〈표 3-4〉 해운·항만 관련 녹색기술의 분류 ····· 93
〈표 3-5〉 한국형 녹색분류체계의 경제활동 구분 ····· 94

〈표 3-6〉 해운·항만 관련 녹색기술의 분류 ····· 95
〈표 3-7〉 영국 교통부(DfT)의 해양 탄소중립 기술 유형 분류 ····· 96
〈표 3-8〉 기술 유형별 평가항목 ····· 98
〈표 3-9〉 석유·가스 기후변화 이니셔티브(OGCI)의 해운 배출저감기술 유형 분류 ····· 102
〈표 3-10〉 유형2: 선박 설계 조치 (Vessel design measures) ····· 103
〈표 3-11〉 유형7: 운항 최적화 (Voyage optimization) ····· 106
〈표 3-12〉 해운부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) 상세 ····· 110
〈표 3-13〉 항만부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) 상세 ····· 114
〈표 3-14〉 해운·항만 부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) ····· 117
〈표 3-15〉 설문 분석 수행 과정 ····· 120
〈표 3-16〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환 ····· 121
〈표 3-17〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선 ····· 122
〈표 3-18〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 전·후 처리 ····· 124
〈표 3-19〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환 ····· 126
〈표 3-20〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선 ····· 127
〈표 3-21〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 전·후 처리 ····· 129
〈표 3-22〉 해운 탄소 중립 기술의 시장 도입/적용 가능성 ····· 131
〈표 3-23〉 해운 분야 에너지 전환 기술의 기술적 난이도 ····· 133
〈표 3-24〉 해운 분야 에너지 전환 기술의 도입에 따른 효과 ····· 134
〈표 3-25〉 항만 탄소 중립 기술의 시장 도입/적용 가능성 ····· 136
〈표 3-26〉 항만 탄소 중립 기술의 항목별 상용화의 기술적 난이도 ····· 137
〈표 3-27〉 항만 탄소 중립 기술의 도입에 따른 효과 ····· 139
〈표 3-28〉 방사형 그래프의 적용 ····· 140
〈표 3-29〉 국제협력 대상 유형의 선별 ····· 155
〈표 3-30〉 해운 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별 ····· 156
〈표 3-31〉 항만 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별 ····· 157
〈표 3-32〉 지표별 수준 구분: 국내 기술 수준(100점) ····· 158
〈표 3-33〉 지표별 수준 구분: 2030~2050 기술·시장 전망(7점) ····· 159
〈표 3-34〉 해운 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별 ····· 161
〈표 3-35〉 항만 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별 ····· 163

〈표 4-1〉 전략적 국제협력·공조 체계 구축 ····· 169
〈표 4-2〉 한-유럽 탄소중립 공동 연구개발 플랫폼 구축 ····· 171
〈표 4-3〉 주요 추진과제: 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업(2024년~) ····· 174
〈표 4-4〉 주요 추진과제: 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램(2024년~) ····· 177

그림 목차

〈그림 1-1〉 연구의 주요내용 및 수행과정 ····· 10
〈그림 1-2〉 연구전략: 국제공동연구 및 한-유럽 기술전문가 자문위원회 활용 ····· 15
〈그림 2-1〉 국내외 해양 탄소중립 과학기술 협력·정책 동향 검토 ····· 32
〈그림 2-2〉 IMO의 선박 온실가스 배출 저감 경로 ····· 33
〈그림 2-3〉 EU: 「탄소중립 산업법」(초안)의 탄소중립 전략기술 ····· 36
〈그림 2-4〉 인천항만공사 지능형 신재생에너지 통합관리시스템 대시보드 ····· 48
〈그림 2-5〉 한국형 탄소중립 100대 핵심 기술 주요 내용 ····· 52
〈그림 2-6〉 해양수산 신산업 육성전략 ····· 57
〈그림 2-7〉 EU 자금지원 주제(Heading) 및 세부 유형 ····· 61
〈그림 2-8〉 EU 자금지원 및 입찰 플랫폼(Funding & Tender platform) ····· 64
〈그림 2-9〉 EU Missions for Horizon Europe ····· 66
〈그림 2-10〉 Horizon 협력 네트워크 지도 ····· 69
〈그림 2-11〉 PIONEERS 컨셉 ····· 73
〈그림 2-12〉 Green C Ports 시범사업 ····· 77
〈그림 2-13〉 기술의 상용화 구분에 따른 감축 요구 역할 비중 ····· 79
〈그림 3-1〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석 ····· 90
〈그림 3-2〉 영국 교통부(DfT)의 해양 탄소중립 기술 유형 분류 상세 ····· 97
〈그림 3-3〉 유형별 평가결과 ····· 99
〈그림 3-4〉 유형1: 미래 에너지 연료 (Future energy carriers) ····· 103
〈그림 3-5〉 해운 부문 과학기술 분류체계 도출을 위한 다이어그램 구성 ····· 109
〈그림 3-6〉 항만 부문 과학기술 분류체계 도출을 위한 다이어그램 구성 ····· 112
〈그림 3-7〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환 ····· 122
〈그림 3-8〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선 ····· 123
〈그림 3-9〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선 ····· 125
〈그림 3-10〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환 ····· 127
〈그림 3-11〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환 ····· 128
〈그림 3-12〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환 ····· 130
〈그림 3-13〉 해운부문 탄소중립 기술 지표별 평가 결과 ····· 142
〈그림 3-14〉 해운 부문: '에너지 전환' 기술 지표별 평가 결과 ····· 144

〈그림 3-15〉 해운 부문: '에너지 효율 개선' 기술 지표별 평가 결과 ····· 145
〈그림 3-16〉 해운 부문: '전·후 처리 기술 평가' 기술 지표별 평가 결과 ····· 147
〈그림 3-17〉 항만 부문 탄소중립 기술 지표별 평가 결과 ····· 148
〈그림 3-18〉 항만 부문: '에너지 전환' 기술 지표별 평가 결과 ····· 150
〈그림 3-19〉 항만 부문: '에너지 효율 개선' 기술 지표별 평가 결과 ····· 151
〈그림 3-20〉 항만 부문: '전·후 처리 기술 지표별 평가 결과 ····· 153
〈그림 3-21〉 지표별 수준 구분: 국내 기술 수준 ····· 158
〈그림 3-22〉 지표별 수준 구분: 2030~2050 기술·시장 전망 ····· 159
〈그림 4-1〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진 네트워크(예시) ····· 174

정책 제안

▌분석 내용 및 방법

1. 한-유럽 국제 공동연구 수행

- 현재 탄소중립의 기술 및 정책 분야 전반에서 선도적인 연구개발 및 시범적용 등을 주도하고 있는 유럽의 현지 전문가 그룹과의 국제 공동 연구 수행

2. 선별된 한-유럽 전문가 그룹의 자문-검토체계 적용

- 해양 탄소중립 과학기술 분야별 주요 선행연구그룹, 유럽 및 국내 최상위 선급, 기술연구소, 주요 대학의 검증된 전문가 등을 고도의 전문성을 기준으로 선별하여,

- 연구의 전과정에서 이들의 의견을 반영하기 위한 '한-유럽 해양 탄소중립 기술전문가 자문위원회/세미나 시리즈' 구성 ·운영(분과별/종합 세미나 총 6회 운영)

3. 기술에 대한 다면 평가결과를 바탕으로, 국제협력 대상 기술 유형 식별

- ① 해양 탄소중립 기술항목/유형별 수준평가, ② 국제협력 대상 기술 식별을 위한 수요(시장성/기술적 난이도/탄소중립 기여 가능성) 및 다면적 종합분석의 국제협력 여건 평가 등을 주요 내용으로 하는 델파이(Delphi) 설문-분석 모형 설계, 수행

- ① 기술항목/유형별 기술격차 분석, ② 해양 탄소중립 관련 현안 분석, 이를 종합하여 ③ 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석 수행
- 해운·항만 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별(선도/공동/협동 기술유형 구분)
- 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진방안 도출

▌정책제안

1. 혁신기술 시장 주도를 위한 전략적 접근

- 우리의 강점 및 최상위권 기술 습득을 위한 정교한 전략 수립을 통해, 선별된 기술 선진국 또는 개도국과 기초 연구단계에서부터 다자 간 플랫폼 구축, 이를 통한 공동연구 지원 확대하는 등, **우리 주도의 다자간 국제협력 생태계 구축**

- 기술동맹 관계에 기반한 다자간 플랫폼을 토대로, 플랫폼 내 국가와 탄소중립 과학기술 개발 및 상용화 등을 위한 **글로벌 가치사슬 구축, 시장/수요 창출, 확대 등을 위한 프로그램 개발**

2. 연구개발 국제협력 주도·지원을 위한 재원 마련

- 해운·항만 부문의 탄소중립 신규·유망기술 분야에 대한 다각적 지원 확대, 기술 수준 최상위권 선도국 및 유력 연구기관과의 기술동맹 관계 구축이 필수적; **선행적으로 국제협력 R&D에 대한 투자 규모의 확대** 필요

- 국제공동연구, 인력 교류, 글로벌 다자협력 프로젝트 참여 촉진 등의 다양한 지원 목적별 투자, 선별된 핵심기술 및 틈새·연계기술의 선택과 집중, 조기 실증, 상용화 및 시장 수요 연계 등 연구단계별 실효적 투자 방안 모색; 해**양수산부 또는 기술 수요에 따른 범부처 통합 개념의 구체적인 시행전략이나 투자 방향에 대한 본격 논의** 필요

▌정책·사업화 방안

1. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업

① 국제협력 대상국가/연구그룹 및 대상 기술 및 주제 선별을 위한 국내외 기술 수준평가 및 모니터링·분석사업을 지속적으로 수행하고 이를 바탕으로 연구 대상 및 주제, 파트너 등을 구체화

② 해운/항만, 또는 화학·엔진 정도의 엔지니어링 및 ICT 및 최적화 솔루션 기술 등 고유의 영역에서 국내의 해당 기술 유형을 주도할 수 있는 **기술 영역별 거점 연구기관 및 대학/민간 컨소시엄 형태의 '국제협력 추진 네트워크(안)'을 지정**하여 구성

- 국내 거점을 기반으로 특정 주제별 '개방형 혁신' 또는 새로운 융복합 아이디어를 구성하는 한편, 이를 바탕으로 적합한 해외 유력기관과의 역할 분담에 따른 '개방형 혁신' 도모

〈요약 그림-1〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진 네트워크(예시)



해양수산부 독자 추진체계 (예시)



범부처 추진체계 (예시)

자료: 저자 작성

〈요약 표-1〉 주요 추진과제: 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업(2024년~)

추진 사항	추진 주체
• 해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 전략방안 마련 ※「해양 탄소중립 과학기술 전략」에 국제 협력 추진 및 지원 조항 마련 - 국제협력 대상국가/연구그룹 및 대상 기술 및 주제 선별을 위한 국내외 기술 수준평가 및 모니터링·분석 - 선별된 대상 및 주제의 추진을 위한 우선순위 식별 - 국제협력 전략 로드맵에 따른 시간표에 따라서, 개별 연구개발 협력사업 추진, 재정적 지원	해양수산부 국제협력총괄과, 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등
• 해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 파트너, 대상 기술,주제 선별, 우선순위 식별 - 평가지표①: 우리 기술 수준의 평가 - 평가지표②: 2030년 전후~2050년까지의 시장성 - 평가지표③: 도입에 따른 탄소중립 기여효과 - 평가지표④: 2030년 전후까지 요구 사항 충족 또는 상용화 가능성을 판단할 수 있는 기술적 난이도 - 국제협력 대상 기술 유형의 선별 체계 적용: ① 선도기술, ② 공동기술, ③ 협동기술	해양수산부 국제협력총괄과, 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등
• 해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 지원을 위한 재정 확보방안 마련 ※「해양 탄소중립 과학기술 전략」에 해운·항만 탄소중립 핵심기술 개발·지원을 위한 '해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램' 및 재정 확보방안 마련 → 제도적 근거에 따른 '해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 지원' 목적의 재원 개발, 체계적 재정 지원,활용방안 구체화	해양수산부 국제협력총괄과, 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등

추진 사항	추진 주체
• 기술 영역별 거점 연구기관 및 대학/민간 컨소시엄 형태의 '국제협력 추진 네트워크(안)' 구성, 지정	해양수산부 독자 추진체계 (1안) – 해양수산부 해양환경정책과 등
	범부처 추진체계 (2안) – 해양수산부 해양환경정책과/해양수산과학기술진흥원 – 산업자원통상부/한국산업기술진흥원 등 – 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 등

자료: 저자 작성

2. 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램

- 마련된 기술전략에 따라서 **'선택과 집중'을 위한 우선적 연구개발 대상 기술유형 및 항목, 주제를 선별하고, 선별된 미래 기술의 신속 개발 및 도입을 총괄적으로 지원**하기 위한 프로그램

- 해양수산부 또는 유관부처와의 범부처 산하에 심사위원회를 구성하여 심사절차 및 기준을 정하고, 이에 따라서 지원 대상 및 규모, 기간 등을 결정하는 '별도의 R&D 트랙' 전개

〈요약 표-2〉 주요 추진과제: 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램(2024년~)

추진 사항	추진 주체
• '해운·항만 탄소중립 구현을 위한 선도기술 연구개발 프로그램' 개발·도입 + 해운· 항만 탄소중립 구현 위한 우선적 연구개발 대상 기술유형 및 항목, 주제 선별 + 선별된 미래 기술의 신속 개발 및 도입 총괄 지원 → 동전략의 '해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업'에 연계, 일원화	해양수산부 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등

자료: 저자 작성

요 약

해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 조사·분석
– 해운·항만 부문

안용성 · 김경신 · 김주형 · 이상혁 · 이혜령
정병욱 · 김형주 · 염구섭 · 하승만 · 박치병 · 장하영 · 김중원 · 황인식 · 최수원

1. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성

1) 해양 탄소중립 과학기술 관련 현행 정책 패러다임의 한계

▪ 장기적 목표 달성을 위한 미래기술의 불확실성

- 전 지구적인 목표 수준과 시한이 정해진 반면, 이를 현실화하는 문제는 현재 기술 패러다임에서 불가능에 가까운 것으로 평가
- 하지만, 현재 우리 탄소중립 기술 관련 정책의 패러다임은 2050년이 아닌 2030년을 목표 달성 시한으로, 이미 시장에서 어느 정도 경제성이 확보·검증된 태양광 및 풍력 등의 재생에너지, 배터리 기술 기반의 전기화, 그리고 에너지 효율 개선 기술 위주의 시나리오를 설정
- 탄소중립 이행 트랙에서 성공 여부를 결정하게 될 2030년 이후의 새로운 기술 패러다임에 대한 적극적인 논의가 시급한 현시점에서, 가장 중요한 결정요인인 '기술' 또는 '혁신기술' 자체에 대한 별도의 정책적 접근, 이에 따른 전략적 방안의 개발·구체화 작업 미비

▪ **해양 탄소중립 과학기술 국제협력의 제약 요인**

- 전략적 접근을 위한 해양 탄소중립 과학기술 관련 기초자료 미비

• 최근 우리 정부의 정책방향은 2050년 탄소중립 달성 과정의 본질적 문제점, 즉 탄소중립 구현을 위한 '혁신기술'의 불확실성, 이로 인한 정책과정과 현실의 기술·시장 간의 괴리를 최소화하기 위한 전략적 접근의 맥락

• 이러한 전략적 접근, 특히 관련 국제협력을 강화하는 방향성에도 불구하고, 구체적인 시행전략이나 투자 방향 등에 대한 본격 논의는 미흡

• 이는 구체적 추진방안 논의의 근거가 될 만한 기초자료, 즉 혁신/핵심기술 후보군에 대한 유효성 검토, 이들 기술 분야별 우리 기술의 역량 수준, 성장 가능성 및 중장기적 시장 전망 등에 대한 분석 등이 미비하기 때문

- 기술 선도국 중심의 배타적 무역장벽 및 기술동맹 강화

• 주요 국가들은 2030년 이후 전개될 미래 탄소중립 관련 핵심기술 및 관련 산업의 시장 환경에서 이를 '기술주권' 개념의 경제·안보 차원의 국가 생존의 문제로 인식하고 있으며, 이에 따라서 심화되는 무한 경쟁에 대한 전략적 방안으로 무역장벽 및 기술동맹 등을 강화하고 있는 추세

• 최근 국제적인 보호무역주의와 기후변화 대응 및 환경의 지속가능성에 대한 규제 강화 추세가 점차 연계; 이에 따라 미래기술 발전을 선도하고 있는 주요 국가들은 새로운 탄소중립 기술 시장을 선점하기 위해, 주로 선도국 간 과학기술 국제협력 등 다양한 국제협력 수단을 적극 활용 중

2) 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성

▪ **미래 혁신기술 시장 개편에 따른, 기술 역량 제고를 위한 전략적 접근**

- '국제협력'은 현시점 우리에게 있어 앞서 제시한 불확실성을 최소화하는 동시에, 미래 시장의 대부분을 차지하게 될 혁신적 핵심기술의 결정과정에

주도적으로 참여하거나 이로 인해 촉발되는 시장에서 선도적인 위치를 점할 수 있는 매우 유효한 전략적 접근방안

- 국제적으로 공동 활용이 가능한 특허 및 표준, 또는 플랫폼 등을 구성하여 글로벌 가치사슬(Global value-chain)을 구축하는 효과가 있어, 기후변화나 COVID-19와 같이 전 지구적으로 발생하는 문제에 공동 대응하기 위한 기제로 그 중요성이 더욱 부각

▪ **탄소중립 기술 선도국 간 기술동맹 추세에, 선제적으로 대응**

- 최근 선진국들을 중심으로 탄소중립 달성을 위한 무역기술장벽(TBT) 등을 도입하여 보호무역주의를 강화하려는 시도가 본격화되고 있으며, 동시에 국가 안보 차원으로 진화한 '기술주권(Technology Sovereignty)'의 확보 경쟁 치열
- 이미 최상위권을 가까운 거리에서 추격하고 있는 우리의 기술 역량 및 인프라 지원 등을 강화함으로써 내재적 역량의 획기적 성장을 도모하는 한편, 국내외 국제협력 지원 프로그램 등을 적극적으로 활용·연계하여 혁신적인 공동 연구개발 협력을 위한 다자주의적 협력관계를 적극적으로 발굴·구축 필요

2. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석

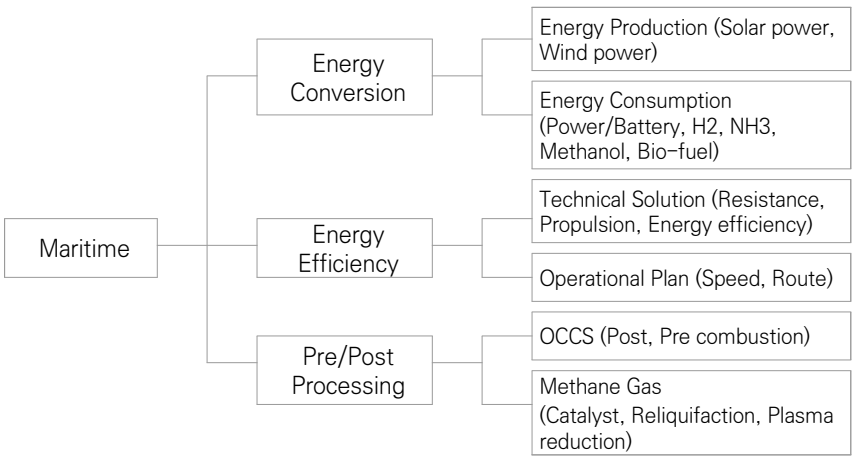
1) 설문·분석모형의 구성

- 연구진은 전문가 그룹의 기술 수준 및 현안 평가작업에 앞서, 해운 부문과 항만 부문의 탄소중립 구현을 위한 과학기술 중 2030년-2050년 기술발전 시나리오 상 유력 기술항목을 선별하고, 이들을 유형화, 계층화함으로써, 평가 대상 기술항목 및 평가지표를 구체화

(1) 해양 탄소중립 과학기술의 유형 분류: 해운 부문

- 해운 부문 즉, 선박의 탄소중립 구현을 위한 과학기술은 '전과정평가(LCA)' 또는 'Well-to-wake(WTW)' 개념을 반영하여, 선박의 운용과정에서 '에너지의 생산-사용-배출'의 흐름에 따라서 단계별로 요구되는 기술 유형 및 기술항목을 선별

〈그림 3-1〉 해운 부문 과학기술 분류체계 도출을 위한 다이어그램 구성



〈표 3-1〉 해운 부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) 상세

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	태양열 집열기 (Solar thermal collector)	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	공기 윤활 (Air lubrication)	이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	용매 (Solvents)
		태양광 판넬 (Solar panel)		추진 효율 향상	선미 덕트 (Stern ducts)			맴브레인 (Membranes)
	풍력	윈드 터빈 (Wind turbine)			웨이크 이퀄라이징 덕트 (Wake equalizing ducts)			고체 흡착제 (Solid sorbents)

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
에너지 소비 (대체 연료)	전력/ 배터리	배터리 (Battery)			스웰 전 덕트 (Pre-swirl ducts)			극 저온 (Cryogenic)
		캐패시터/콘덴서 (Capacitor)			스웰 전 스테이터 (Pre-swirl stators)		연소 후 과정 (Pre-combustion)	연소 후 카본 포집 시스템 (Pre-combustion carbon capture system)
	수소	연료 전지 (Fuel cell) (PEMFC/HT-PEMFC/SOFC/MCFC/AFC)			소용돌이 발생 핀 (Vortex generator fins)			산소 연료 연소 (Oxyfuel combustion)
		내연 기관 (Internal combustion engine)			프로펠러 보스 캡 핀 (Propeller boss cap fins)	메탄가스	배기 가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	메탄산화촉매 (Methane oxidation catalyst)
	암모니아	연료 전지 (Fuel cell) (SOFC/AMFC)			플레트너 로터 (Flettner rotor)		환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	예) 퓨어쿨 (PureCool)
		내연 기관 (Internal combustion engine)			견인 연 (Towing kite)		플라즈마 감소 (Plasma reduction)	
	메탄올	연료 전지 (Fuel cell) (HT-PEMFC/SOFC/MCFC/DMMFC)			윙 세일 (Wing sail)			
		내연 기관 (Internal combustion engine)			소프트 돛 (Soft sail)			
	바이오 연료	연료전지 (Fuel cell) (SOFC/MCFC)		에너지 효율 향상	본선 디시 그리드 시스템 (Onboard DC grid system)			

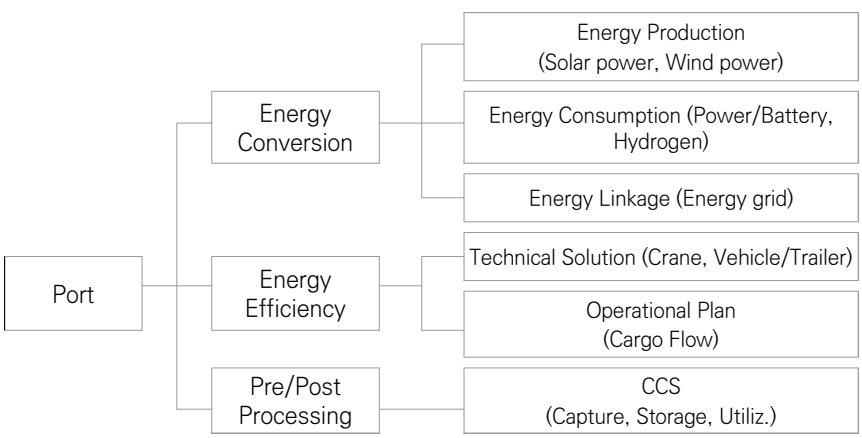
에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
		내연 기관 (Internal combustion engine)	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	최적화 기술 (Optimisation technology) (AI/Big data)			
				최적 항로	최적화 기술 (Optimisation technology) (AI/ Big data)			

자료: 저자 작성

(2) 해양 탄소중립 과학기술의 유형 분류: 항만 부문

- 항만 부문의 탄소중립 구현을 위한 과학기술 역시. 해운 부문의 기술 유형 분류에서와 같이 항만 내 '에너지의 생산-사용-배출'의 흐름에 따라서 단계별로 요구되는 기술 유형 및 기술항목을 선별

〈그림 3-2〉 항만 부문 과학기술 분류체계 도출을 위한 다이어그램 구성



〈표 3-2〉 항만 부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) 상세

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
에너지 생산 (대체에너지 원)	태양광	광전지 태양광 패널 (Photovoltaic (PV) solar panels)	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	자동화 크레인 (Automated cranes)	탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	아민 스크러빙 (Amine scrubbing)
		집중된 태양광 발전 (Concentrating solar power (CSP))			하이브리드 크레인 (Hybrid cranes)			아민 스크러빙 (Amine scrubbing)
		태양 열 (Solar thermal)			텔레스코픽 집 크레인 (Telescopic jib crane)			멤브레인 분리 (Memberanes separation)
		수동적 태양열 이득 (Passive solar gain)			크레인 전동화 (Crane electrification)			극저온 분리 (Cryogenic distillation)
		부유식 태양광 발전 (Floating photovoltaics)		차량/트레일러 효율 개선	자동 트레일러 (Automated trailers)			직접 공기 포집 (Direct air capture (DAC))
	풍력	육상 윈드터빈 (Onshore wind turbines)			트레일러 전동화 (Trailer electrification)		저장 (Storage)	고갈된 석유 및 가스 저장소 (Depleted oil and gas reservoirs)
		해상 윈드터빈 (Offshore wind turbines)	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	AI			식염수 대수층 (Saline aquifers)
에너지 연계	에너지	스마트			빅 데이터			현무암 형성

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
	그리드 (분산전원 기술 항만)	그리드 (Smart grids)			(Big data)			(Basalt formations)
		마이크로 그리드 (Micro girds)			IOT			해양 저장 (Ocean storage)
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	리튬 이온 배터리 (Lithium-ion batteries)					활용 (Utilization)	향상된 오일 회수 (Enhanced oil recovery (EOR))
		소디움 이온 배터리 (Sodium-ion batteries)						탄소 광물화 (Carbon mineralization)
		플로우 배터리 (Flow batteries)						합성 연료 생산 (Production of synthetic fuels)
	수소	PEMFC						플라스틱 생산 (Production of plastics)
		SOFC						
		AFC						

자료: 저자 작성

(3) 설문·분석의 수행

▪ **설문조사 수행**

- 기술 유형별 국내외 전문가 그룹을 대상으로, 2023년 7월 하순~8월 중순까지 약 3주간 이메일 응답 방식으로 실시
- 국내 전문가 21명, 해외(유럽) 24명으로, 총 45명 전문가의 응답을 수집하고, 오류가 있는 경우 재응답하는 방식으로 유효 응답 확보

▪ **결과 분석**

- 기술 수준평가: 해운·항만 부문 각각의 기술 유형 및 항목별로 100점 척도를 활용하여, 국내 기술과 해외 기술의 격차를 평가
- 유형별 국제협력 전략 도출을 위한 국제 동향(시장 점유율), 기술적 난이도 및 탄소중립 기여 가능성 항목에서는 7점 척도를 활용; 구해진 점수의 평균과 각 영역별 세부항목의 7점 평균의 평균값을 활용하여 각 영역별 세부항목의 중요도를 평가
- 유형별·기술항목별 중요도를 평가함에 있어 예측 평가 시점을 '현재~2030년' 및 '2030~2050년'으로 구분하여, 시점 격차에 따른 시사점 반영

〈표 3-3〉 설문 분석 수행 과정

설문주제·항목 도출	→	분야별 전문가 세미나	→	설문 문항 보완 및 확정	→	설문조사 수행	→	결과 분석
① 기술격차 ② 수요평가 (시장성/기술적 난이도/탄소중립 기여 가능성)		• 항만·해운 부문 분류체계 구성(대/중/소 유형 분류) • 소분류별 개별 기술항목 확정		• 설문 구조 및 구성 요소, 항목, 방식 확정 • 설문 대상자 확보		• 국내/해외 전문가 • 학·연계그룹/이해관계그룹		• 국내 개발 및 국제 협력이 가장 시급한 기술분야 도출

자료: 저자 작성

2) 기술유형·항목별 기술격차 분석

(1) 해운 부문

〈표 3-4〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	59.8	64.3	55.2	4	8	0	21	8
	풍력	58.3	59.5	57.1	4	1	3	33	4
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	66.7	67.1	66.2	2	10	0	26	2
	수소	60.6	61.7	59.6	3	7	9	21	2
	암모니아	59.5	58.6	60.5	4	5	7	24	0
	메탄올	60.2	61.4	58.9	5	2	3	29	2
	바이오연료	57.3	61.0	53.6	3	10	2	23	2
기술 종합		60.3	61.9	58.7	25	43	24	177	20

자료: 저자 작성

〈표 3-5〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	82.6	89.5	75.7	19	3	7	15	0
	추진 효율 향상	83.8	89.5	78.1	17	1	4	21	0
	에너지 효율 향상	82.9	89.0	76.7	17	1	3	20	0
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	80.6	86.7	74.5	12	3	4	25	0
	최적항로	78.7	83.6	73.8	8	2	5	29	0
기술 종합		81.7	87.7	75.8	73	10	23	110	0

자료: 저자 작성

〈표 3-6〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 전·후 처리

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	66.1	68.6	63.6	4	6	4	26	0
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	58.2	58.3	58.2	2	6	6	23	0
메탄가스	배기 가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	67.7	70.8	64.7	4	6	0	26	0
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	69.4	73.3	65.6	7	6	1	23	0
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	60.1	64.0	56.1	17	24	11	98	0
기술 종합		64.3	67.0	61.64	34	48	22	196	0

자료: 저자 작성

(2) 항만 부문

〈표 3-7〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 생산	태양광	63.6	65.0	62.1	1	15	1	15	8
	풍력	56.8	57.3	56.4	0	1	4	34	2
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원)	62.6	63.9	61.3	4	9	2	24	0
에너지 소비	전력/배터리	69.1	69.0	69.2	5	10	3	13	4
	수소	57.2	56.0	58.5	1	4	7	20	3
기술 종합		61.9	62.2	61.5	11	39	17	106	17

자료: 저자 작성

〈표 3-8〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	74.5	73.3	75.8	4	10	3	18	1
	차량/트레일러 효율 개선	75.0	72.3	77.8	4	12	2	16	1
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	72.8	69.0	76.5	4	7	2	21	0
기술 종합		74.1	71.5	76.7	12	29	7	55	22

자료: 저자 작성

〈표 3-9〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 전·후 처리

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	56.4	57.0	55.7	1	12	2	23	1
	저장 (Storage)	53.2	54.0	52.5	1	11	2	22	1
	활용 (Utilization)	50.3	54.5	46.2	0	9	3	25	1
기술 종합		53.3	55.2	51.5	2	32	7	70	3

자료: 저자 작성

3) 해양 탄소중립 관련 현안 및 기술 수요 분석

- 본연구에서 선별한 해운·항만 부문 탄소중립 과학기술 및 유형별 분류체계를 바탕으로, 분야별 전문가들이 판단하는 미래 기술 시나리오 상 이들의 ① 향후 시장성, ② 기술적 난이도, ③ 탄소중립에 기여도, 총 3개 지표별 평가를 수행

(1) 해운 부문

〈표 3-10〉 해운 탄소 중립 기술의 시장 도입/적용 가능성

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내전문가	해외전문가	평균	국내전문가	해외전문가
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	3.3	3.8	2.9	4.1	4.4	3.8
	풍력	3.4	3.4	3.4	4.6	4.4	4.7
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	4.2	4.2	4.1	5.4	5.4	5.4
	수소	3.6	3.8	3.4	6.1	6.5	5.8
	암모니아	4.2	4.3	4.2	6	6.3	5.8
	메탄올	4.8	5.2	4.4	5.6	5.7	5.4
	바이오연료	4.4	5.1	3.8	5.1	5.6	4.7
기술 종합		4	4.2	3.7	5.3	5.5	5.1
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내전문가	해외전문가	평균	국내전문가	해외전문가
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	4.9	5.1	4.8	5.3	5.1	5.6
	추진 효율 개선	5	5.1	4.9	5.4	5.3	5.6
	에너지 효율 개선	5	5.3	4.7	5.8	5.7	5.8
운영적 방안	선박 속도 최적화	5.1	5.2	5	5.5	5.6	5.5
	최적 항로	5	5.2	4.9	5.5	5.6	5.4
기술 종합		5	5.2	4.8	5.5	5.5	5.6
전·후 처리		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내전문가	해외전문가	평균	국내전문가	해외전문가
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	3.6	4	3.2	5.1	5.3	4.8
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	3	3.6	2.4	4.5	4.9	4.2
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	3.4	4.2	2.5	4.5	5	4
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	3.3	4.2	2.5	4.2	4.8	3.7
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	2.8	3.5	2.1	4	4.4	3.6
기술 종합		3.2	3.9	2.5	4.5	4.9	4.1

자료: 저자 작성

〈표 3-11〉 해운 분야 에너지 전환 기술의 기술적 난이도 설문 결과

에너지 전환		기술적 난이도		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	3.7	3.5	3.9
	풍력	4	3.9	4.1
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	4.5	4.8	4.2
	수소	6.1	6.3	6
	암모니아	5.7	5.7	5.7
	메탄올	4.5	4.6	4.3
	바이오연료	4	4.4	3.5
기술 종합		4.6	4.7	4.5
에너지 효율 개선		**기술적 난이도**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	3.9	3.9	3.9
	추진 효율 개선	3.9	4	3.9
	에너지 효율 개선	4	4.1	3.9
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	3.5	3.8	3.2
	최적 항로	3.6	3.9	3.3
기술 종합		3.8	3.9	3.6
전·후 처리		**기술적 난이도**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	5.4	5.7	5.1
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	5.6	6	5.2
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	5.1	5.2	5
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	5.1	5	5.2
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	5.4	5.4	5.3
기술 종합		5.3	5.5	5.2

자료: 저자 작성

〈표 3-12〉 해운 분야 에너지 전환 기술의 도입에 따른 효과

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	3.4	3.9	2.9	4.1	4.3	4
	풍력	3.5	4.1	3	4.6	4.8	4.5
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	4.1	4.7	3.5	5.3	5.3	5.3
	수소	4.1	5	3.3	6.2	6.8	5.6
	암모니아	4.4	5.3	3.5	6.2	6.5	6
	메탄올	4.5	5.2	3.7	5.5	6	5.1
	바이오연료	4.4	5	3.7	5.1	5.7	4.4
기술 종합		4.1	4.7	3.4	5.3	5.6	5
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	4.3	4.4	4.2	4.6	4.4	4.9
	추진 효율 개선	4.3	4.5	4.1	4.8	4.7	4.9
	에너지 효율 개선	4.3	4.6	4	4.8	5	4.7
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	4.5	4.8	4.3	4.8	4.9	4.8
	최적항로	4.3	4.5	4.2	4.8	4.8	4.8
기술 종합		4.3	4.6	4.1	4.8	4.7	4.8
전후처리		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
이산화 탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	3.9	4.8	3.1	5	5.6	4.5
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	3.5	4.5	2.6	4.6	5.2	4
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	3.6	4.4	2.7	4.5	5.1	3.8

	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	3.5	4.6	2.5	4.4	4.9	3.9
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	3.3	4.3	2.3	4.4	4.8	3.9
기술 종합		3.6	4.5	2.6	4.6	5.1	4

자료: 저자 작성

(2) 항만 부문

〈표 3-13〉 항만 탄소 중립 기술의 시장 도입/적용 가능성

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산	태양광	4.4	4.4	4.4	5.3	4.9	5.7
	풍력	4.2	3.8	4.6	5.5	5.1	5.8
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)	4.5	4.6	4.5	5.9	6	5.8
에너지 소비	전력/배터리	4.7	4.7	4.7	6	5.8	6.3
	수소	3.5	3.5	3.5	5.7	5.8	5.5
기술 종합		4.3	4.2	4.3	5.7	5.5	5.8
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	4.5	4.7	4.3	5.2	5.3	5.2
	차량/트레일러 효율 개선	4.6	4.8	4.4	5.4	5.3	5.5
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	4.8	4.9	4.7	5.9	5.9	5.9
기술 종합		4.6	4.8	4.4	5.5	5.5	5.5

전·후 처리		현재 ~ 2030년			2030– 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	3	3.2	2.8	5	4.8	5.1
	저장 (Storage)	3.1	3.2	2.9	5.1	4.8	5.4
	활용 (Utilization)	2.6	3	2.3	4.9	4.7	5.1
기술 종합		2.9	3.1	2.7	5	4.7	5.2

자료: 저자 작성

〈표 3-14〉 항만 탄소 중립 기술의 항목별 상용화의 기술적 난이도

에너지 전환		기술적 난이도		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산	태양광	3.6	3.6	3.6
	풍력	4	4.2	3.8
에너지 연계	에너지그리드(분산전원기술 항만)	4.2	4.4	4
에너지 소비	전력/배터리	4.2	4.4	3.9
	수소	5.8	5.8	5.7
기술 종합		4.3	4.5	4.2
에너지 효율 개선		**기술적 난이도**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	3.2	3.2	3.1
	차량/트레일러 효율 개선	3.2	3.3	3.1
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	4.1	4.3	3.8
기술 종합		3.5	3.6	3.3
전·후 처리		**기술적 난이도**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	5.5	5.7	5.3
	저장 (Storage)	5.3	5.4	5.3
	활용 (Utilization)	5.7	5.7	5.6
기술 종합		5.5	5.6	5.4

자료: 저자 작성

〈표 3-15〉 항만 탄소 중립 기술의 도입에 따른 효과

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산	태양광	4	4.6	3.4	5	5.1	4.9
	풍력	3.8	4	3.7	5	4.8	5.2
에너지 연계	에너지그리드 (분산 전원)	4.4	4.5	4.3	5.4	5.2	5.7
에너지 소비	전력/배터리	4.6	4.9	4.3	5.5	5.6	5.5
	수소	3.9	4.7	3.1	5.9	6.4	5.3
기술 종합		4.1	4.5	3.8	5.4	5.4	5.3
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	3.8	4.1	3.5	4.3	4.5	4.2
	차량/트레일러 효율 개선	4.0	4.2	3.8	4.5	4.5	4.4
운영적 방안	화물흐름 개선 (스마트 항만)	4.4	4.5	4.4	5.1	5.2	5.1
기술 종합		4.1	4.3	3.9	4.6	4.7	4.6
전·후 처리		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	3.7	4.3	3.1	5.1	5.3	4.9
	저장 (Storage)	3.7	4.2	3.2	4.9	5.2	4.7
	활용 (Utilization)	3.5	4.3	2.8	5.1	5.4	4.8
기술 종합		3.6	4.2	3	5	5.3	4.8

자료: 저자 작성

4) 국제협력 대상 기술항목의 식별

▪ 국제협력 대상 유형의 구분

- 연구진은 과학기술 국제협력을 위한 전략적인 접근의 일환으로, 국제협력 대상 기술유형을 다음과 같이 '선도기술', '공동기술', '협동기술' 총 3가지로 구분하여 정의

〈표 3-16〉 국제협력 대상 유형의 선별

구 분	내 용
선 도	• 이미 기술 수준이 최상위권으로, 추후 연구개발을 통해 '초격차' 확보 필요 • 2030년 전후 시장 규모, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형
공 동	• 선도국가의 기술 수준에 근접하거나, 빠른 속도로 근접하고 있는 기술 유형 • 2030년 전후 시장 규모, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형
협 동	• 2030년 전후 시장 규모가 커지거나, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형임에도, 아직 전세계 기술 성숙도가 기술 개반 초반으로 파악되는 경우

자료: 저자 작성

▪ 국제협력 대상 기술항목의 식별

〈표 3-17〉 해운 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별

에너지 전환		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
에너지 생산 (대체에너지원)	태양광	59.8	4.1	3.7	4.1		
	풍력	58.3	4.6	4.0	4.6		
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	66.7	5.4	4.5	5.3	공동	
	수소	60.6	6.1	6.1	6.2	공동	시급
	암모니아	59.5	6.0	5.7	6.2	협동	시급
	메탄올	60.2	5.6	4.5	5.5	공동	
	바이오연료	57.3	5.1	4.0	5.1	협동	시급
종 합		60.3	5.3	4.6	5.3	-	-

에너지 효율 개선		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	82.6	5.3	3.9	4.6	공동	
	추진 효율 개선	83.8	5.4	3.9	4.8	공동	
	에너지 효율 개선	82.9	5.8	4.0	4.8	공동	
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	80.6	5.5	3.5	4.8	공동	
	최적항로	78.7	5.5	3.6	4.8	공동	
종 합		81.7	5.5	3.8	4.8	-	-
전·후 처리		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정	66.1	5.1	5.4	5.0	공동	
	연소 후 과정	58.2	4.5	5.6	4.6	협동	
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매	67.7	4.5	5.1	4.5	공동	
	환기 시 재액화	69.4	4.2	5.1	4.4	공동	
	플라즈마 감소	60.1	4.0	5.4	4.4		
종 합		64.3	4.5	5.3	4.6	-	-

자료: 저자 작성

〈표 3-18〉 항만 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별

에너지 전환		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
에너지 생산	태양광	63.6	5.3	3.6	5.0		
	풍력	56.8	5.5	4.0	5.0		
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원)	62.6	5.9	4.2	5.4	공동	시급
에너지 소비	전력/배터리	69.1	6.0	4.2	5.5	공동	시급
	수소	57.2	5.7	5.8	5.9	협동	시급
종 합		61.9	5.7	4.3	5.4	-	-

에너지 효율 개선		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	74.5	5.2	3.2	4.3		시급
	차량/트레일러 효율 개선	75.0	5.4	3.2	4.5		시급
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	72.8	5.9	4.1	5.1	공동	시급
종 합		74.1	5.5	3.5	4.6	-	-
전·후 처리		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**	**협력 구분**	**연구개발 시급성**
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집	56.4	5.0	5.5	5.1	협동	시급
	저장	53.2	5.1	5.3	4.9	협동	시급
	활용	50.3	4.9	5.7	5.1	협동	
종 합		53.3	5.0	5.5	5.0	-	-

자료: 저자 작성

EXECUTIVE SUMMARY

Analysis on International Cooperation Conditions for Marine Carbon-Neutral Science and Technology
: Shipping and Port Sector

YongSung Ahn, Juhyung Kim, Kyungshin Kim, Sanghyeok Lee, Hye ryeong Lee,
Byongug Jeong, Hyungju Kim, Koosup Yum, Seungman Ha, Chyby ung Park, Hayoung Jang, Joongwon Kim, Insik Hwang, Suwon Choi

1. Necessity for international cooperation plans in marine carbon-neutral science and technology

1) Limitations of the existing policy paradigm for marine carbon-neutral science and technology

- Uncertainty of future technologies in achieving long-term objectives
  - Despite global targets and deadlines for marine carbon-neutral initiatives already having been established, the feasibility of achieving these objectives under the current technological paradigm is examined as nearly unattainable.

- However, Korea's current policy paradigm for carbon-neural technology is aimed at meeting its goals by 2030, rather than 2050. Based on this schedule, a number of scenarios have been developed focusing on renewable energy such as solar and wind power, which have secured and validated economic feasibility in the market, battery technology-based electrification and energy efficiency improvement technology.
- The current period requires urgent and active discussions about a new technological paradigm post-2030, a crucial timeline that will dictate the success of carbon neutrality track. However, there is a lack of policy approach specifically addressing the key determinant - 'technology' or 'innovative technology' – a notable absence of efforts to develop and detail a strategic plan in this regard.

▪ Constraints on international cooperation in marine carbon-neutral science and technology

- Lack of fundamental data regarding marine carbon-neutral science and technology for strategic approach

• The latest policy direction of the Korean government is focused on a strategic approach for minimizing the gap between policy process and actual technology as well as the market. Such gap stems from inherent problems in the process of achieving carbon neutrality in 2050, specifically the uncertainties associated with 'innovative technology' crucial for carbon neutrality.

• Despite this strategic approach, particularly the direction to strengthen relevant international cooperation, earnest discussions on concrete implementation strategies and investment directions

have been insufficient.

- This is attributable to the lack of fundamental data on which to buttress the discussion of specific plans, i.e., validation of innovative and core technology candidates, analysis of the level of competencies of domestic technologies, growth potential as well as mid-to long-term market outlook, etc.

– Strengthening exclusive trade barriers and technology alliances driven by technology-leading nations

- In the market environment surrounding core technologies and industries related to carbon neutrality post-2030, major countries are acknowledging this as a matter of national survival in the context of economy and security as the concept of 'technological sovereignty'. Consequently, these nations are strategically enhancing trade barriers and forming technology alliances as a response to the escalating boundless competition in this domain.
- Recent trends in international protectionism and strengthened regulation of climate change response and environmental sustainability are increasingly aligned. In this context, major countries leading the development of future technologies are actively leveraging various forms of international cooperation, mainly targeting scientific and technological international cooperation between leading countries, to dominate new markets in advance for carbon-neutral technologies.

2) Necessity for international cooperation plans in marine carbon-neutral science and technology

- Strategic approach to improve technological capabilities following the restructuring of the future innovative technology market

- 'International cooperation' is a significantly valid strategic approach for us at the moment: it minimizes the uncertainties suggested above, while simultaneously providing an opportunity for us to be involved in the decision-making processes of innovative core technologies. These technologies are expected to dominate future markets, and through such collaborations, we can position ourselves to take a leading role in the markets they will trigger.
- It has the effect of creating a global value chain by organizing patents, standards, or platforms that can be jointly utilized globally, highlighting its importance even more as a mechanism for jointly responding to global issues such as climate change and COVID-19.

- Preemptively responding to the trend of forming technology alliances between carbon-neutral technology leading nations

- As of recent, leading nations have been actively pursuing measures to strengthen protectionism through the introduction of technical barriers to trade (TBT) as part of their efforts to achieve carbon neutrality. Simultaneously, there is intense competition to secure 'technology sovereignty', a concept that

has escalated to the level of national security.

- It is essential to further enhance our already advanced technological competencies and infrastructure support. Concurrently, we should proactively seek and establish multilateral partnerships focused on innovative joint research and development collaborations. This can be achieved by effectively utilizing and connecting various domestic and international cooperation support programs.

2. Analysis of international cooperation conditions for marine carbon-neutral science and technology

1) Construction of surveys and analysis models

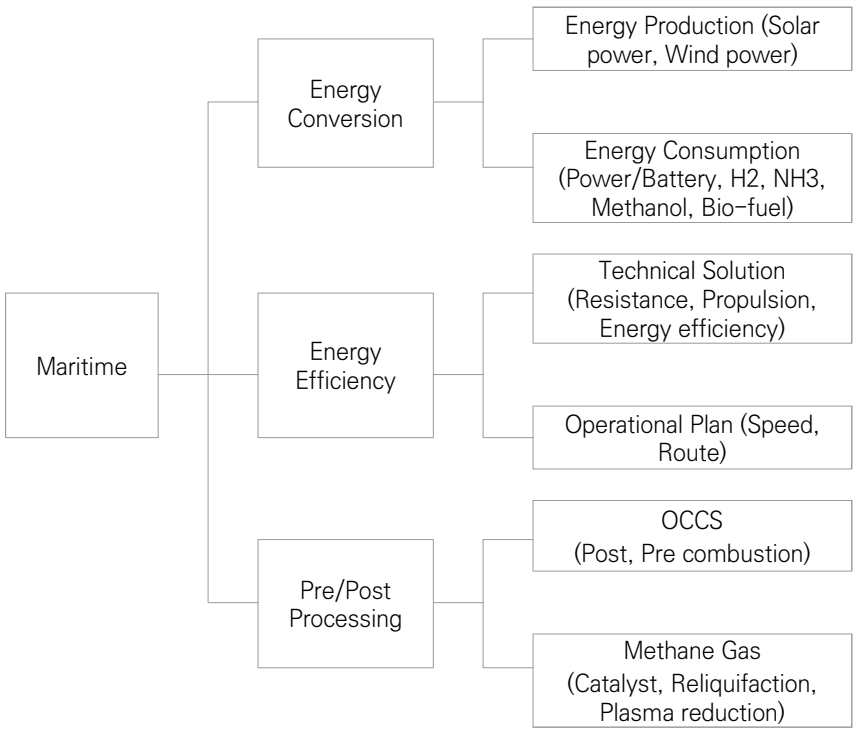
- Prior to the expert group's assessment of technology levels and pending issues, the researchers selected the most promising technologies for achieving carbon neutrality in the shipping and port sectors under the 2030-2050 technology development scenario, categorized and hierarchized them, in order to specify technology items and assessment items targeted for the assessment.

(1) Classification of types of marine carbon-neutral science and technology: Shipping sector

- In the shipping sector, technology for the carbon neutrality of ships reflects the concept of 'life cycle assessment (LCA)' and

'well-to-wake (WTW)', and selects the types of technologies and technology items required in stages in accordance with the flow of 'production, use, and emission of energy' in the operational process of ships.

〈Pic 3-1〉 Diagram to derive a science and technology classification system in the shipping sector



〈Table 3-1〉 Detailed classification of carbon-neutral technologies (Classification system) in the shipping sector

Energy conversion			Energy efficiency improvement			Pre/Post Processing		
Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology
Energy production (Alternative energy sources)	Solar power	Solar thermal collector	Technical solution (Ship equipment)	Resistance mitigation	Air lubrication	Carbon dioxide (OCCS)	Pre-combustion	Solvents
		Solar panel		Propulsion efficiency improvement	Stern ducts			Membranes
	Wind power	Wind turbine			Wake equalizing ducts			Solid sorbents
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/ Battery	Battery			Pre-swirl ducts			Cryogenic
		Capacitor			Pre-swirl stators		Post combustion	Post combustion carbon capture system
	Hydrogen	Fuel cell (PEMFC/HT-PEMFC /SOFC/MCFC/AFC)			Vortex generator fins			Oxyfuel combustion
		Internal combustion engine			Propeller boss cap fins	Methane gas	Methane catalysts in exhaust	Methane oxidation catalyst
	Ammonia	Fuel cell (SOFC/AMFC)			Flattener rotor		Reliquifaction in venting	Ex) PureCool
		Internal combustion engine			Towing kite		Plasma reduction	
	Methanol	Fuel cell (HT-PEMFC/ SOFC/MCFC /DMMFC)			Wing sail			
		Internal combustion engine			Soft sail			
	Bio fuel	Fuel cell (SOFC/MCFC)		Energy efficiency improvement	Onboard DC grid system			

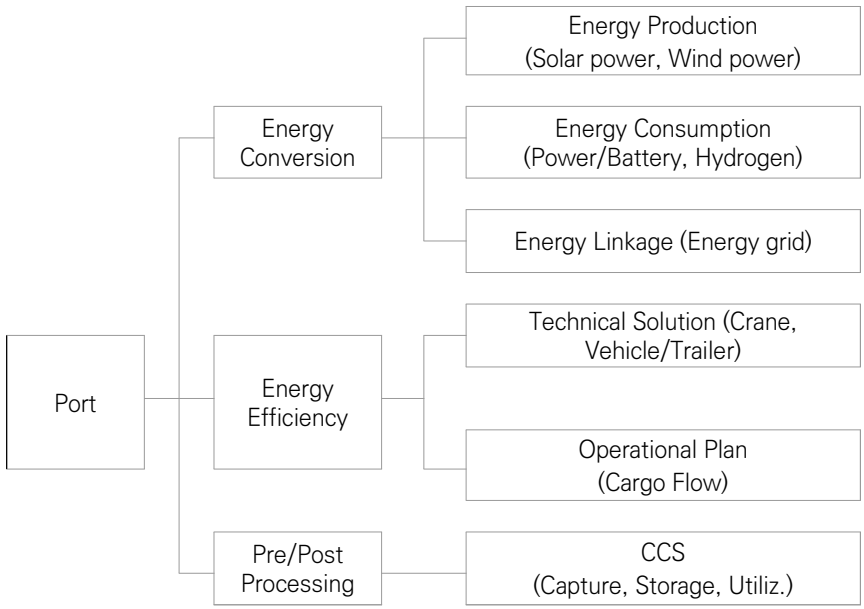
Energy conversion			Energy efficiency improvement			Pre/Post Processing		
Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology
		Internal combustion engine	Operational plans (Ship operation)	Ship speed optimization	Optimization technology (AI/Big data)			
				Optimal route	Optimization technology (AI/ Big data)			

Source: Prepared by the authors

(2) Classification of types of marine carbon-neutral science and technology: Port sector

- As shown in the classification of the shipping sector earlier, science and technology for the realization of carbon neutrality in the port sector selected the type of technology and technology items required in stages in accordance with the flow of 'production, use, and emission of energy' in the port

〈Pic 3-2〉 Diagram to derive a science and technology classification system in the port sector



〈Table 3-2〉 Detailed classification of carbon-neutral technologies (Classification system) in the port sector

Energy conversion			Energy efficiency improvement			Pre/Post Processing		
Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology
Energy production (Alternative energy sources)	Solar power	Photovoltaic (PV) solar panels	Technical solution (Port equipment)	Crane efficiency improvement	Automated cranes	Carbon capture and Storage (CCS)	Capture	Amine scrubbing
		Concentrating solar power (CSP)			Hybrid cranes			Amine scrubbing
		Solar thermal			Telescopic jib crane			Memberanes separation
		Passive solar gain			Crane electrification			Cryogenic distillation
		Floating photovoltaics		Vehicle/trailer efficiency improvement	Automated trailers			Direct air capture (DAC)
	Wind power	Onshore wind turbines			Trailer electrification		Storage	Depleted oil and gas reservoirs
		Offshore wind turbines	Operational plans (port operation)	Cargo flow improvement (Smart port)	AI			Saline aquifers
Energy linkage	Energy grid (Distributed generation technology port)	Smart grids			Big data			Basalt formations
		Micro girds			IOT			Ocean storage

Energy conversion			Energy efficiency improvement			Pre/Post Processing		
Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology	Medium category	Small category	Detailed technology
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/ Battery	Lithium -ion batteries					Utilization	Enhanced oil recovery (EOR)
		Sodium -ion batteries						Carbon mineralization
		Flow batteries						Production of synthetic fuels
	Hydrogen	PEMFC						Production of plastics
		SOFC						
		AFC						

Source: Prepared by the authors

(3) Surveys and analysis

▪ Conducting surveys

- A survey was carried out via email for approximately three weeks from late July to mid-August in 2023 targeting a group of domestic and foreign experts by technology type.
- After collecting responses from a total of 45 experts including 21 domestic experts and 24 foreign (Europe) ones, the survey secured valid responses by asking responses again to errors.

▪ Result analysis

- Technology level assessment: The gap between domestic

technology and foreign technology was evaluated by using a 100-point scale for each type of technology and item in the shipping and port sector.

- A 7-point scale was employed for international trends (market share), technical difficulty, and potential for carbon neutrality contribution to derive international cooperation strategies by type; the importance of detailed items in each area was evaluated by calculating the average of the obtained scores and the average of the 7 points of the detailed items.
- In estimating the importance of technology by type and item, the evaluation period is specifically divided into 'present to 2030' and '2030 to 2050' to reflect the implications of the time gap.

〈Table 3-3〉 Process of conducting survey analysis

Derive survey topics and items	Hold expert seminar per sector	Refine and finalize survey questions	Conduct a survey	Analyze results
① Technology gap ② Demand assessment (marketability/ technical difficulty/Potential for carbon neutrality contribution	• Construction of port and shipping sector classification system (large, medium, small type classification) • Confirmation of individual technology items per small classification	• Finalization of survey structure, items and methods • Securing survey participants	• Domestic /foreign experts • Academic, affiliated groups/interest groups	• Identification of the most pressing technology areas for domestic development and international cooperation

Source: Prepared by the authors

2) Technology gap analysis by technology type and item

(1) Shipping sector

〈Table 3-4〉 Assessment of domestic technology level in the shipping sector: Energy conversion

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
Energy production (Alternative energy sources)	Solar	59.8	64.3	55.2	4	8	0	21	8
	Wind power	58.3	59.5	57.1	4	1	3	33	4
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/Battery	66.7	67.1	66.2	2	10	0	26	2
	Hydrogen	60.6	61.7	59.6	3	7	9	21	2
	Ammonia	59.5	58.6	60.5	4	5	7	24	0
	Methanol	60.2	61.4	58.9	5	2	3	29	2
	Bio fuel	57.3	61.0	53.6	3	10	2	23	2
Technology in all		60.3	61.9	58.7	25	43	24	177	20

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-5〉 Assessment of domestic technology level in the shipping sector: Energy efficiency improvement

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
Technical solution (Ship equipment)	Resistance mitigation	82.6	89.5	75.7	19	3	7	15	0
	Propulsion efficiency improvement	83.8	89.5	78.1	17	1	4	21	0
	Energy efficiency improvement	82.9	89.0	76.7	17	1	3	20	0

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
Operational plans (Ship operation)	Ship speed optimization	80.6	86.7	74.5	12	3	4	25	0
	Optimal route	78.7	83.6	73.8	8	2	5	29	0
Technology in all		81.7	87.7	75.8	73	10	23	110	0

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-6〉 Assessment of domestic technology level in the shipping sector: Pre/Post processing

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
OCCS	Pre-combustion	66.1	68.6	63.6	4	6	4	26	0
	Post combustion	58.2	58.3	58.2	2	6	6	23	0
Methane gas	Methane catalysts in exhaust	67.7	70.8	64.7	4	6	0	26	0
	Reliquifaction in venting	69.4	73.3	65.6	7	6	1	23	0
	Plasma reduction	60.1	64.0	56.1	17	24	11	98	0
Technology in all		64.3	67.0	61.64	34	48	22	196	0

Source: Prepared by the authors

(2) Port sector

〈Table 3-7〉 Assessment of domestic technology level in the port sector: Energy conversion

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
Energy production	Solar	63.6	65.0	62.1	1	15	1	15	8
	Wind	56.8	57.3	56.4	0	1	4	34	2
Energy linkage	Energy grid (Distributed generation)	62.6	63.9	61.3	4	9	2	24	0
Energy consumption	Electric power /Battery	69.1	69.0	69.2	5	10	3	13	4
	Hydrogen	57.2	56.0	58.5	1	4	7	20	3
Technology in all		61.9	62.2	61.5	11	39	17	106	17

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-8〉 Assessment of domestic technology level in the port sector: Energy efficiency improvement

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
Technical solution (Port equipment)	Crane efficiency improvement	74.5	73.3	75.8	4	10	3	18	1
	Vehicle/Trailer efficiency improvement	75.0	72.3	77.8	4	12	2	16	1
Operational plans (Port operation)	Cargo flow improvement (Smart port)	72.8	69.0	76.5	4	7	2	21	0
Technology in all		74.1	71.5	76.7	12	29	7	55	22

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-9〉 Assessment of domestic technology level in the port sector: Pre/Post processing

Category		Domestic technology level			No.1 nation (Num. of respondents)				
		Average	Domestic expert	Foreign expert	ROK	US	Japan	Europe	Others
Carbon capture and storage (CCS)	Capture	56.4	57.0	55.7	1	12	2	23	1
	Storage	53.2	54.0	52.5	1	11	2	22	1
	Utilization	50.3	54.5	46.2	0	9	3	25	1
Technology in all		53.3	55.2	51.5	2	32	7	70	3

Source: Prepared by the authors

3) Analysis of current issues and technology demands related to marine carbon neutrality

- Based on the classification system of carbon-neutral science and technology in the shipping and port sector selected in this study, an evaluation was carried out per three indicators: 1) future marketability, 2) technical difficulty and 3) contribution to carbon neutrality. These indicators were applied to future technology scenarios devised by experts in each sector.

(1) Shipping sector

〈Table 3-10〉 Market adoption/applicability of carbon neutral technology in the shipping sector

Energy conversion		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Energy production (Alternative energy sources)	Solar	3.3	3.8	2.9	4.1	4.4	3.8
	Wind power	3.4	3.4	3.4	4.6	4.4	4.7
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/Battery	4.2	4.2	4.1	5.4	5.4	5.4
	Hydrogen	3.6	3.8	3.4	6.1	6.5	5.8
	Ammonia	4.2	4.3	4.2	6	6.3	5.8
	Methanol	4.8	5.2	4.4	5.6	5.7	5.4
	Bio fuel	4.4	5.1	3.8	5.1	5.6	4.7
Technology in all		4	4.2	3.7	5.3	5.5	5.1

Energy efficiency improvement		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Technical solution (Ship equipment)	Resistance mitigation	4.9	5.1	4.8	5.3	5.1	5.6
	Propulsion efficiency improvement	5	5.1	4.9	5.4	5.3	5.6
	Energy efficiency improvement	5	5.3	4.7	5.8	5.7	5.8
Operational plans	Ship speed optimization	5.1	5.2	5	5.5	5.6	5.5
	Optimal route	5	5.2	4.9	5.5	5.6	5.4
Technology in all		5	5.2	4.8	5.5	5.5	5.6
Pre/Post processing		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
OCCS	Pre-combustion	3.6	4	3.2	5.1	5.3	4.8
	Post combustion	3	3.6	2.4	4.5	4.9	4.2
Methane gas	Methane catalysts in exhaust	3.4	4.2	2.5	4.5	5	4
	Reliquifaction in venting	3.3	4.2	2.5	4.2	4.8	3.7
	Plasma reduction	2.8	3.5	2.1	4	4.4	3.6
Technology in all		3.2	3.9	2.5	4.5	4.9	4.1

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-11〉 Technical difficulty of energy conversion technology in the shipping sector

Energy conversion		Technical difficulty		
		Average	Domestic experts	Foreign experts
Energy production (Alternative energy sources)	Solar	3.7	3.5	3.9
	Wind power	4	3.9	4.1
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/Battery	4.5	4.8	4.2
	Hydrogen	6.1	6.3	6
	Ammonia	5.7	5.7	5.7
	Methanol	4.5	4.6	4.3
	Bio fuel	4	4.4	3.5
Technology in all		4.6	4.7	4.5
Energy efficiency improvement		Technical difficulty		
		Average	Domestic experts	Foreign experts
Technical solution (Ship equipment)	Resistance mitigation	3.9	3.9	3.9
	Propulsion efficiency improvement	3.9	4	3.9
	Energy efficiency improvement	4	4.1	3.9
Operational plans (Ship operation)	Ship speed optimization	3.5	3.8	3.2
	Optimal route	3.6	3.9	3.3
Technology in all		3.8	3.9	3.6
Pre/Post processing		Technical difficulty		
		Average	Domestic experts	Foreign experts
Carbon dioxide (OCCS)	Pre-combustion	5.4	5.7	5.1
	Post combustion	5.6	6	5.2
Methane gas	Methane catalysts in exhaust	5.1	5.2	5
	Reliquifaction in venting	5.1	5	5.2
	Plasma reduction	5.4	5.4	5.3
Technology in all		5.3	5.5	5.2

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-12〉 Effects of introducing energy conversion technology in the shipping sector

Energy conversion		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Energy production (Alternative energy sources)	Solar	3.4	3.9	2.9	4.1	4.3	4
	Wind power	3.5	4.1	3	4.6	4.8	4.5
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/Battery	4.1	4.7	3.5	5.3	5.3	5.3
	Hydrogen	4.1	5	3.3	6.2	6.8	5.6
	Ammonia	4.4	5.3	3.5	6.2	6.5	6
	Methanol	4.5	5.2	3.7	5.5	6	5.1
	Bio fuel	4.4	5	3.7	5.1	5.7	4.4
Technology in all		4.1	4.7	3.4	5.3	5.6	5
Energy efficiency improvement		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Technical solution (ship equipment)	Resistance mitigation	4.3	4.4	4.2	4.6	4.4	4.9
	Propulsion efficiency improvement	4.3	4.5	4.1	4.8	4.7	4.9
	Energy efficiency improvement	4.3	4.6	4	4.8	5	4.7
Operational plans (Ship operation)	Ship speed optimization	4.5	4.8	4.3	4.8	4.9	4.8
	Optimal route	4.3	4.5	4.2	4.8	4.8	4.8
Technology in all		4.3	4.6	4.1	4.8	4.7	4.8

Pre/Post processing		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Carbon dioxide (OCCS)	Pre-combustion	3.9	4.8	3.1	5	5.6	4.5
	Post combustion	3.5	4.5	2.6	4.6	5.2	4
Methane gas	Methane catalysts in exhaust	3.6	4.4	2.7	4.5	5.1	3.8
	Reliquifaction in venting	3.5	4.6	2.5	4.4	4.9	3.9
	Plasma reduction	3.3	4.3	2.3	4.4	4.8	3.9
Technology in all		3.6	4.5	2.6	4.6	5.1	4

Source: Prepared by the authors

(2) Port sector

〈Table 3-13〉 Market adoption/applicability of carbon neutral technology in the port sector

Energy conversion		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Energy production	Solar	4.4	4.4	4.4	5.3	4.9	5.7
	Wind power	4.2	3.8	4.6	5.5	5.1	5.8
Energy linkage	Energy grid (Distributed generation technology port)	4.5	4.6	4.5	5.9	6	5.8
Energy consumption	Electric power/Battery	4.7	4.7	4.7	6	5.8	6.3

	Hydrogen	3.5	3.5	3.5	5.7	5.8	5.5
Technology in all		4.3	4.2	4.3	5.7	5.5	5.8
Energy efficiency improvement		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Technical solution (Port equipment)	Crane efficiency improvement	4.5	4.7	4.3	5.2	5.3	5.2
	Vehicle/Trailer efficiency improvement	4.6	4.8	4.4	5.4	5.3	5.5
Operational plans (Port operation)	Cargo flow improvement (Smart port)	4.8	4.9	4.7	5.9	5.9	5.9
Technology in all		4.6	4.8	4.4	5.5	5.5	5.5
Pre/Post processing		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Carbon capture and storage (CCS)	Capture	3	3.2	2.8	5	4.8	5.1
	Storage	3.1	3.2	2.9	5.1	4.8	5.4
	Utilization	2.6	3	2.3	4.9	4.7	5.1
Technology in all		2.9	3.1	2.7	5	4.7	5.2

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-14〉 Technical difficulty of commercialization of port carbon-neutral technologies

Energy conversion		Technical difficulty		
		Average	Domestic experts	Foreign experts
Energy production	Solar	3.6	3.6	3.6
	Wind power	4	4.2	3.8
Energy linkage	Energy grid (Distributed generation technology port)	4.2	4.4	4

Energy consumption	Electric power/Battery	4.2	4.4	3.9
	Hydrogen	5.8	5.8	5.7
Technology in all		4.3	4.5	4.2
Energy efficiency improvement		Technical difficulty		
		Average	Domestic experts	Foreign experts
Technical solution (Port equipment)	Crane efficiency improvement	3.2	3.2	3.1
	Vehicle/Trailer efficiency improvement	3.2	3.3	3.1
Operational plans (Port operation)	Cargo flow improvement (Smart port)	4.1	4.3	3.8
Technology in all		3.5	3.6	3.3
Pre/Post processing		Technical difficulty		
		Average	Domestic experts	Foreign experts
Carbon capture and storage (CCS)	Capture	5.5	5.7	5.3
	Storage	5.3	5.4	5.3
	Utilization	5.7	5.7	5.6
Technology in all		5.5	5.6	5.4

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-15〉 Effects of introducing carbon neutral technology in the port sector

Energy conversion		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Energy production	Solar	4	4.6	3.4	5	5.1	4.9
	Wind power	3.8	4	3.7	5	4.8	5.2
Energy linkage	Energy grid (Distributed generation technology port)	4.4	4.5	4.3	5.4	5.2	5.7

Energy consumption	Electric power/Battery	4.6	4.9	4.3	5.5	5.6	5.5
	Hydrogen	3.9	4.7	3.1	5.9	6.4	5.3
Technology in all		4.1	4.5	3.8	5.4	5.4	5.3
Energy efficiency improvement		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Technical solution (Port equipment)	Crane efficiency improvement	3.8	4.1	3.5	4.3	4.5	4.2
	Vehicle/Trailer efficiency improvement	4.0	4.2	3.8	4.5	4.5	4.4
Operational plans (Port operation)	Cargo flow improvement (Smart port)	4.4	4.5	4.4	5.1	5.2	5.1
Technology in all		4.1	4.3	3.9	4.6	4.7	4.6
Pre/Post processing		Present ~ 2030			2030 ~ 2050		
		Average	Domestic experts	Foreign experts	Average	Domestic experts	Foreign experts
Carbon capture and storage (CCS)	Capture	3.7	4.3	3.1	5.1	5.3	4.9
	Storage	3.7	4.2	3.2	4.9	5.2	4.7
	Utilization	3.5	4.3	2.8	5.1	5.4	4.8
Technology in all		3.6	4.2	3	5	5.3	4.8

Source: Prepared by the authors

4) Identification of technology items for international cooperation

▪ Classification of technology types for international cooperation

- As part of a strategic approach for science and technology international cooperation, the researchers defined technology types targeting international cooperation into three: 'leading technology', 'joint technology' and 'collaborative technology'.

〈Table 3-16〉 Selection of technology types for international cooperation

Classification	Content
Leading	• The technology level is already at the top level, and needs to secure a 'super gap' through future R&D • Type of technology with significant contribution to carbon neutrality depending on the market size and introduction around 2030
Joint	• Type of technology that is close to or rapidly approaching the technology level of leading nations • Type of technology with significant contribution to carbon neutrality depending on the market size and introduction around 2030
Collaborative	• Even though the market size increases around 2030 or the technology type has a large contribution to carbon neutrality resulting from the introduction, the global technology maturity is still considered to be in the early stage of development.

▪ Identification of technology items for international cooperation

〈Table 3-17〉 Identification of technology types for international cooperation in the shipping sector

Energy conversion		Domestic technology level (100)	Marketability (7)	Technical difficulty (7)	Introduction effect (7)	Cooperation type	R&D Urgency
Energy production (Alternative energy sources)	Solar	59.8	4.1	3.7	4.1		
	Wind power	58.3	4.6	4.0	4.6		
Energy consumption (Alternative fuel)	Electric power/Battery	66.7	5.4	4.5	5.3	Joint	
	Hydrogen	60.6	6.1	6.1	6.2	Joint	Urgent
	Ammonia	59.5	6.0	5.7	6.2	Collaborative	Urgent
	Methanol	60.2	5.6	4.5	5.5	Joint	
	Bio fuel	57.3	5.1	4.0	5.1	Collaborative	Urgent
Total		60.3	5.3	4.6	5.3	-	-
Energy efficiency improvement		**Domestic technology level (100)**	**Marketability (7)**	**Technical difficulty (7)**	**Introduction effect (7)**	**Cooperation type**	**R&D Urgency**
Technical solution (Ship equipment)	Resistance mitigation	82.6	5.3	3.9	4.6	Joint	
	Propulsion efficiency improvement	83.8	5.4	3.9	4.8	Joint	
	Energy efficiency improvement	82.9	5.8	4.0	4.8	Joint	
Operational plans	Ship speed optimization	80.6	5.5	3.5	4.8	Joint	
	Optimal route	78.7	5.5	3.6	4.8	Joint	
Total		81.7	5.5	3.8	4.8	-	-

Pre/Post processing		Domestic technology level (100)	Marketability (7)	Technical difficulty (7)	Introduction effect (7)	Cooperation type	R&D Urgency
Carbon dioxide (OCCS)	Pre-combustion	66.1	5.1	5.4	5.0	Joint	
	Post combustion	58.2	4.5	5.6	4.6	Collaborative	
Methane gas	Methane catalysts in exhaust	67.7	4.5	5.1	4.5	Joint	
	Reliquifaction in venting	69.4	4.2	5.1	4.4	Joint	
	Plasma reduction	60.1	4.0	5.4	4.4		
Total		64.3	4.5	5.3	4.6	-	-

Source: Prepared by the authors

〈Table 3-18〉 Identification of technology types for international cooperation in the port sector

Energy conversion		Domestic technology level (100)	Marketability (7)	Technical difficulty (7)	Introduction effect (7)	Cooperation type	R&D Urgency
Energy production	Solar	63.6	5.3	3.6	5.0		
	Wind power	56.8	5.5	4.0	5.0		
Energy Linkage	Energy grids (Distributed generation)	62.6	5.9	4.2	5.4	Joint	Urgent
Energy consumption	Electric power/Battery	69.1	6.0	4.2	5.5	Joint	Urgent
	Hydrogen	57.2	5.7	5.8	5.9	Collaborative	Urgent
Total		61.9	5.7	4.3	5.4	-	-

Energy efficiency improvement		Domestic technology level (100)	Marketability (7)	Technical difficulty (7)	Introduction effect (7)	Cooperation type	R&D Urgency
Technical solution (Port equipment)	Crane efficiency improvement	74.5	5.2	3.2	4.3		Urgent
	Vehicle/Trailer efficiency improvement	75.0	5.4	3.2	4.5		Urgent
Operational plans (Port operation)	Cargo flow improvement (Smart port)	72.8	5.9	4.1	5.1	Joint	Urgent
Total		74.1	5.5	3.5	4.6	-	-
Pre/Post processing		Domestic technology level (100)	Marketability (7)	Technical difficulty (7)	Introduction effect (7)	Cooperation type	R&D Urgency
Carbon capture and storage (CCS)	Capture	56.4	5.0	5.5	5.1	Collaborative	Urgent
	Storage	53.2	5.1	5.3	4.9	Collaborative	Urgent
	Utilization	50.3	4.9	5.7	5.1	Collaborative	
Total		53.3	5.0	5.5	5.0	-	-

Source: Prepared by the authors

01
서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구의 배경 및 필요성

1) 연구의 배경

1997년 UN 기후변화협약(UNFCCC)의 제3차 당사국총회(COP3)에서 국제 기후변화 규범체계를 구체화한 「교토 의정서(Kyoto Protocol)」를 채택한 이래로, 장기적인 목표로 지구의 평균온도 상승을 억제하기 위한 논의가 본격적으로 시작되었다. 이후, 2009년 제15차 총회(COP15)에서는 2℃ 이내로 억제하는 목표를 설정하고, 이어서 개최된 COP16에서 「칸쿤 합의(Cancun Agreement)」을 채택함으로써 이를 공식화하였다. 이는 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC)의 '제4차 종합평가 보고서(AR4)'에서 제시한 '2℃ 시나리오'에 기반한 것으로, 2015년 COP21에서는 지구의 평균온도 상승을 산업혁명 이전 대비 2℃보다 낮은 수준으로 유지하고, 나아가 1.5℃ 이내로 억제하기 위해 노력하기 위한 「파리 기후협정(Paris Agreement)」을 채택하는 데에 이르렀다.

또한, 제48차 IPCC 총회(인천 송도, 2018.10.)에서는 2100년까지 지구 평균온도 상승을 1.5℃ 이내로 제한하기 위한 시나리오를 제시함으로써 파리협정에서 합의된 목표 수준의 과학적 근거를 마련한 「지구온난화 1.5℃ 특별보고서(Global Warming of 1.5℃)」를 승인하였으며, 이를 위해서는 2030년까지 전지구적으로 이산화탄소 배출을 2010년 대비 최소 45% 이상 감축하는 한편, 2050년경까지는 추가 배출로 인한 이산화탄소 농도의 상승이 없는 순배출 제로(Net zero) 즉, '탄소중립'을 달성해야 한다.[1)]

지구의 평균온도 상승을 1.5℃ 이내로 억제하기 위한 실질적 방안으로 2050년까지 탄소중립을 달성해야 하는 목표 수준과 시한이 정해지고, 이에 따라 국제사회 및 유럽연합 등의 주요 국가들 역시 해운 및 항만의 미세먼지 배출저감에 이어 탄소중립 이행을 위한 규제를 추가하거나 강화하고 있다. 국제해사기구(IMO) 역시 질소산화물 및 황산화물 등 선박의 대기오염물질 배출에 대한 제한적 규제를 시행하고 개별 기준을 강화한 데 이어, 2018년 4월, MEPC 72차 회의에서 온실가스 배출 저감을 위한 초기 전략 결의안, 즉 2050년까지 국제해운의 배출을 2008년 수준 대비 50% 이상 감축함으로써 탄소중립을 실현하기 위한 목표 및 일정을 설정하는 한편, 이를 달성하기 위한 각종 기술적 조치 및 시장기반 조치 성격의 탈탄소화 작업 등을 매우 빠른 수준으로 논의하고 있다.[2)]

우리 정부 역시, 2020년 전후 「항만의 대기환경 개선을 위한 특별법」 및 「해양환경 관리법」 등, 선박 및 항만 활동으로 인한 대기오염물질 배출의 본격 관리 및 이를 위한 모니터링 등을 제도적으로 강화한 데 이어, 상기와 같은 국제사회의 탄소중립 이행 요구에 부응하여 2050년까지 탄소중립을 목표로 하는 범정부 차원의 「탄소중립 추진전략」을 발표하였다. 또한, 최근에는 국가적 차원의 탄소중립 목표를 달성하기 위한 절차와 정책 수단을 규

1) 기상청 기후변화감시과 (2020), p. 4.
2) 안용성 외 (2022), p. 1.

정한 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 제정하였으며, 이에 따라서 전통적으로 고탄소 산업구조 기반 위에 성장해온 해운·항만 부문 역시 저탄소, 나아가 배출제로 전환의 주요 대상으로 부각되고 있다.

하지만, 이러한 목표는 현재의 기술적 수준에서 달성하기 어려운 목표로, 2030년 전후까지 시장에서 상용화할 수 있을 것으로 전망되는 새로운 패러다임의 획기적인 배출제로 기술의 성공적인 도입·적용으로 비로소 도달할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

이에, 국내외 항만 운영사 및 조선·기자재 업계 등은 2050 탄소중립 구현을 위한 기술적 대안과 관련한 불확실성을 최소화하기 위해서 다양한 대안 및 보완적 기술 등에 대한 검토 및 연구개발 등을 동시다발적으로 수행하고 있다. 또한, 주요 국가들은 멀지않은 미래에 새로운 패러다임에 따라서 재편되는 시장에서 기술주권을 확보하기 위해, 적용 대상의 특성 및 환경 등에 따라서 유력한 혁신기술의 후보군을 선별하고, 이들에 대한 무한 경쟁에 돌입하고 있다.

2) 연구의 필요성

탄소중립에 있어 '국제협력'은 본질적인 의미에서 이행 트랙의 중요한 분기점이 된 파리협약(2015)이 지향하는 바와 같이, 이미 온실가스를 대량 배출해온 선진국·강대국 간의 '감축 협력', 그리고 그간의 책임에서 상대적으로 자유로우나 그로 인한 피해는 올곧이 같이 견디어 내야 하는 개도국과의 '적응 협력'으로 구체화될 수 있다.[3] 이는 탄소중립 이행 추진을 위한 전지구적 공동 추진 동력을 도출하기 위한 '공유지의 비극(Tragedy of the Commons)' 개념 기반의 이론적 근거로, 우선 '감축 협력'은 이제서

3) 나라경제(2021.09.)(검색일: 2023.6.3.)

야 발전을 추구하게 된 행위자(개도국)들이 '용이하지만 위험한' 기존의 고탄소 기반의 발전경로를 포기하고 상대적으로 '고비용에 개발·적용은 어려우나 중장기적으로 지속가능한' 저탄소 발전경로를 채택할 수 있도록, 이미 발전의 성과를 향유한 선진국이 재정적·기술적 지원을 제공함으로써 가능하다. '적응 협력' 역시, 지구 온난화, 이로 인한 기후변화로 인한 재난 및 재해 등에 대한 대응 역량을 확보하지 못한 개도국에 대해서 선진국이 국제개발 협력 등의 방식으로 실질적인 재정적·기술적 지원을 제공함으로써, 이들의 회복력 및 대응 역량 자체를 제고할 수 있다.

하지만 본 연구는 이러한 개념의 '탄소중립'의 공동 추진을 위한 협력의 개념보다는 해운 및 항만 분야 탄소중립 기술 분야에서 최상위 선도그룹을 간발의 차이로 추격하고 있는 '추격자' 위치의 우리 입장에서, 2030년 전후로 새롭게 형성되거나 재편될 것으로 보이는 혁신기술 시장에서 주도적인 위치를 점할 수 있는 기회를 창출하기 위한 전략적 접근의 가능성을 탐구하는 데에 목적을 두고 있다.

2030년까지 채 10년이 남지 않은 현시점은, 지구 온난화를 회피하기 위한 전지구적인 공동의 목표 아래에서 항만 및 해운의 전후방을 포함하는 전산업 부문에 국제사회 및 국가 차원의 탄소중립 추진 방향 및 목표 수준, 기한 등은 제시되었으나, 이를 실제 구현하기 위해 요구되는 기술 및 정책적 방법론의 유효성에 대해서는 확실하게 결정된 바가 없는 상황으로 이해할 수 있다. 탄소중립 이행을 위한 국제해사기구(IMO) 및 유럽연합의 추가적인 관련 규제들은 이미 정해진 목표 수준 및 기한 등을 현재의 기술적 수준 측면에서 고려하였을 때 달성하기 어려운 수준으로 평가되고 있다. 따라서, 이미 기술력과 품질 면에서 세계 시장을 주도하거나 멀지 않은 격차에서 따라가고 있는 우리 조선·기자재 업계에게, 이러한 불확실성은 가까운 미래의 시장을 선점하거나 주도할 수 있는 절체절명의 기회인 동시에 새로운 시장환경에서 도태될 수도 있는 위험요인으로 작용할 수 있다.

(1) 미래 탄소중립 시장 경쟁력 제고 및 육성을 위한 국제협력 기반 마련

2050년이라는 장기적 목표 시한 내에서 이러한 불확실성에 의한 리스크를 최소화하는 동시에, 추후 대안적 방법론의 결정을 주도하는 위치를 점하기 위한 전략적 접근방안으로, 국제적 수준에서 분야별 선도그룹과 유기적인 공조의 필요성이 날로 커지고 있다. 최근 국내외 관련 규제의 강화에 따라서, 관련 규범을 준수·이행하기 위한 혁신적 연구개발, 선별된 유효한 기술 및 정책적 방안의 고도화는 물론 해양 탄소중립 과학기술의 적용을 위한 인과 메커니즘 및 검증 등의 기초·응용 연구 수요 역시 급증하고 있으며, 주로 민간의 영역에서 기업들의 경쟁에 따른 개별 기술 분야별 격차구도를 서서히 형성해가고 있다.

멀지 않은 미래에 새로운 패러다임에 따라서 재편되는 시장에서 우리 기업들이 기회를 선점하거나 경쟁력을 가지기 위해서는, 주도적인 소수의 기업들의 자체적인 전략과는 별개로 국가적 차원에서 기술적 불확실성에 의한 시장의 리스크를 최소화할 수 있도록 개별 과학기술의 유형 및 분야별 기술 현황, 우리와 선도 그룹 간의 격차 및 요인 등을 정확하게 파악하고, 이를 바탕으로 분야별로 앞서가고 있는 시장의 주도그룹과의 협력기반, 이를 바탕으로 다양한 가능성을 모색할 수 있도록 국제협력의 생태계를 조성해줄 필요가 있다.

(2) 해운·항만 분야 탄소중립 기술정책의 전략적 접근을 위한 기초자료 확보

아직 국내에서는 선박 및 항만의 배출저감 및 방지·관리기술 등 탄소중립 구현을 위한 기술 전반에 대한 현황, 선도기술 대비 우리 기술의 수준 및 격차, 주요 현안 및 이에 따른 수요 전망 등에 대한 파악 작업이 매우 미비한 수준에 머무르고 있다. 국가 또는 분야별 목표나 이를 위한 방향성을 제시하고, 개별 업계 또는 이행주체들이 그들의 역량과 나름의 경영적

판단에 따라서 이를 이행해 나가야 하는 현재의 이행 구조는, 관련 이해관계 산업의 이행주체들은 물론 관련된 산업군에 있어서도 몇몇의 시장 주도적인 업체를 제외하고는 '정보의 비대칭'에 따른 비효율, 이에 따른 위험을 유발할 수밖에 없다.

이러한 현행 구조에서, 2050년까지 해운 및 항만 분야의 탄소중립을 구현해내기 위한 에너지 및 기술 대안에 대한 탐구 및 연구개발 등은 국내외 현안 대응 차원에서 민간의 주도 또는 기술분야별·부처별 판단과 수요에 따라서 개별적으로 추진되고 있다. 하지만, 해당 기술 및 인프라 전반에 대한 현황 및 기술 수준, 유효성, 이에 따른 전환 가능성 등에 대한 조사·연구 작업은 아직 이루어지지 못하고 있으며, 이른바 해운 및 항만 분야의 탄소중립을 구현하기 위한 전략적 접근이 불가한 상황이 지속되고 있다. 이는 다시 탄소중립 구현을 위한 기술 현황에 대한 기초자료의 미비로, 기존의 제도 또는 이를 개선하기 위한 정책, 나아가 이를 반영해야 하는 시장의 불확실성이 재차 증대되는 악순환을 초래할 수 있다.

따라서, 이러한 불확실성의 환경에서 이로 인한 위험을 최소화하기 위해서는 탄소중립 구현을 위한 대안 기술 및 정책 측면의 추가적인 연구개발 외에도, 이들 기술 및 정책 대안의 현황, 그리고 빠르게 발전하고 있는 제도·기술 및 환경에 따라서 달라질 수 있는 적용 유효성 등을 종합적으로 평가하는 기초자료의 생산, 나아가 이러한 정보의 추이 등을 시장에 공유하기 위한 노력이 필요한 시점이다.

2. 연구 목적

2050 탄소중립 목표 달성의 관건인 과학기술, 보다 정확하게는 '혁신적인 미래 핵심기술'의 불확실성을 최소화하는 동시에, 새로운 기술 패러다임으로 재편될 것이 확실시되는 시장에서 주도적인 위치를 확보하기 위해서는 '추격자'의 입장에서 최상위권 선도그룹과의 전략적 공조, 협력 등을 통한 우리 기술 역량의 획기적인 향상을 도모해야 한다. 새로운 시장의 구조가 어느 정도 결정될 것으로 전망되는 2030년 전후까지 얼마 남지 않은 현시점에서, 우리의 기술 역량을 최상위권 기술 수준으로 육성·제고하는 한편 최상위권 기술 선도그룹과의 협력을 도모하기 위해서는, 선행적으로 우리 기술역량 및 환경 등에 대한 실제 현황 파악, 이를 바탕으로 선별된 협력 파트너와 상호간 우위 평가, 이에 따른 교차 수요 등에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

이에 본 연구는 ① '2050 해양 탄소중립' 구현을 위한 실체적 방법론, 즉 과학기술 및 이를 활용한 정책적 조치의 현황 등을 검토(보고서 후반부 부록에 배치)하고 이를 바탕으로 과학기술 및 제도환경의 변화에 따른 불확실성, 이에 따른 현행 정책 및 제도의 한계를 규명하는 한편, ② 해양 부문 탄소배출의 대부분을 차지하는 해운 및 항만 분야의 탄소중립 과학기술 전반의 국내외 기술 여건(분야별 기술격차 및 현황분석 등) 및 ③ 이와 연계한 국내외 현안 파악, 수요조사 등을 통해 보다 실효적인 국제협력 방안을 제시하고자 하였다.

또한, 해당 과학기술의 여러 분야에서 선도적인 위치를 점하고 있는 유럽 현지 전문가들과의 공조를 통해 최신의 현안 및 수요를 발굴·반영하고, 이에 대한 국내외 공론화 과정을 통해, ① 해운 및 항만 부문의 혁신적 탄소중립 핵심기술의 불확실성에서 기인하는 위험요인을 최소화하는 동시에, ② 최상위 기술 역량 획득을 위한 전략적 국제협력의 제도적 기반 마련 과정에 보다 유효한 단초를 제공하고자 하였다.

이를 통해 역대 초유의 장기적 목표인 탄소중립을 실제로 구현하기 위한 혁신적 미래기술 대안을 세계 시장 차원에서 주도적으로 결정하거나 참여하기 위한 우리의 전략적인 국제협력 체계를 구축할 수 있다. 동시에, 최신의 국내외 기술 여건 및 동향정보를 지속적으로 시장에 공유함으로써, 현재 해운 및 항만의 탄소중립 기술 산업 및 전후방 산업 그리고 기술 수요군의 경영적 선택·결정 과정에서 나타나고 있는 '정보의 비대칭' 문제를 해소함은 물론, 핵심 후보·연계기술 간 품질 경쟁을 유도할 수 있을 것으로 보인다. 또한, 국내 기술산업 전반의 경쟁력을 제고하는 한편, 추후 경쟁이 심화될 것으로 예상되는 해양 탄소중립 기술 시장을 주도할 수 있는 기회를 제공할 수 있을 것으로 보인다.

〈표 1-1〉 연구의 목적

연구 목적	기대 효과
• '2050 해양 탄소중립' 구현을 위한 과학기술 및 제도환경의 변화에 따른 불확실성, 이에 따른 현행 정책 및 제도의 한계를 규명 → 해양 부문의 혁신적 탄소중립 과학기술의 연구개발 및 미래 글로벌 가치사슬(Global value-chain) 구축 등을 위한 전략방안으로, 국제협력의 필요성 도출 • 해운 및 항만 분야의 탄소중립 과학기술 전반에 대한 국내외 기술 여건(분야별 기술격차 및 현황 분석 등) 및 이와 연계한 국내외 현안 파악, 수요조사 등을 통해 → 보다 실효적인 국제협력방안 제시	• 단기적인 목표에 대응하기 위한 최적의 대안적 방법론으로, 국내외 관련 규범에 대한 효과적 이행 지원 • 장기적 목표인 2050 탄소중립을 실제로 구현하기 위한 혁신기술의 공동 개발,참여 등의 국제협력을 통해 → 가까운 미래에 재편될 탄소중립 기술시장에서, 혁신기술의 결정, 글로벌 가치사슬 구축 주도, 참여 • 최신의 국내외 기술 여건 및 동향정보를 공유함으로써, 현재 해운·항만 산업 전반의 '정보의 비대칭' 문제 최소화 → 해운·항만 환경기술 시장의 효율성, 경쟁력 제고

자료: 저자 작성

제2절 연구 내용 및 방법

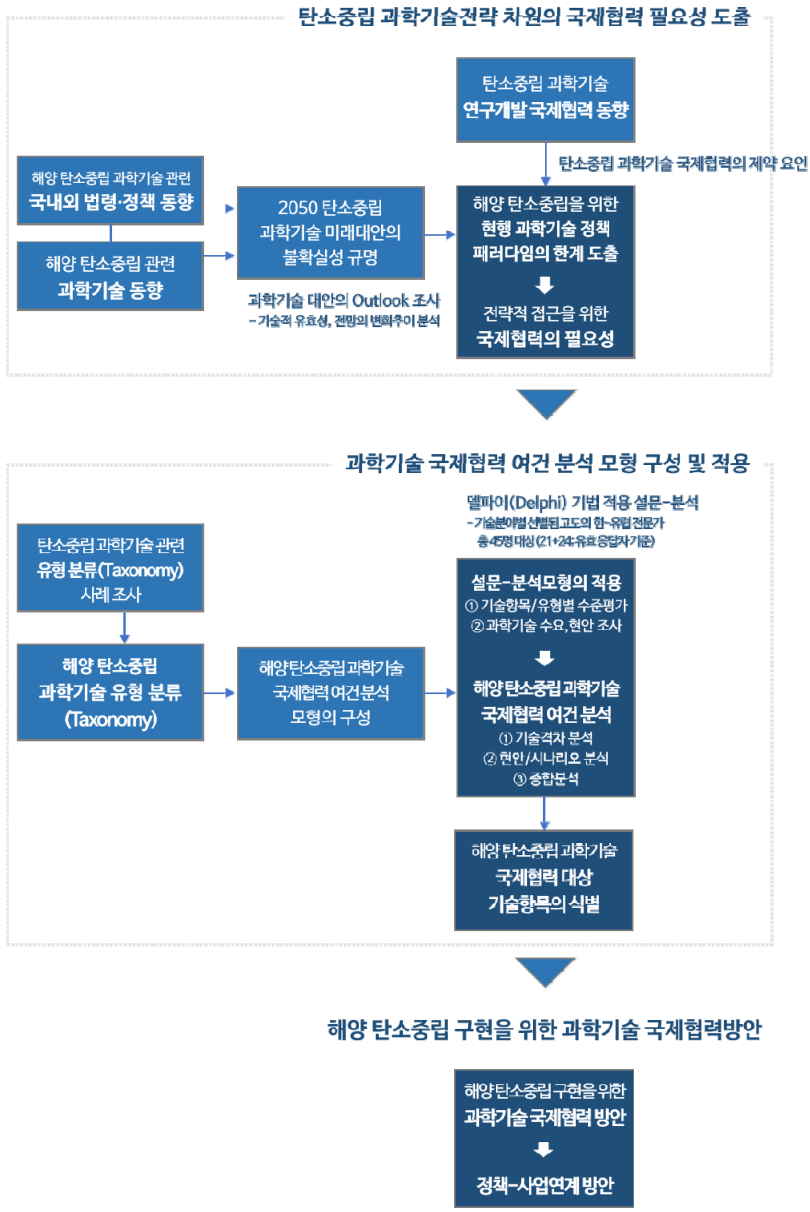
1. 연구 범위 및 주요내용

본 연구는 해양 부문 탄소배출의 대부분을 차지하는 해운 및 항만 분야의 탄소중립 과학기술 및 제도환경의 불확실성을 규명하고, 적용 가능한 기술·정책적 대안의 동향, 유형별/주요 국가별 기술 수준평가 및 격차 분석, 이에 따른 현안 및 수요조사 및 분석 등을 통해, 국제협력 추진을 위한 전략적 시사점 및 이에 따른 협력 방안, 그리고 이와 관련한 정책·사업화 제안사항을 제시하는 데 목적이 있다.

윤제용(2021)에 따르면, 기후변화 해결과 탄소중립 달성을 위한 국제협력의 두 가지의 지향점은 온실가스를 대량 배출하는 선진국·강대국 간의 '감축 협력'과, 기후변화의 책임은 적지만 피해는 큰 개도국과 관련된 '적응 협력'임을 지적하고 있다.[4] 본 연구는 전자에 해당하는 범주에서 기존의 환경 기술 시장이 신기술과 융합하여 새롭게 재편될 것으로 예상되는 '혁신기술' 시장에 진입하거나, 이를 주도하기 위한 전략적 접근방안을 탐구하는 시도로 이해할 수 있다.

4) 나라경제(2021.9.)(검색일: 2023.6.3.)

〈그림 1-1〉 연구의 주요내용 및 수행과정



자료: 저자 작성

이를 위해, 우선 제2장에서는 탄소중립 구현의 도구인 과학기술 전략, 미래 기술의 연구개발을 위한 국내외 주요 규범, 이들을 관통하는 주요 개념 및 원리를 조사·검토하고,[5] 최근 유럽을 중심으로 활발하게 추진되고 있는 선도적인 친환경 과학기술 국제협력 체계와 주요 사례를 조사 및 분석하였다. 이를 통해 제도적 환경과 현시점 기준 과학기술의 유효성과의 괴리에서 기인하는 기술 및 시장의 '불확실성'을 규명하는 한편, 이를 여실히 반영하지 못하고 있는 정책적 한계, 최종적으로 이를 극복하기 위한 전략적 방안으로서의 과학기술 국제협력 전략의 필요성을 검토하였다.

〈표 1-2〉 해양 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 관련 동향 조사,분석

구 분	내 용	비 고
해양 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 관련 동향 분석	해양 탄소중립 과학기술 관련 국내외 법령·정책 조사·검토	• 탄소중립 과학기술 일반 전략,정책 • 해운·항만 탄소중립 과학기술 전략
	탄소중립 과학기술 연구개발 협력 동향 분석	• 탄소중립 관련 국제협력 정책 • 해운·항만 부문 과학기술 협력 체계 • 해운·항만 과학기술 협력 사례
	해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성 제시	• 해양 탄소중립 과학기술 정책 패러다임의 한계 • 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 제약요인
		• 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성

자료: 저자 작성

제3장에서는 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진을 위한 국내외 여건을 분석하였다. 우선, 분석을 위한 프레임을 해운 및 항만 부문 각각의 기술유형에 따른 분류체계로 구성하기 위해, 관련 분류체계(Taxonomy)의 사례를 분석하고, 이를 바탕으로 두 부문의 여건 분석을 위한 기술유형 및 항목을 도출하고 다시 이를 계층화하였다.

5) 이를 구현하기 위한 대안적 과학기술의 최신 동향은 분야 및 유형별로 구분하여 조사하고, 이를 부록에서 정리하였음

이어서, 이에 따른 상·하위 속성(유형) 및 기술항목에 대해서 주요 선도·경쟁국가와의 수준평가를 통해 격차분석을 수행하는 한편, 주요 평가지표에 의한 기술 유형별 현안 및 이에 따른 수요조사를 통해 국제협력 추진을 위한 여건 분석을 수행하였다. 또한, 분석결과에 대한 종합평가를 통해 기술 수준, 환경 등을 고려한 국제협력 대상 기술항목의 식별 결과를 제시하였다.

〈표 1-3〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석

구 분	내 용	비 고
해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석	해양 탄소중립 과학기술의 유형 분류	• 탄소중립 과학기술 관련 유형 분류체계 (Taxonomy) 사례 검토
		• 설문-분석 위한 대상 기술의 유형화, 계층화
	설문-분석모형의 구성, 적용	• 전문가 세미나 수행 • 설문조사 문항, 항목 구성 확정
	해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석	• 기술항목/유형별 기술격차 분석 • 국제협력 대상 기술 식별을 위한 수요평가
	• 기술 수준, 환경 등을 고려한 협력 분야 식별	• 평가지표별 수준급간에 따른 국제협력 대상 유형의 구분 • 국제협력 대상 기술항목의 식별

자료: 저자 작성

제4장에서는 국내외 여건 분석 및 종합평가 결과를 바탕으로, 앞서 제시한 추진방향에 부합하는 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안을 제시하였다. 또한, 이를 추진하기 위한 정책·사업화 제안사항을 주요 사업모형 및 일정과 함께 구체적으로 제시하였다.

〈표 1-4〉 해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력 방안 도출

구 분	내 용	비 고
해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력 방안 도출	해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력 방안	• 2050 탄소중립 구현을 위한 '해양 탄소중립 과학기술 전략' 마련 • 한-유럽 탄소중립 공동 연구개발 플랫폼 구축 • 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도기술 육성·지원
	정책·사업화 제안	• 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업 • 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램

자료: 저자 작성

마지막으로 제5장에서는 결론 및 정책제언과 함께, 본 연구의 한계 및 우리원 또는 국가 차원의 향후 연계과제를 제시하였다.

2. 연구 방법

본 연구의 결과물은 해운 및 항만 부문의 탄소중립 과학기술의 국내외 기술격차 및 주요 현안 분석, 이를 바탕으로 도출한 '우리 해양 부문 탄소중립 과학기술의 경쟁력 육성·제고를 위한 국제협력 전략방안' 정도로 요약할 수 있다. 따라서 본 연구 성과의 실효성을 최신의 과학기술 동향 및 그 의의를 정확하게 수집·판단하는 데에 있다고 해도 과언이 아니다. 따라서, 현재 탄소중립의 기술 및 정책 각 분야에서 선도적인 연구개발 및 적용을 주도하고 있는 유럽의 현지 전문가 그룹과의 국제 공동연구를 수행하였다.

또한, 이들 외에도 해양 탄소중립 과학기술 분야별 주요 선행연구그룹, 유럽 소재 최상위 선급 기술연구소 전문가 등을 고도의 전문성을 기준으로 국내외에서 선별하여, 아래와 같이 연구의 전과정에서 이들의 의견을 반영

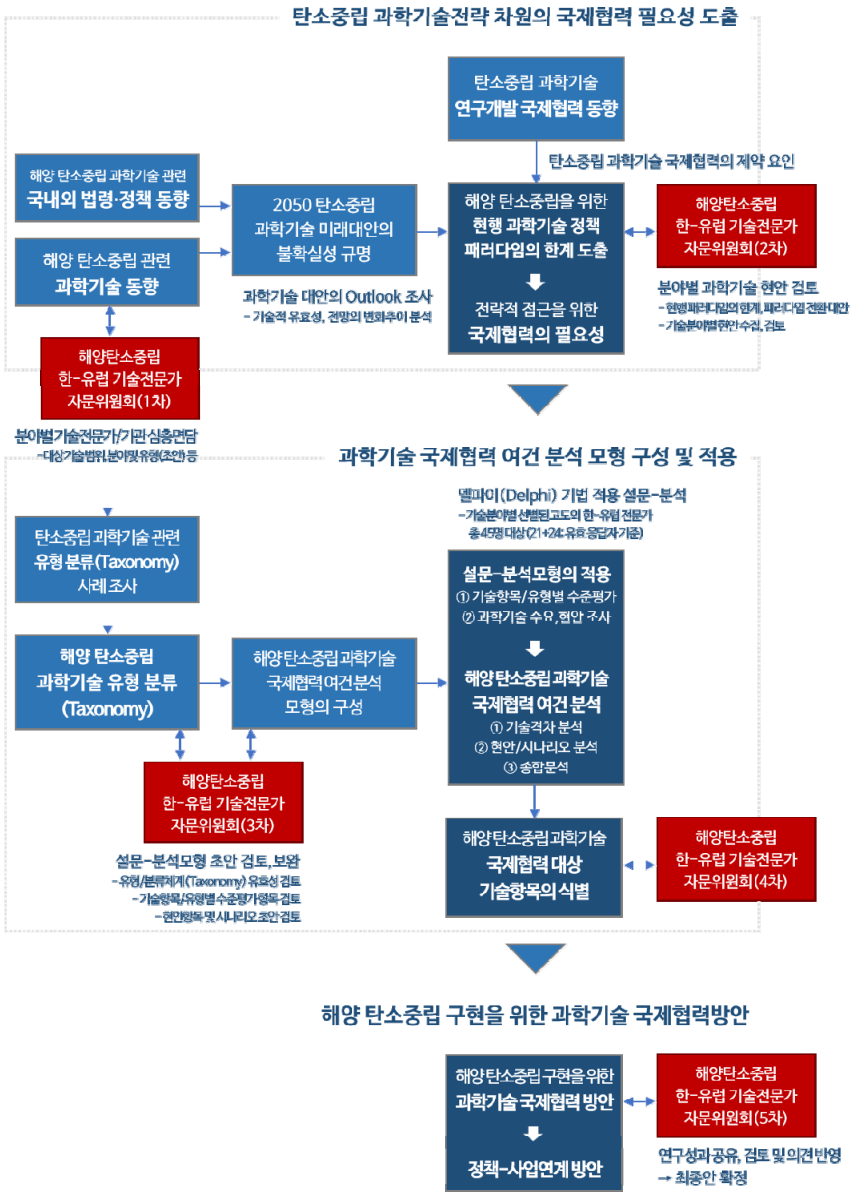
하기 위한 '한-유럽 해양 탄소중립 기술전문가 자문위원회'를 구성 ·운영하고, 필요에 따라서 사안별 심층면담(FGI)를 수행하였다. 기술 자문위원회는 사안에 따라서 분과별/종합 위원회로 구분하여, 정확한 기술 지식 및 최신 동향의 의의를 올바르게 반영하도록 운영하였다.

연구과정에 있어서는, 우선 해양 탄소중립 과학기술의 국제협력의 필요성을 도출하기 위해 국제기구 및 주요 국가의 탄소중립 기술 관련 규범 및 탄소중립 과학기술의 국제협력을 위한 주요 프로그램 및 체계의 사례, 대안적 과학기술의 최신 동향, 이들의 시장 전반 등에 대해서 최신 기술 전문자료의 Outlook, 보고서 등의 문헌자료를 수집·조사하였다. 이어서, 법령 및 동향정보의 비교분석 결과 초안을 바탕으로 기술 자문위원회 및 개별 심층 면담을 통해 검토·보완하였다.

해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진을 위한 국내외 여건 분석과정에서는 선행적으로 분석체계 구성을 위한 기술 유형 및 분류 기준을 확립하고, 기술 자문위원회의 의견 수렴을 거쳐 기술 수준평가 및 격차분석, 시나리오에 의한 현안 분석 등을 위한 설문체계 및 항목을 구성하였다. 이를 바탕으로 ① 해양 탄소중립 기술항목/유형별 수준평가, ② 국제협력 대상 기술 식별을 위한 수요평가, 이를 바탕으로 ③ 현안 및 협력여건 평가 등을 주요 내용으로 하는 델파이(Delphi) 설문-분석 모형을 설계하였다. 설문조사는 국내외에서 기술 분야별로 선별된 전문가 총 45명(국내 21명, 유럽 24명)을 대상으로 수행하였다.

또한, 연구를 통해 도출한 '해양 탄소중립 과학기술의 국제협력 방안' 및 정책·사업화 방안의 실효성 검토를 위해, 국내외 전문가 자문위원회와는 별개로 연구성과 수요부서인 해양수산부 해양환경정책과, 항만물류기획과의 실무자 그룹을 대상으로 실무자 확대세미나를 수행하였다.

〈그림 1-2〉 연구전략: 국제공동연구 및 한-유럽 기술전문가 자문위원회 활용



자료: 저자 작성

제3절 선행 연구

1. 선행 연구

국제사회의 2050 탄소중립 실현 목표 및 기한 설정, 이에 따른 국내법 연계 등으로, 최근 다양한 배출저감 조치 및 기술 적용 등에 따른 배출 감축경로 및 시나리오의 구성, 그리고 이를 구성하기 위한 핵심지표 및 기준 등에 관한 연구는 일부 시작되고 있으나, 탄소중립 구현에 가장 중요한 요소인 '기술' 자체에 대한 전략 측면의 연구는 아직 미비하다. 기존의 화석연료 사용을 대체하기 위한 과도기적 저탄소 에너지 또는 배출제로 개념의 새로운 에너지 대안 및 이를 활용하는 추진기관, 저장 및 운송 등에 대한 연구개발 활동은 개별 기술분야별로 매우 활발하게, 경쟁적으로 수행되고 있음에도, 이러한 대안 기술 및 정책적 방법론들을 종합적으로 연계해서 살펴보거나, 이들의 유효성을 비교검토하는 기술전략 차원의 연구는 기업 차원의 차별화 전략 측면에서 주로 이루어지고 있는 것으로 파악된다.

장기적인 목표인 탄소중립의 구현에 있어, 현 시점 가장 중요한 화두는 '불확실성' 및 그럼에도 일정한 경로 및 방법을 선택해야 하는 상황에서 발생할 수밖에 없는 리스크로 볼 수 있다. 최근 이러한 불확실성에 대한 논의가 거시적인 감축경로 및 시나리오 분석 연구 등을 시작으로 점차 영역을 확대하고 있다. 이창훈 외(2021)는 관련 기술의 진화·발전, 환경의 변화 등에 따른 기존 기술대안 및 이를 적용한 감축경로에 대한 유효성 검토와 반영, 이를 위한 '탄소중립' 이행점검체계 구축의 필요성을 제시하였으며, 현재 상용화되었으나 지속적으로 발전하고 있는 탄소중립 기술, 상용화되지 않은 기술 중 핵심기술을 선별하여 아래와 같이 제시한 바 있다.[6)]

6) 이창훈 외(2021); 안용성 외(2022) p.103 재인용

〈표 1-5〉 탄소중립 구현의 핵심기술 선별의 사례

구 분	내 용
배터리	• 전기자동차 배터리, 전력 저장장치
재생에너지	• 고효율 저비용 태양광, (부유식) 해상풍력
계통 유연화	• 가상관성 등
수소환원 제철	-
탄소 포집, 저장 및 이용	• 탄화수소 합성 기술 등
수소 생산, 저장 및 수송	• 암모니아 전환 및 재추출 기술 포함
수소 이용	• 수소 모빌리티, 수소 터빈
대기 중 탄소 직접 포집 (DAC)	-

자료: 이창훈 외(2021); 안용성 외(2022) p.103 재인용

기술 수준 및 격차분석 등과 관련한 주요 선행연구는 특정 기술의 수준 평가를 위한 방법론 또는 이를 시범 적용, 실증하려는 연구에 그치거나, 본 연구와 연관 정도가 상대적으로 높은 친환경·녹색 기술의 경우에도 거시적인 유형 분류에 따른 기술군의 평가에 국한하여 수행되었다. 특히 신현하 외(2023)의 경우, 최근 탄소중립 구현을 위한 과학기술 전반에 대한 국제협력 R&D 투자현황 및 협력동향에 대한 조사·분석을 통해, 국내 탄소중립 기술의 경쟁력 확보를 위한 시사점을 도출하는 등, 매우 유효한 연구 성과를 제공하고 있다.

또한, 기술 혁신 및 역량 강화를 위한 기존의 기술 협력 관련 연구들은 정태적 패러다임에 그치지 않고 추가적인 모형 설계를 통해 동태적 모형을 적용·검증하는 등 매우 유의미한 연구성과를 나타내고 있어, 해양 탄소중립 과학기술의 해운·항만 부문의 기술 유형 및 세부 기술항목을 Taxonomy의 형태로 제시하고, 이들 체계에 따른 수준평가 및 격차 분석을 시도하는 본연구에 방법론 측면에서 유효한 선택지를 제공하고 있다.

〈표 1-6〉 선행 연구 검토

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
기술협력	※※※ 1	• 과제명: 기후기술협력 사업의 협력국 선정 연구 • 연구자(연도): 김제원·이원아·신종석·엄다예·배크리스탈·손지희(2021) • 연구목적: 국내에서 추진하는 기후기술협력의 효과성 향상을 위한 중점협력국 선정	• 문헌조사 및 분석 • 분석적계층과정(AHP)	• AHP 적용 선행사례 검토 • AHP 설문지 구성; 중점협력국 선정지표(안) 도출 • 선정지표 및 가중치 산정 결과 분석
	※※※ 2	• 과제명: 탄소중립 과학기술 국제협력 R&D 현황: 감축부문 국가연구개발사업을 중심으로 • 연구자(연도): 신현하·이원아·전은진·손지희·안세진·이종석(2023) • 연구목적: 탄소중립 분야의 과학기술 국제협력 R&D 투자현황 및 협력동향에 대한 조사·분석을 진행하여, 국내 탄소중립 기술경쟁력 확보를 위한 시사점 제공	• 문헌조사 및 분석 • 조사·분석 대상 데이터셋 추출 및 구축	• 최근 5년간('17~'21) 의기후기술 국가연구개발사업을 대상으로, ① 탄소중립 분야 세부사업 및 과제 선정 후, ② 지원목적이 국제협력에 해당하는 세부사업 및 과제를 추출하여 탄소중립 과학기술 국제협력 R&D 투자현황 및 협력동향 조사·분석 수행
	3	• 과제명: 국별·기술별 과학기술 국제협력 현황점검 및 추진전략 –공공부문을 중심으로 • 연구자(연도): 홍성범·정성철·이명진·최영식·임덕순(2000) • 연구목적: 국제과학기술협력 정책과 전략의 혁신을 위해, 과학기술 협력현황을 파악·평가하고, 대상국별, 협력대상기술별 협력수요를 바탕으로 기술협력 현황과 문제점을 분석하여, 새로운 국제과학기술협력전략과 실질적인 협력 프로그램 도출	• 문헌조사 및 분석 • 과학기술 분야별 전문가 대상 설문조사, 분석	• 과학기술 국제협력의 개념적 이해 • 과학기술 국제협력현황 및 향후 추진방향:설문조사 결과를 바탕으로 기술분야별 국제협력 현황 및 향후 추진방향 도출

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
	4	• 과제명: 기술협력 파트너 다양성과 혁신성과에 대한 연구 • 연구자(연도): 김현창·배영임(2017) • 연구목적: 기업이 다양한 파트너 유형과 협력하는 것이 혁신성과에 도움이 되는지, 이 과정에서 흡수역량(absorptive capacity)과 전유성(appropriability)의 조절효과 분석	• 문헌조사 • 흡수역량, 전유성에 대한 조절효과 실증분석	• 연구가설 도출(기술협력 파트너 다양성과 혁신성과; 기술협력과 흡수역량; 기술협력과 전유성) • 기술혁신조사(KIS) 제조업 부문 2010년도 자료 활용, 실증분석 모형 설계 및 분석
	5	• 과제명: EU FP 7차 사례분석을 통해서 살펴본 국제기술협력 프로세스 모형에 관한 연구 • 연구자(연도): 김진숙(2014) • 연구목적: 국제기술협력 평가단계에서 하부프로세스 모형 개발	• 문헌조사 • 프로세스 모형 개발 및 실증 분석	• 프로세스모형 개발을 위한 이론적 배경 검토 • 국제기술협력 평가단계의 하부프로세스 모형 • 사례분석: EU FP 7차 제안서 평가단계
	6	• 과제명: 거래비용이론 관점에서 살펴본 EU권 국제기술협력 정책적 함의 • 연구자(연도): 김진숙(2011) • 연구목적: 우리 정부가 추진하는 EU권과의 국제기술협력 중 주를 이루는 EU FP과 EUREKA에 대한 정책적 함의 도출	• 문헌조사 • 국내외 국제기술협력 전문가와 인터뷰 및 심층면담 • 사례별 비교분석	• EU권 국제기술협력 현황 • 네트워크 이론 및 거래비용이론 검토 • 정부의 EU 국제기술협력 정책 비교분석
	7	• 과제명: EU의 FP과 EUREKA 국제기술협력에 관한 연구 • 연구자(연도): 김진숙(2011) • 연구목적: EU와의 국제기술협력을 위한 주요 시사점 도출	• 문헌조사 • 사례별 분석	• EU의 일반적인 기술혁신정책 현황 • EU의 국제기술협력 종합 프로그램 사례별 조사, 분석 • EU권과의 국제기술협력 대안
	8	• 과제명: 과학기술 국제협력 성과제고에 관한 연구 • 연구자(연도): 김영인·이병민(2009)	• 문헌조사 • 성과평가 모형 설계 및 추이 분석	• 과학기술 국제협력의 개념 및 특성 • 과학기술국제화사업의 성과분석

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		• 연구목적: 교육과학기술부의 과학기술국제화사업을 중심으로 성과 및 효율성 분석을 통하여 과학기술국제화사업의 성과제고방안 제안		• 과학기술국제화사업의 성과제고 방안
	9	• 과제명: The globalization of technology and its implications for developing countries–Windows of opportunity or further burden? • 연구자(연도): Archibugi, D. (2003) • 연구목적: 기술의 세계화(globalization of technology)의 개념을 새롭게 정의하고, 개도국의 참여 양상에 대한 분석을 통해 개도국의 정책적 시사점 제시	• 문헌조사 • 기존통계 비교분석	• Globalization of technology의 양상 및 유형 분류 • 개도국의 참여 양상 분석 • 국제 기술협력의 정책적 시사점
기술수준평가	※※※ 1	• 과제명: 국제공동연구 우선지원 분야 선정 방법론: 산업기술수준조사와 주성분 분석 활용을 중심으로 • 연구자(연도): 이철주·이정우(2022) • 연구목적: 산업기술수준조사와 주성분 분석을 활용하며 국내 기술 경쟁력, 기술의 중요성 및 정책 부합성을 확인하는 3개 단계를 거쳐 국제공동연구 우선 지원 분야 선정 방법론 제안	• 문헌조사 • 사례연구별 비교분석	• 국제공동연구 우선 지원 분야 선정 방법론 현황 • 국제공동연구개발 우선 지원 분야 선정 사례 분석(기술 분류; 기술 경쟁력 분석; 기술 중요성 분석; 정책 부합성 분석)
	※※※ 2	• 과제명: 기술수준평가를 위한 성장곡선 모형의 적용 적합도 및 기술변화 패턴 비교에 관한 연구 • 연구자(연도): 박병무·박주찬(2016) • 연구목적: 동태적 기술수준평	• 문헌조사 • 사례연구별 비교분석 • 동태적 기술수준평가(Gompertz, Weibull) 모형	• 기술성장 곡선 이론 검토 • 동태적 과학기술수준평가 사례연구 비교분석 • 동태적 기술수준평가(Gompertz, Weibull) 모형 적용 • 기술변화 형태의 동질

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		가에서 가장 범용적으로 활용되어온 Gompertz모형에 머무르지 않고 Weibull모형의 적용을 추가로 시도하여 두 모형 적용결과 논의, 적용 결과를 토대로 동일 분야 기술변화의 패턴에 대한 본질적 유사성과 상이점 검증		성 검증: 적용 결과를 토대로 시범적인 차원에서 비교 상대국(최고기술보유국)과의 동일 분야 기술변화의 패턴에 대한 본질적 유사성, 상이점 논의
	3	• 과제명: 우리나라의 중점녹색기술수준 조사·분석 및 시사점 • 연구자(연도): 홍미영·황기하·홍정석·이경재(2013) • 연구목적: 우리나라의 중점 녹색기술(27개)의 기술수준 및 기술격차 등을 종합적으로 조사·분석하여, 녹색기술 분야 과학기술정책 수립에 활용	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 국내·외 기술수준평가 사례조사·분석 • 중점 녹색기술수준 조사 설계 • 중점 녹색기술별 기술수준 및 기술격차년수 • 중점 녹색기술별 한국과 최고기술보유국, 중국과의 기술격차 변화 등
	※※ 4	• 과제명: AHP를 활용한 기술합성 및 동태적 분석 방법을 통한 과학기술수준 평가 • 연구자(연도): 황준범·강보영·박병무·오은호(2012) • 연구목적: 기존 과학기술 수준평가 방법에 대한 재조명을 바탕으로 새로운 개념 및 이론이 배경이 되는 수준평가 모형을 제안하고, 이에 대한 시범적 실증사례 검토를 통해 연구의 실효성 점검	• 문헌조사 • 동태적 접근 모형 및 AHP 분석모형	• 과학기술 수준평가 방법론 검토 • 기존조사방식의 한계 • 동태적 접근 및 모형 제안 • 동태적 접근 모형 및 AHP를 통한 기술합성의 시범 적용
	5	• 과제명: 기술력 격차를 보이는 국가 간의 전략적 R&D 정책의 후생효과분석 • 연구자(연도): 구본원·김영한(2020) • 연구목적: 경쟁국가들간의 다양한 기술력 격차수준을 연속변수로 고려한 분석모형에 기반하여, R&D 지원 정책의 전략적 효과분석과 함께, 비	• 문헌조사 • 사회후생효과 분석	• 비협조적인 R&D 보조금 정책하에서의 사회후생효과 분석 • 협조적인 R&D 보조금 정책하에서의 사회후생효과 분석 • R&D 정책의 협조적 정책조정체계가 유지될 수 있는 유인체계 분석

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		R&D 정책의 후생효과 분석		
	6	• 과제명: 새로운 기술수준 측정 방법론 개발에 대한 이론적 접근 • 연구자(연도): 박병무(2007) • 연구목적: 선진기술과 우리기술의 위상을 입체적으로 비교·분석하고, 비교정태(比較靜態: comparative statics) 혹은 동태적(動態的: dynamics) 측정을 위한 이론적 개념 및 기법 개발 모색	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 현행 기술수준 측정방법과 사례 검토 • 현행 방법의 한계 및 극복방안 • 성장곡선 이론의 적용: 로지스틱 함수(logistic function); 곰퍼츠 함수(Gompertz function) • 차세대 성장동력 기술의 가상적 성장곡선 적용
시나리오 구성 및 분석	※※※ 1	• 과제명: 탄소중립 시나리오 작성 및 이행점검체계 구축을 위한 기획 연구 • 연구자(연도): 이창훈 외(2021) • 연구목적: 정부의 탄소중립 시나리오 작성을 위해, 핵심지표를 선별하는 한편, 우리나라 탄소중립 목표 추진에 적합한 이행점검체계 제시	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 탄소중립 시나리오의 핵심지표 선별 • 온실가스 감축 이행점검에 대한 국내외 사례 검토 및 시사점 도출 • 2050 탄소중립 이행점검 체계(안) 제시
	2	• 과제명: 한국의 2050년 탄소중립 시나리오 문헌 비교분석 및 시사점 • 연구자(연도): 박년배(2022) • 연구목적: 정부의 탄소중립 시나리오와 국내 탄소중립 시나리오 연구 등을 종합적으로 비교·분석하여, 2050년 탄소중립 및 2030년 감축목표 이행전략에 시사점 제공	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 온실가스 배출량의 탄소중립 경로 비교분석 • 최종에너지 소비 전망 비교분석 • 2050년 발전량 비교분석 • 2050년 1차에너지 공급 전망
	3	• 과제명: 세계 및 주요국의 탄소중립 시나리오 수립 동향 및 시사점 • 연구자(연도): 박년배(2021) • 연구목적: 주요국의 에너지 부문 탄소중립 시나리오들의 배출량 경로와 에너지수급 전망,	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 전지구적 차원 탄소중립 시나리오 동향분석 • 주요국가 탄소중립 시나리오 동향분석

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		주요 감축수단, 비용, 연구방법론 등을 검토함으로써, 우리나라 탄소중립 시나리오 및 이행전략에 대한 시사점 도출		
	4	• 과제명: 기후변화 대응이 산업에 미치는 영향 • 연구자(연도): 박종욱·이나윤(2021) • 연구목적: 2000년 이후 우리나라의 산업별 이산화탄소 배출량 현황을 검토하고, 이를 바탕으로 탄소가격정책(탄소세)의 산업별 영향을 생산비용 및 산업구조 측면에서 분석	• 시나리오 재설정 • 모형 구성 및 균형분석	• 2001~18년중 산업별 이산화탄소 배출량 시계열을 구축; 산업연관분석 적용 • 산업별 이산화탄소 배출 현황과 증감요인 분석 • 탄소배출규제의 산업별 생산비용 및 산업구조에 미치는 영향분석
	※※ 5	• 과제명: Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector • 연구자(연도): IEA(2021) • 연구목적: 2050년까지 에너지사용 부문에서 탄소중립 목표를 달성하기 위한 시나리오 제시	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위한 시나리오 구성 • 탄소중립 목표 달성을 위한 부문별 핵심기술 및 지표
	6	• 과제명: Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050 • 연구자(연도): IRENA(2020) • 연구목적: 2050년 1인당 1.1톤 배출(에너지 관련 이산화탄소 배출)을 중심으로, 재생에너지 및 탈탄소화 등을 통해 2060년까지 이를 제로 또는 순제로로 감축하는 방안 검토	• 문헌조사 • 감축경로 구성 및 시나리오별 비교분석	• 감축경로에 따른 시나리오 구성(BES; PES; TES; DDP) • 탄소중립 목표 달성을 위한 부문별 감축 수준 및 경로 • 주요 지표에 대한 해당 연구와 선행연구결과 비교분석 • 시나리오에 따른 비용 편익 분석
	※※ 7	• 과제명: Net Zero Europe • 연구자(연도): McKinsey & Company(2020) • 연구목적: 유럽이 2050년에 탄소중립 목표를 달성하는 데	• 문헌조사 • 사례별 비교분석 • 비용최적화 모형	• 부문별 예상 감축 경로 분석 • 탄소중립 목표를 달성하기 위한 최소비용 시나리오 구성, 분석

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		필요한 최소비용 경로 제시		• 최소비용 경로에 의한 부문별 배출량; 기술요소별 감축량 • 탄소중립 목표 달성을 위한 부문별 비용
	※※ 8	• 과제명: Towards Net-Zero Emissions in the EU Energy System by 2050 • 연구자(연도): EU Commission(2020) • 연구목적: 유럽 에너지 시스템(EU energy system)의 2030년, 2050년 온실가스 감축경로 및 시나리오 구성	• 문헌조사 • 주요 시나리오별 비교분석	• 유럽 에너지 시스템(EU energy system)의 2030-2050년 시나리오 관련 선행 연구 비교분석 • EU의 온실가스 감축 시나리오; 2030, 2050 • EU의 온실가스 감축 시나리오별 핵심기술 및 부문별 지표 제시
과학기술전략	1	• 과제명: 탄소중립에 대응한 해양과학분야 OECD 국가유형의 지속과 변화 • 연구자(연도): 서인석·이미애·이유현(2022) • 연구목적: 해양분야의 탄소중립에 대한 OECD 국가의 대응방법과 그 수준을 살펴보고, 이를 유형화 시도	• 문헌조사 • 사례별 비교분석 • 퍼지셋 이상형 분석; 유형화 분석	• 국내외 해양분야 탄소중립 대응 현황 • 해양분야 탄소중립 대응 유형 검토: 규제 vs. 기술개발 • 분석 대상에 대한 퍼지 집합 이론 적용, 유형화 • OECD 국가별 유형변화 추이 분석
	2	• 과제명: 해양 과학기술분야 탄소중립 정책에 대한 OECD 국가유형의 지속과 변화 • 연구자(연도): 서인석·이유현(2021) • 연구목적: OECD 국가를 대상으로 탄소중립에 대응할 수 있는 해양과학기술정책 수준의 유형화	• 문헌조사 • 퍼지셋 이상형분석	• 탄소중립을 향한 해양분야 패러다임과 유형 구분 • 해양 탄소배출: 국제마린벙커 CO2 배출량 퍼지셋(역코딩) 추이분석 • 해양규제: 해양보호면적비율 퍼지셋(역코딩) 추이분석 • 해양 R&D 투자: 해양 RD&D(Research, Development and Demonstration) 총예산 퍼지셋(역코딩) 추이분석

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
	※※ 3	• 과제명: 한국형 녹색 분류체계(K-Taxonomy) 향후 과제 • 연구자(연도): 임형석(2022) • 연구목적: 주요 각국이 구축하고 있는 녹색 분류체계를 평가하고, 이에 근거하여 한국형 녹색 분류체계(K-Taxonomy) 구축을 위한 과제 도출	• 문헌조사 • 사례별 비교분석	• 글로벌 녹색 분류체계 현황 비교분석 • 국내 녹색 분류체계 상세 평가 • 한국형 녹색 분류체계(K-Taxonomy) 구축을 위한 과제 도출
	4	• 과제명: 국내외 탄소중립 관련 정책 및 기술 동향 • 연구자(연도): 최현진(2022) • 연구목적: 국내외 탄소중립 관련 주요 핵심 정책 현황을 살펴보고, 이를 통해 탄소중립의 실질적 달성을 위한 과학기술 개발 및 관련 투자 방향 고찰	• 문헌조사 • 정책사례별 비교분석	• 국내외 탄소중립 정책 동향 • 국내외 탄소중립 핵심 기술 추진 현황 분석
	5	• 과제명: EU 운송분야 탄소중립 정책과 배터리 산업 • 연구자(연도): 안상욱(2022) • 연구목적: EU의 운송분야 기후변화 대응과 배터리산업 육성정책이 한국에 주는 함의 도출	• 문헌조사 • 시장 전망 및 예측	• EU 운송분야 탄소중립 정책, EU의 역내 배터리가치사슬 육성정책 현황 • EU 배터리 시장 추이에 따른 한국기업의 대응 전략
	6	• 과제명: 탄소중립을 위한 해양그린수소 육성 전략 • 연구자(연도): 이은창·이슬기·허선경(2022) • 연구목적: 해양에너지를 이용한 그린수소 생산을 위한 주요국의 정책과 프로젝트를 살펴보고, 우리나라의 '청정수소경제로의 대전환 목표'를 달성하기 위한 해양그린수소 전략 제안	• 문헌조사 • 사례별 분석	• 우리나라의 탄소중립 추진과 해양그린수소 현황 • 주요 국가의 해양그린수소 기술개발 현황 및 정책 현황 • 주요 해양그린수소 프로젝트 사례 분석 • 해양그린수소 국내 보급 확대 전략
AHP	※ 1	• 과제명: Applying the Analytic Hierarchy Process in healthcare	• 문헌조사 • 선행 적용사례별 비교분석	• Analytic Hierarchy Process (AHP)의 이론적 배경

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		research: A systematic literature review and evaluation of reporting • 연구자(연도): Schmidt, K., Aumann, I., Hollander, I., Damm, K. and vonder Schulenburg, J. M. G.(2015) • 연구목적: 다기준 의사결정(Multi-criteria decision making)을 위한 AHP 분석방법론의 유효성 검토		• 선별된 분석대상군에 대한 AHP 분석방법론의 적용 추이 분석 • 적용목적의 유형 분류, 분석
	2	• 과제명: The application of analytic hierarchy process in higher-learning institutions: a literature review • 연구자(연도): Anis, A. and Islam, R.(2015) • 연구목적: 1992년~2013년간 AHP 분석방법론을 고등교육기관 관련 연구에 적용한 사례 검토, 비교분석을 통해, 해당 분야 적용가능성 분석	• 문헌조사 • 선행 적용사례별 비교분석	• Analytic Hierarchy Process (AHP)의 이론적 배경 • 33개 분석대상 선행연구의 유형 분류 • 고등교육기관 평가툴로서의 유효성 검토
	3	• 과제명: The role of the analytic hierarchy process(AHP) algorithm in health care services • 연구자(연도): Citrawati D.H.D. ·Widyawati M.N.·Suryono S.(2020) • 연구목적: 보건분야 AHP 분석방법론 적용 가능성 검토, 제시	• 문헌조사 • 선행 적용사례별 비교분석	• 과거 10여년 간 보건 분야 AHP 분석방법론 적용 선행연구사례를 검토; 주요 내용, 연구 목적, 성과 및 지표 • 선정된 주요 선행연구의 AHP 분석방법론 적용 사례별 비교분석
관련 규범	1	• 과제명: 탄소중립기본법의 의미와 향후 법적 과제 • 연구자(연도): 한상훈, 마아랑 (2021)	• 문헌조사, 분석	• 탄소중립기본법의 주요 내용 검토 • 탄소중립기본법의 의의 및 한계 도출

구 분		연구 목적	연구방법	주요 연구 내용
		• 연구목적: 「탄소중립·녹색성장 기본법」의 제정 의의 및 한계 검토를 통해 향후 입법과제 제시		• 향후 입법과제 제시
	2	• 과제명: 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법의 제정 의의와 그 이행을 위한 향후 과제 • 연구자(연도): 이준서(2021) • 연구목적: 탄소중립기본법의 주요 내용 분석을 통해, 정책과 법제 간의 연계를 확보하기 위한 고려사항, 녹색성장법의 한계를 극복하기 위한 법적 과제 제시	• 문헌조사 • 법리 분석	• 탄소중립기본법의 제정 의의, 내용 분석을 통한 한계 도출 • 탄소중립기본법의 이행을 위한 향후 과제 도출

※ 선행연구 활용 중요도(※~※※※)
자료: 저자 작성

2. 본 연구의 차별성

본 연구는 '2050 해양 탄소중립' 구현을 위한 실체적 방법론, 즉 과학기술 및 이를 활용한 정책적 조치의 현황, 이들의 유효성 및 변화 추이, 전망 등을 검토하고 이를 바탕으로 과학기술 및 제도환경의 변화에 따른 불확실성을 규명함으로써, 이러한 불확실성에 기인하는 현행 탄소중립 관련 과학기술 정책의 한계 및 이를 해결하기 위한 전략적 접근방안으로 보다 실효적인 국제협력 방안을 도출하는 데에 목적을 두고 있다.

해운·항만 부문의 탄소중립 추진을 위한 정책 및 과학기술의 수요조사, 이에 따른 대안 기술 분야별 수준 평가 등, 본 연구를 통해 도출된 조사·평가 결과는 최근 활발하게 시작되고 있는 탄소중립 이행 경로 및 시나리오의 신뢰도 제고를 위한 가장 최신의 정확한 기초 근거자료를 제공할 수 있다. 또한, 현재의 기술 패러다임에서는 달성하기 어려운 장기적 목표를 실

행하기 위해 혁신적인 기술 패러다임에 의한 새로운 가능성의 출현이 요구되는 현재의 기술 발전 구도에서, 협력을 통한 시너지를 창출하거나 전략적 공조를 통해 대안기술의 적용성을 확대하는 등, 미래 시장의 형성을 주도할 수 있는 전략적 시사점을 제공할 수 있다.

〈표 1-7〉 본 연구의 차별성

구 분	선행 연구 검토		
	연구 목적	연구방법	본 연구
연구 목적	• 과학기술 협력방안 도출 • 기술수준 평가모형의 실증 • 탄소중립 시나리오 구성 및 분석 • 탄소중립 구현을 위한 해양과학기술정책/친환경 기술의 유형구분	• 김제원·이원아·신종석·엄다예·배크리스탈·손지희(2021) • 신현하·이원아·전은진·손지희·안세진·이종석(2023) • 이철주·이정우(2022) • IEA(2021), McKinsey & Company(2020), EU Commission(2020) • 이창훈 외(2021), 박병무·박주찬(2016) • 박종욱·이나윤(2021) • 서인석·이유현(2021) • 임형석(2022) 등	• 해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 및 제도환경의 불확실성 규명 • 불확실성으로 인한 위험을 최소화 하기위한 국제협력 전략방안 도출
연구 대상	• 과학기술 협력사업 사례 • 국내 산업기술수준조사 등의 기술자료 • 국내외 탄소중립 경로 및 시나리오 • 한국형 녹색 분류체계(K-Taxonomy) 등		• 해양 탄소중립 과학기술 국제협력을 위한 국내외 여건 분석 – 해운·항만 탄소중립 관련 국내외 정책·기술 동향 – 해운·항만 분야 탄소중립 추진을 위한 정책·기술 수요조사 – 수요조사 결과에 따른 대안기술 분야별 기술 수준·격차 분석 – 해양 탄소중립 과학기술 현안 및 시장대응 시나리오 분석
연구 방법	• 문헌조사 • 사례별 비교분석 • 동태적 기술수준평가(Gompertz, Weibull) 모형 등의 성장곡선 이론 활용 • 통계분석		• 문헌조사 및 사례별 비교분석 • 델파이(Delphi) 기법 적용 설문-분석모형 구성, 수행 • 기술주기/수준평가, 여건분석(기술분야별 한-유럽 전문가 대상 설문조사,분석)

구 분	선행 연구 검토		
	연구 목적	연구방법	본 연구
			• 한-유럽 전문가 자문위원회 구성·운영, 전문가 대상 심층 인터뷰

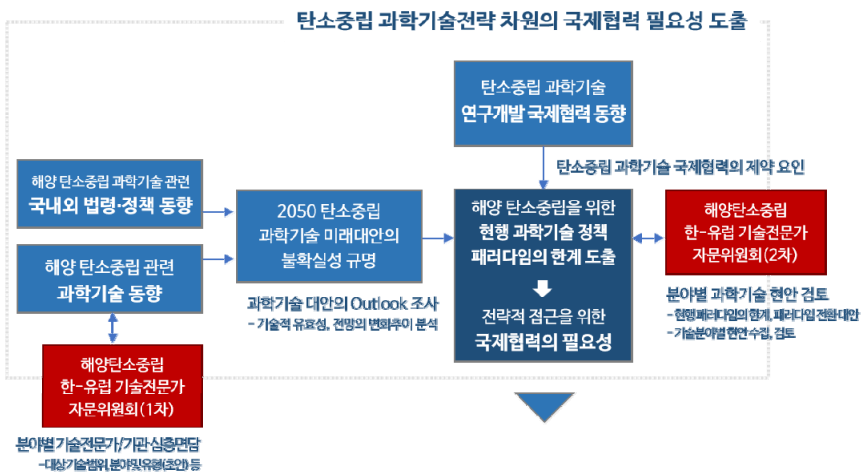
자료: 저자 작성

02
해양 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 관련 동향

제2장에서는 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진을 위한 국내외 여건을 분석하기에 앞서, 탄소중립 구현의 도구인 과학기술 전략, 미래 기술의 연구개발 및 협력을 위한 국내외 주요 규범에 대한 검토를 통해, 현재 우리의 정책과정에서 현시점 기준 과학기술 및 미래 혁신기술의 불확실성에서 기인하는 한계를 확인하였다. 또한, 현행 과학기술 패러다임의 한계를 해결하기 위한 전략적 방안으로서의 국제협력의 필요성을 도출하였다.

이를 위해, 탄소중립 구현을 위한 미래 기술의 연구개발을 위한 국내외 주요 규범을 분석하여, 이들을 관통하는 주요 개념 및 원리를 파악하는 한편, 이를 실현하기 위한 '과학기술'의 최신 동향, 그리고 선도적인 과학기술 연구개발을 위한 국제협력 사례를 조사·검토하였다.

〈그림 2-1〉 국내외 해양 탄소중립 과학기술 협력·정책 동향 검토



자료: 저자 작성

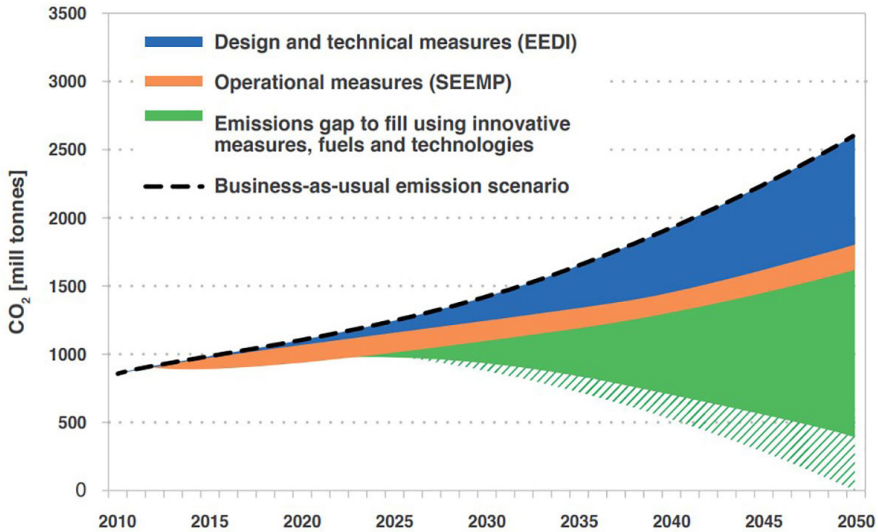
제1절 탄소중립 과학기술 관련 국내외 법령·정책 동향

1. 국제해사기구(IMO)

국제해사기구(IMO)는 2018년 「선박의 온실가스 배출 감소에 관한 초기 IMO 전략(Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships)」을 채택하며, 국제 해운 분야에서 발생하는 온실가스 배출량 저감을 위한 전략적 방향을 설정하였다. 이에 따르면, 2050년까지 국제 해운의 연간 온실가스 배출을 2008년 대비 최소 50% 감축하는 것을 목표로, 이를 실현하기 위한 단기[7] 및 중장기 후보조치[8]를 제시하였다.

7) 2018~2023년 사이 합의 가능한 조치, EEDI, SEEMP, EEXI(Energy Efficiency Existing Ship Index), 선박 속도 최적화 및 저감, 기술협력활동 강화 등에 대한 내용 포함

〈그림 2-2〉 IMO의 선박 온실가스 배출 저감 경로



자료: IMO(2020), IMO Action to Reduce Greenhouse Gas Emissions from International Shipping (검색일: 2023.4.17.)

2020년 발간한 '제4차 IMO 온실가스 연구(Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020)'는 선박의 배출을 저감하기 위한 기술적 방안 44가지를 제시하고 있다. 이들 배출 저감 기술은 다양한 선행연구 검토를 바탕으로 도출된 것으로, 에너지 절감, 재생 에너지 사용, 대체 연료 사용, 속도 감소 등, 총 4개 유형으로 분류하였다. 다만, 해당 기술 리스트는 한계 저감 비용 곡선(MACC; Marginal abatement cost curve)을 제시하기 위해 도출한 것으로, 충전식 배터리 장착 모터 선박, 탄소 포집 등 일부 정보가 미흡한 잠재 기술에 대해서는 포함하지 않고 있다. 총 44개 기술 중 에너지 절감(23개)과 대체연료 사용(16개)이 대부분을 차지하고 있다는 점에서, 당분간 선박의 탄소중립 기술 시장의 방향은 에너지 효율 개선 또는 친환경 대체연료를 중심으로 전개될 것으로 예상된다.

8) 2023~2030년 사이 합의 가능한 조치, 시장기반조치에 대한 내용 포함

〈표 2-1〉 IMO: 선박의 온실가스 배출 저감 기술 분류

구 분	분 류	내 용
에너지 절감	메인 엔진 개선	• 메인 엔진 튜닝 • 커먼 레일 • 전기 엔진 제어
	보조 시스템	• 주파수 변환기 • 펌프 및 팬 속도 제어
	스팀 플랜트 개선	• 스팀 플랜트 운영 개선
	폐열 회수	• 폐열 회수 • 보조 엔진의 배기가스 보일러
	프로펠러 개선	• 프로펠러 러더 업그레이드 • 프로펠러 업그레이드(노즐, 팁 윙렛) • 프로펠러 보스 캡 핀 • 역회전 프로펠러
	프로펠러 정비	• 프로펠러 성능 모니터링 • 프로펠러 연마
	공기 윤활	• 공기 윤활
	선체 코팅	• 저마찰 선체 코팅
	선체 유지 보수	• 선체 성능 모니터링 • 선체 브러싱 • 선체 하이드로 블라스팅 • 드라이도크 풀 블라스트
	선체 개구부 수류 최적화	• 선체 개구부 수류 최적화
	초경량 선박	• 초경량 선박
	보조 전력 수요 절감	• 보조 전력 수요 절감(저에너지 조명 등)
재생에너지 사용	풍력	• 토잉 카이트 • 풍력(고정 돛 또는 날개) • 풍력 엔진(플레트너 로터
	태양광 패널	• 태양광 패널
대체연료 사용	저탄소 연료	• LNG + ICE or FC • 메탄올 + ICE • 에탄올 + ICE

구 분	분 류	내 용
	무탄소 연료	• 수소 + ICE or FC • 암모니아 + ICE or FC • 합성 메탄 + ICE or FC • 바이오매스 메탄 + ICE or FC • 합성 메탄올 + ICE • 바이오매스 메탄올 + ICE • 합성 에탄올 + ICE • 바이오매스 에탄올 + ICE
감속	속도 저감	• 속도 10% 감소

자료: IMO, Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020(검색일: 2023.6.8.), p. 468.

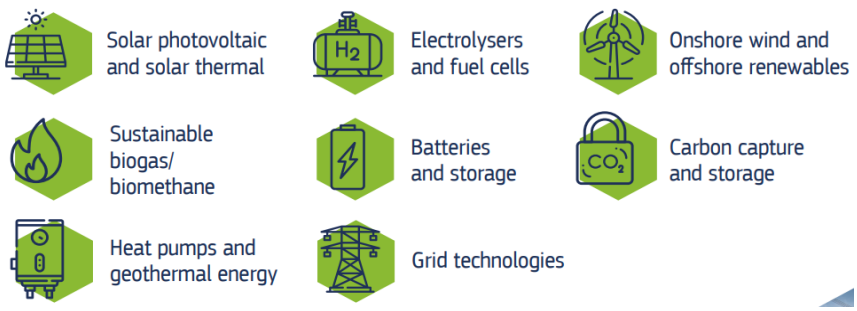
2. 유럽

유럽연합(EU)은 2019년, 2050년 탄소중립 달성을 목표로 이를 위한 비전 및 정책추진 방향을 제시하는 「유럽 그린딜(European Green Deal)」을 발표하는 등 선제적인 정책방향을 설정, 추진하고 있다. 또한 이러한 정책 추진의 일환으로, 구체적인 실행방안을 담은 정책 패키지 'Fit for 55'를 2021년 발표한 데 이어, 2023년에는 친환경 기술 육성 전략을 포함하는 「그린딜 산업계획(Green Deal Industrial Plan)」을 발표하였다.

이어서 2023년 3월에는 「그린딜 산업계획」의 추진을 위한 「탄소중립 산업법(Net-Zero Industry Act)」 초안을 발표하였다. 해당 법안은 EU의 '탄소중립 전략기술(Strategic Net-zero Technologies)'을 선정·제시하고, 이들 기술의 육성을 위한 정책적 지원 방안, 즉 규제 완화, 보조금 지급, 행정 및 인허가 절차 간소화 등에 대한 사항을 규정하고 있다. 법안은 ① 태양광· 태양열 기술, ② 전해조 및 연료전지 기술, ③ 육풍 및 해풍 재생 기술, ④ 지속가능한 바이오가스/바이오메탄 기술, ⑤ 배터리 및 저장기술, ⑥ 탄소 포집 및 저장기술(CCUS; Carbon Capture, Utilization,

Storage), ⑦ 히트 펌프 및 지열 에너지 기술, ⑧ 그리드 기술, 총 8가지 탄소중립 핵심기술을 선정하여 제시하고 있으나, 그 외에도 지속 가능한 대체 연료 기술 등 여타 탄소중립 기술 역시 해당 법안에 의해 지원받을 수 있다.[9)]

〈그림 2-3〉 EU: 「탄소중립 산업법」(초안)의 탄소중립 전략기술



자료: European Commission(2023.3.22.), Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs(검색일: 2023.6.3.)

이와 더불어, 유럽연합은 탄소중립 기술 개발 및 투자에도 적극적 추진 의지를 천명하고 있다. 「전략계획 2020-2024; 연구 및 혁신(Strategic Plan 2020-2024; Research and Innovation)」, 「탄소중립 산업법(Net-Zero Industry Act)」 초안 등에서, Horizen Europe, Innovation Fund 등의 연구개발 재원 프로그램을 활용하여 역내 회원국들의 탄소중립 기술 연구개발 및 협력에 대한 지원을 확대하고 있다.

해운·항만 부문에 대해서는, 해운 부문을 ETS(배출권 거래제)에 점진적으로 편입하고, 대체연료 관련 인프라를 강화하는 한편, 재생에너지 지침 및 에너지 과세 지침 개정, IMO의 에너지 효율 개선기술 프로젝트에 대한 지원 등으로, 보다 유효한 기술적 방안의 본격 개발·적용에 의한 탈탄소화,

9) European Commission(2023.3.22.), Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs(검색일: 2023.6.3.)

이를 통한 탄소중립의 구현을 도모하고 있다. 또한 해운·항만 부문의 탈탄소화 이행을 위한 핵심 이행 요소로, 에너지 효율 개선 및 저탄소 연료 사용 확대를 추진하고 있다.[10].

한편 영국은 2008년, 「기후변화법(Climate Change Act)」을 제정하고 세계 최초로 탄소중립 목표를 법제화한 이래로, 탄소중립 이행을 위한 정책 및 기술 패러다임을 선도하고 있다. 2020년에는 탄소중립과 관련한 장기전략 「녹색 산업 혁명을 위한 10대 중점계획(The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution)」에서 영국의 탄소중립 구현을 위한 10대 중점분야를 제시하고, 영국이 집중적으로 육성하고자 하는 기술 및 산업 전략과 예산 지원 계획을 공표하였다.

〈표 2-2〉 영국: 탄소중립 구현을 위한 10대 중점분야

구 분	내 용
해상풍력 확대	• 해상풍력 용량 확대(에너지저장 등 스마트기술 활용)
저탄소 수소 개발	• 저탄소 수소 생산을 위한 연구개발 투자 확대
원자력 기술 향상	• 대규모 신규 원자력 프로젝트 지원 • 차세대 원자력 기술 투자 추진
무공해 차량 전환 가속화	• 무공해 차량 전환 지원 • 전기차·충전인프라 투자 확대 • 비용 효율적 무공해 대형 화물차 개발
친환경 대중교통, 자전거, 보행	• 대중교통, 자전거, 보행 인프라 확충; 지속가능한 교통수단 전환 가속화 • 대중교통 통행효율 개선 • 철도노선 전기화, 무공해 버스 도입
친환경 항공 및 해양 기술 개발	• 지속가능한 항공연료 활용 촉진 • 무공해 항공기 개발 • 미래형 공항 및 항만 인프라 개발 • 친환경 조선·해양 기술 투자 확대 • 수소 연료 보급 항만 구축

10) European Commission, Reducing emissions from the shipping sector(검색일: 2023.5.7.)

구 분	내 용
건물 에너지 효율 향상	• 에너지 효율 건물 표준 마련 • 저탄소 난방시스템 확대 • 가정 및 공공부문 에너지 효율 개선
CCUS 투자	• 산업 클러스터 내 CCUS 설립 지원 • CCUS 비즈니스 모델 개발 • 산업용 탄소 포집 및 수소 프로젝트 투자 활성화 • CCUS 인프라 개발
자연환경 보호	• 자연 보호 및 복원 프로젝트 추진 • 홍수 및 해안 방재 프로그램 투자
녹색금융 및 혁신	• 녹색기술 발전을 위한 신규 재원 개발 • 10대 Net-Zero Innovation Portfolio 기술 투자 : 해상풍력, 첨단모듈원자로, 에너지 저장 및 유연성, 바이오에너지, 수소, 주택, 직접 공기 포집 및 첨단 CCUS, 산업용 연료 전환, 에너지를 위한 인공지능과 같은 파괴적 기술(Distruptive Technologty)

자료: HM Government(2020.11.18.)The ten point plan for a green industrial revolution(검색일: 2023.6.13.), pp. 7~31.

영국 교통부는 2019년, 해운 부문의 온실가스 배출에 대한 국가계획 「청정해양계획(Clean Maritime Plan)」을 발표하고, 2050년까지 해운 부문의 배출 제로를 달성하기 위해 요구되는 기술적 방안을 제시했다.

〈표 2-3〉 영국: 해운 부문 배출제로 구현을 위한 기술적 방안

기술 분류	세부 기술
대체연료 추진선박	• 메탄올 • 수소 • 암모니아 • 바이오연료
비연료 추진선박	• 하이브리드화 • 완전 전기화 • Shore-power(cold-ironing) • 풍력(Sails, Flettner rotors, kites) • 태양광

기술 분류	세부 기술
선박 에너지 효율 옵션	• 러더벌브 • 공기윤활 기포 • 전류고정 프로펠러 덕트 • 베인휠 • 선체 스크러버 • 트림 최적화

자료: HM Government(2019.7.11.), Clean maritime plan: Maritime 2050 environment route map(검색일: 2023.6.13.), p. 14.

3. 미국

미국 바이든 행정부는 기후변화 대응을 주요 국정과제 중 하나로 선정하고, 관련 기술개발에 대한 투자·지원 근거를 마련 등 강력한 기후변화 대응 정책을 펼치고 있다. 특히, 「인플레이션 감축법(The Inflation Reduction Act)」[11]은 친환경·에너지 관련 산업에 대한 투자세액 공제 등 인센티브 지원과 관련된 내용을 규정하여 탄소중립 구현을 위한 연구개발 투자 유입을 본격 유도하고 있다.

한편, 백악관은 2021년 2월, 기후 위기 대응 및 일자리 창출 도모를 위한 혁신 정책 방향을 발표하였다.[12] 이를 통해 탄소중립 기술에 대한 R&D 투자 가속화를 위한 기후 혁신 실무 그룹(Climate Innovation Working Group) 운영 계획을 발표하고, 기후 혁신 실무 그룹이 추진할 10대 혁신 기술영역을 함께 제시하였다.

11) 2022년 8월 16일 발효.
12) The White House(2021.2.11.), Biden-Harris Administration Launches American Innovation Effort to Create Jobs and Tackle the Climate Crisis(검색일: 2023.6.22.)

〈표 2-4〉 미국: 기후 혁신 실무 그룹 선정 10대 혁신기술영역

구 분	내 용
건물	• 탄소중립 건축 자재를 활용한 탄소중립 건물
에너지 저장	• 기존 대비 1/10 가격 수준으로 에너지 저장
에너지 관리	• 무탄소 발전소 기반의 그리드 계획 및 운영 지원을 위한 에너지 시스템 관리 도구
수송	• 저비용의 무탄소 자동차·대중교통 시스템 개발
수송	• 항공기, 선박용 새로운 친환경 연료 • 항공기 및 선박 효율성 및 수송 관리 기술
냉난방	• 지구온난화를 유발하는 냉매 없는 냉동, 에어컨, 히트 펌프 시스템
산업 공정	• 철강, 콘크리트, 화학 및 기타 산업 배출물 포집을 통한 공정 저탄소화
수소	• 오염물질을 발생시키는 수소보다 저렴한 그린수소 생산
토양	• 대기중 CO2 제거 및 토지 저장을 위한 혁신적인 토양 관리, 식물학, 농업기술
CCUS	• 직접 포획 및 산업·발전시설 개조를 통한 CO2 포획을 통한 대체 제품 생산(CCU) 및 지하 저장(CCS)

자료: The White House(2021.2.11.), Biden-Harris Administration Launches American Innovation Effort to Create Jobs and Tackle the Climate Crisis(검색일: 2023.6.22.)

2022년 11월에는 '2050 탄소중립 목표 달성을 위한 미국의 혁신(U.S. Innovation to Meet 2050 Climate Goals: Assessing Initial R&D Opportunities)'[13] 보고서에서, 탄소중립 달성을 위해 집중이 필요한 유망기술 37가지를 제시하였다. 해당 기술들은 '탄소중립 게임체인저 실무그룹(Net-Zero Game Changers Working Group)'에서 선정된 결과물로, 이를 토대로 효율적인 건축 냉·난방, 탄소중립 항공, 탄소중립 전력 그리드 및 전기화, 핵융합 에너지, 탄소중립, 순환경제 실현을 위한 산업 생산품 및 연료의 5개 영역을 우선 추진 영역으로 선정하였다.

13) The White House, U.S. Innovation to Meet 2050 Climate Goals: Assessing Initial R&D Opportunities(2022.11.)(검색일: 2023.6.25.)

〈표 2-5〉 미국: Net-Zero 탄소중립 유망 기술

기술 분류	세부 기술
전기 시스템	• 첨단 분산 시스템: 데이터, 최적화, 제어 • 저탄소, 저비용 장기 에너지 저장 • 탄소 중립 전력 그리드: 첨단 송전 계획, 운영 및 최적화 • 에너지 기반시설을 위한 통행권 재목적화
탄소중립 연료	• 효율적, 대안적 바이오연료 생산 • 탄소중립 전기연료 • 탄소중립 수소 및 암모니아 • CO2 및 수소 수송을 위한 파이프라인 용도전환
탄소 포집 활용 및 저장	_
순환 경제 및 안전한 공급망	_
수송	• 첨단 배터리 • 커넥티드/자율주행차 • 전기/하이브리드 항공기 • 초고속 열차 및 전기 철도 • 저탄소 해운 • 저탄소 대형트럭 및 오프로드 차량 • 저비용 원격 차량 충전 • 수요대응형 모빌리티
발전	• 첨단 핵분열 • 첨단 태양광 • 첨단 풍력 • 심부 지열 발전 • 핵융합 에너지
산업	• 저탄소 알루미늄 생산 • 저탄소 화학제품 생산 • 저탄소 콘크리트 생산 • 저탄소 산업 공정용 열 및 청정수 • 저탄소 철강 생산

기술 분류	세부 기술
건축물 및 인프라	• 저탄소 건축물 건설 및 운영 • 저탄소 콘크리트 인프라 건설 • 온실가스 저배출 빌딩 열, 냉방
농업 및 메탄 감소	• 온실가스 저감 농작 기법 • 탄소중립 온실 및 축사 시설 • 비농업적인 메탄 감축 • 가축 온실가스 저감
탄소 제거	• 공학적 이산화탄소 제거 솔루션 • 자연적 이산화탄소 제거 솔루션

자료: The White House(2022.11.), U.S. Innovation to Meet 2050 Climate Goals: Assessing Initial R&D Opportunities(검색일: 2023.6.25.), pp. 10-24.

미국 에너지부(DOE)는 2023년 1월 발표한 '운송 부문 탈탄소화를 위한 미국의 청사진-운송 혁신을 위한 공동전략(The U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization-A Joint Strategy to Transform Transportation)'에서, 해양 부문(선박) 탈탄소화를 위한 대체연료 및 유망 기술을 제시하였다.[14] 항만의 탈탄소화를 위한 내용으로는, 항만의 전기화를 지원하는 보조금 프로그램, 선박의 속도 최적화를 위한 'Just-in-Time 시스템' 등을 제시하고 있다.

〈표 2-6〉 미국: 해양 탈탄소화 지원을 위한 유망 연료 및 기술

기술 분류	세부 기술
지속가능한 액체 및 기체 연료	• 바이오연료 • 암모니아 • 수소 • 메탄올
전기추진 선박	-
Cold-ironing	-

14) U.S. Department of Energy(검색일:2023.6.28.)

기술 분류	세부 기술
에너지 효율화 및 하이브리드화	• 전기 파워트레인 하이브리드화 • 폐열 회수 • 선체 설계 개선 • 코팅 • 고효율 HVAC • 전력관리시스템 • 선박 속도 저감 • 운영 전략 최적화
재생에너지	• 태양광 • 풍력 • 원자력
배기가스 처리 및 탄소 포집	• 연소후 배기가스 처리 • CO2 포집, 보관, 공급

자료: U.S. Department of Energy(검색일:2023.6.28.), pp. 69-70.

4. 국내

앞서 살펴본 바와 같이, 온실가스 감축전략 등 해운 부문에 대한 환경규제가 본격 시행됨에 따라서 배출제로 개념의 탄소중립 기술 개발 및 보급 정책이 확산되고 있다. 국제사회의 움직임에 부응하여, 우리 정부도 보다 체계적이고 중장기적인 친환경선박 기술개발 및 보급 정책을 제시하기 위해 관련 법령과 법정 계획을 수립하고 있다. 아울러 국내 주요 항만에서도 항만 장비와 연료의 친환경 전환을 위한 전략을 마련하고 있다.

1) 탄소중립 기술개발 관련 법령 및 정책

(1) 환경친화적 선박 관련 법 정비 및 기술개발 로드맵 설정

「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」에 근거해 2020년 수립된 「제1차 친환경선박 개발·보급 기본계획('21~'30)」은 '한국형 친환경 선박(Greenship-K) 추진전략'을 제시하고 있다. 이 계획에 따라, 해양수산부는 「친환경 선박 보급 시행계획」을, 산업통상자원부는 「친환경 선박 개발 시행계획」을 각각 고시한 바 있다. 시행계획은 2021년, LNG 등 저탄소 선박의 핵심 장비를 국산화하는 방향을 제시한 데 이어, 2022년에는 암모니아 추진선 등 무탄소 선박 기술 개발에 착수하기로 했다.[15]

2023년에는, 확대되는 친환경 선박 시장에 대한 선제적 대응을 위해 선박의 탄소배출 저감을 위한 탑재 장치 기술 개발, 무탄소 선박 핵심기술과 액화수소 운반 탱크 기술, 국내 안전기준과 국제표준화, '그린쉽-K 시범선박 건조' 등의 방향 등을 제시하였다.[16]

〈표 2-7〉 제1차 친환경선박 기본계획('21~30) 상 개발로드맵

세부 추진과제	추진 일정(연도)										소관 부처
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
1-1. 수소·암모니아 등 무탄소 선박 기술 확보											
수소 연료 추진선박 기자재 기술 개발 및 실증											
• 수소 연료전지 연안선박 패키지 기술개발											산업부
• 수소 연료전지 기자재 성능·평가 기술개발											산업부
• 수소선박 안전기술개발											산/해
• 극저온 액화수소 저장 시스템 개발											산업부
• 대용량 연료전지 하이브리드 기술 개발											산업부

15) 산업통상자원부(2023.1.30.)(검색일:2023.7.14.). p. 1.
16) 산업통상자원부(2023.1.30.)(검색일:2023.7.14.). p. 3.

세부 추진과제	추진 일정(연도)										소관 부처
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
• 액화수소 벙커링 및 기자재 시험 · 평가 기술개발											산업부
암모니아 연료 선박 기술 개발											
• 연안선박용 암모니아 연료전지 추진시스템 개발											산업부
• 대형 내연기관용 암모니아 연료공급시스템 개발											산업부
1-2. 혼합연료 추진 등 저탄소 선박 기술개발											
무탄소선박 브릿지(Bridge) 기술 개발											
• 연안선박용 혼합연료 추진선 상용화 기술개발											해수부
• 혼합연료 스마트 엔진·연료 공급장치 개발											산업부
• 혼합연료 안전성 평가체계 및 벙커링 기술 개발											산업부
• 수소 혼소 가스터빈 기술개발											산업부
에너지 효율향상 기술 개발											
• 마찰저감 기술개발											산업부
• 에너지 절감 기술개발											산업부
• 고효율 추진기 기술개발											산업부
• 운항효율 최적화 기술개발											산업부
• 신소재·경량화 기술개발											산업부
• 에너지 하베스팅 기술 개발											산업부
• CO2 포집·저장·활용 기술 개발											산업부
1-3. LNG·전기·하이브리드 추진기술 고도화											
LNG 선박 기자재 기술 고도화 및 연료슬립 문제 해결											
• LNG 선박 기자재 국산화											산업부/ 해수부
• 연안용 LNG 추진 패키지 개발											산업부
• LNG 연료슬립 문제해결											산업부
전기 선박 기자재 국산화 및 하이브리드 · 대용량 기술 개발											
• 연안용 전기·하이브리드선박 상용화											산업부/ 해수부
• 핵심 기자재 국산화											산업부
• 하이브리드 추진기술 확보											산업부

세부 추진과제	추진 일정(연도)										소관 부처
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
• 대용량 선박 추진기술 확보											산업부
2-1. 시험·검사기준 마련											
• 친환경선박 국내 시험 기준 개발											산업부/해수부
• 친환경선박 잠정 검사기준 마련											산업부/해수부
2-2. 시험·평가 시설 구축											
• LNG 단열시스템 실증기반 구축											산업부/해수부
• 선박용 수소연료 공급 · 시험설비 구축											산업부/해수부
• 혼합연료 시험·평가 시스템 구축											산업부/해수부
• 암모니아·메탄올 연료전지 시험평가 기반 구축											산업부/해수부
3-1. 그린쉽-K 시범선박 건조											
• 신기술 사업화 지원 부처 협력체계 구축											산업부/해수부
• 시범선박 대상 선정 및 선박적용 기술고도화/국산화											산업부/해수부
• 신기술 적용 시범선박 건조·운영											산업부/해수부
• 시범선박 기술 대형선박 확산 및 세계 시장 진출 지원											산업부/해수부
3-2. 해상실증을 통한 기술검증 및 시장진입 지원											
• 친환경기술 선박 적용 테스트베드 구축											산업부/해수부
• 테스트선박 활용 해상실증 지원											산업부/해수부
• 중소중견기업 기술 실용화 지원체계 구축											산업부/해수부
• 기술검증 결과의 국내 기준 및 국제 표준화 연계											산업부/해수부

자료: 산업통상자원부(2023.1.30.), 2023년 한국형 친환경선박 (Greenship-K) 개발 시행계획(검색일:2023.7.14.), pp. 18-19.

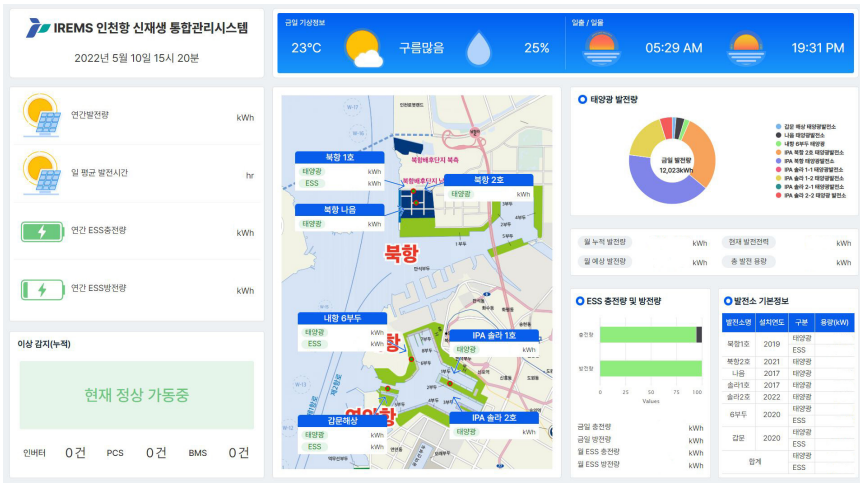
(2) 신재생에너지 개발, 이용, 보급 촉진 관련 법 정비 및 이행

신·재생에너지의 기술개발과 이용·보급 촉진, 관련 산업의 활성화, 이를 통한 에너지 구조의 환경친화적 전환 및 온실가스 배출 감축을 위한[17] 「신에너지[18] 및 재생에너지[19] 개발 · 이용 · 보급 촉진법」은 「신재생에너지 기본계획」을 수립하도록 하고 있다. 이에 따른 제5차 계획(2020~2034년)은 태양광과 풍력을 중심으로 보급 확대를 추진하는 한편, 공급 위주의 신재생에너지 정책에서 벗어나 'RE100' 이행 가능성 제고를 통해 다양한 수요 기반의 창출을 모색하도록 하고 있다.

「신재생에너지 기본계획」에 따라서, 개별 무역항 역시 항만의 탈탄소화를 위한 방안으로 신재생 에너지원을 적극 활용하고 있다. 인천항은 내항에 '해상태양광 전력연계 선박용 친환경 전력망'을 구축하고, 재생에너지 기반의 친환경 에너지를 에너지 저장장치(ESS, Electric power Storage System)에 저장하고, 이를 활용하여 육상전원 공급장치(AMP)를 통해 정박한 선박에 전력을 공급하는 망체계를 마련했다. 아울러, 항만 내 태양광 발전소의 통합 관리를 위해, 사물인터넷(IoT), 증강현실, 빅데이터 등의 신기술을 융합한 '지능형 신재생에너지 통합관리시스템'을 구축하고, 이를 통해 신재생에너지 발전소를 실시간 모니터링하고, 최적 운영방안을 도출하고 있다.[20]

17) 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법, 제1조
18) 기존 화석연료를 변화시켜 수소에너지, 연료전지, 석탄액화가스화 에너지, 중질잔사유가스화 에너지 등
19) 태양에너지, 풍력, 수력, 해양에너지, 지열에너지, 바이오에너지, 폐기물에너지((비재생폐기물로부터 생산된 것은 제외)
20) 인천항만공사(2022.5.15.)(검색일: 2023.4.5.)

〈그림 2-4〉 인천항만공사 지능형 신재생에너지 통합관리시스템 대시보드



자료: 인천항만공사(2022.5.15.)(검색일: 2023.4.5.)

울산항은 2026년까지 직영시설의 전력 자립도를 50%까지 달성한다는 목표를 설정하고, 이를 위한 기술적 방안으로 태양광, 소형풍력, 연료전지 기술의 도입·활용을 계획하고 있다.[21] 여수·광양항은 친환경 에너지 자립 항만 구축을 위해 항 내 유휴부지를 활용한 신재생에너지 발전 사업을 추진하여, 2030년까지 광양항 전력 소비를 100% 재생에너지 기반의 친환경 방식으로 전환할 예정이다. 또한, 2024년부터 수소 컨테이너 트레일러 실증사업으로 총 12대를 운용하여 연간 5,680톤의 공기정화가 가능할 것으로 전망하고 있다.[22] 부산항은 항만 내 신재생에너지 보급을 위해 신항 배후물류단지에 대한 태양광 발전사업을 추진하고,[23] 민간·지방자치단체와 공동으로 신항 배후단지에 수소충전소 등 수소 기반시설 구축 사업을 추진하고 있다. 그 외에도, 부산항을 출입하는 컨테이너 차량의 활동을 이용해 전력을 생산하는 '압전발전 시스템' 개발에 착수했다.[24]

21) 울산항만공사, EGS경영-신재생에너지 자립 항만 구축- 직영시설 50% 전력공급(검색일: 2023.4.5.)
22) 여수광양항만공사(검색일: 2023.4.5.)
23) 부산항만공사, 6.24 BPA 신항사업소에서 태양광 실증사업 준공식, (검색일: 2023.7.5.)
24) 부산항만공사(2022.1.18.), BPA, 항만드나드는 차량 활용해 전력 생산 압전발전 시스템 기술개발 착수

(3) 수소 기반 인프라 구축

수소는 탄소중립의 핵심 수단으로 열과 전기를 생산하는 과정에서 온실가스와 미세먼지와 같은 유해물질을 배출하지 않는 친환경 에너지로,[25] 에너지의 저장·발전을 유연하게 해 재생에너지의 변동성을 줄임으로써 안정적인 에너지 공급체계를 구축·운용할 수 있다.[26] 우리 정부는 근거 법령으로 「수소경제 육성 및 수소안전관리에 관한 법률」을 마련하고, 이에 따라 수소경제 이행을 효과적으로 추진하기 위한 「수소경제 이행 기본계획」을 2021년 발표했다.

해양수산부는 수소의 수입 또는 생산, 항만 내 저장 및 이송·활용 등, 수소 에너지 생태계를 구축·포함하는 '수소항만'을 계획하고 있다. 이를 위한 선도 사업 대상으로 울산항, 광양항, 부산항, 평택 · 당진항, 군산항 등 5개 항만을 선정하고, 전국 무역항을 대상[27]으로 2040년까지 수소항만 조성 가능성을 검토하고 항만 내 수소 생태계 구축을 위한 수소항만 기본계획을 수립할 예정이다.[28]

〈표 2-8〉 수소항만 선도 사업

항만	특징
울산항	• 수소항만 육성: 블루수소를 생산하거나 해외 그린수소 수입 후 내륙 공급 • 2030년까지 생산 기반시설, 수소터미널, 수소저장시설, 배관망 구축
광양항	• 2023년까지 수소트럭 휴게소, 충전소, 발전시설 등 수소복합 스테이션 구축 • 2040년까지 근 석유화학단지(여수산단), 광양제철소 등과 연계하여 수소를 생산하고, 소비하는 거점으로 조성

보고회 개최(검색일: 2023.4.5.)
25) 산업통상자원부(2021.11.26.), 제 1차 수소경제 이행 기본계획(검색일: 2023.4.5.), p. 2.
26) 산업통상자원부(2021.11.26.), 제 1차 수소경제 이행 기본계획(검색일: 2023.4.5.), p. 3.
27) 울산(2), 광양(2), 부산, 평택당진(2), 군산, 인천(2), 삼척, 새만금(2), 제주 등 14개소
28) 해양수산부(2021.11.26.), 수소경제 확산을 위한 항만의 도전이 시작된다(검색일: 2023.4.5.)

부산항	• 수소추진선박과 화물차를 위한 수소연료 생산과 공급체계 구축 • 2030년까지 LNG벙커링 터미널 개발과 연계하여 수소 생산 시설을 구축하며, 선박, 화물차를 위한 수소 연료 생산 및 공급체계 마련
평택·당진항	• 2025년부터 수소 모빌리티 실증단지* 조성 * 수소충전소 등을 구축, 수소차·수소하역장비 등 신규 개발된 수소 모빌리티 실증 장소로 활용 • 2040년까지 항만 하역장비 전반을 수소기반으로 전환
군산항	• 2028년까지 이산화탄소 포집, 저장기술 활용 블루수소 생산 전용 터미널 구축

자료: 해양수산부(2021.11.26.), 수소경제 확산을 위한 항만의 도전이 시작된다(검색일: 2023.4.5.)를 바탕으로 저자 작성

(4) 탄소중립 추진 방향, 이를 위한 한국형 탄소중립 100대 핵심기술 선정

우리 정부는 온실가스 감축 및 기후위기 적응대책을 강화하고, 탄소중립 사회로의 이행 과정에서 발생할 수 있는 경제·환경·사회적 불평등을 해소하는 한편, 녹색기술과 녹색산업 육성을 촉진하고 경제와 환경의 조화로운 발전을 도모하기 위해 「기후 위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법」을 제정하였다.[29] 이 법은 2050 탄소중립이라는 국가목표 달성을 위한 법적 근거, 절차와 정책적 수단을 담고 있다.

이에 따라서, 산업통상자원부, 환경부, 국토교통부, 해양수산부 등 관계부처가 협업하여 수송 부문의 온실가스 감축목표를 설정하고, 대중교통 활성화, 전기·수소차 전환, 철도·항공·선박의 친환경화 등 '녹색교통의 활성화'를 천명하였다.[30] 이와 관련하여, 해양수산부는 선제적으로 「2050 국제해운 탄소중립」 목표를 수립하고, 국제해운의 탈탄소화 추진전략을 발표했다. 또한, 해운 부문 탄소중립을 위한 4대 전략을[31] 제시하였다.[32]

29) 기후 위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법, 제1조
30) 국무조정실,(2022.3.22.), (검색일: 2023.4.7.)
31) 친환경 선대 전환, 해운산업 투자여건 개선, 친환경 기술 및 미래연료 인프라 확충, 무탄소항로 구축 및 국제협력 주도
32) 해양수산부(2023.2.13.), 대한민국 해운산업, 바다위 무탄소 운송 이끈다(검색일: 2023.4.7.), p. 3.

「탄소중립 기본법」에 따른 「국가 탄소중립 녹색성장 기본계획」은 과학기술 기반 체계적인 탄소중립 이행을 위한 한국형 100대 핵심기술을 도출하고 분야별 R&D 로드맵을 수립할 것을 명시하고 있다. 이에 따라서, 기본계획은 수송부문에서 육해공의 모빌리티 전반의 탄소중립화를 정책목표로 설정하는 한편, 수소부문에서는 그린수소 생산기반을 구축하고 수소 선박·트램·드론 등의 모빌리티 활용을 확대하려 한다. 이를 위해 수소 활용을 위한 배관망을 구축하고, 2028년까지 시범항만 2개소를 조성하여 인프라를 구축할 예정이다.[33]

국가과학기술자문회의 산하 '탄소중립기술 특별위원회'는 2023년 4월 발표된 「국가 탄소중립 녹색성장 기본계획」의 후속 조치로, 에너지 전환, 산업, 수송·교통, 건물·환경 부문과 관련된 17개 중점 분야, '한국형 탄소중립 100대 핵심기술 선정(안)'을 발표했다. 이는 범부처 차원의 기술개발 방향성을 제시하기 위한 것으로, 기술 수준에 따라서 초격차, 신격차, 감격차 기술로 분류하고, 기간별로 단기형('30년까지 상용화 목표), 중장기형('30년 이후 상용화 목표) 기술로 구분하는 등, 다각적인 분산 투자 전략으로 범부처 차원의 전략적 기술개발 투자 방향을 설계한 것이다.[34] 구체적으로, 이미 세계 최고 수준의 기술력을 보유하여 선두를 유지하고 격차를 확대해야 하는 '초격차 기술', 세계적으로 아직 기술 개발 초기 단계로, 신시장 창출·선점이 가능한 '신격차 기술', 선도국과 다소 기술 수준에 격차가 있어 추후 격차를 해소해나가야 하는 '감격차 기술'로 정의하고 있다.[35]

33) 관계부처 합동(2023.4.)(검색일: 2023.5.31.), p. 73.
34) 과학기술정보통신부 보도자료, KDI 경제정보센터(2023.5.19.)
35) 과학기술정보통신부 보도자료, KDI 경제정보센터(2023.5.19.)

〈그림 2-5〉 한국형 탄소중립 100대 핵심 기술 주요 내용



자료: 과학기술정보통신부 보도자료, KDI 경제정보센터(2023.5.19.)

〈표 2-9〉 한국형 탄소중립 100대 핵심기술 목록

종류	단기형 (~'30년 상용화) (37개)		중장기형('30년 이후 상용화) (63개)	
초격차 9개	세계 최고 수준 기술력을 보유하여, 선두를 유지하고 격차를 확대해 나갈 기술			
	• (수소) 기체수소 저장·운송 • (전력저장) 단주기에너지저장시스템 • (원자력) 소형모듈원자로(SMR) • (친환경차) 이차전지 셀 고도화, 이차전지 시스템 고도화, 연료전지 시스템 고도화	6개	• (철강) 수소환원제철 • (석유화학) 연료유·부산물 기초화학 원료 전환 • (산업일반) 친환경 냉매	3개
신격차 39개	세계적으로 기술 개발 초기 단계로, 신시장 창출 · 선점이 가능한 기술			
	• (태양광) 초고효율 태양전지, 사용처 다변형 태양광시스템, 폐태양광 재활용 재사용 • (수소) 해외 암모니아·수소 대용량 저장·운송 • (무탄소전력) 고효율 연료전지 열병합 • (전력저장) 사용후 배터리 ESS 시스템 • (전력망) 분산자원 및 유연자원 통합운영 • (철강) 고로 연·원료 대체, 전로 연·원료 대체, 철강산업 하공정 무탄소 연료 전소 • (석유화학) 바이오 PEF, 바이오 폴리올, 폐플라스틱 자동 선별 • (친환경차) 전기구동시스템 성능 향상, 전력변환장치 고도화, 유선충전 고속화 • (환경) 바이오 생분해성 플라스틱	17개	• (풍력) 수직축 부유식 풍력발전 • (수소) 차세대 수전해, 액체수소 운송선 • (전력저장) 장주기 에너지 저장 시스템 • (석유화학) 부생가스 고부가 전환, 바이오나프타·올레핀, 폐플라스틱 용매 추출, 폐플라스틱 해중합, 폐플라스틱 열분해, 폐플라스틱 가스화, 저에너지 반응 공정, 저에너지 분리·소재 공정 • (CCUS) 습식 포집, 건식 포집, 차세대 포집 • (산업일반) 공정가스 대체, 공정가스 처리 • (선박) 연료후처리 및 에너지 효율향상 • (건축) 건물에너지 관리·제어·데이터 활용 • (환경) 리뉴어블 플라스틱, 금속자원 회수, 국토공간 유형별 탄소 흡수 증진·관리	22개
감격차 52개	선도국과 다소 기술 수준 격차가 있어, 격차를 해소해나가야 할 기술		수소추진선박과 화물차를 위한 수소연료 생산과 공급체계 구축	
	• (풍력) 해상풍력 부유체 시스템 • (풍력) 해상풍력 설치·시공 • (수소) 알칼라인 수전해	14개	• (풍력) 초대형 풍력 터빈 • (풍력) 해상풍력발전 운영·관리 • (수소) 액체수소 저장·운송	38개

종류	단기형 (~'30년 상용화) (37개)	중장기형('30년 이후 상용화) (63개)
	• (수소) PEM 수전해 • (무탄소 전력) 수소혼소 가스터빈 • (시멘트) 혼합재 함량 증대 • (CCUS) 분리막 포집 • (CCUS) 화학적 전환 • (CCUS) 광물 탄산화 • (친환경차) 수소차용 수소저장 시스템 • (친환경차) 수소충전소 • (선박) 탄소중립 내연기관, 선박용 연료전지·배터리 시스템 • (건축) 고성능·다기능 외피	• (수소) 수소 전용 배관망 • (수소) 차세대 해외수소 저장·운 • (수소) 액체수소 인수기지 • (무탄소전력) 수소전소 가스터빈 • (무탄소전력) 석탄보일러 암모니아 혼소 • (무탄소전력) 초고효율 연료전지 복합발전 • (전력망) 지능형 송배전 시스템, 실시간 전력거래 플랫폼 • (에너지통합) 산업용 고온·초저온 히트펌프, 복합에너지시스템, 열에너지 저장시스템 • (원자력) 선진 원자력 시스템, 원자력 폐기물 관리 • (철강) 탄소 저감형 전기로, 철강 부산물 재자원화 • (석유화학) 전기 가열로 NCC 시스템, 무탄소 연료 NCC 공정, 스마트 플랜트 전환 • (시멘트) 비탄산염 원료 대체, 신규 혼합재 제조, 순환자원 연료 대체, 저탄소 신열원 활용 • (CCUS) 저장소 탐사·평가·선정, 저장 시설·설비 설계·구축, 저장소 CO2 주입·운영, CO2 저장 모니터링, 생물학적 전환 • (산업일반) 산업공정용 수소·암모니아 활용, 전동기·전력변환기 효율화, 그린데이터센터, 탄소배출 저감 효과 모니터링 • (친환경차) 무선충전 대용량화 • (선박) 선박 전기추진 시스템 • (건축) 건물·설비 전기화·고효율화, 건물 신재생 에너지 및 에너지 융합시스템

자료: 과학기술정보통신부 보도자료, KDI 경제정보센터(2023.5.19.)를 바탕으로 저자 작성

(6) 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵, 에너지 국제공동연구 로드맵

산업통상자원부는 2021년 「탄소중립 산업·에너지 R&D전략」의 추진을 위한 '2050 탄소중립 에너지기술 로드맵'을 발표했다. 에너지기술 로드맵은 '2030 국가 온실가스 감축목표(NDC)' 및 2050 탄소중립 달성에 필요한 13대 분야, 197개 핵심기술에 대한 개발 일정, 확보방안과 함께 에너지 6대(무탄소 발전, 재생에너지, 계통선진화, 에너지 저장, 수소화, 에너지 고효율화), 산업·수송 9대, 탄소중립 공통 2대(자원 순환, CCUS)로 총 17대 분야 기술을 제시했다.[36]

〈표 2-10〉 탄소중립 에너지기술 로드맵 13대 분야 및 탄소중립 산업·에너지 R&D 전략 17대 분야 중 관련 분야

<table>
<tr><td rowspan="2">13대 분야</td><td>청정 연료 발전</td><td>태양광</td><td>전력 계통</td><td rowspan="2">에너지 저장</td><td rowspan="2">그린 수소</td><td rowspan="2">산단 건물</td><td rowspan="2">자원 순환</td><td rowspan="2">CCUS</td><td rowspan="2">에너지 설비</td><td rowspan="2">정유</td></tr>
<tr><td>연료 전지</td><td>풍력</td><td>섹터 커플링</td></tr>
<tr><td rowspan="2">17대 분야 중 해당 분야</td><td>무탄소 발전</td><td>재생 에너지</td><td>계통 선진화</td><td>에너지 저장</td><td>수소화</td><td>에너지 고효율화</td><td>자원 순환</td><td>CCUS</td><td>산업 공통 설비</td><td>정유</td></tr>
<tr><td colspan="6">에너지 분야</td><td colspan="2">공통 분야</td><td colspan="2">산업 분야</td></tr>
</table>

자료: 산업통상자원부(2021.12.3.), 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵(검색일: 2023.5.31.)

특히, '에너지 국제공동연구 로드맵'은 탄소중립 기술 각 분야를 선도하고 있는 주요국가와 국제공동연구를 통해 핵심·원천기술을 확보하는 한편, 이미 확보한 우리 기술의 해외 판로를 개척하기 위해, 국제협력 수요가 높은 태양광, 풍력, ESS, 수소연료전지, 지능형 전력망, 효율 향상 등 5개 기술 분야의 핵심기술을 도출하고, 주요국의 해당 분야 기술 수준, 현지 여건을 분석해 중점 협력 대상국과 상호 협력방안을 제시하였다.[37]

36) 산업통상자원부(2021.12.3.), 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵(검색일: 2023.5.31.)

(7) 국가 필수전략기술 선정 및 육성 보호전략을 통한 기술 우위 확보

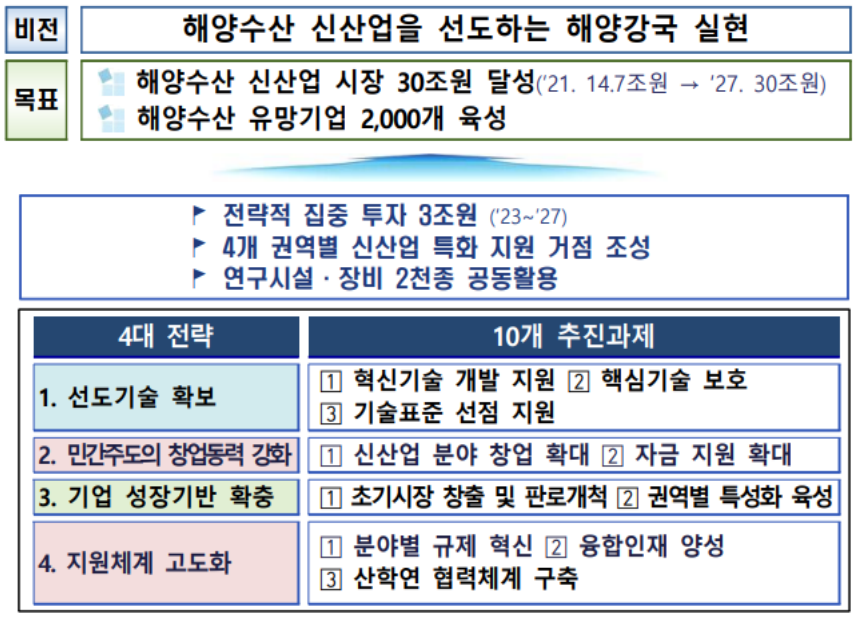
우리 정부는 세계적으로 기술 우위 확보를 위한 경쟁이 심해지면서, 국가 필수기술에 대한 우선순위와 전략을 수립할 필요성에 따라, 2021년 「국가 필수 전략기술 선정 및 육성·보호전략」을 발표했다. 우리나라가 반드시 주도권을 가져야 하는 국가 필수전략기술로 반도체·디스플레이, 이차전지, 5G·6G, 첨단 바이오, 첨단 로봇·제조, 사이버보안, 수소, 사이버보안 양자, 우주·항공 기술 등 10개 기술을 선정하고,[38] 최고 기술국 대비 60~90% 정도인 기술 수준을 2030년까지 90% 이상 달성하는 것을 목표로 국가역량을 집중하기 위해 다음과 같은 세부적인 방안을 제시했다.[39]

(8) 해양수산 신산업 육성전략을 통한 선도기술 확보 및 핵심기술 국산화

'해양수산 신산업 육성전략'은 해양수산 신산업이 국가전략 사업으로서 가지는 중요성을 인식하고 '해양수산 신산업 육성'을 국정과제에 반영되면서 본격적으로 추진하기 위해 마련되었다. 친환경·첨단 선박, 스마트 블루푸드, 해양레저관광, 해양 바이오, 해양 에너지·자원을 5대 신산업 분야로 설정하는 한편, 약 15조원 규모인 시장을 2027년까지 30조원으로 확대하고 관련 유망기업을 2,000개 육성하기 위해 선도기술 확보, 민간주도의 창업동력 강화, 기업 성장기반 확충, 지원체계 고도화의 4대 전략과 10대 추진과제를 마련했다.[40]

37) 산업통상자원부(2021.12.3.), 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵(검색일: 2023.5.31.)
38) 과학기술정보통신부(2021.12.21.), 국가 필수전략기술 선정 및 육성 보호전략 발표(검색일: 2023.7.5.)
39) 과학기술정보통신부(2021.12.21.), 국가 필수전략기술 선정 및 육성 보호전략 발표(검색일: 2023.7.5.)
40) 해양수산부, 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진(2022.12.27.)(검색일: 2023.7.5.)

〈그림 2-6〉 해양수산 신산업 육성전략



자료: 해양수산부(2022.12.27.), 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진(검색일: 2023.7.5.)

우선, 향후 5년간 자율운항 선박 4.0, 디지털 항법·통신(e-Navi), 친환경 선박, 스마트 블루푸드, 해양그린수소 등 5개 분야에서 글로벌 상위 10% 이상의 선도기술을 확보하기 위해, 친환경·첨단선박 관련 기술은 저·무탄소 연료와 엔진, 자율운항선박의 AI 자율운항 관련 핵심기술을 국산화하고 해상통신 및 고정밀 위성항법 시스템 개발[41] 등을 추진한다.[42] 아울러 개발된 기술 보호 및 활용 촉진 위한 정책적 지원도 마련한다. 현재 해양부문에서는 조선 분야에만 지정되어 있던 국가핵심기술 대상 분야를 해양 에너지 등으로 확대하는 한편, 기술기업에 감세 등의 혜택을 지원한다.[43] 기존 특

41) 해양측위 정밀도 10m → 5m (출처: 해양수산부(2022.12.27.), 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진(검색일: 2023.7.5.))
42) 해양수산부(2022.12.27.), 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진(검색일: 2023.7.5.)
43) 해양수산부(2022.12.27.), 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진(검색일: 2023.7.5.)

허장벽을 극복하기 위한 회피 설계 등도 지원해 국내외 시장 가치가 높은 기술에 대해 핵심, 원천 특허 선점할 수 있도록 한다. 이 밖에도 해양수산 산업표준(KS) 인증 항목을 41개에서 150개로 확대하고 시험·인증 기관 지정을 추진하고 R&D 단계부터 기술 표준화를 동시에 진행하는 패스트트랙을 도입하여 소요 시간을 단축할 계획이다.[44]

제2절 탄소중립 과학기술 연구개발 협력 동향

해양 탄소중립 과학기술의 적용 및 활용을 증대시키기 위해서는 국내·외 진행되고 있는 과학기술 지원체계에 대한 이해와 해양에서의 탄소중립 과학기술 협력 동향에 대한 파악이 필요하다. 다음에서는 과학기술 지원체계와 해운·항만 중심의 탄소중립 과학기술 협력 동향에 대해 살펴보고자 한다.

1. 탄소중립 관련 국제협력 정책 동향

과학기술 국제협력에 관하여 범부처적으로 적용되는 사항을 정하는 주요 법률로는 「과학기술기본법」, 「국가연구개발혁신법」, 「협동연구개발촉진법」, 「기술의 이전 및 사업화 촉진에 관한 법률」 등이 있다.[45] 「과학기술기본법」은 국가 과학기술 정책을 추진하는데 근거가 되는 기본·총괄규범으로, 과학기술정책을 종합적이고 체계적으로 추진할 수 있는 근거를 제시하면서 과학기술에 대한 국가 정책의 원칙과 추진방향을 제시하고 있다.[46] 「국가 연

44) 해양수산부(2022.12.27.), 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진(검색일: 2023.7.5.)
45) 권성훈(2022.10.20.)(검색일: 2023.7.11.), p. 2.
46) 윤종민(2014), p. 105.

구개발 혁신법」은 국가 R&D 사업 추진에 있어 다른 법에 우선 적용되는 총괄규범이며, 「협동연구 개발 촉진법」은 연구개발 시 국내외 기관과의 협력사항을 규정하고 있다.[47]

〈표 2-11〉 과학기술 국제협력 관련 국내법과 주요 내용

법 령	관련 조항 및 주요 내용
과학기술기본법	제18조 과학기술의 국제화 촉진 • (정부) 외국정부, 국제기구 또는 외국의 연구개발 관련 기관·단체 등과 과학기술분야 국제협력 촉진 위한 시책 수립·추진 • (과학기술정보통신부장관) 과학기술협력 시책의 효율적 추진 위해 전문적인 지원 기관 지정, 그 지원업무 수행에 필요한 경비의 전부 또는 일부를 출연하거나 보조할 수 있음
국제과학기술협력 규정	제4조 과학기술국제화 사업의 추진 등 • (과학기술정보통신부장관)과학기술의 국제화를 촉진하기 위하여 과학기술 국제화사업을 추진할 수 있음 • 과학기술분야 국제협력 전문기관으로서 한국과학기술기획평가원과 한국연구재단을 지정할 수 있음
	제5조 과학기술협력의 추진 • (과기부장관) 과학기술협력을 촉진하기 위하여 과학기술공동위원회 구성·운영, 개발도상국가 지원사업 추진, 기술조사단 상호 파견 및 공동학술회의 개최 등 추진, 과학기술공동위원회와 개도국 지원 시 미리 외교부장관과 협의
	제6조 국내과학기술자의 외국파견 • (정부) 국제공동연구 또는 과학기술국제화기반조성사업 등을 추진 위해 국내 과학기술자 및 관계 공무원을 외국에 파견할 수 있음
	제7조 과학기술국제화 사업의 보안관리 • (과학기술 국제협력 전문기관과 과학기술국제화사업 수행기관) 과학기술 국제화사업의 추진과정에서 연구 개발 결과 등 주요 정보가 외부로 무단 유출되지 않도록 보안대책을 수립·시행
국가연구개발혁신법	제3조 적용범위 • 정부가 국제기구, 외국의 정부·기관·단체와 체결한 협정·조약 등에 따라 정해진 금액을 납부하여 추진하는 사업에 대해서는 이 법 제2장(국가연구개발사업의 추진)의 규정을 적용하지 아니함
	제9조 예고 및 공모 등 • 정부가 국제기구 또는 외국의 정부·기관·단체와 체결한 협정·조약 등에 따라 연구개발과제와 연구개발기관을 특정한 경우에는 공모 외의 방법으로 연구개발과제와 수행기관을 선정할 수 있음

법 령	관련 조항 및 주요 내용
협동연구개발촉진법	제11조 국제협동연구 개발과제의 우선지원 • (국가지방자치단체 또는 공공기관) 대학·기업 또는 연구소가 외국의 연구개발 관련 기관과 공동으로 수행하는 특정 요건(외국 기관이 연구비 공동 부담 등)에 해당되는 협동연구개발과제를 국내의 대학·기업 또는 연구소 사이의 협동연구개발과제에 우선하여 지원할 수 있음
기술의 이전 및 사업화 촉진에 관한 법률	제16조 국제 기술이전·사업화의 촉진 • (정부) 정부·기업·대학·연구소 및 단체 등이 국제기구 또는 외국의 정부·기업·대학·연구소 및 단체 등과의 상호 기술이전·사업화에 관한 국제협력을 촉진하기 위한 시책을 마련하여야 함
해양수산과학기술육성법	제21조 해양수산과학기술의 국제협력 • (해수부장관) 국제적인 해양수산과학기술의 발전에 기여하고 국내 해양수산과학기술의 수준을 향상시킬 수 있도록 외국의 정부, 해양수산 관련 국제기구 및 외국의 연구개발 기관 · 단체 등과 협력하여 해양수산과학기술 분야 국제 공동 연구 및 국제동향 파악과 정보 및 기술개발, 인력의 국제교류 등의 사업을 시행할 수 있음
기후변화대응 기술개발 촉진법	제12조 기술지원체제와의 협력 등 • (과기부장관) 「기후변화에 관한 국제연합 기본협약」과 「파리협정」의 이행을 위하여 국가 간 기후변화대응 기술개발 및 개발된 기술의 이전 촉진, 기술지원체제와의 협력을 주관 제13조 국내 과학기술자 등의 외국파견 • (정부) 기후변화대응 기술개발 및 이전을 위한 국제협력 사업 또는 국제공동연구 등을 추진하기 위하여 국내 과학기술자 및 관계 공무원을 외국에 파견

자료: 권성훈(2022.10.20.)(검색일: 2023.7.11.)

「국가 탄소중립 녹색성장 기본계획」은 탄소중립 및 녹색성장을 가장 중요한 글로벌 아젠다로 상정하고, 국제협력 강화 추진의 필요성을 강조하고 있다. 이를 위해 양다자 협력 강화, 기후변화와 녹색성장, 환경, 에너지, 해양 등 다양한 분야별 주요 국제기구와 탄소중립·녹색성장 관련 전략적 협력을 강화하고 확대할 것을 명시하고 있다.[48]

47) 권성훈(2022.10.20.)(검색일: 2023.7.11.), p. 3.
48) 관계부처 합동(2023.4.)(검색일: 2023.5.31.), p.168.

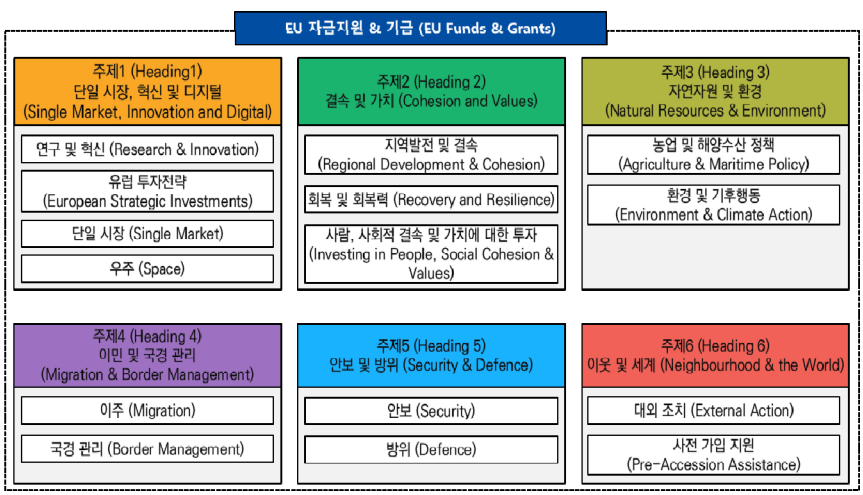
2. 해운·항만 부문 과학기술 협력 체계

1) EU 과학기술 협력 체계

유럽연합(EU)은 다양한 국가와 정책, 프로그램에 대해 보조금과 대출, 상금 등의 형태로 재정을 지원(Funding)하고 있다. 자금지원(Funding)에 이용되는 예산은 EU의 직접관리 자금, 각 국가·지역 당국의 협력관리 기금, 국가·지역 당국이 관리하는 간접자금 시스템 등으로 구성되어 있다.

EU의 자금지원 프로그램은 크게 6개의 주제(Heading), 15개의 세부 부문으로 구분되며, 각 부문은 다양한 지원 프로그램들로 구성되어 있다. 이들 중 단일 시장, 혁신 및 디지털(Single Market, Innovation and Digital)의 연구 및 혁신(Research & Innovation)과 유럽의 전략적 투자(European Strategic Investments)에 해당하는 프로그램들에서 주로 연구와 과학기술 발전을 지원하고 있다.

〈그림 2-7〉 EU 자금지원 주제(Heading) 및 세부 유형



자료: European Commission(2021.4.29.), 2021-2027 long-term EU budget & NextGenerationEU(검색일: 2023.7.11.) 참고 저자작성.

‘연구 및 혁신(Research & Innovation)’ 부문은 ‘Horizon Europe’, ‘ERTP(Euratom Research and Training Programme)’, ‘ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)’ 등이 포함된다. 특히, EU 기금 중 가장 대표적인 연구개발 지원 프로그램, ‘Horizon Europe’은 과학적·기술적·경제적·환경적·사회적 영향 등 모든 형태의 연구와 혁신기술 개발을 지원하고 있다.

‘유럽의 전략적 투자(European Strategic Investments)’ 부문은 ‘InvestEU’, ‘Connecting Europe Facility’, ‘Digital Europe Programme’ 등이 대표적이다. 우선, ‘InvestEU’는 민간투자 유치, 친환경적인 디지털 전환 등을 위한 주요 장기프로젝트를 지원한다. ‘Connecting Europe Facility’는 유럽 전역의 주요 에너지, 교통 및 디지털 인프라 제공 등을 지원하고 있으며, ‘Digital Europe Programme’은 유럽의 디지털 전환과 회복을 가속화할 수 있는 프로젝트들을 지원하는 프로그램이다.

〈표 2-12〉 EU 자금지원 부문 및 세부 프로그램 (2021-2027)

주제 (Heading)	부문 (Sub-category)	프로그램 (Programme)
단일 시장, 혁신 및 디지털 (Single market, Innovation and Digital)	연구 & 혁신 (Research & Innovation)	• Horizon Europe • Euratom Research and Training Programme • ITER
	유럽 투자전략 (European Strategic Investments)	• InvestEU • Connecting Europe Facility • Digital Europe Programme
	단일 시장 (Single Market)	• Single Market Programme • EU Anti-Fraud Programme • Cooperation in the field of taxation (FISCALIS) • Cooperation in the field of customs (CUSTOMS)
	우주공간 (Space)	• European Space Programme

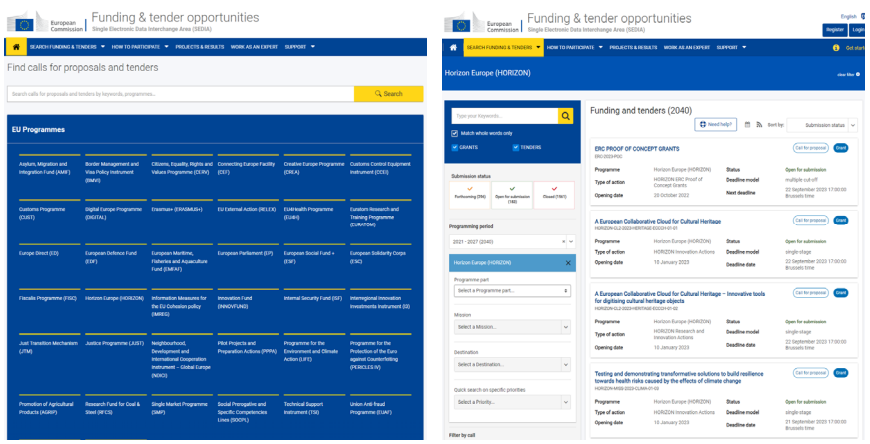
주제 (Heading)	부문 (Sub-category)	프로그램 (Programme)
결속 및 가치 (Cohesion and Values)	지역발전 및 결속 (Regional Development & Cohesion)	• European Regional Development Fund (ERDF) • Cohesion Fund (CF) • REACT-EU • Support to the Turkish Cypriot community
	회복 및 회복력 (Recovery and Resilience)	• Recovery and Resilience Facility • Technical Support Instrument • Protection of the Euro Against Counterfeiting • Union Civil Protection Mechanism (rescEU) • EU4Health
	사람, 사회적 결속 및 가치에 대한 투자 (Investing in People, Social Cohesion & Values)	• European Social Fund+ • Erasmus+ • European Solidarity Corps • Justice Programme • Citizens, Equality, Rights and Values programme • Creative Europe
자연 자원 및 환경 (Natural Resources & Environment)	농업 및 해양수산 정책 (Agriculture & Maritime Policy)	• European agricultural guarantee fund (EAGF) • European agricultural fund for rural development (EAFRD) • European Maritime, Fisheries and Aquaculture Fund
	환경 및 기후행동 (Environment & Climate Action)	• Programme for Environment and Climate Action (LIFE) • Just Transition Fund
이주 및 국경 관리 (Migration & Border Management)	이주 (Migration)	• Asylum, Migration and Integration Fund
	국경 관리 (Border Management)	• Integrated Border Management Fund
안보 및 방위 (Security & Defence)	안보 (Security)	• Internal Security Fund • Nuclear Decommissioning (Lithuania) • Nuclear Safety and Decommissioning
	방위 (Defence)	• European Defence Fund

주제 (Heading)	부문 (Sub-category)	프로그램 (Programme)
이웃 및 세계 (Neighbourhood & the World)	대외 조치 (External Action)	• Global Europe: Neighbourhood, Development and International Cooperation Instrument • Humanitarian Aid • Common Foreign and Security Policy • Overseas Countries and Territories
	사전 가입 지원 (Pre-Accession Assistance)	• Pre-Accession Assistance

자료: European Commission(2021.4.29.), 2021-2027 long-term EU budget & NextGenerationEU(검색일: 2023.7.11.) 참고 저자 작성.

다양한 EU의 프로그램이 지원하는 프로젝트나 연구의 참여는, 관리부처에 직접 접촉하는 방법 외에도 'EU 펀딩 및 입찰 플랫폼(Fundings & Tender Opporunities)'을 통해 제안·신청할 수 있다. 플랫폼은 각각의 프로그램에 따른 입찰 신청 기한, 제안서 양식, 공고 내용 등을 포함한 신청과 관련된 정보를 제공하며, 제안서 제출, 협력기관 선정 등 주어진 일정·절차를 밟아 신청할 수 있다.

〈그림 2-8〉 EU 자금지원 및 입찰 플랫폼(Funding & Tender platform)



자료: European Commission, Funding & tender opportunities, (검색일: 2023.7.10)

주목할만한 점은, 국제 및 기관 간 협력에 있어서 개별 프로그램의 성격에 따라 참여 가능한 국가/기관의 범위와 성격이 상이하다. 'Horizon Europe'는 기관 협력 및 네트워크를 이용한 협력 중심의 연구 및 혁신 지원 프로그램으로, 비가입 국가인 제3국의 참여 확대를 유도하고 있다.

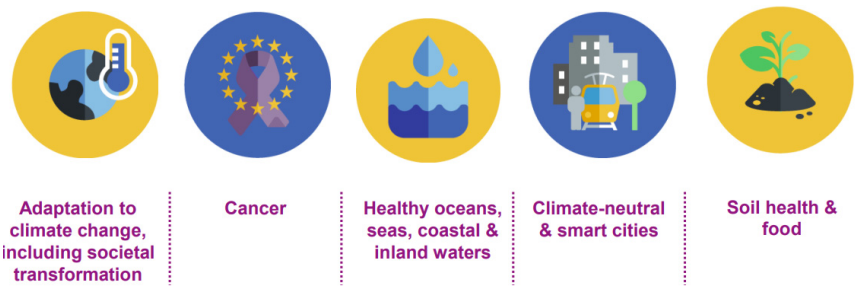
(2) Horizon Europe 프로그램

'Framework Program(FP)'은 EU의 대표적 국제기술협력 정책으로, 기후변화에 대응하고 UN의 지속가능한 개발 목표를 달성을 지원함으로써 유럽연합의 경쟁력 확보·성장을 촉진하기 위한 프로그램이다. 1984년 제1차 FP를 출범한 이래로 EU 과학기술 정책의 골격을 이루고 있으며, 프레임워크 프로그램 외에도 회차에 따라 'Horizon Europe 2020', 'Horizon Europe'으로 불린다.[49]

현재 진행되고 있는 'Horizon Europe(제9차 EU-FP)'은, 2014년~2020년까지 약 800억 유로의 예산이 투입되었던 'Horizon 2020(제8차 EU FP)'을 계승한 프로그램이다. Horizon Europe은 E유럽연합의 역내 과학기술 기반 및 이를 통한 산업경쟁력 강화 촉진과 지속가능한 개발 목표를 포함한 국제적 사회문제 해결에 기여를 주요 목적으로 한다. 이를 위해, 2021년부터 2027년까지 대규모의 연구 및 혁신을 위한 자금 지원을 계획하고 있으며, 정보통신, 바이오, 클린 에너지, 우주와 물리, 탄소중립 등에 약 955억 유로의 예산을 확보하였다.

49) 김소은·윤서희·성경모(2022)

〈그림 2-9〉 EU Missions for Horizon Europe



자료: European Commission, Research and Innovation funding – Horizon Europe, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/index_en.(검색일: 2023.4.7.)

프로그램은 '우수과학(Excellent Science)', '글로벌 과제와 산업 경쟁력(Global Challenges and Industrial Competitiveness)', '혁신적 유럽(Innovative Europe)'의 세 가지 핵심 영역으로 구성된다.[50] '우수과학' 부문은 과학기술 기반 강화를 목적으로 기초과학 분야 연구를 중심으로 추진하며, '글로벌 과제와 산업 경쟁력' 부문은 EU의 우선적 정책과제를 보다 효과적으로 관리하고, 전반적 산업경쟁력 강화에 방점을 두고 있다. 특히, 하향식으로 과제를 구성하고, 각 분야의 이해관계자들과 회원국의 연구 활동을 연계해서 추진하고 있다.[51] 관련된 세부 전략은 크게 건강, 문화·창의성·포용적 사회, 사회를 위한 안보, 디지털·산업 및 우주, 기후변화·에너지 및 모빌리티, 식량·바이오경제·자연자원·농업 및 환경의 6가지 클러스터로 구분된다.

'혁신적 유럽' 부문은 '혁신'에 초점을 두고 있다. 획기적인 아이디어, 이를 바탕으로 하는 미래 시장의 창출, 혁신적인 기업의 발전을 위해 효과적인 지원방안을 마련하고, 유럽혁신위원회를 중심으로 모든 과학·기술 및 응용 분야의 혁신 기술 개발을 지원한다.

50) European Commission, Research and Innovation funding – Horizon Europe, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/index_en.(검색일: 2023.4.7.)
51) 한국산업기술진흥원(2019.9.11.)(검색일: 2023.4.7.)

〈표 2-13〉 Horizon Europe 프로그램 구조 및 전략

<table>
<tr><th>핵심 분야1 (Pillar 1)</th><th>핵심 분야2 (Pillar 2)</th><th>핵심 분야3 (Pillar 3)</th></tr>
<tr><th>우수과학
(Excellent Science)</th><th>글로벌 과제와 유럽 산업 경쟁력
(Excellent Science)</th><th>혁신적 유럽
(Innovative Europe)</th></tr>
<tr><td>• 유럽연구 위원회
(European Research Council)</td><td>• 건강(Health)</td><td>• 유럽 혁신 위원회
(European Innovation Council)</td></tr>
<tr><td>• Marie Sklodowska-Curie Actions</td><td>• 문화, 창의성, 포용적 사회
(Culture, Creativity and Inclusive Society)</td><td>• 유럽 혁신 생태계
(European Innovation Ecosystems)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">• 연구 인프라
(Research Infrastructures)</td><td>• 사회를 위한 안보
(Civil Security for Society)</td><td rowspan="4">• 유럽 혁신 및 기술 연구소
(European Institute of Innovation and Technology)</td></tr>
<tr><td>• 디지털, 산업 및 우주
(Digital, Industry and Space)</td></tr>
<tr><td>• 기후변화, 에너지 및 모빌리티
(Climate, Energy and Mobility)</td></tr>
<tr><td>• 식량, 바이오경제, 자연자원, 농업 및 환경 (Food, Bioeconomy, Natural Resources, Agriculture and Environment)</td></tr>
<tr><td colspan="3">• Part : Widening Participation and strengthening the European Research Area</td></tr>
</table>

자료: European Commission, Horizon Europe funding programmes and open calls(검색일: 2023.07.13.)

핵심 유형에 따라 과제의 생산과 지원이 상향식(Bottom up) 또는 하향식(Top down)으로 진행되고 있으며, '글로벌 과제와 산업 경쟁력' 부문은 클러스터별 목적성을 가진 과제를 우선적으로 도출해, 이를 지원하는 하향식 방식으로 진행되고 있다. 선 공고 후 지원하는 형태로, 2년마다 Work Programme(WP)을 기획하고 분야별 공고 내용 전체를 일괄적으로 공지하며, 과제별로는 2년에 걸쳐 온라인 플랫폼(Funding & Tenders Portal)에 공지하고 있다.

Horizon Europe의 프로젝트(또는 과제)의 참여 신청은 전술한 'EU Funding & Tender Opportunities'의 플랫폼을 이용해 양식에 맞춘 제안서를 작성하고 신청한다. 현재 모집 중이거나 예정되어있는 프로젝트들부터 완료된 프로젝트의 결과도 확인 가능하다. 프로젝트의 신청 현황을 보면 2021년~2027년까지 예정(Forthcoming) 296개, 제출 오픈 183개, 완료 1,561개로, 총 2,040개의 프로젝트가 해당된다. 또한 Horizon Europe 대부분의 프로젝트들은 공동의 연구 및 기술 개발로 연구를 위한 파트너쉽 구성을 장려하고 있으며, 개별 연구팀 또는 조직은 '우수과학'에 해당하는 프로젝트에 지원할 수 있다.

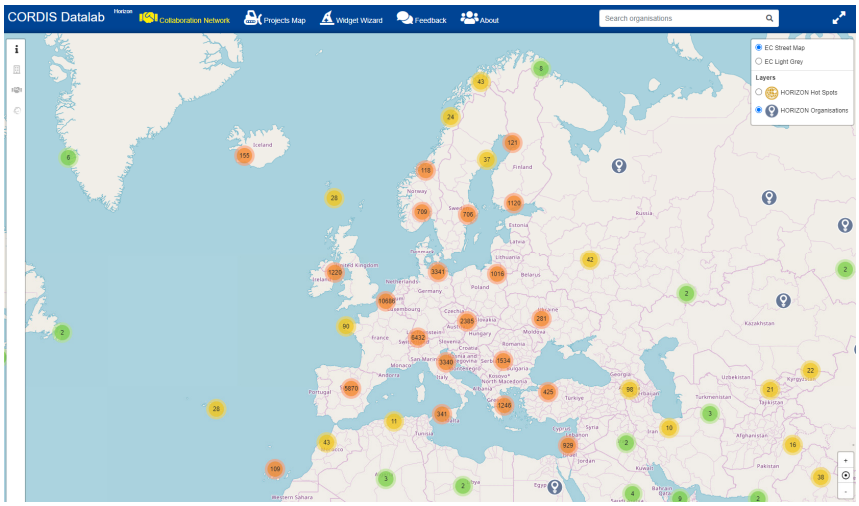
해당 프로그램들은 주로 유럽연합에 가입되어 있거나, 물리적으로 가까운 지역들을 대상으로 해왔으나, 최근에는 기술혁신과 경쟁력 향상이라는 목표 아래 다양한 국가와 기구, 기관과 전문가들로 그 대상을 확장하고 있다. 실제로, 전세계 모든 연구 관련 기관소속 연구자 또는 연구팀이 Horizon Europe의 인력교류(Phillar1)와 공동연구 공고에 참여할 수 있다. 과제 참여를 위한 컨소시엄의 기본적인 구성은 'EU 회원국 소속 연구기관과 EU 회원국/준회원국 소속 연구기관'의 형태로, 그 외 국가는 제3국 파트너로 참여할 수 있으며 한국은 여기에 속한다.[52]

온라인으로 계획서를 제출하는 방식으로 과제를 지원할 수 있으며, 이후 EU의 평가-과제 선정-연구(기금) 협약-참여기관 간 협약-과제 수행-중간평가-최종평가-정산보고서 제출 순으로 운영된다. 유럽 연구자를 제외한 제3국 소속 연구자일 경우, 과제 참여를 위한 별도의 예산 마련이 필요하다. 그러나 Horizon Europe은 Horizon 2020(PF 8) 보다 국제협력 및 참여를 강조하고 있으며, 비회원국(제3국)이 프로그램에 참여할 수 있는 연결정책을 마련하고, 국제협력이 가능한 주제, 제3국 참가를 위한 예외 EU

52) 주한 EU대표부(2021.8.17.), Horizon Europe-Associated Countries(검색일: 2023.11.02)

기금 마련, 다자간 또는 양자간 협정이나 이니셔티브 이행을 위한 주제 선정, 과제 공고별 파트너 검색 제공 등 이들의 참여를 장려하기 위해 다양한 지원방안을 모색 중이다. 이러한 노력들은 EU 가입국이 아닌 국가와 기관의 과제 참가 장벽을 낮출 수 있으며, 장기적으로는 다국가·기관의 참여를 확대시킬 것으로 예상된다.

〈그림 2-10〉 Horizon 협력 네트워크 지도



자료: European Comission(검색일: 2023.7.9.)

우리나라는 EU와 2007년 「양자 과학기술 협정」을 맺어 공동의 이익 및 우선순위를 바탕으로 연구·혁신에 대한 협력을 증진하고자 노력하고 있다. 5G, 사물인터넷, 사이버보안, 기후과학, 전염병, 나노 전자공학, 클라우드와 인공지능 등의 영역에서 협력해 왔으며, 최근에는 자율주행 시스템과 재해 복원력, 극지 연구 등의 새로운 분야를 추가하였다. 우리나라는 제3국의 자격으로, 'Horizon 2020(2014~2020)'에는 128개 한국소속 기관이 197개 과제에 참여했으며, 'Horizon Europe(2021~2027)'에는 14개 기관이 17개 과제에 참여하고 있다.[53]

이를 위해, 국내에서는 과학기술정보통신부와 산업통상자원부에서 Horizon Europe 참여연구자 지원사업을 운영하고 있다. 과학기술정보통신부는 주로 참여가 확정되거나 참여를 준비하는 연구자 개인을 대상으로 지원하며, 한국연구재단(한-EU 공동연구지원사업, 한-EU 협력진흥사업)과 정보통신기획평가원(한-EU 공동연구지원사업)을 통해 진행하고 있다.

산업통상자원부는 한국산업 기술진흥원을 통해 중소·중견기업을 대상으로 중점 지원하고 있으며,[54] 상기 프로그램을 통해 '우주과학 데이터 분석 및 서비스 개발', '지열·수력·해양 및 기타 재생에너지 개발', '재생의학 국제 공동연구', '축산 시설로부터 발생하는 암모니아 및 온실가스 배출량 기준 정립', '바이오매스 기반 나노소재 개발을 위한 네트워크 구축' 등의 프로그램에 참여한 바 있다.

(3) InvestEU와 CEF(Connecting Europe Facility) 프로그램

EU의 연구와 기술개발 지원의 많은 부분을 'FP(Horizon Europe)' 프로그램이 차지하고 있으나, 이 외에도 다양한 기술 및 지원 프로그램이 존재한다. 그중 'InvestEU'와 'CEF'는 인프라와 기술 등을 중심으로, 탄소 저감이나 기후대응과 관련된 사업·프로젝트에도 활발하게 투자하고 있다.

'InvestEU'는 지원 유형 중 '유럽의 전략적 투자' 부문에 해당하는 프로그램으로, 유럽의 혁신과 일자리 창출을 위해 유럽 역내 전역에 대한 투자를 유치하는 데에 목적을 두고 있다. 2015~2020년 기간 동안 5천억 유로 이상을 동원한 유럽 투자모델을 기반으로, EU 전역에서 2021년부터 2027년까지 3,720억 유로 이상의 투자 유치를 목표로 하고 있다. 해당 프로그

53) European Commission(2023.5.22.), Horizon Europe: The EU and the Republic of Korea launch formal negotiations on association to the programme(검색일: 2023.8.10.)

54) Korea-EU Research Center, Horizon Europe : The EU Research & Innovation Programme 2021-2027(검색일: 2023.08.10)

램은 지속가능한 인프라, 연구, 혁신 및 디지털화, 중소기업, 사회적 투자와 기술까지 4개의 정책적 쟁점(window)을 중심으로 구성되며, 전체 투자의 30%는 기후 목표에 활용될 계획이다.

'CEF'는 유럽의 '그린 딜(European Green Deal)'[55] 정책을 이행하는 핵심 지원 수단으로, 2030년-2050년 EU 탈탄소화 목표를 이행에 있어 중요한 역할을 하고 있다. 실제로 CEF 프로그램은 유럽 내 운송과 에너지, 디지털 서비스 세부분을 중심으로, 각각의 연결성이 누락된 부분을 연계할 수 있는 다양한 프로젝트를 지원하고 있다. 이러한 지원을 통해 유럽 지역 간의 이동을 쉽고 지속가능하게 만들 수 있으며, 재생에너지 사용의 확대, 에너지 안보 강화, 기업 및 시민간의 상호작용 촉진 등을 통해 모든 유럽 회원국 및 시민 혜택을 증가시킬 것으로 예측하고 있다.

2) IMO 과학기술 협력 체계

국제해사기구(IMO)는 해운과 관련한 각종 기술적 사항과 선박에 의한 해상오염 방지, 국제 해운과 관련된 법률문제 해결을 위한 국제협력을 강조하고 지원하고 있다. IMO에 의한 국제협력의 전반적인 내용은 '파트너십 및 프로젝트 부서(DPP; Department of Partnerships and Projects)'가 다양한 외부 파트너(IMO 회원국, UN 기관, 금융기관, NGO, IGO, 민간 등)와의 기회를 개발하고 지원하는 등, 협력·지원 전반을 총괄하고 있다.

55) 주한유럽연합대표부(2020.7.5.)(검색일: 2023.04.19.)

IMO의 기술지원을 위한 자금은 '기술협력 기금'과 다양한 기관의 기부를 통한 자금(Multi-Donor Trust Funds), 특정 프로그램에 대한 재정 및 현물 지원으로 구성된다. 이렇게 모아진 자금을 바탕으로 도서국 포함 개발도상국에 대한 기술과 정책을 지원하는 한편, 외부 기관뿐 아니라 IMO 내부의 기술협력 등, 다양한 기술 협력과 혁신을 도모하고 있다.

IMO는 현재 총 12개의 파트너십 프로젝트를 진행하고 있다. 주로, 해운부문의 저탄소/탈탄소 전환을 위한 프로젝트와 선박 및 해양쓰레기로 인한 환경 영향 대응을 위한 프로젝트로 구성되어 있으며, 그 외에도 운송 기술 지원과 기술·혁신 교류를 위한 프로젝트 역시 포함된다.

특히, 저탄소 전환을 위한 파트너쉽은 해운산업의 저탄소 전환을 위한 'GreenVoyage2050', IMO-GHG 전략 이행 지원을 위한 역량 구축 교육 프로그램 'GHG SMART', 해운의 탄소배출량 감축을 위한 녹색 기술 시연 및 배포를 위한 'IMO CARES', 에너지 효율성 개선 및 저탄소기술 활용 증대 지원을 위한 'GMN-The Global MTCC Network', 그리고 개도국을 대상으로 탈탄소화 촉진을 위해 지식을 공유하고 국제해운 커뮤니티의 네트워크와 협업 기회를 구축하기 위한 'NextGEN' 등을 진행하고 있다.

〈표 2-14〉 IMO DDP 프로젝트 목록

1. GreenVoyage2025	7. GloLitter Partnerships
2. GHG SMART	8. GloNoise Partnership
3. IMO CARES	9. SENSREC Phase II
4. GMN-The Global MTCC Network	10. NestGEN
5. GloFouling Partnerships	11. FINSMART
6. TEST Biofouling	12. Innovation Forum

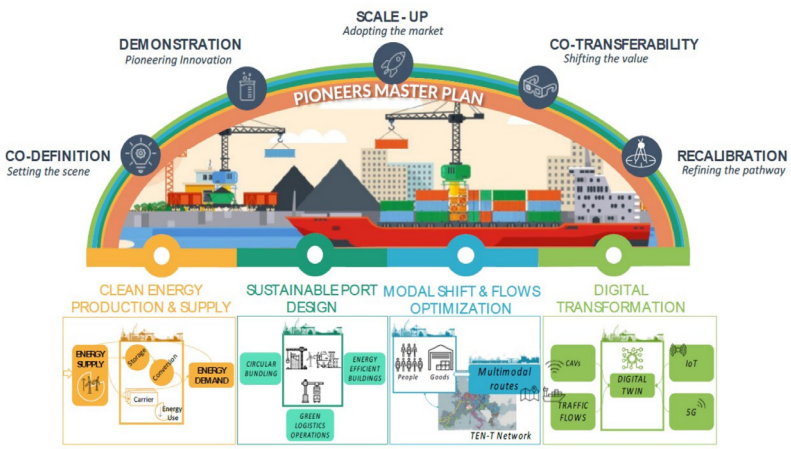
자료: IMO, Partnerships and Projects(검색일: 2023.7.13.) 참고 저자 작성

3. 해운·항만 과학기술 국제협력 사례

1) PORTable Innovation Open Network for Efficiency and Emissions Reduction Solutions

'PORTable Innovation Open Network for Efficiency and Emissions Reduction Solutions; PIONEERS)'은 제8차 FP 'Horizon 2020' 프로그램의 '사회적 과제(Societal Challenges)' 분야, 스마트·그린 및 통합 교통 클러스터의 일환으로 출범하였다. 약 3,300만 유로(EU 지원; 2,500만 유로) 규모로, 2021년 10월부터 2026년 9월까지 5년 동안 진행된다. 프로젝트는 앤트워프(Antwerp) 항만을 중심으로 바르셀로나(Barcelona), 콘스탄차(Constanta), 펜로(Venlo) 항만이 참여하고 있으며, 총 46개의 파트너로 구성된 컨소시엄의 조정을 통해 수행되고 있다.[56]

〈그림 2-11〉 PIONEERS 컨셉



자료: European Commission, PORTable Innovation Open Network for Efficiency and Emissions Reduction Solutions, https://cordis.europa.eu/project/id/101037564/results(검색일: 2023.7.10.)

56) European Commission, PORTable Innovation Open Network for Efficiency and Emissions Reduction Solutions(검색일: 2023.7.10.)

2050년까지 역내 항만을 그린 인프라로 전환하는 것을 목표로, 탄소 배출량을 줄이기 위한 몇 가지 특정 솔루션(핵심 주제: 청정에너지 생산 및 공급을 위한 녹색 항구 혁신 구현, 전기와 수소 및 메탄올 차량의 배치, 지속가능한 항구 디자인, 전환 교통(modal shift) 및 흐름 최적화, 5G 및 AI 기반 디지털 플랫폼을 통한 전환 등) 개발을 진행하고 있다. 핵심 주제에 따른 각각의 연구개발을 수행하고, 총 19개의 실증(시범)사업을 통해 일반 항만들에 확장을 계획하고 있다.

역내 항만의 탄소배출 저감을 위해, 앞서 설명한 핵심 주제별로 다양한 세부 적용방안(기술)의 연구개발을 추진하고 있다. 우선, '청정에너지 생산 및 공급' 분야는 해류 에너지 생성, 육상풍력 생산, 수소 충전 인프라, 터미널 운영을 위한 배터리 저장 및 친환경 에너지 스마트 관리, 멀티연료 항만 구축 등, 주로 친환경 에너지 생산 방법과 공급을 위한 인프라 설치에 대한 기술과 방법들이 포함된다. '지속가능한 항만 디자인'에서는 그린 및 친환경 콘크리트를 위한 지역자원 회복, 증기 및 폐열의 이용, 넥스트젠 디스트릭트 등 에너지 전환 및 자원 효율 증대를 위한 방법을 모색하고 있다.

'전환교통과 흐름 최적화' 분야는 복합 운송 교통 계획을 위한 IT 플랫폼, 항만 지원의 출퇴근 모드 전환 실현, 화물 흐름 최적화, MaaS 플랫폼을 활용한 멀티모달액세스 등 교통과 물류 효율화·최적화를 위한 연구개발을 포함하며, '디지털 전환' 분야는 컨테이너 셔틀 솔루션의 자동화, 선박 자동화, 선박교통 자동화, 5G 기반 지능형 선박 위치 파악 기술, 컨테이너 운송 예측, 디지털 트윈 등의 방법을 포함한다.

〈표 2-15〉 PIONEER 핵심 분야 및 세부 기술

핵심 분야 (Pillar)	세부 기술·방안 (Action)
1. 청정에너지 생산 및 공급	• Energy generation from water currents • On-shore wind production • Hydrogen refuelling infrastructure • A corridor of modular docking stations for energy containers • Battery storage & smart management of green energy in terminal operations • Multi-fuel port • OPS for ferries • Tugboats on H^2 and methanol • Hydrogen heating for buildings
2. 지속가능한 항만 디자인	• Local resource recovery for green, circular concrete • Power-to-methanol • Steam and waste heat • NextGen District • Zero pellet loss & plastic catcher • Electric green last-mile • Green straddle carriers • Antwerp@C partnership for CO2 capturing & utilisation
3. 전환교통 (Modal shift) 및 흐름 최적화	• IT platforms for planning multimodal transport • Realizing a modal shift in the commute of port employees • Cargo flow optimization • Multimodal access to port using of a MaaS platform • Cargo flow prediction
4. 디지털 전환	• Automated container shuttle solutions for port operations • Automated vessels • Vessel traffic optimization • Maritime 5G for intelligent vessel location • Container transport forecast • Digital Twin

자료: European Commission, PORTable Innovation Open Network for Efficiency and Emissions Reduction Solutions, https://cordis.europa.eu/project/id/101037564/results(검색일: 2023.7.10.)

2) Green C Port(Green and Connected Port)

'Green C port'는 EU의 'CEF 프로그램'이 지원하고 있는 프로젝트로, 항만 운영이 도시에 미치는 영향 저감, 항만 및 선박의 배출량 모니터링, TEN-T(Trans-European Transport Network) 핵심 네트워크 내 항만 운영성능의 최적화를 위한 디지털 도구·기술 제공 등을 목적으로, 2019년 4월부터 2023년 3월까지 진행되었으며, 4개의 유럽국가, 12개의 파트너가 참여하였다.

〈표 2-16〉 Green C Port 프로젝트의 구체적 목표

1. 신형 또는 혁신 센서 네트워크 업그레이드
2. 기존 항만 대상 실시간 데이터 수신 기능 탑재(IT 플랫폼 구현)
3. 도시에 미치는 영향 감소
4. 항만 및 선박 배출량 모니터링
5. 항만 운영 효율성 향상, 화물처리 최적화
6. 핵심항구 화물 출입 관리
7. 사례연구 및 주요 이점 전달

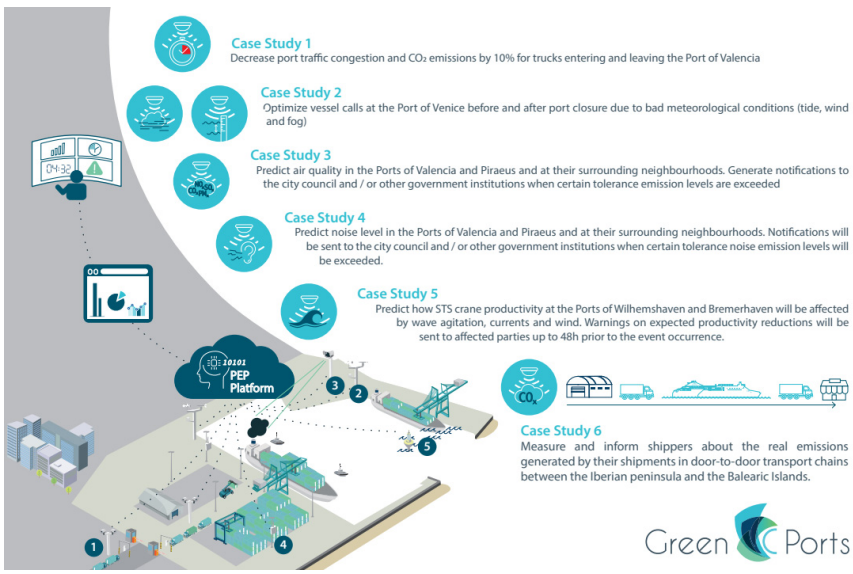
자료: Green C Ports, Overview(검색일: 2023.4.25)

해당 프로젝트는 상기 목표에 따라, 주로 센서, 빅데이터 플랫폼, 비즈니스 인텔리전스 툴, 인공지능 모델링 등 에너지 효율성을 향상시키고 탄소 배출량을 줄일 수 있는 기술과 솔루션을 핵심 주제로, 세부 연구 및 기술 개발을 수행하였다.

해운·항만 부문의 탄소 저감과 관련해서는, 항만의 교통혼잡 관리를 위한 스마트 도구(센서 네트워크, 플랫폼) 기반 교통량 진·출입 예측 시스템을 구축하고, 항만 내 물류요소의 항만 접근성 개선을 위한 선박 입·출항 시간 최적화 예측 도구, 항만 및 선박 배출량 모니터링을 위한 가스 측정 카메라(센서) 및 플랫폼 등을 구축하였다. 그 외에도, 선박에서 해안까지

(ship-to-shore)의 크레인 생산성 예측 모델 및 정보, 복합운송체인(multimodal transport chain) 이용한 실시간 배출량 측정 등에 관한 기술과 방법이 개발되었다. 최종적으로는 개발·연구된 기술들을 중심으로 유럽 횡단 운송네트워크 정책(TEN-T)에 포함되는 핵심 항만 5개(Valencia, Venice, Piraeus, Wilhelmshaven 및 Bremerhaven)를 대상으로 실증연구를 거쳐 각 기술들의 이점과 이용 확대 방안을 도출하였다.

〈그림 2-12〉 Green C Ports 시범사업



자료: Green C Ports, Case studies(검색일: 2023.4.19.)

제3절 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성

1. 해양 탄소중립 과학기술 관련 현행 정책 패러다임의 한계

1) 장기적 목표 달성을 위한 미래기술의 불확실성

2015년 파리협약 체결 이후 국제사회는 산업혁명 이전 대비 지구 평균 온도의 상승을 2℃ 아래로, 더 나아가 1.5℃ 아래로 억제하기 위해 노력하는 데에 합의한 바 있다. 이후 발표된 IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체)의 2018년 '지구온난화 1.5℃ 특별보고서'는 평균 온도의 상승을 1.5도 아래로 억제하는 것이 더이상 선택의 문제가 아님을 증명하는 한편, 현재 전지구적으로 추진 중인 '2050 탄소중립' 목표에 중요한 근거가 되었다.

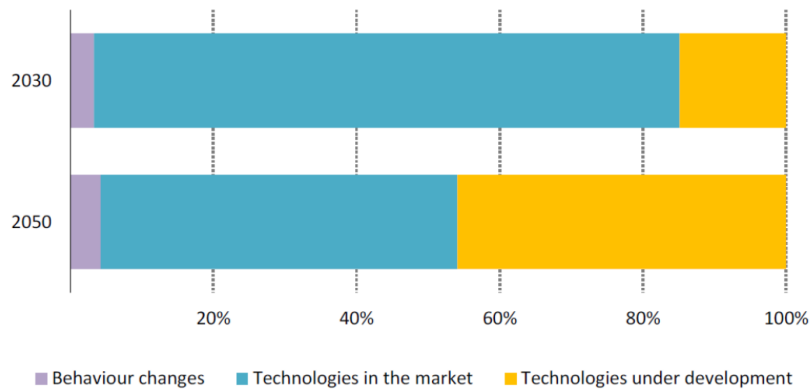
이에 2019년 독일과 프랑스의 탄소중립을 목표로 규정하는 법령 제정을 시작으로, 2022년 10월 기준 전세계 18개 국가, 즉 한국, 독일, 스웨덴, 일본, 프랑스, 영국, 한국, 캐나다, 스페인, 아일랜드, 칠레, 포르투갈, 덴마크, 헝가리, 뉴질랜드, 룩셈부르크, 피지, 러시아 및 유럽연합이 탄소중립을 법령에서 명문화하였다.[57] 우리 정부는 2020년 10월, '2050년까지 탄소중립 달성'을 목표로 법제화하고 전사회적인 탄소중립 패러다임 전환을 위한 범정부 차원의 「탄소중립 추진전략」을 발표한 데 이어, 최근에는 국가 차원의 탄소중립 목표를 달성하기 위한 절차와 정책 수단을 규정한 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 제정하였다.

하지만 전 지구적인 목표 수준과 시한이 정해진 반면, 이를 현실화하는 문제는 현재 기술 패러다임에서 불가능에 가까운 것으로 평가되고 있다. 에너지 사용·전환 시나리오에 따른 2050 탄소중립 달성 가능성을 분석한

57) 장연재·공지영(2022), p. 36.

국제 에너지 기구(IEA)의 2021년 보고서, 'Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector'에 따르면, 2050년까지 탄소중립을 달성하기 위해서는 바이오에너지, 배터리 및 전기화, 수소 에너지 및 연료전지, 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 등 아직 개발 초기단계에 머물러 있거나 기술적 불확실성이 높은 기술들의 혁신적인 발전이 필수적임을 지적하고 있다. 이러한 기술들은 2050 탄소중립 이행 트랙에서 주요 분기점으로 평가되는 2030년 이후의 온실가스 감축 경로에서 많은 부분을 책임져야 하며, 따라서 해당 기간 감축 요구량의 약 50%에 대한 감축 가능성은 아직 상용화되지 않은 상기 핵심기술의 시장성 확보에 달려 있다.[58]

〈그림 2-13〉 기술의 상용화 구분에 따른 감축 요구 역할 비중



자료 IEA(2021.5.)(검색일: 2023.7.3.), p. 16.

이창훈 외(2021)는 탄소중립 목표 달성을 위한 주요 지표를 전략, 기술, 제도 등으로 제시하고, 특히 기술 발전 정도에 따른 불확실성을 최소화 하기 위한 방안으로 주요 지표별 이행 가능성, 특히 핵심기술의 발전 양상을 짧은 주기로 지속적으로 점검하고, 이를 감축전략의 수정에 반영하는 이행 점검체계를 제안하고 있다.

58) IEA(2021.5.)(검색일: 2023.7.3.), pp. 16-19.

하지만 현재 우리 탄소중립 기술 관련 정책의 패러다임은 2050년이 아닌 2030년을 목표 달성 시한으로, 이미 시장에서 어느 정도 경제성이 확보·검증된 태양광 및 풍력 등의 재생에너지, 배터리 기술 기반의 전기화, 그리고 에너지 효율 개선 기술 위주의 시나리오를 설정하고 있는 것으로 보인다.

또한, 최근 제정된 「탄소중립 기본법」에서 '녹색기술의 연구개발 및 사업화 등의 촉진하기 위한 방안'으로 관련 기술 정보의 수집·분석 및 제공, 국제협력 등을 규정하고 있으나,[59] 이에 대한 구체적 내용은 아직 뒤따르지 못하고 있다. 보다 아쉬운 점은, 탄소중립 이행 트랙에서 성공 여부를 결정하게 될 2030년 이후의 새로운 기술 패러다임에 대한 적극적인 논의가 시급한 현시점에서, 국가 차원의 탄소중립 패러다임에서 가장 중요한 결정요인인 '기술' 또는 '혁신기술' 자체에 대한 별도의 정책적 접근, 이에 따른 전략적 방안 역시 아직 구체화하지 못하고 있다는 데에 있다.

현시점의 정책과정에서는 2050년 패러다임의 중간 목표시점인 2030년까지의 목표 달성이 당장의 최우선적 화두일 수는 있으나, 앞서 살펴본 바와 같이 정작 탄소중립 기술의 혁신으로 촉발되는 시장의 재편은 2030년 이후의 혁신기술 패러다임에 따라서 촉발될 가능성이 매우 높다. 따라서, 이러한 기술적 불확실성에 효과적으로 대응하는 한편, 이른바 혁신기술의 결정 과정에 참여하거나 이를 주도할 수 있는 전략적 방안이 시급하게 요구되는 시점이라고 할 수 있다.

59) 「탄소중립 기본법」 제56조(녹색기술의 연구개발 및 사업화 등의 촉진)

2) 해양 탄소중립 과학기술 국제협력의 제약 요인

(1) 전략적 접근을 위한 해양 탄소중립 과학기술 관련 기초자료 미비

최근 우리 정부 역시 탄소중립 과학기술 국제협력의 중요성을 인식하고, 선도국과의 기술협력 방향성 설정 및 체계 구축을 서두르고 있다. 최초로 법제화된 국가연구개발예산의 중장기 투자전략인 「제1차 국가연구개발 중장기 투자전략(2023~2027)」에서 2030년 과학기술 5대 강국 도약을 목표로 12대 국가 전략기술 육성, 그리고 에너지 기술혁신 및 저탄소 산업구조 전환을 통한 탄소중립 이행에 적극 투자를 강조한 바 있다. 또한, 이를 위한 주요 전략으로 '과학기술 국제협력의 전략성 강화', '범지구적 지속가능 발전을 위한 과학기술 국제공동연구 활성화' 등을 제시하였다. 탄소중립 녹생성장 위원회 역시, 「탄소중립·녹색성장 추진전략」 및 「탄소중립·녹색성장 기술혁신전략」을 통해 '양·다자협력을 통한 기후대응 연대 강화', '선도국 중심의 전략적 국제협력 강화'와 더불어 '실증 연계형 국제협력 플래그십 사업 추진' 등의 추진방안을 제시한 바 있다.

우리 정부의 이러한 정책방향은 앞서 살펴본 2050년 탄소중립 달성 과정의 본질적 문제점, 즉 탄소중립 구현을 위한 실체적 기술, 아직은 현실적이지 못한, 그래서 어떠한 양상으로 전개될지 알 수 없는 '혁신기술'의 불확실성, 이로 인한 정책과정과 현실의 기술·시장 간의 괴리를 최소화하기 위한 전략적 접근으로 이해할 수 있다. 하지만, 이러한 전략적 접근, 특히 관련 국제협력을 강화하는 방향성에도 불구하고, 구체적인 시행전략이나 투자 방향에 대한 논의는 본격화되지 못하고 있다.

이는 구체적 추진방안 논의의 근거가 될 만한 기초자료, 즉 (해운·항만 부문의) 혁신기술 후보군에 대한 유효성 검토, 이들 기술 분야별 우리 기술의 역량 수준, 성장 가능성 및 중장기적 시장 전망 등에 대한 분석 등이 미비하기 때문인 것으로 파악된다. 오상진 외(2020)는 2020년 기후기술

분야의 우리 수준에 대한 평가를 통해, 향후 R&D 투자 및 육성 방향에 새로운 대안 마련의 필수적인 조건으로 우리 기술의 글로벌 경쟁력을 측정·분석한 정량적 기초자료 생산이 필요함을 이미 지적한 바 있다.

이와 관련하여 5년 주기의 '녹색기술 수준 조사(녹색기술센터(GTC))', 국가 중점과학기술에 대한 2년 주기의 '기술수준 평가(한국과학기술기획평가원(KISTEP))'을 통해 우리의 기술역량에 대한 수준평가, 이와 관련한 분석결과 등을 공유하고 있으나, ① 이는 해양 또는 해운·항만이 거시적인 전체의 일부분으로, 우리가 필요한 해운·항만 부문에 대한 해상도를 반영하지 못하고 있으며, ② 조사 및 분석결과의 효용을 극대화하기 위해서는 시간적 해상도, 즉 조사-공개의 주기를 1년 정도로 짧게 할 필요가 있다.

이러한 기초자료 외에도 추가적으로, 해운·항만 부문 탄소중립 개별 기술 항목의 대체 가능성, 특정 기술 간 연계에 따른 정(正)·부(負)의 효과 등에 대한 조사·연구 역시 논의조차 되지 못하고 있다. 이러한 기술 현황·전망 및 검토결과는 정교한 정교한 대응방안 설계를 위한 필수적 근거자료로, 이들 기초자료의 미비는 전략적 접근을 위한 종합적 관점의 결여, 나아가 정교한 대응전략 마련에 주요한 장애 요인으로 작용하여, 도리어 2050 탄소중립 달성을 위한 '혁신기술' 및 활용에 대한 불확실성이 증대되는 순환구조를 고착화하고 있는 것으로 보인다.

(2) 기술 선도국 중심의 배타적 무역장벽 및 기술동맹 강화

앞서 살펴본 바와 같이, 2030년 전후에 이르러 '2050 탄소중립' 이행을 위한 주요 핵심기술 위주로 환경·기술 시장이 근본적인 재구조화 과정을 거쳐 수요의 전환, 혁신적 기술 패러다임의 고도화 등을 통해 시장 규모 자체의 기하급수적 성장, 그리고 그 외에도 새로운 혁신기술 및 이들 항목의 연계기술 등의 추가적 틈새 시장의 형성 및 급격한 성장이 확실시 되고 있다.

새롭게 형성되는 시장을 선점하거나 주도하기 위한 산업·경제적 동기 외에도, 최근 전지구적인 보건·사회·경제적인 환경의 급격한 변화 그리고 이에 따른 미·중 중심의 기술패권 경쟁 등의 새로운 국제정치 구도의 등장 등으로 새로운 기술 패러다임 환경에서 기술주권을 확보하기 위한 '기술안보' 차원의 접근이 활발해지고 있는 즈음이다. 즉, 주요 국가들은 2030년 이후 전개될 미래 탄소중립 관련 핵심기술 및 관련 산업의 시장 환경에서 이를 '기술주권' 개념의 경제·안보 차원의 국가 생존의 문제로 인식하고 있으며, 이에 따라서 심화되는 무한경쟁에 대한 전략적 방안으로 무역장벽 및 기술동맹 등을 강화하고 있는 추세이다.

이러한 맥락에서 최근 국제적인 보호무역주의와 기후변화 대응 및 환경의 지속가능성에 대한 규제 강화 추세가 점차 연계되고 있다. 이에 따라 이른바 미래기술 발전을 선도하고 있는 주요 국가들은 새로운 탄소중립 기술 시장을 선점하기 위해, 주로 선도국 간 과학기술 국제협력 및 ODA 등 다양한 국제협력 수단을 적극 활용하고 있다.

이른바, '혁신기술'에 의한 시장 재편, 그리고 무역 및 경제와 연계한 환경규제의 강화 등으로 탄소중립 기술 시장, 특히 해운·항만 부문의 탄소중립 기술 시장의 급성장이 확실시 되는 상황에서, 시장의 구조가 고착화 되기 전에 기술 선도그룹의 진입은 필수적이다. 하지만, 아이러니하게도 국내 기술 수준은 타 기술 선도국들에 비해 아직 상대적으로 낮은 수준으로 평가되고 있다. 해운·항만 부문 탄소중립 구현을 위한 핵심기술에 대한 미시적·종합적 평가·분석에 대한 자료는 아직 미비하지만, 신현하 외(2023)에 따르면, 국가녹색기술연구소의 '2020 기후기술 수준조사' 결과 주요 5개국(한국, 중국, 일본, 미국, EU) 중 우리나라는 최고 기술보유국으로 평가된 미국 및 EU 대비 기술수준 80%, 기술격차 3년으로 '추격그룹'에 속하는 것으로 나타났다.[60]

〈표 2-17〉 기후기술 감축 분야 국가별 기술수준, 기술격차 및 연구역량

구 분		한국	중국	일본	미국	EU
기술수준(%)		80	80	90	100	100
기술격차(년)		3	3.5	1.5	0	0
연구역량 (점)	기초연구	68.5	66.3	82.6	90.7	89.8
	응용개발	71.8	68.3	79.1	88.0	87.2

자료: 오상진 외(2020.12.) 재인용: 신현하 외(2023), p. 3

시장의 재구조화가 어느 정도 완료될 것으로 예상되는 2030년 전후에 유력 핵심기술 분야의 기술 수준을 상위 또는 최상위 수준, 즉 기술 선도국 그룹에 속하는 수준으로 끌어올리기 위해서, 얼마 남지 않은 시간 동안 획기적으로 기술 역량을 제고하기 위한 매우 정교한 전략 마련이 시급히 요구되는 시점이라고 볼 수 있다. 하지만, 현재의 정책 패러다임에서는 미래 시장환경 변화, 구조 재편 등에 대한 인식이 주요하게 나타나고 있지 않으며, 이러한 이유로 인해 주요 법령 및 정책에서 제시하고 있는 '과학기술 연구개발의 전략성 강화', '국제 공동연구의 활성화' 등의 전략적 접근방안을 구체화하지 못하고 있다.

2. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안의 필요성

1) 미래 혁신기술 시장 개편에 따른, 기술 역량 제고를 위한 전략적 접근

현재 우리의 탄소중립 정책과정에 있어 가장 우려되는 부분은 2050 탄소중립 목표 달성의 여부를 결정하게 될 2030년 이후의 '혁신기술' 패러다임에 대한 국가 차원의 고민이 깊지 않다는 데에 있다. 2030년 이후의 감축경로, 이를 결정하게 될 혁신적인 핵심기술 및 주요 연계기술의 개발 및 발전,

60) 오상진 외(2020.12.), p. 32.

이로써 새로운 구조로 전환될 수밖에 없는 시장의 재편 정도로 이어지는 향후 탄소중립 기술 시장의 시나리오에서, 이른바 '불확실성'을 최소화하기 위한 '탄소중립 기술전략', 그리고, 미래의 혁신기술 시장을 주도하거나 참여하기 위한 전략적 방안 마련의 시급성은 시간이 갈수록 커지고 있다.

한편, '2050 탄소중립 달성'은 이미 인류의 생존을 위한 전 지구적 공동의 목표로 설정되었지만, 개별 국가의 이해와 처해진 상황에 따라서 이에 대한 대응 양상은 매우 다르게 나타나고 있다. 예를 들어, 미국, 유럽연합 등 주요 선진국은 탄소중립 이행을 위한 주요 추진사항의 일환으로 '탄소국경 조정제도(CBAM; Carbon Border Adjustment Mechanism)', '탄소세(Carbon Tax)' 등의 도입 등을 시행하거나 추진하고 있다. 이는 국가의 배출이 감소세에 접어든 주요 선진국들이 탄소중립 추진과 더불어 새로운 시장의 패러다임에서 자국의 산업적 이익을 보호하려는 정책수단으로 이해할 수 있다.[61] 하지만, 이들 소수의 주요 국가, 즉 이미 '온실가스 배출정점(Peak)'을 지나 저탄소 배출 산업구조로 전환한 주요 선진 국가들 외에는 탄소중립 이행과 경제 성장을 동시에 추구하기 쉽지 않은 상황이다. 우리의 경우 기술적 경쟁력은 이들과의 격차가 상대적으로 크지 않은 추격그룹에 속해 있음에도 아직 배출정점을 지나오지 않은 상태로, 이미 오래전부터 배출감소 국면에 들어선 주요 선진국, 즉 친환경 기술 또는 탄소중립 구현을 위한 주요 핵심기술의 선도국가 그룹에 비해서 그리 유리한 상황은 아니다.

이러한 환경에서, '국제협력'은 현시점 우리에게 있어 앞서 제시한 불확실성을 최소화하는 동시에, 미래 시장의 대부분을 차지하게 될 혁신적 핵심기술의 결정과정에 주도적으로 참여하거나 이로 인해 촉발되는 시장에서 선도적인 위치를 점할 수 있는 매우 유효한 전략적 접근방안이다. 본디, 과

61) 서인석·이유현(2021), p. 351.

학기술의 연구개발에 있어 국제협력은 기술 수준의 우위에 있는 협력대상의 우수한 기술역량을 흡수하거나, 개발 초기부터의 협력으로 양자의 공동 우위를 창출함으로써 시너지 효과를 얻을 수 있다. 또한, 그 어느 누구도 성공을 확신할 수 없는 연구개발의 도전적 탐험의 구조에서, 연구개발에 소요되는 비용은 물론 실패에 대한 위험 역시 공동으로 부담할 수 있다. 또한 국제적으로 공동 활용이 가능한 특허 및 표준, 또는 플랫폼 등을 구성하여 글로벌 가치사슬(Global value-chain)을 구축하는 효과가 있어, 기후변화나 COVID-19와 같이 전 지구적으로 발생하는 문제에 공동 대응하기 위한 기제로 그 중요성이 더욱 부각되고 있다.[62]

2) 탄소중립 기술 선도국 간 기술동맹 추세에, 선제적으로 대응

전 지구적 기후변화대응 감축 노력과 함께 탄소중립 기술 시장이 급속도로 성장하고 있는 가운데, 최근 선진국들을 중심으로 탄소중립 달성을 위한 무역기술장벽(TBT; Technical Barriers to Trade) 등을 도입하여 보호무역주의를 강화하려는 시도가 본격화되고 있으며, 이에 따라서 국가 안보 차원으로 진화한 '기술주권(Technology Sovereignty)'의 확보가 날로 중요해지고 있다. 유럽연합(EU)의 '탄소 국경 조정제(CBAM)' 도입은 이러한 움직임의 대표적인 사례로, 주요 산업 부문에 대해서 2023년 10월 도입한 바 있으며, 이에 따라서 배출량을 보고하고 이를 수집하는 일정 기간 소요 후 2026년부터는 본격 시행, 즉 인증서 구매의무가 발생할 것으로 예상되고 있다.

이와 더불어 미·중 기술패권 경쟁 중심의 新기술냉전 구도가 조성됨에 따라서 기술선도국 간 기술동맹이 강화되는 추세로, 배타적인 탄소 무역장벽을 극복하고 날로 첨예해지고 있는 기술경쟁 환경에 대응하기 위한 방안

62) 이철주·이정우(2022), pp. 25-26.

마련이 필요한 상황이다.[63] 이러한 맥락에서, 우리 역시 미래 기술·시장 환경의 급격한 변화, 이에 따른 기술주권의 확보를 위한 기존 선도그룹과의 협력 또는 유력한 과학기술 협력기술동맹에 참여하기 위한 전략적 방안에 논의를 본격화해야 하는 시점이다.

새로운 시장의 주요 패러다임으로 확실시되고 있는 탄소중립 및 친환경 기술, 이를 위한 디지털 전환 및 최적화 기술 분야 등에서 이미 최상위권을 가까운 거리에서 추격하고 있는 우리의 기술 역량 및 인프라 지원 등을 강화함으로써 내재적 역량의 획기적 성장을 도모하는 한편, 국내외 국제협력 지원 프로그램 등을 적극적으로 활용·연계하여 혁신적인 공동 연구개발 협력을 위한 다자주의적 협력관계를 적극적으로 발굴·구축해야 한다.

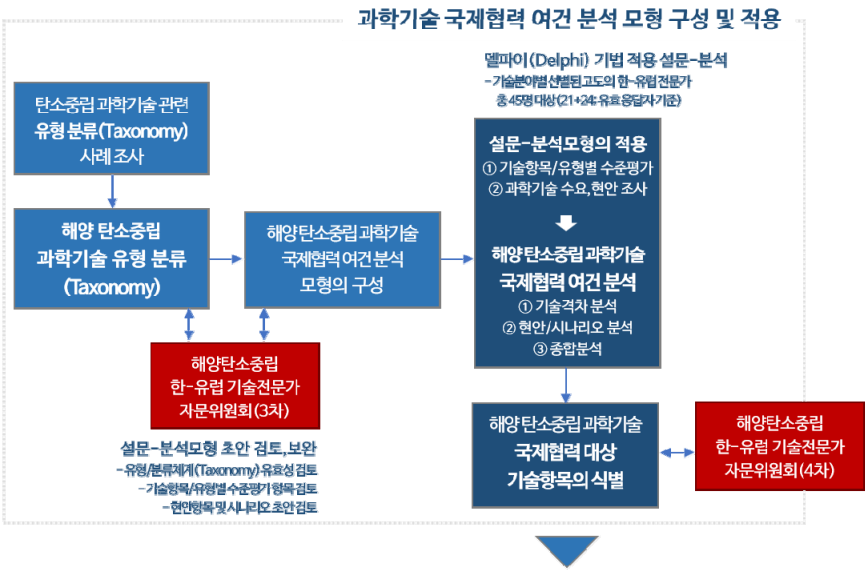
63) 신현하 외(2023), p. 3.

03
해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석

제3장에서는 해운·항만 부문의 탄소중립 구현을 위한 최신 과학기술 및 국제협력 동향 조사결과를 토대로, 2050 탄소중립 달성의 관건으로 평가되는 이른바 혁신기술의 연구개발 또는 표준화 작업 등의 국제협력 추진을 위한 국내외 여건 및 현안을 검토하였다. 이어서, 검토결과를 종합적으로 분석하여 평가지표별 수준급간에 따른 국제협력 대상 유형을 구분하고 다시 이를 바탕으로 전략적인 국제협력 대상 기술항목을 식별하였다.

이를 위해, 탄소중립/친환경 과학기술 분류체계의 사례에 대한 검토 결과를 바탕으로, 본 연구의 여건 분석을 위한 프레임을 해운 및 항만 부문 각각의 기술 유형에 따른 분류체계로 구성하였다. 또한, 분류체계안에 따른 상하위 속성(유형) 및 기술항목에 대해서 주요 선도·경쟁국가와의 수준평가를 통해 격차분석을 수행하는 한편, 분야별 현안 및 이에 따른 수요조사를 통해 국제협력 추진을 위한 현안 분석을 수행하였다.

〈그림 3-1〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석



자료: 저자 작성

제1절 설문-분석모형의 구성

1. 해양 탄소중립 과학기술의 유형 분류

1) 탄소중립 과학기술 관련 유형 분류체계(Taxonomy) 사례

(1) 국내외 녹색기술 분류체계

가. 유럽연합 녹색기술 분류체계(EU Taxonomy)

유럽연합은 선제적인 기후변화 대응과 지속가능한 사회로의 전환을 목적

으로, 자본의 흐름을 친환경성과 연계하는 방향으로 유도하는 한편 이를 위해 환경적으로 지속가능한 경제활동에 대한 정의 및 분류 기준 등을 제시하였다.[64] 유럽연합의 녹색기술 분류체계는 아래와 같이 총 6가지 환경목표를 설정하고, 이를 위한 판정기준을 모두 충족하는 경우에 한하여 환경적으로 지속가능한 경제활동으로 인정하고 있으며, 구체적 달성 여부는 탄소 배출량 등과 같은 기술 심사 기준(Technical Screening Criteria, TSC)에 부합해야 한다.

〈표 3-1〉 유럽연합 녹색기술 분류체계의 환경목표

1. 기후변화 완화(climate change mitigation)
2. 기후변화 적응(Climate change adoption)
3. 해양자원 보존(sustainable and protection)
4. 순환경제로의 전환(transition to a circular economy)
5. 오염방지(pollution prevention and control)
6. 생태계 보호(protection and restoration of biodiversity and ecosystem)

자료: European Commission(2020.05.), Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance(검색일: 2023.8.7.)

〈표 3-2〉 유럽연합 녹색기술 분류체계의 판단 조건

1. 6대 환경목표 중 하나 이상의 환경목표 달성에 상당히 기여할 것
2. 다른 목표들에 중대한 침해를 주지 않을 것
3. 최소한의 사회적·지배구조적 최소보호 요건을 준수할 것[65]

자료: European Commission(2020.05.), Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance(검색일: 2023.8.7.)

64) 국가녹색기술연구소(2021.10.31.) 유럽연합의 ESG 동향과 국내에의 정책적 시사점(검색일: 2023.7.2.)

65) '다국적 기업에 대한 경제협력개발기구(OECD)의 가이드라인', '기업과 인권에 대한 유엔의 이행 원칙' 등에서 정하는 최소한의 안전 보장 조치를 따를 것을 정하고 있음

해당 분류체계는 '환경적으로 지속 가능한 활동'을 탄소중립 달성에 직접적으로 기여할 수 있는 '저탄소 활동(Low carbon)', 이를 가능케 하는 '지원 활동(Enabling)', 그리고 '전환 활동(Transitional)'으로 구분하고 있다. 전환 활동은 완전한 저탄소 경제활동에 해당하지는 않지만 상대적으로 배출량이 적어 과도기적으로 탄소배출 저감에 기여할 수 있는 경제활동으로 설명하고 있다.

〈표 3-3〉 경제활동 유형 분류

부 분	경제 활동
저탄소 부문	• 재생에너지(태양광,태양열,풍력,수력, 해양에너지 등) 기술 활용한 전력생산 • 수소,암모니아 제조 • 에너지 효율 조건 만족하는 건축물 건설
지원 부문	• 건물 에너지 효율 개선 컨설팅, 관리 등 • 저탄소 운송수단 운영 위한 설비 건설 및 관리 유지 • 온실가스 감축에 기여하는 데이터 솔루션 개발 및 이용
전환 부문	• 온실가스 배출량 조건을 만족하는 저탄소 운송수단 (차량, 선박 등)의 구매, 운용 등

자료: 대한상공회의소(2022.4)(검색일: 2023.6.18.)

전환 부문의 경제활동으로 인정받기 위해서는 해당 산업의 기존 평균보다 강화된 기준을 적용해야 하며, 지원 부문, 전환 부문의 활동은 모두 탄소 집약적 생산방식을 유지하는 데에 기여하지 않아야 한다.[66] 한편, 해운 및 항만 분야와 관련한 활동(기술)의 유형은 다음과 같다.

66) 한국ESG연구소(2022)(검색일: 2023.7.19.)

〈표 3-4〉 해운·항만 관련 녹색기술의 분류

분 야	활 동
제조	재생에너지 기술 관련 제조
	수소 생산 및 사용 관련 장비 제조
	수송을 위한 저탄소 기술 관련 제조
	배터리 제조
	수소 제조
	암모니아 제조
에너지	풍력 발전
	해양 에너지 발전
	재생가능 비화석 액체 / 가스 연료 발전
	전기의 저장
	수소 저장
	수송을 위한 바이오 가스나 바이오 연료 생산
	재생가능 / 저탄소 연료의 전달 및 분배
	화석 가스 연료 발전
수송	내수 승객 수송
	내수 화물 수송
	내수 승객 / 화물용 수송의 개조
	외해 및 해안 화물용 수송 및 항만 운영 관련 활동
	외해 및 해안 승객 수송
	외해 및 해안 화물 및 승객 수송의 개조
	개인용 이동수단을 위한 인프라
	저탄소 해상 운송을 위한 인프라
직업, 과학기술 관련 활동	시장근접 연구, 개발 및 혁신
	대기권에서 직접 탄소 포집을 위한 연구 개발 및 혁신

자료: European Commission(2020.05.), Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance(검색일: 2023.8.7.)

나. 한국형 녹색분류체계(K-Taxonomy)

한국형 녹색기술 분류체계인 'K-택소노미'는 우리나라의 탄소중립 달성 목표 및 지속 가능 발전목표를 중심으로, 유럽연합과 국제표준화기구의 녹색기술 분류체계 등을 바탕으로 개발되었다. 분류체계 내 경제활동은 환경목표에 대한 기여, 환경개선 영향, 측정과 판단 가능성, 국내 산업 특수성, 기술개발 수준 등의 주요 기준을 고려하여 구분·제시하고 있다.[67]

체계에서 제시하는 환경적으로 지속가능한 활동으로 인정받기 위한 6가지 환경목표와 3가지 판정 기준은 앞서 살펴본 유럽연합의 체계와 유사한 구조로 파악할 수 있다. 또한, 이들 환경목표에 기여하는 세부 경제활동은 탄소중립 및 환경개선에 기여하는 '녹색 부문'과 탄소중립으로 전환하기 위한 과도기적인 경제활동으로 한시적으로 포함된 '전환 부문'으로 구성된다.

〈표 3-5〉 한국형 녹색분류체계의 경제활동 구분

부 분	분 야	경제 활동
녹색	산업	• 탄소중립 핵심기술 활용을 위한 제조 • 배출원 단위가 상대적으로 낮은 철강 제조 등
	발전·에너지	• 재생에너지 생산 : 태양광, 풍력, 수력 등 • 수소 및 암모니아 제조
	수송	• 무공해 차량,철도, 선박, 항공기 제조 • 무공해 대중교통 운영 및 육상, 철도 운송 등
	도시·건물	• 제로에너지 특화 도시 개발 및 운영 • 제로에너지 건출물 건설 및 리모델링 등
전환 부문		• 중소기업 사업장 온실가스 감축활동 • LNG 및 혼합가스 기반 에너지 생산 • 수소(블루수소) 제조 • 친환경 선박 건조 및 운송

자료: 대한상공회의소(2022.2)(검색일: 2023.7.11.)

67) 환경부(2021.12.30.), 한국형 녹색분류체계 가이드라인(검색일: 2023.6.19.)

녹색 부문은 온실가스 감축, 기후변화 적응, 물, 순환경제, 오염, 생물다양성 분야의 경제활동을 포함하고 있으며, 전환 부문은 화석연료와 연관된 활동을 일부 포함하지만, 중간단계인 과도기적 경제활동, 즉 중소기업 사업장 온실가스 감축 활동, 액화천연가스(LNG) 및 혼합가스 기반 에너지 생산, 블루수소 제조, 친환경 선박 건조, 친환경 선박 운송과 같은 5개의 활동을 포함한다. 해운 및 항만의 탄소중립과 관련해서는 아래와 같이 활동(기술)의 유형을 제시하고 있다.

〈표 3-6〉 해운·항만 관련 녹색기술의 분류

분 야	경제 활동	설 명
제1절 녹색 부문 : 1. 온실가스 감축		
가. 산업	탄소중립 핵심기술 활용을 위한 소재·부품· 장비 제조	탄소중립을 위한 핵심기술인 (1) 재생에너지, (2) 수소, (3) 암모니아, (4) 무공해 차량·철도차량·건설기계·농업기계·선박·항공기, (5) 전기화(Electrification) 및 전기활용기술(전기가열로 등), (6) 수소환원제철, (7) 비탄산염, (8) 혼합시멘트, (9) 불소화합물(F-gas; Fluorinated gases) 대체 및 제거, (10) 제로에너지 건축, (11) 이산화탄소의 포집·저장(CCS), (12) 바이오차(Biochar), (13) 녹색부문 관련 그린뉴딜 혁신품목에 필요한 소재·부품·장비를 생산하기 위한 설비를 구축·운영하는 활동
나. 발전·에너지	바이오가스·수소·암모니아 이송 인프라 구축· 개조·운영	바이오가스, 수소, 암모니아의 이송을 위한 네트워크 인프라를 구축·개조·운영하거나 탱크로리 및 선박 등을 통해 이송하는 활동
	ICT 기반 에너지 관리 솔루션 개발 및 시스템 구축·운영	재생에너지 이용 촉진, 무공해 차량·철도차량·건설기계·농업기계· 선박·항공기 활용 촉진, 에너지 효율 개선 등 온실가스 감축을 위해 관련 ICT 솔루션을 개발하거나 시스템을 구축·운영하는 활동
다.수송	무공해차량·철도차량·건설기계· 농업기계·선박· 항공기 제조	무공해(전기, 태양광, 수소) 차량·철도차량·건설기계·농업기계·선박· 항공기 생산 및 이에 필요한 설비를 구축·운영하는 활동
	무공해 대중교통 운영	무공해(전기, 태양광, 수소) 차량·철도차량·선박을 도입하거나 해당 교통수단의 충전, 정비 등 유지관리 관련 시설을 구축·운영하는 활동

분 야	경제 활동	설 명
	무공해 선박 운송	여객 또는 화물의 수상 운송을 위해 무공해(전기, 태양광, 수소) 선박을 도입하거나 무공해 선박으로 개조 또는 관련 선박의 유지관리 시설을 구축·운영하는 활동
	무공해 운송 인프라 구축·운영	여객 또는 화물의 (1) 육상, 철도 운송에 필요한 전기충전소, 전력망 접속 개선, 수소연료공급시설, 전기고속도로, 전기철도시설 등의 저탄소 육상 운송 인프라 또는 (2) 수상 운송에 필요한 육상전원 공급장치(AMP; Alternative Maritime Power), 전력망 접속 개선, 무공해(전기, 태양광, 수소) 항만 하역장비, 수소연료공급시설, 바이오에탄올·바이오디젤·바이오중유 공급시설 등의 수상 운송 인프라를 구축·운영하는 활동
제2절 전환 부문 : 1. 온실가스 감축		
다.수송	친환경 선박 건조	친환경 선박의 건조 및 이에 필요한 설비를 구축·운영하는 활동
	친환경 선박 운송	여객 또는 화물의 수상 운송을 위해 친환경 선박을 도입하거나 친환경 선박으로 개조 또는 관련 선박의 유지관리 시설을 구축·운영하는 활동

자료: 환경부(2021.12.30.), 한국형 녹색분류체계 가이드라인(검색일: 2023.6.19.)

(2) 영국 교통부의 해양 탄소중립 과학기술 유형 분류

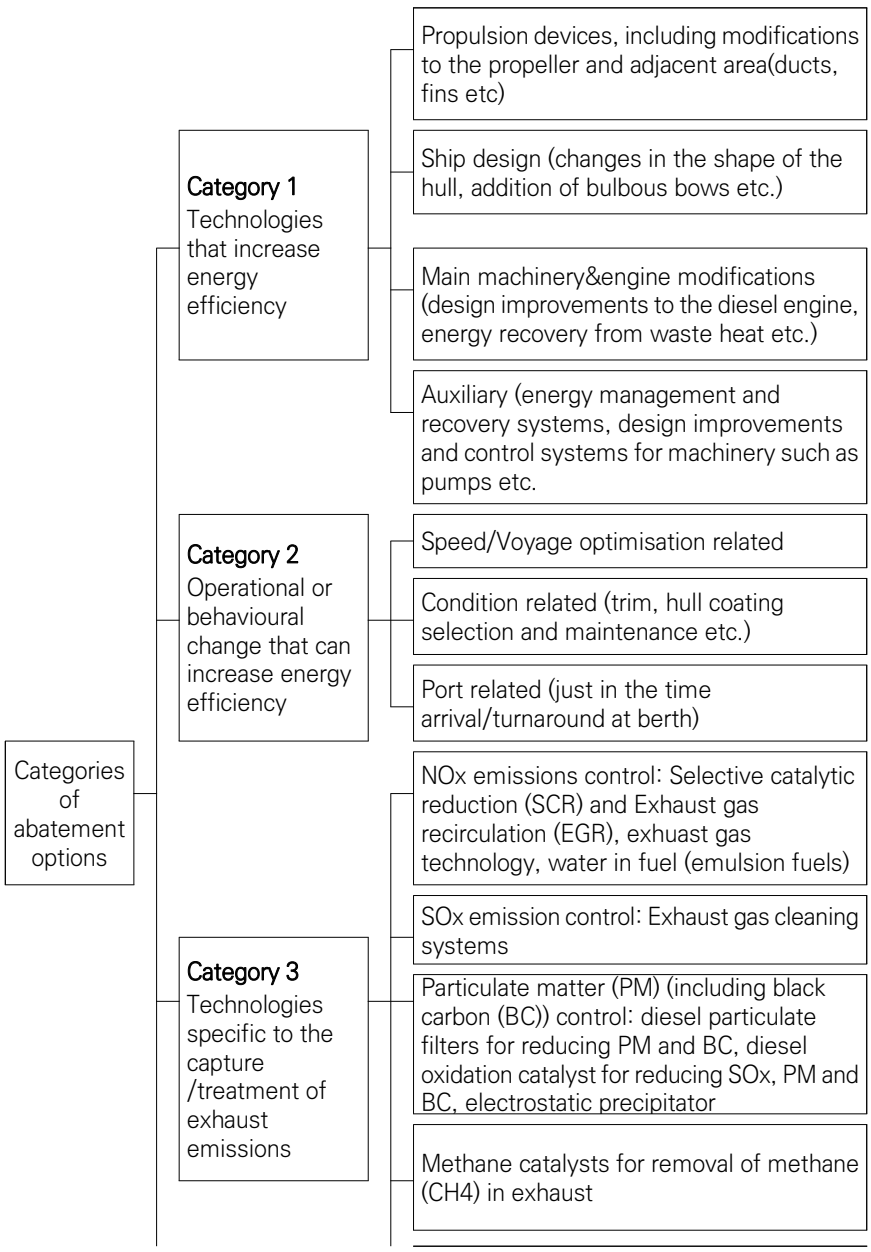
영국 교통부(DfT)는 해양 부문의 기후변화 및 대기오염 저감에 본격 기여를 목적으로, 해양 활동으로 발생하는 배기가스의 배출을 저감하기 위한 다양한 기술적 방안들을 다음과 같이 크게 4가지 유형으로 분류·제시하고 있다.

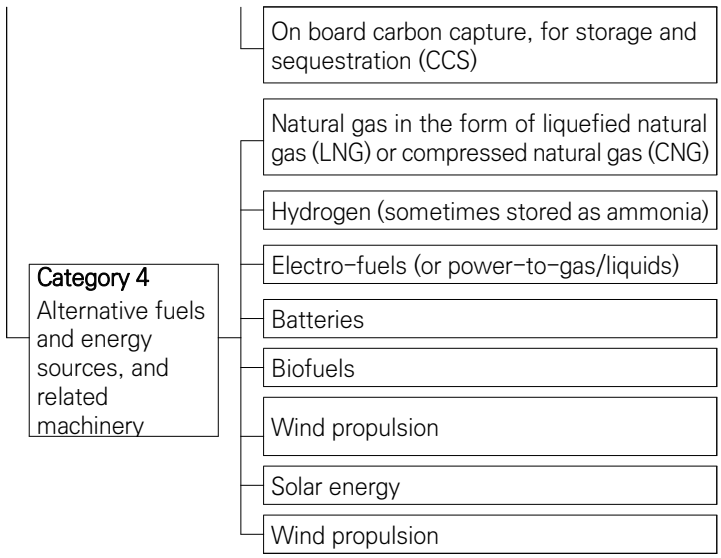
〈표 3-7〉 영국 교통부(DfT)의 해양 탄소중립 기술 유형 분류

Category 1: 에너지 효율 개선 (Technologies that increase energy efficiency)
Category 2: 에너지 효율 개선을 위한 운영·행동 변화 (Operational or behavioural change that can increase energy efficiency)
Category 3: 배기가스의 포집, 처리 (Technologies specific to the capture/treatment of exhaust emissions)
Category 4: 대체 에너지 전환 (Alternative fuels and energy sources, and related machinery)

자료: 저자 작성

〈그림 3-2〉 영국 교통부(DfT)의 해양 탄소중립 기술 유형 분류 상세





자료: 저자 작성

또한, 상기 카테고리별로 분류된 기술적 방안들 중 카테고리 1, 2, 3의 유형에 대해서는 다음의 6개 항목별로 평가하고, 그 결과를 제시하고 있다.

〈표 3-8〉 기술 유형별 평가항목

구 분	평가 항목
Impacts/Benefits	• GHG abatement (Low/Medium/High) • Local air pollutant abatement (Low/Medium/High) • At sea air pollutant abatement (Low/Medium/High)
Commercialisation	• TRL (4 – 9) • Expected commercialisation date (currently available; up to 10 years) • Future cost reduction potential (Low/Medium/High)

자료: 저자 작성

'에너지 효율 개선' 기술 유형은 기존 부품(엔진, 프로펠러 등)의 성능을 개선하거나 선체의 항력/저항을 감소시키는 방법으로, 구조적인 선박 설계 변경을 제외한 대부분의 기술적 옵션을 기존 선박에 개조하여 적용할 수 있다. '에

너지 효율 개선을 위한 운영·행동 변화' 유형은 앞서 제시한 기술적 옵션을 적용하는 방식 외에 운항 또는 운영(행동) 방식을 변경하는 것으로, 특히 선박의 운항 속도를 (추가적으로) 저감함으로써 운영 상 에너지 효율 개선을 도모한다.[68] '배기가스의 포집, 처리' 기술 유형은 배기 배출물질의 처리를 위한 기술적 방안으로, 엔진 배기가스를 '정화'하거나 특정 구성 물질 등을 포집하고 저장하는 과정을 포함한다.

'대체 에너지 전환'을 위한 기술 유형은 기존 연료를 대체할 수 있는 친환경 개념의 다양한 대체 연료 및 에너지, 그리고 이를 도입·활용하기 위한 기술적 방안을 포함한다. 특히, 해당 보고서는 다양한 대체 연료·에너지 및 활용 기술의 적용에 상관관계를 분석하여 제시하고 있다.

〈그림 3-3〉 유형별 평가결과

유형1: 에너지 효율 개선

Options	Impacts/benefits			Commercialisation		
	GHG abatement	Local air pollutant abatement	At sea air pollutant abatement	TRL	Expected commerc. date	Future cost reduction potential
Propulsion devices, including modifications to the propeller and adjacent area (ducts, fins etc.)	Low	Low	Low	TRL9	Currently available	Low
Ship design (changes in the shape of the hull, addition of bulbous bows etc.)	Medium	Low	Medium	TRL9	Currently available	Medium
Main machinery & engine modifications (design improvements to the diesel engine, energy recovery from waste heat etc.)	Low	Low	Low	TRL7-9	Up to 10 years	Medium
Auxiliary (energy management and recovery systems, design improvements and control systems for machinery such as pumps etc.)	Low	Medium	Low	TRL7-9	Currently available	Medium

68) UK GOV(2019.7.), Reducing the Maritime Sector'S Contribution To Climate Change and Air Pollution(검색일: 2023.6.3.), p.9.

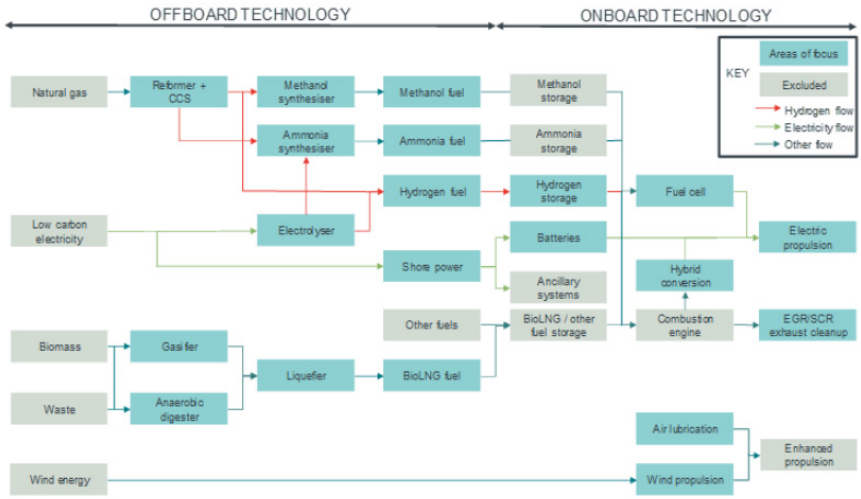
유형2: 에너지 효율 개선을 위한 운영·행동 변화

Options	Impacts/benefits			Commercialisation		
	GHG abatement	Local air pollutant abatement	At sea air pollutant abatement	TRL	Expected commerc. date	Future cost reduction potential
Speed/voyage optimisation related	Medium	Low	Medium	TRL9	Currently available	Low
Condition related (trim, hull coating selection and maintenance etc.)	Medium	Low	Medium	TRL9	Currently available	Low
Port related (just in time arrival/turnaround at berth)	Low	Medium	Low	TRL9	Currently available	Low

유형3: 배기가스의 포집, 처리

Options	Impacts/benefits			Commercialisation		
	GHG abatement	Local air pollutant abatement ***	At sea air pollutant abatement ***	TRL	Expected commerc. date	Future cost reduction potential
NO_x emissions control: Selective catalytic reduction (SCR) and Exhaust gas recirculation (EGR), exhaust gas technology, water in fuel (emulsion fuels)	Negative-Low	High	High	TRL9	Currently available	Medium
SO_x emissions control: Exhaust gas cleaning systems	Negative	High	High	TRL9	Currently available	Medium
Particulate matter (PM) (including black carbon (BC)) control: diesel particulate filters for reducing PM and BC, diesel oxidation catalyst for reducing SO_x, PM and BC, electrostatic precipitator	Negative-Low	High	High	TRL8*	Currently available **	Low
Methane catalysts for removal of methane (CH_4) in exhaust	High	Low	Low	TRL 5	Approximately 5 years	Medium
On board carbon capture, for storage and sequestration (CCS)	High	Low	Low	TRL 4	Approximately 10 years	Medium

유형4(대체 에너지 전환) 기술 유형 간 관계 분석



자료: Reducing the Maritime Sector'S Contribution To Climate Change and Air Pollution. July 2019, pp. 9~12.

(3) 석유·가스 기후변화 이니셔티브(OGCI)의 해운 배출저감기술 유형 분류

거대 석유회사 연합체인 '석유·가스 기후변화 이니셔티브(OGCI)'는 해운 부문의 무탄소 전환을 위한 R&D 기술 유형 및 항목에 대한 분류작업을 수행하고, 이를 국제해사기구(IMO)의 해양환경 보호위원회(MEPC)에 제출한 바 있다.[69] 해당 보고서는 국제 해운의 탈탄소화에 적용할 수 있는 기술 및 대체 에너지 등을 식별하고, 이들 기술적 방안의 ① 적용 가능성(선박 범주), ② 가용성(서비스 시작 날짜), ③ 탄소 감소 잠재력 및 비용(자본 및 운영)에 대해서 평가하고 그 결과를 제시하였다.

69) Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.)

〈표 3-9〉 석유·가스 기후변화 이니셔티브(OGCI)의 해운 배출저감기술 유형 분류

미래 에너지 연료 (Future energy carriers)
선박 설계 조치 (Vessel design measures)
추진 보조장치에 의한 조치 (Power assistance measures)
대체 추진 조치 (Alternative propulsion measures
엔진 및 후처리 기술 (Engine and aftertreatment technologies)
탄소 포집 기술 (Carbon capture)
운항 최적화 (Voyage optimization)

자료: Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.)

'미래 에너지 연료' 유형은 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 연료 및 에너지의 다양한 대안으로, 다음과 같이 이들의 도입·적용으로 인한 온실가스 배출 저감 정도, 비용, 다양한 생산 경로의 온실가스 배출량 등을 평가하는 한편, 이들에 대해서는 선단의 준비성(TRL)과 생산 및 벙커링 인프라 역시 고려하고 있다.[70] (그림 3-3 참조)

'선박 설계 조치' 유형은 선박의 연료 효율을 개선하기 위해 신규 선박의 설계 및 건조 단계 또는 기존 설계를 개선하기 위한 개조(Retrofits) 과정에서 적용할 수 있다. 보고서는 기술적으로 성숙하거나(TRL 9) 높은 시장 침투율로 이미 널리 구현된 기술을 식별하여 제시하고,[71] 이들의 배출저감 정도 및 관련 비용 등을 〈표 3-10〉과 같이 평가하여 제시하였다

70) Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.)
71) Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.)

〈그림 3-4〉 유형1: 미래 에너지 연료 (Future energy carriers)

Fuel *Pathway*	GHG reduction potential(%)*	TRL for trans-oceanic	Compatibility
HFO *(low sulphur)*	-	9	-
MDO	-	9	-
LNG *Global average*	10	9	Requires gas/dual fuel engine and associated cryogenic storage.
BioLNG *Liquid manure***	72	9	Same requirements as for LNG.
LPG *Natural gas (propane)*	20	9	Requires LPG/dual fuel engine.
Methanol (Grey) *Natural gas*	(emissions > HFO)	9	Not drop-in. Compatible with internal combustion engines.
Methanol (Green) *Synthetic (renewable)*	95	7	
Ammonia (Grey) *Natural gas*	(emissions > HFO)	7	Not drop-in. Compatible with engines under development (spark ignition with a hydrogen blend, or dual-fuel with pilot diesel). Safety and toxicity concerns.
Ammonia (Blue) *Natural gas + CCS*	85	4/5/6	
Ammonia (Green) *Renewable electrolysis*	75	3/4/5	
Hydrogen (Grey) *Natural gas*	(emissions > HFO)	7	Not drop-in. Compatible with internal combustion engines (spark ignition & dual-fuel) but requires development and a supporting fuel.
Hydrogen (Blue) *Natural gas + CCS*	84	4/5/6	
Hydrogen (Green) *Renewable electrolysis*	75	3/4/5	
FAME *e.g. Waste cooking oil*	73	9	Drop-in (blended only < 20% FAME)
HVO *e.g. Waste cooking oil*	77	9	Drop-in (blended and neat)
Batteries	66%	4/5/6	Not compatible with ICE. Require their own storage systems and equipment. Weight and size challenges.

Attractive **Moderate** **Unfavourable**

자료: Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.), p. 31.

〈표 3-10〉 유형2: 선박 설계 조치 (Vessel design measures)

Vessel Design Measure	Brief description	GHG reduction potential(%)	Cost of measure(USD $) per vessel	TRL
Optimun ship size dimensions	Large ships tend to be more fuel efficient as they have lower total hull resistance.	~9%	Included in total new-build cost	9
Construction weight	Lighter ships are more fuel efficient.	~9%		9

Vessel Design Measure	Brief description	GHG reduction potential(%)	Cost of measure(USD $) per vessel	TRL
Hull dimensions (from optimisation)	The shape and dimension of hulls impact ship resistance. Computational fluid dynamics modelling is used.	4–8%	$150,000 to $500,000	9
Bulbous bow retrofit	Initial ship design is sometimes optimised for an operating profile different to the operating profile of the vessel at sea. Retrofitting a new bulbous bow may enable fuel savings to be achieved with bespoke bow designs.	3%–5%	$100,000 with additional material cost of $250,000 to $700,000 depending on size	9
Bow thruster tunnel optimisation	Bow thrusters are propulsion devices in the bow or stem of a ship to make manoeuvring easier without using the main propulsion mechanism. Improving their design can reduce drag.	0.5%–1%	~$10,000	9
Hull coatings	Coatings prevent/reduce the build-up of waste deposits and counteract organic growth, reducing surface friction.	0.5%–5%	$30,000 to $500,000	9
Interceptors	Trim tabs used to potimise trim are horizontally installed at the end of the vessel. The interceptor reduces resistance and controls the trim by changing the interceptor height.	1–5%	–	9/8
Ducktail waterline extension	Lengthening the stem of ship reduces the resistance of the ship.	3–7%	–	9
Air lubrication	The pumping of compressed air into a recess in the bottom of the ship's hull. The entrained air reduces frictional resistance between the hull and the water, reducing propulsion power demand.	7%	$130,000 to $3,380,000	7/8/9

Vessel Design Measure	Brief description	GHG reduction potential(%)	Cost of measure(USD $) per vessel	TRL
Ballast reduction and trim optimisation	By effectively loading cargo, vessel trim and/or draft can be optimised to reduce hull resistance. In order to effectively optimise the trim and draft, additional equipment is necessary such as a better loading computer of a dedicated trim optimiser.	0.5-3%	$15,000 to $75,000	9
Ballet free vessel design	An extension to ballast reduction is the ballast free ship concept. Ballast free designs are based on multi-hull concepts and make use of low-weight materials such as composite thermoplastics and aluminium. Through the reduced weight this leads to emissions savings.	~9%	Included in total new-build cost	5/6/7

자료: Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.), p. 49.

선박의 추진과 관련한 기술은 풍력 보조 기술(Wind-assistance technologies) 등 대체 동력원을 활용하여 주엔진 동력의 수요를 저감하는 '추진 보조장치에 의한 조치'의 유형, 그리고 고정 피치 프로펠러 위주의 기존 추진 방식을 LAP(Large Area propeller), CRP (Contra-rotating propeller) 및 POD 추진 방식으로 대체하는 '대체 추진 조치' 유형 정도로 구분하고 있다.[72]

후처리 개념의 유형으로는, 엔진 자체의 효율성을 개선하거나 배출된 배기가스에 대한 처리 기술 등을 포함하는 '엔진 및 후처리 기술', 그리고 배출된 이산화탄소의 포집, 운송 및 최종 저장 또는 재활용 등으로 정의되는 '탄소 포집' 과정을 포함하는 기술 유형으로 구분하고 있다.

72) Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.)

마지막으로, 운항 및 운영 최적화를 통해 에너지 효율 개선, 즉 배출의 저감을 도모하는 '운항 최적화' 기술 유형 역시, 적용으로 인한 배출 저감 정도, 비용 및 기술 성숙도(TRL)를 평가하여 아래와 같이 제시하고 있다.

〈표 3-11〉 유형7: 운항 최적화 (Voyage optimization)

Propulsion design/ technology	Brief description	GHG reduction potential(%)	Cost of measure($) for one vessel	TRL
Speed reduction (10%)	Speed reduction or 'slow steaming' is an operational practice that reduces fuel consumption (and hence costs and emissions).	10–15%	No investment costs, but may impact the total revenue due to longer sailing time.	9
Speed reduction (20%)		18–28%		9
Speed reduction (30%)		24–38%		9
Advanced port logistics	Through flexible planning, improved collaboration, real-time data exchange and digitalised cargo flows, a smoother ship-port interface can result in a significant reduction in the time ships spend waiting.	Up to 1%	-	8/9
Optimisation of vessel capacity utilisation	This measure is based on the ability to counterbalance supply and demand. Optimising capacity utilisation reduces the cost per transported unit and save emissions per tonne-mile.	0–30%	-	8/9
Advanced autopilots	Minimises movements from the rudder, which otherwise creates additional drag to the hull and consequently increases ship resistance.	0.25–1.5%	No cost of implementation assuming that autopilot is already installed.	9
Weather routing	Weather routing and voyage planning minimise exposure to unsheltered water.	0–5%	$25,000	9

Propulsion design/ technology	Brief description	GHG reduction potential(%)	Cost of measure($) for one vessel	TRL
Autonomous shipping	Rapidly advancing technology is making crewless operations increasingly possible.	Up to 6%	Due to low TRL, reliable data on capital costs per vessel are lacking	5/6/7
Power demand management e.g. lighting	Each piece of equipment and machinery on board consumes energy and can individually be assessed to optimise the energy efficiency and possibly be replaced with higher efficiency models.	0.25–5%	$100,000* compared to traditional lighting installations	9
Engine efficiency measurements	Main engine efficiency measurement enables improved power management of the engine(s).	Up to 5%	$20,000 to $75,000	9
Hull cleaning	Thorough cleaning of the vessel's hull on a regular basis can improve the surface finish, reducing resistance and improving fuel efficiency.	1–5%	$5,000 to $50,000	9
Propeller cleaning polishing	Cleaning and polishing the propeller regularly can improve the surface finish and, hence, the propeller efficiency.	3–4%	$4,000 to $8,000	9

*Refers to the additional cost of $100,000 (USD) compared to traditional lighting installations on normal ships and $200,000 to $1,000,000 (USD) on passenger and cruise ships. Sources; (Ciuffo, Giovine, Marra, & Miola, 2010) (International Maritime Organization, 2009) (GloMEEP IMO, 2015) (Seatrade-Maritime, 2018) (MDPI, 2018) (Smith, et al., 2019).

자료: Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.)(검색일: 2023.8.31.), p. 54.

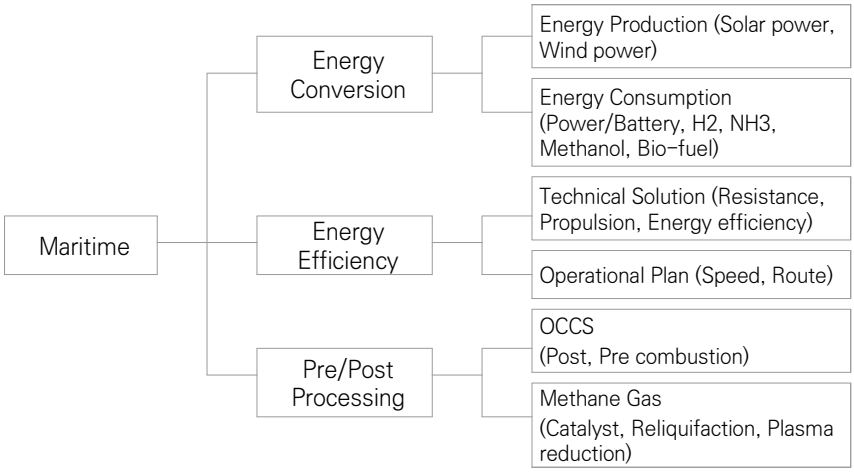
2) 해양 탄소중립 과학기술의 유형 분류

연구진은 전문가 그룹의 기술 수준 및 현안 평가작업에 앞서, 해운 부문과 항만 부문의 탄소중립 구현을 위한 과학기술 중 2030년-2050년 기술발전 시나리오 상 유력 기술항목을 선별하고, 이들을 유형화, 계층화함으로써, 평가 대상 기술항목 및 평가지표를 구체화하였다. 이를 위해, 연구진의 사전 조사 및 분석결과를 바탕으로 해운 및 항만 부문 기술항목을 선별하고, 이들을 유형별로 분류하여 상·하위 속성에 따른 계층화 작업을 수행하였다. 또한, 그 결과에 대한 검토·보완을 위해 개별 기술 분야별 국내외 전문가 그룹을 선정하고, 총 3차례의 전문가 세미나를 통해 '해운·항만 부문 탄소중립 구현을 위한 과학기술 분류체계'를 다음과 같이 확정하였다.

(1) 해운 부문

해운 부문 즉, 선박의 탄소중립 구현을 위한 과학기술은 '전과정평가(LCA)' 또는 'Well-to-wake(WTW)' 개념을 반영하여, 선박의 운용과정에서 '에너지의 생산-사용-배출'의 흐름에 따라서 단계별로 요구되는 기술유형 및 기술항목을 선별하였다. 이러한 원칙에서, '에너지 전환', '에너지 효율 개선', 배출에 대한 '전·후 처리'를 상위 속성(대분류 유형)으로 구분하고, 이들 유형별로 다시 에너지의 흐름, 또는 기술적 방안 및 운영적 방안으로 구분하여 하위 속성(중분류 유형) 및 이에 해당하는 기술 항목으로 구성하였다.

〈그림 3-5〉 해운 부문 과학기술 분류체계 도출을 위한 다이어그램 구성



자료: 저자 작성

'에너지 전환' 유형(대분류)은 ① 에너지 생산과 ② 소비의 두 가지 하위 속성(중분류 유형)으로 구분하였다. 우선, '에너지 생산' 유형은 선상에서 활용 가능한 대체 에너지원, 즉 ① 태양광, ② 풍력 기반의 기술유형(소분류)으로 분류하고, 각 유형별 세부 기술항목을 정리하였다. '에너지 소비' 유형은 ① 배터리, ② 수소, ③ 암모니아, ④ 메탄올, ⑤ 바이오 연료 등과 같은 대체 에너지원을 기준으로, 개별 대체 에너지의 활용 기술을 세부 기술항목으로 정리하였다.

'에너지 효율 개선' 유형(대분류)은 ① 기술적 방안과 ② 운영적 방안, 두 가지 하위 속성(중분류 유형)으로 구분하였다. '기술적 방안' 유형은 선박에 적용 가능한 다양한 에너지 효율 기술을 ① 저항 감소, ② 추진효율 개선 및 ③ 에너지 효율 개선과 관련한 기술유형(소분류)으로 분류하고, 각각의 세부 기술항목을 정의하였다. '운영적 방안' 유형은 ① 선박의 속도와 ② 항로 최적화를 통한 에너지 효율 개선 기술유형(소분류)에 해당하는 세분 기술항목을 정리하였다.

마지막으로, '전·후 처리' 유형(대분류)은 선박에서 발생하는 대표적인 온실가스인 ① 이산화탄소와 ② 메탄가스를 직접적으로 제거하기 위한 기술유형(중분류)으로 구분하였다. '이산화탄소 처리 기술' 유형의 경우, ① 선박 연료의 사용 이전과 ② 이후 처리과정을 통해 이산화 탄소 배출량을 절감하는 기술유형(소분류)에 해당하는 각각의 세부 기술항목을 정리하고, '메탄가스 처리 기술' 유형(중분류)의 경우는 ① 촉매기술(methane catalysis), ② 재액화 기술(reliquification), ③ 플라즈마 감소 기술(plasma reduction) 등의 기술유형(소분류)에 해당하는 세부 기술항목을 정리 유형별로 분류하였다.

〈표 3-12〉 해운부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) 상세

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	태양열 집열기 (Solar thermal collector)	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	공기 윤활 (Air lubrication)	이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	용매 (Solvents)
		태양광 판넬 (Solar panel)		추진 효율 향상	선미 덕트 (Stern ducts)			맴브레인 (Membranes)
	풍력	윈드 터빈 (Wind turbine)			웨이크 이퀄라이징 덕트 (Wake equalizing ducts)			고체 흡착제 (Solid sorbents)
에너지 소비 (대체 연료)	전력/ 배터리	배터리 (Battery)			스웰 전 덕트 (Pre-swirl ducts)			극 저온 (Cryogenic)
		캐패시터/콘덴서 (Capacitor)			스웰 전 스테이터 (Pre-swirl stators)		연소 후 과정 (Pre-combustion)	연소 후 카본 포집 시스템 (Pre-combustion carbon capture system)
	수소	연료 전지 (Fuel cell) (PEMFC/HT-PEMFC/SOFC/MCFC/AFC)			소용돌이 발생 핀 (Vortex generator fins)			산소 연료 연소 (Oxyfuel combustion)

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
		내연 기관 (Internal combustion engine)			프로펠러 보스 캡 핀 (Propeller boss cap fins)	메탄가스	배기 가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	메탄산화촉매 (Methane oxidation catalyst)
	암모니아	연료 전지 (Fuel cell) (SOFC/AMFC)			플레트너 로터 (Flettner rotor)		환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	예) 퓨어쿨 (PureCool)
		내연 기관 (Internal combustion engine)			견인 연 (Towing kite)		플라즈마 감소 (Plasma reduction)	
	메탄올	연료 전지 (Fuel cell) (HT-PEMFC/ SOFC/MCFC/ DMMFC)			윙 세일 (Wing sail)			
		내연 기관 (Internal combustion engine)			소프트 돛 (Soft sail)			
	바이오 연료	연료전지 (Fuel cell) (SOFC/MCFC)		에너지 효율 향상	본선 디시 그리드 시스템 (Onboard DC grid system)			
		내연 기관 (Internal combustion engine)	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	최적화 기술 (Optimisation technology) (AI/Big data)			
				최적 향로	최적화 기술 (Optimisation technology) (AI/ Big data)			

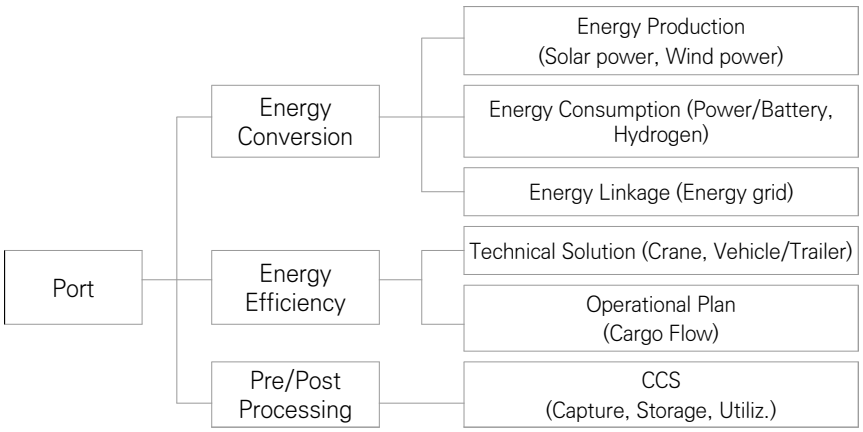
자료: 저자 작성

(2) 항만 부문

항만 부문의 탄소중립 구현을 위한 과학기술 역시. 해운 부문의 기술 유형 분류에서와 같이 항만 내 '에너지의 생산-사용-배출'의 흐름에 따라서 단계별로 요구되는 기술 유형 및 기술항목을 선별하였다. 이는 최근 'Well-to-wake(WTW)' 개념이 국내외 환경·경제 규제의 기본 전제로 채택되고 있는 현실을 반영함은 물론, 해운·항만 기술 유형 분류의 기준에 일관성을 부여하여, 추후 활용 및 분석의 효율성을 제고하려는 데에 그 목적이 있다.

이에 따라서, 항만 탄소중립 과학기술 역시, 대체 에너지를 중심으로 하는 '에너지 전환', 항만 내 활동 전반에 대한 '에너지 효율 개선', 그리고 이들 활동으로 인한 배출에 대한 '전·후 처리'를 상위 속성(대분류 유형)으로 구분하고, 이들 유형별로 다시 에너지의 흐름, 또는 기술적 방안 및 운영적 방안으로 구분하여 하위 속성(중분류 유형) 및 이에 해당하는 기술 항목으로 구성하였다.

〈그림 3-6〉 항만 부문 과학기술 분류체계 도출을 위한 다이어그램 구성



자료: 저자 작성

우선, ‘에너지 전환’ 유형(대분류)은 항만 내 ① 에너지 생산 및 ② 내외부 연계, ③ 에너지 소비의 세가지 하위속성(중분류 유형)으로 구분하였다. ‘에너지 생산’ 유형은 항만 내에서 생산 가능한 재생에너지 즉, ① 태양에너지와 ② 풍력 관련 기술유형(소분류)으로 구분하고, 각 유형별 세부 기술항목을 정리하였다. ‘에너지 연계’ 유형은 항만 내외에서 생산한 에너지의 활용을 위한 에너지 그리드(분산 전원; 소분류)와 관련한 세부 기술항목으로, ‘에너지 소비’ 유형은 ① 배터리와 ② 수소와 같은 재생에너지 기반의 친환경 에너지의 항만 내 소비를 위한 세부 기술항목을 분류하였다.

‘에너지 효율 개선’ 유형(대분류)은 해운 부문과 마찬가지로, ① 기술적 방안과 ② 운영적 방안, 두 가지 하위 속성(중분류 유형)으로 구분하였다. ‘기술적 방안’ 유형은 항만 내 육상 배출의 주요인으로 확인되고 있는 ① 크레인 및 ② 차량/트레일러의 에너지 효율을 개선하기 위한 기술유형(소분류)으로 구분하고, 이들 유형에 해당하는 세부 기술항목을 정리하였다. ‘운영적 방안’ 유형은 항만의 물류 단계를 재배치하거나 디지털트윈 등의 최적화 솔루션 등을 활용한 화물흐름 개선(소분류)을 구현하기 위한 세부 기술항목을 정리하였다.

마지막으로, 각종 저감 노력에도 불구하고 배출되는 온실가스를 저감하거나 방지하는 ‘전·후 처리’ 유형(대분류)은 탄소 포집 및 저장(CCS; 중분류), 그리고 이를 위한 ① 포집(Capture) ② 저장(Storage), ③ 활용(Utilization) 기술유형(소분류)으로 분류하고, 개별 세분류 유형별 세부 기술항목을 다음과 같이 정리하였다.

〈표 3-13〉 항만부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계) 상세

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
에너지 생산 (대체에너지원)	태양광	광전지 태양광 패널 (Photovoltaic (PV) solar panels)	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	자동화 크레인 (Automated cranes)	탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	아민 스크러빙 (Amine scrubbing)
		집중된 태양광 발전 (Concentrating solar power (CSP))			하이브리드 크레인 (Hybrid cranes)			아민 스크러빙 (Amine scrubbing)
		태양 열 (Solar thermal)			텔레스코픽 집 크레인 (Telescopic jib crane)			멤브레인 분리 (Memberanes separation)
		수동적 태양열 이득 (Passive solar gain)			크레인 전동화 (Crane electrification)			극저온 분리 (Cryogenic distillation)
		부유식 태양광 발전 (Floating photovoltaics)		차량/트레일러 효율 개선	자동 트레일러 (Automated trailers)			직접 공기 포집 (Direct air capture (DAC))
	풍력	육상 윈드터빈 (Onshore wind turbines)			트레일러 전동화 (Trailer electrification)		저장 (Storage)	고갈된 석유 및 가스 저장소 (Depleted oil and gas reservoirs)
		해상 윈드터빈 (Offshore wind turbines)	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	AI			식염수 대수층 (Saline aquifers)
에너지 연계	에너지	스마트			빅 데이터			현무암 형성

에너지 전환			에너지 효율 개선			전·후 처리		
중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술	중분류	소분류	세부기술
	그리드 (분산전원 기술 항만)	그리드 (Smart grids)			(Big data)			(Basalt formations)
		마이크로 그리드 (Micro girds)			IOT			해양 저장 (Ocean storage)
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	리튬 이온 배터리 (Lithium-ion batteries)					활용 (Utilization)	향상된 오일 회수 (Enhanced oil recovery (EOR))
		소디움 이온 배터리 (Sodium-ion batteries)						탄소 광물화 (Carbon mineralization)
		플로우 배터리 (Flow batteries)						합성 연료 생산 (Production of synthetic fuels)
	수소	PEMFC						플라스틱 생산 (Production of plastics)
		SOFC						
		AFC						

자료: 저자 작성

2. 설문·분석모형의 구성

본 연구는 해운·항만 부문의 탄소중립을 구현하기 위한 기술들에 대한 수준평가, 과학기술 분야별 수요 및 탄소중립 구현과 관련한 기술 현안 조사 및 분석을 위하여 설문-분석 모형을 사용하였다. 이와 관련한 응답은 전문가 개개인의 지식과 경험에 기반한 주관적인 관점에서 정성적으로 이루어지기 때문에, 보다 객관적인 정량적 평가를 위해 통계적 의사결정 방

법인 델파이기법을 활용하였다. 델파이기법은 오픈형 설문조사를 통해 전문가들의 다양한 의견을 통합할 수 있는 기법으로 알려져 있다.

특히, 본 설문은 총 2단계에 걸친 국내외 전문가 그룹의 참여로, 설문 문항 및 체계의 구성단계에서부터 연구진의 자의적 판단 및 해석보다는 전문가 그룹의 의견을 반영하는 한편, 응답자인 개별 전문가들의 설문 대상 및 관련 현안에 대한 이해도를 최대한 제고하였다. 또한, 국제협력의 특성을 고려하여, 우리 기술에 대한 객관적 평가, 미래 기술 시나리오에 대한 국내·해외의 시각차 등을 반영하기 위해, 국내·해외 전문가 그룹을 같은 비율로 2단계 평가작업에 참여하도록 하여, 설문-분석 결과의 신뢰도 극대화를 도모하였다.

첫번째 단계는 설문 체계 및 항목, 이를 위한 평가지표 등을 구체화하는 과정으로, 우선 연구진의 사전 분석 결과를 바탕으로 각 항목들의 계층화·수치화 작업을 통해 평가 지표 및 항목의 초안을 도출하였다. 이어서, 연구진이 마련한 초안 및 후보항목 등에 대한 전문가 그룹의 검토, 즉 델파이 기법을 적용하여 평가항목을 계층화·유형화하고, 구체적인 설문-분석모형을 확정하였다.

이어서, 두번째 단계에서는 국내외 전문가를 대상으로 하는 해운·항만 부문 탄소중립 기술의 수준평가, 그리고 이와 관련한 현안 평가를 수행하였다. 사전 분석 및 전문가 그룹의 검토과정을 통해 도출된 유형화된 평가대상 및 기술항목, 그리고 선별된 주요 현안에 대해서, 기술 분야별 전문가 그룹을 대상으로 그들의 지식과 경험을 토대로 정교한 평가과정을 수행하였다.

〈표 3-14〉 해운·항만 부문 탄소중립 과학기술 유형분류(분류체계)

구분	에너지 전환		에너지 효율 개선		전·후 처리	
항만	에너지 생산 (대체 에너지 원)	태양광	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)
		풍력		차량/트레일러 효율 개선		저장 (Storage)
	에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)		활용 (Utilization)
	에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리				
		수소				
해운	에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	이산화 탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)
		풍력		추진 효율 개선		연소 후 과정 (Pre-combustion)
				에너지 효율 개선		
	에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalyst in exhaust)
		수소				
		암모니아				
		메탄올		최적 항로		환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)
		바이오연료				플라즈마 감소 (Plasma reduction)

자료: 저자 작성

3. 설문·분석모형의 적용

1) 설문·분석모형의 적용

(1) 설문 주제·항목 도출

본 연구의 핵심은 해운·항만 부문의 2050 탄소중립 구현을 위해서 요구되는 과학기술 항목을 식별하고, 현재 기술 패러다임에서 제외되어 있거나 현장 적용이 어려운 기술 영역을 포함하여 2030년 전후까지 상용화되어 이후 탄소중립 시나리오에서 중요한 역할을 할 수 있는 '혁신기술' 기반의 새로운 기술 패러다임을 제시하는 데에 있다. 또한, 새로운 기술 패러다임에 기반한 유력 기술 리스트(유형 분류체계)를 바탕으로 유형별 특성과 시장·제도 환경의 변화를 고려하여, 추후 연구개발 및 국제협력 전략 수립에 유효한 시사점을 도출하는 데에 목적을 두고 있다.

따라서, 이를 위한 질문을 ① 우리 탄소중립 기술의 현재 위치와 선도국가와의 격차, 이에 따른 니즈를 파악하기 위한 기술 수준평가, 그리고 기술 유형·항목별 전략적 접근 방향 도출을 위한 ② 시장성, 기술적 난이도, 탄소중립에 기여도 등에 대한 평가, 총 2개 영역으로 확정하였다.

(2) 기술 분야별 전문가 세미나

앞서 설명한 바와 같이, 본 연구는 연구성과의 신뢰도를 극대화하기 위해 ① 전문가풀을 국내에 한정하지 않고, 같은 비율의 해외 전문가그룹을 섭외하고, ② 연구진이 마련한 설문 주제 및 항목 초안, 설문-분석 방식 등을 전문가 세미나의 형식으로 총 3차례에 걸쳐 검토-보완 과정을 거쳤다. 이 과정에서 설문 응답 대상으로 선별된 기술분야별 국내외 전문가 그룹이 세미나에 참여하도록 하여, 미래 기술 시나리오에 대한 기술 분야별·국내/

해외 전문가별 시각차를 최대한 반영하는 한편, 설문주제 및 문항에 대한 응답자의 이해도 제고를 도모하였다.

사전 조사 및 분석을 통해 연구진이 도출한 설문 주제 및 방향, 설문 체계 및 항목 등의 초안에 대해서, 국내외 기술 전문가들의 다양한 견해를 유도하고, 이를 종합적으로 반영하여 총 3차례의 집단 지성에 의한 '검토-보완'하는 일련의 과정으로 적용하였다.

(3) 설문 문항 보완 및 확정

설문-분석 모형 준비를 위한 일련의 '검토-보완' 과정을 통해, 기술유형 및 항목별 수준평가, 시장성/기술적 난이도/탄소중립에 기여도 등을 파악하기 위해, 총 2개 영역, 8개 문항의 설문 구조, 그리고 이를 분석하기 위한 방법론 등을 확정하였다.

2) 설문-분석 수행

(1) 설문조사 수행

설문조사는 기술 유형별 국내외 전문가 그룹을 대상으로, 2023년 7월 하순~8월 중순까지 약 3주간 이메일 응답 방식으로 실시하였다. 국내 전문가 21명, 해외(유럽) 24명으로, 총 45명 전문가의 응답을 수집하고, 오류가 있는 경우 재응답하는 방식으로 유효 응답을 확보하였다. 설문 내용의 특성 상 선박 및 항만활동의 탄소중립 구현과 관련한 과학기술에 분야별·종합적으로 고도의 전문성을 보유한 국내외 전문가들을 대상으로, 학·연계 그룹과 민간 이해관계그룹의 비율을 동등하게 조정하여 선별하였으며, 이들을 대상으로 설문조사를 수행하였다.

(2) 결과 분석

기술 수준평가는 해운·항만 부문 각각의 기술 유형 및 항목별로 100점 척도를 활용하여, 국내 기술과 해외 기술의 격차를 평가하였다. 유형별 국제협력 전략 도출을 위한 국제 동향(시장 점유율), 기술적 난이도 및 탄소중립 기여 가능성 항목에서는 7점 척도를 활용하였으며, 구해진 점수의 평균과 각 영역별 세부항목의 7점 평균의 평균값을 활용하여 각 영역별 세부항목의 중요도를 평가하였다. 또한, 유형별·기술항목별 중요도를 평가함에 있어 예측 평가 시점을 '현재~2030년' 및 '2030~2050년'으로 구분하여, 시점 격차에 따른 시사점을 반영하도록 하였다.

〈표 3-15〉 설문 분석 수행 과정

설문주제·항목 도출		분야별 전문가 세미나		설문 문항 보완 및 확정		설문조사 수행		결과 분석
① 기술격차 ② 수요평가 (시장성/기술적 난이도/탄소중립 기여 가능성)	→	• 항만·해운 부문 분류체계 구성(대/중/소 유형 분류) • 소분류별 개별 기술항목 확정	→	• 설문 구조 및 구성 요소, 항목, 방식 확정 • 설문 대상자 확보	→	• 국내/해외 전문가 • 학·연계그룹/이해관계그룹	→	• 국내 개발 및 국제 협력이 가장 시급한 기술분야 도출

자료: 저자 작성

제2절 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 분석

1. 기술유형·항목별 기술격차 분석

1) 해운 부문

(1) 에너지 전환

〈표 3-16〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	59.8	64.3	55.2	4	8	0	21	8
	풍력	58.3	59.5	57.1	4	1	3	33	4
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	66.7	67.1	66.2	2	10	0	26	2
	수소	60.6	61.7	59.6	3	7	9	21	2
	암모니아	59.5	58.6	60.5	4	5	7	24	0
	메탄올	60.2	61.4	58.9	5	2	3	29	2
	바이오연료	57.3	61.0	53.6	3	10	2	23	2
기술 종합		60.3	61.9	58.7	25	43	24	177	20

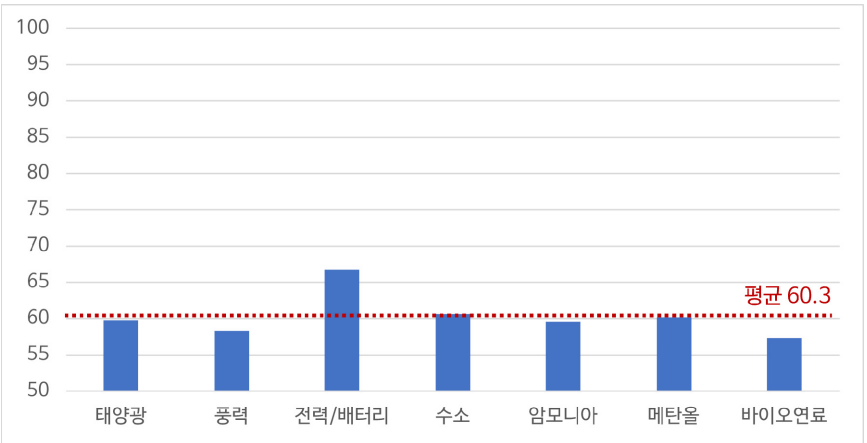
자료: 저자 작성

국내외 기술 전문가 그룹의 평가결과, 해운 부문의 '에너지 전환' 유형(대분류)의 우리 기술 수준은, 현재 기술 선도국가(100점 기준)의 수준과 비교하였을 때 전체 평균 60.3점으로 나타났다. 우리나라는 기술 선도 1위 국가로 가장 많이 선택된 유럽은 물론, 미국과도 상당한 기술 격차가 있음을 확인할 수 있다.

'에너지 전환' 유형의 기술항목 중, ①-1 태양광 기술은 현재 기술 선도국가(100점)의 수준 대비, 59.8점으로 평가하였으며, ①-2 풍력 활용 기술

은 58.3점, ②-1 전력/배터리 기술은 66.7 점, 그리고 대체 연료 항목 중 ②-2 수소, ②-3 암모니아, ②-4 메탄올, ②-5 바이오연료 기술은 각각 60.6점, 59.5점, 60.2점, 57.3점, 60.3점으로 평가하였다.

〈그림 3-7〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환



자료: 저자 작성

에너지 전환 유형 기술 전반에서 유럽은 물론 차선도 국가인 미국과도 큰 격차를 확인하였으나, 특히, ①-2 풍력 활용 기술과 ②-5 바이오연료 기술이 선도국가와의 격차가 상대적으로 크게 나타났다.

(2) 에너지 효율 개선

〈표 3-17〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선

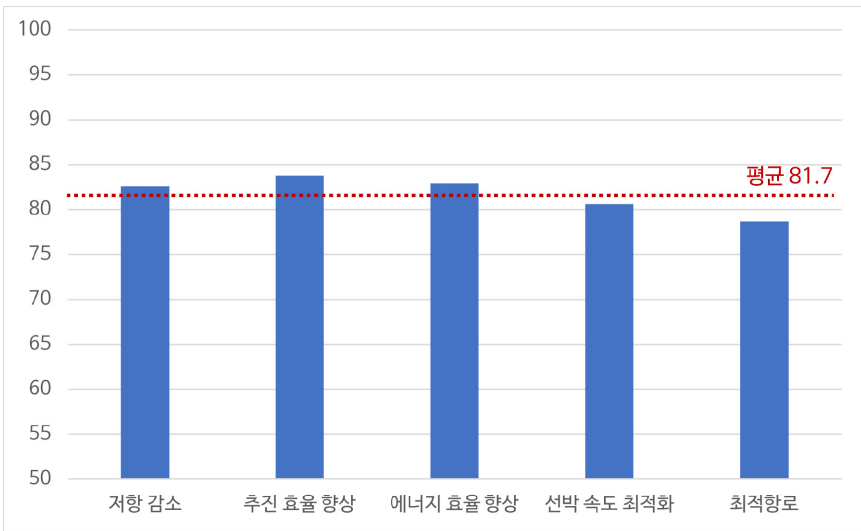
구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	82.6	89.5	75.7	19	3	7	15	0
	추진 효율	83.8	89.5	78.1	17	1	4	21	0

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
	향상								
	에너지 효율 향상	82.9	89.0	76.7	17	1	3	20	0
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	80.6	86.7	74.5	12	3	4	25	0
	최적항로	78.7	83.6	73.8	8	2	5	29	0
기술 종합		81.7	87.7	75.8	73	10	23	110	0

자료: 저자 작성

해운 부문의 '에너지 효율 개선' 유형(대분류)의 우리 기술 수준은 전체 평균 81.7점으로, 현재 선도국가인 유럽과의 격차가 여타 국가에 비해 매우 근접하고 있는 것으로 나타났다.

〈그림 3-8〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선



자료: 저자 작성

‘에너지 효율 개선’ 유형의 기술항목 중, 기술적 방안에 해당하는 ①-1 선박의 저항 감소 기술은 현재 기술 선도국가(100점)의 수준 대비, 82.6점으로 평가하였으며, ①-2 추진 효율 개선 기술은 83.8점, ①-3 에너지 효율 개선 기술은 82.9점으로 평가하였다. 운영적 방안에 해당하는 ②-1 선박 속도 최적화 기술은 80.6점, ②-2 항로 최적화 기술은 78.7점으로 나타났다.

에너지 효율 개선 기술 전반에서 현재 기술 선도국가인 유럽과의 격차를 확인하였으나, 추후 연구개발의 성과에 따라서 유럽과 함께 해당 분야를 선도할 수 있는 기술 수준을 확보하고 있는 것으로 보여지며, 운영적 방안 중 ②-2 항로 최적화 기술은 상대적으로 큰 격차로 나타났다.

(3) 전·후 처리

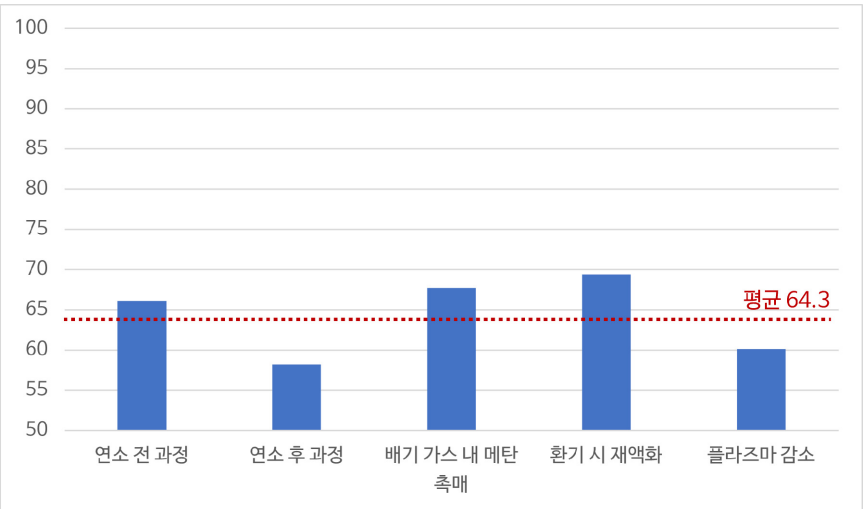
〈표 3-18〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 전·후 처리

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리나라	미국	일본	유럽	기타
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	66.1	68.6	63.6	4	6	4	26	0
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	58.2	58.3	58.2	2	6	6	23	0
메탄가스	배기 가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	67.7	70.8	64.7	4	6	0	26	0
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	69.4	73.3	65.6	7	6	1	23	0
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	60.1	64.0	56.1	17	24	11	98	0
기술 종합		64.3	67.0	61.64	34	48	22	196	0

자료: 저자 작성

해운 부문의 '전·후 처리' 유형(대분류)의 우리 기술 수준은, 전체 평균 64.3점으로 나타났으며, 기술 선도 1위 국가로 가장 많이 선택된 유럽과 상당한 기술 격차를 확인하였다.

〈그림 3-9〉 해운 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선



자료: 저자 작성

'전·후 처리' 유형의 기술항목 중, 선상 이산화탄소의 처리를 위한 ①-1 연소 전 기술은 현재 기술 선도국가(100점)의 수준 대비, 66.1점, ①-2 연소 후 기술은 58.2점으로 평가하였다. 메탄가스 처리 유형에 해당하는 ②-1 배기가스 내 메탄 촉매 기술은 67.7점, ②-2 환기 시 재액화 기술은 69.4점, ②-2 플라즈마 감소 기술은 60.1점으로 나타났다. 이러한 격차 수준은 최근 국내 조선소 및 해운선사를 중심으로 전·후 처리 기술의 필요성에 대한 논의가 많아지고 있는 현실에 대한 반증으로, 아직 국내 기술의 실제 적용 사례가 거의 없다는 점에서 국내외 전반적으로 유럽과의 기술 격차를 여전히 크게 인식하고 있는 것으로 판단된다.

2) 항만 부문

(1) 에너지 전환

〈표 3-19〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환

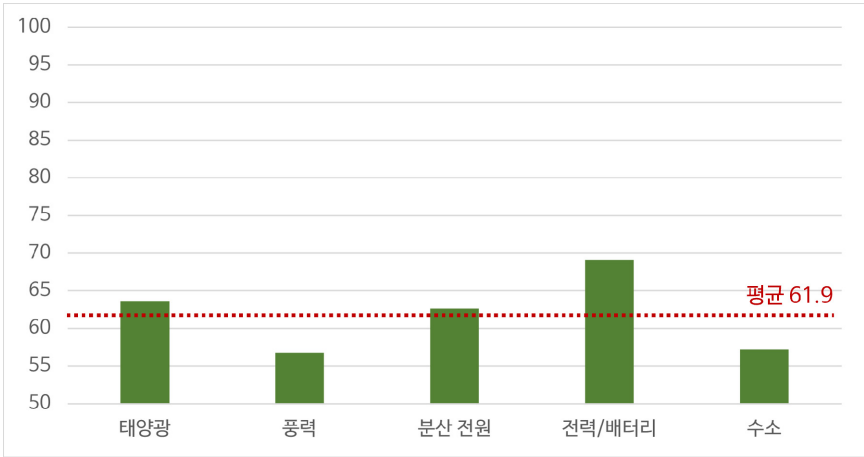
구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 생산	태양광	63.6	65.0	62.1	1	15	1	15	8
	풍력	56.8	57.3	56.4	0	1	4	34	2
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원)	62.6	63.9	61.3	4	9	2	24	0
에너지 소비	전력/배터리	69.1	69.0	69.2	5	10	3	13	4
	수소	57.2	56.0	58.5	1	4	7	20	3
기술 종합		61.9	62.2	61.5	11	39	17	106	17

자료: 저자 작성

항만 부문의 '에너지 전환' 유형(대분류)의 우리 기술 수준은, 현재 기술 선도국가(100점)의 수준과 비교하였을 때 전체 평균 61.9점으로 나타났다. 우리나라는 해운 부문에서와 마찬가지로, 기술 선도 1위 국가로 가장 많이 선택된 유럽은 물론, 미국과도 상당한 기술 격차가 있음을 확인할 수 있다.

항만의 '에너지 전환' 유형의 기술항목 중, 에너지 생산 유형에 해당하는 ①-1 태양광 기술은 현재 기술 선도국가(100점)의 수준 대비, 63.6점, ①-2 풍력 기술은 56.8점, 에너지 연계에 해당하는 ②-1 분산전원 기술은 62.6점, 그리고 에너지 소비 유형에 해당하는 ③-1 전력/배터리 기술은 69.1점, ③-2 수소 활용 기술은 57.2점으로 평가하였다.

〈그림 3-10〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환



자료: 저자 작성

에너지 전환 유형 기술 전반에서 유럽은 물론 다른 국가와의 큰 격차를 보여주었으며, 이는 우리나라의 항만 에너지 전환 기술에 대한 본격 연구개발의 필요성을 절실히 반증한다. 특히, ①-2 풍력 기술과 ③-2 수소 활용 기술 수준이 여타 국가의 수준과 매우 큰 격차를 보이고 있다.

(2) 에너지 효율 개선

〈표 3-20〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 효율 개선

구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리나라	미국	일본	유럽	기타
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	74.5	73.3	75.8	4	10	3	18	1
	차량/트레일러 효율 개선	75.0	72.3	77.8	4	12	2	16	1

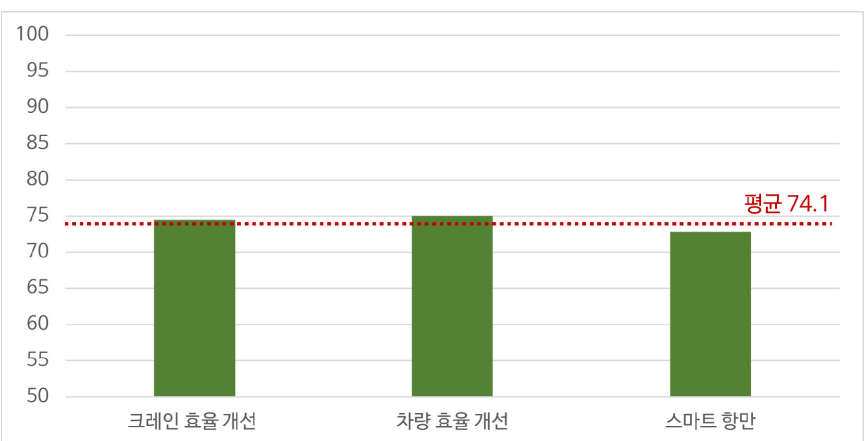
구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	72.8	69.0	76.5	4	7	2	21	0
기술 종합		74.1	71.5	76.7	12	29	7	55	22

자료: 저자 작성

항만 부문의 '에너지 효율 개선' 유형(대분류)의 우리 기술 수준은 전체 평균 74.1점으로, 현재 선도국가인 유럽, 차선도 국가인 미국과도 매우 큰 격차를 보였다.

'에너지 효율 개선' 유형의 기술항목 중, 기술적 방안에 해당하는 ①-1 크레인 효율 개선 기술은 현재 기술 선도국가(100점)의 수준 대비, 74.5점으로 평가하였으며, ①-2 차량/트레일러 효율 개선 기술은 75.0점으로 평가하였다. 운영적 방안에 해당하는 ②-1 스마트 항만 기술은 72.8점으로 나타났다.

〈그림 3-11〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환



자료: 저자 작성

에너지 효율 개선 기술 전반에서 현재 기술 선도국가인 유럽과의 격차를 확인하였으나, 선박의 경우 선도국가인 유럽의 기술 수준에 매우 근접한 데 반해, 유사한 유형임에도 항만 부문에서는 상대적으로 큰 격차를 보이고 있다.

(3) 전·후 처리

〈표 3-21〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 전·후 처리

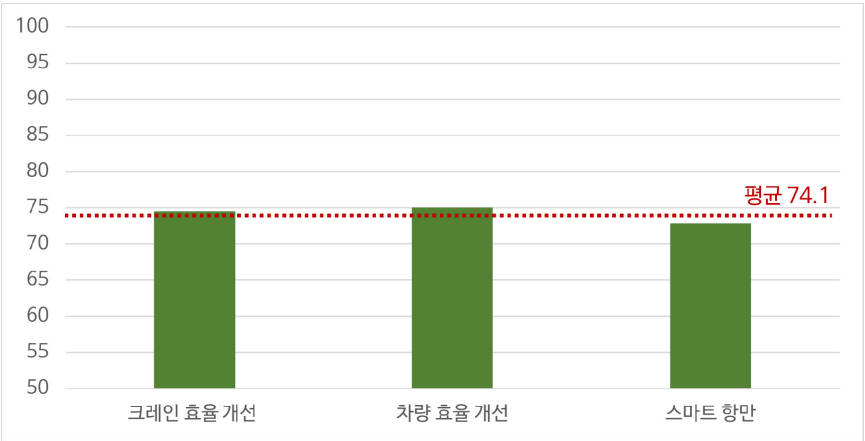
구 분		국내 기술 수준			1위 국가 (명)				
		평균	국내 전문가	해외 전문가	우리 나라	미국	일본	유럽	기타
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	56.4	57.0	55.7	1	12	2	23	1
	저장 (Storage)	53.2	54.0	52.5	1	11	2	22	1
	활용 (Utilization)	50.3	54.5	46.2	0	9	3	25	1
기술 종합		53.3	55.2	51.5	2	32	7	70	3

자료: 저자 작성

항만 부문의 '전·후 처리' 유형(대분류)의 우리 기술 수준은, 전체 평균 53.3점으로 나타났으며, 기술 선도 1위 국가로 가장 많이 선택된 유럽과 상당한 기술 격차를 확인하였다.

'전·후 처리' 유형의 탄소 포집 및 저장(CCS) 기술항목 중, ①-1 항만 내 배출원에 대한 포집 기술은 현재 기술 선도국가(100점)의 수준 대비, 56.4점, ①-2 포집된 이산화탄소의 항만 내 저장 관련 인프라 기술은 53.2점, ①-3 포집된 이산화탄소의 활용기술은 50.3점으로 평가하였다.

〈그림 3-12〉 항만 부문 국내 기술 수준평가: 에너지 전환



자료: 저자 작성

항만 부문의 전·후 처리 기술 전반적으로 국내 기술 수준이 상당히 열악한 상태로, 이는 항만의 탄소 포집 기술에 대한 연구개발 또는 적용 사례가 국내에서는 극히 드물기 때문으로 판단된다. 탄소 포집 및 저장 기술은 현재 탄소중립 시나리오에서 매우 중요한 핵심기술로 평가받고 있으며 추후 그 중요성이 더 커질 것으로 예측되고 있으며, 항만은 해상 지중저장 시 저장 및 이동을 위한 주요 허브로 예상되므로, 이에 대한 연구개발이 매우 시급한 것으로 판단된다.

2. 해양 탄소중립 관련 현안 분석

다음에서는 본연구에서 선별한 해운·항만 부문 탄소중립 과학기술 및 유형별 분류체계를 바탕으로, 분야별 전문가들이 판단하는 미래 기술 시나리오 상 이들의 ① 향후 시장성, ② 기술적 난이도, ③ 탄소중립에 기여도, 총 3개 지표별 평가를 수행하였다.

1) 해운 부문 현안 및 기술 수요 평가

(1) 해운 탄소중립 기술의 시장 도입·적용 가능성(2030; 2050)

〈표 3-22〉 해운 탄소 중립 기술의 시장 도입/적용 가능성

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내전문가	해외전문가	평균	국내전문가	해외전문가
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	3.3	3.8	2.9	4.1	4.4	3.8
	풍력	3.4	3.4	3.4	4.6	4.4	4.7
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	4.2	4.2	4.1	5.4	5.4	5.4
	수소	3.6	3.8	3.4	6.1	6.5	5.8
	암모니아	4.2	4.3	4.2	6	6.3	5.8
	메탄올	4.8	5.2	4.4	5.6	5.7	5.4
	바이오연료	4.4	5.1	3.8	5.1	5.6	4.7
기술 종합		4	4.2	3.7	5.3	5.5	5.1
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내전문가	해외전문가	평균	국내전문가	해외전문가
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	4.9	5.1	4.8	5.3	5.1	5.6
	추진 효율 개선	5	5.1	4.9	5.4	5.3	5.6
	에너지 효율 개선	5	5.3	4.7	5.8	5.7	5.8
운영적 방안	선박 속도 최적화	5.1	5.2	5	5.5	5.6	5.5
	최적 항로	5	5.2	4.9	5.5	5.6	5.4
기술 종합		5	5.2	4.8	5.5	5.5	5.6
전·후 처리		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내전문가	해외전문가	평균	국내전문가	해외전문가
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	3.6	4	3.2	5.1	5.3	4.8
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	3	3.6	2.4	4.5	4.9	4.2
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	3.4	4.2	2.5	4.5	5	4
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	3.3	4.2	2.5	4.2	4.8	3.7
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	2.8	3.5	2.1	4	4.4	3.6
기술 종합		3.2	3.9	2.5	4.5	4.9	4.1

자료: 저자 작성

해운 부문 '에너지 전환' 유형(대분류) 기술의 시장 도입·적용 가능성은, 2030년까지 4.0/7.0점으로 평가되어 다소 높을 것으로 판단이 되었으며, 2030년 이후 2050년까지는 5.5/7.0점으로 2030년 이후 비약적으로 발전할 것으로 전망된다. 특히, 에너지 소비 유형에 해당하는 수소 기술은 당장은 상용화가 어려우나, 2030년 이후 다른 대체 연료 기술들 대비 매우 큰 폭으로 발전할 것으로 판단된다.

'에너지 효율 개선' 유형(대분류) 기술의 경우, 이미 해운 부문에서 많이 적용되고 있으며, 2030년 이후에도 꾸준히 활용될 것으로 판단된다. 특히, 시장 도입·적용 가능성이 항만 부문에서와 같이 타 부문 대비 상대적으로 높은 것으로 나타났는데, 해당 유형 전반적으로 2030년까지 5.0/7.0점, 2030~2050년 5.5/7.0점으로 상당히 높은 시장 수요를 확인할 수 있다. 특히, 운영적 방안에 해당하는 '에너지 효율 향상' 기술에 대한 시장 수요가 상당히 커질 것으로 전망된다.

반면, '전·후 처리' 유형(대분류)의 기술은 2030년까지 시장 도입 가능성이 상당히 낮을 것으로 평가되었다. 반면, 2030년 이후부터는 자체적인 시장성이 큰 폭으로 상승하여 탄소중립에 기여가 일정 부분 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 다른 기술 분야에 비교하면 전후 처리 기술의 시장성은 2030년 이후에도 다소 낮게 나타나는데 (에너지 전환 기술 (5.3점); 에너지 효율 개선 (5.5점) 대비), 이는 선박 내 전·후 처리 기술의 상용화, 이에 따른 활용성이 항만이나 육상에서보다 다소 기술적·경제적 난이도가 높기 때문인 것으로 보여진다.

(2) 해운 탄소중립 기술항목별 상용화의 기술적 난이도

〈표 3-23〉 해운 분야 에너지 전환 기술의 기술적 난이도

에너지 전환		기술적 난이도		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	3.7	3.5	3.9
	풍력	4	3.9	4.1
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	4.5	4.8	4.2
	수소	6.1	6.3	6
	암모니아	5.7	5.7	5.7
	메탄올	4.5	4.6	4.3
	바이오연료	4	4.4	3.5
기술 종합		4.6	4.7	4.5
에너지 효율 개선		**기술적 난이도**		
		평균	**국내 전문가**	**해외 전문가**
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	3.9	3.9	3.9
	추진 효율 개선	3.9	4	3.9
	에너지 효율 개선	4	4.1	3.9
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	3.5	3.8	3.2
	최적 항로	3.6	3.9	3.3
기술 종합		3.8	3.9	3.6
전·후 처리		**기술적 난이도**		
		평균	**국내 전문가**	**해외 전문가**
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	5.4	5.7	5.1
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	5.6	6	5.2
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	5.1	5.2	5
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	5.1	5	5.2
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	5.4	5.4	5.3
기술 종합		5.3	5.5	5.2

자료: 저자 작성

해운 부문에서 ‘에너지 효율 개선’ 유형(대분류) 기술(3.8점/7.0점)을 제외한 ‘에너지 전환(4.6점/7.0점) 및 ’전·후 처리 기술‘(5.4점/7.0점) 유형의 기술은 전반적으로 기술적인 난이도가 상당히 높은 것으로 파악되었다. 특히, 전·후 처리 기술의 기술적 난이도는 에너지 효율 개선 기술 대비 매우 높은 것으로 나타났다. 에너지 전환 유형에서 기술적 난이도가 가장 높을 것으로 평가되는 항목은 ‘수소’ 기술(6.1점/7.0점)로 나타난 반면, 태양광 기술은 기술 성숙도가 상대적으로 높은 3.6점으로 평가되었다.

(3) 도입에 따른 효과

〈표 3-24〉 해운 분야 에너지 전환 기술의 도입에 따른 효과

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	3.4	3.9	2.9	4.1	4.3	4
	풍력	3.5	4.1	3	4.6	4.8	4.5
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	4.1	4.7	3.5	5.3	5.3	5.3
	수소	4.1	5	3.3	6.2	6.8	5.6
	암모니아	4.4	5.3	3.5	6.2	6.5	6
	메탄올	4.5	5.2	3.7	5.5	6	5.1
	바이오연료	4.4	5	3.7	5.1	5.7	4.4
기술 종합		4.1	4.7	3.4	5.3	5.6	5
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	4.3	4.4	4.2	4.6	4.4	4.9
	추진 효율 개선	4.3	4.5	4.1	4.8	4.7	4.9
	에너지 효율 개선	4.3	4.6	4	4.8	5	4.7
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	4.5	4.8	4.3	4.8	4.9	4.8
	최적항로	4.3	4.5	4.2	4.8	4.8	4.8
기술 종합		4.3	4.6	4.1	4.8	4.7	4.8

전후처리		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
이산화 탄소 (OCCS)	연소 전 과정 (Post-combustion)	3.9	4.8	3.1	5	5.6	4.5
	연소 후 과정 (Pre-combustion)	3.5	4.5	2.6	4.6	5.2	4
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매 (Methane catalysts in exhaust)	3.6	4.4	2.7	4.5	5.1	3.8
	환기 시 재액화 (Reliquifaction in venting)	3.5	4.6	2.5	4.4	4.9	3.9
	플라즈마 감소 (Plasma reduction)	3.3	4.3	2.3	4.4	4.8	3.9
기술 종합		3.6	4.5	2.6	4.6	5.1	4

자료: 저자 작성

선박의 탄소중립 기술 도입에 따른 효과(탄소중립 구현에 기여 정도)는 시점에 따라서 크게 달라질 것으로 전망이 된다. 2030년 이후 '에너지 전환' 기술의 탄소중립 기여에 대한 기대는 상당히 높은 것으로 보여지나, 그 외 '에너지 효율 향상' 및 '전·후 처리' 기술 분야에서는 기대치가 다소 낮게 나타났다. 이는 추후 '저감'보다는 본질적인 배출제로화, 즉 무탄소 연료 전환이 해운 부문 탄소중립에 더욱 결정적인 역할을 할 것이라는 전망으로 해석된다.

2) 항만 부문 현안 및 기술 수요 평가

(1) 항만 탄소중립 기술의 시장 도입/적용 가능성(2030; 2050)

〈표 3-25〉 항만 탄소 중립 기술의 시장 도입/적용 가능성

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산	태양광	4.4	4.4	4.4	5.3	4.9	5.7
	풍력	4.2	3.8	4.6	5.5	5.1	5.8
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)	4.5	4.6	4.5	5.9	6	5.8
에너지 소비	전력/배터리	4.7	4.7	4.7	6	5.8	6.3
	수소	3.5	3.5	3.5	5.7	5.8	5.5
기술 종합		4.3	4.2	4.3	5.7	5.5	5.8
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	4.5	4.7	4.3	5.2	5.3	5.2
	차량/트레일러 효율 개선	4.6	4.8	4.4	5.4	5.3	5.5
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	4.8	4.9	4.7	5.9	5.9	5.9
기술 종합		4.6	4.8	4.4	5.5	5.5	5.5
전·후 처리		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	3	3.2	2.8	5	4.8	5.1
	저장 (Storage)	3.1	3.2	2.9	5.1	4.8	5.4
	활용 (Utilization)	2.6	3	2.3	4.9	4.7	5.1
기술 종합		2.9	3.1	2.7	5	4.7	5.2

자료: 저자 작성

항만 부문 '에너지 전환' 유형(대분류) 기술의 전반적인 시장 도입·적용 가능성은, 2030년까지 평균 4.3/7.0점으로 상당히 높을 것으로 판단된다. 항만의 에너지 전환 유형의 기술은 2030년 이후 2050년까지 5.7/7.0점으로, 시장성이 더욱 확장될 것으로 보인다. 특히, 에너지 소비 유형에 해당하는 전력/배터리 기술의 상용화가 다른 항목들에 비해 더욱 두각을 나타낼 것으로 보여지는 반면, 수소 기술은 2030년까지는 적용 가능성이 3.5/7.0점으로 다소 낮으나, 2030년 전후로 폭발적인 성장이 예측된다.

'에너지 효율 개선' 유형(대분류) 기술 역시 시장 도입·적용 가능성이 상대적으로 높게 나타났다. 특히, 운영적 방에 해당하는 '화물 흐름 개선' 기술의 적용 가능성이 2030년 전후로 상당히 높아질 것으로 전망이 되며, 그 외 기술들도 2030년 이후부터 적극적으로 활용이 될 것으로 판단된다.

반면, '전·후 처리' 유형(대분류)의 기술은 2030년까지 시장 도입 가능성이 상당히 낮게 나타났다. 현재 기준으로 시장성이 평균 2.9/7.0점으로, 여타 기술 대비 매우 낮게 평가되었으나, 2030년 전후로 극적으로 시장성이 상승할 것으로 보인다. 전후처리 기술은 전반적으로 현재에는 해결하기 어려운 기술적 난이도로 인해 시장성이 부족하지만, 향후 기술 개발과 더불어 항만의 탄소중립에 있어 큰 역할을 기대하고 있음을 시사한다.

(2) 항만 탄소중립 기술항목별 상용화의 기술적 난이도

〈표 3-26〉 항만 탄소 중립 기술의 항목별 상용화의 기술적 난이도

에너지 전환		기술적 난이도		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산	태양광	3.6	3.6	3.6
	풍력	4	4.2	3.8
에너지 연계	에너지 그리드(분산 전원 기술 항만)	4.2	4.4	4
에너지 소비	전력/배터리	4.2	4.4	3.9
	수소	5.8	5.8	5.7
기술 종합		4.3	4.5	4.2

에너지 효율 개선		기술적 난이도		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	3.2	3.2	3.1
	차량/트레일러 효율 개선	3.2	3.3	3.1
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	4.1	4.3	3.8
기술 종합		3.5	3.6	3.3
전·후 처리		기술적 난이도		
		평균	국내 전문가	해외 전문가
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	5.5	5.7	5.3
	저장 (Storage)	5.3	5.4	5.3
	활용 (Utilization)	5.7	5.7	5.6
기술 종합		5.5	5.6	5.4

자료: 저자 작성

항만 부문에서 '에너지 효율 개선' 유형(대분류) 기술의 상용화를 위한 난이도는 상대적으로 매우 낮은 반면, '전·후 처리' 기술 유형은 상용화에 큰 어려움이 있을 것으로 평가되었다. 상대적으로 평이한 '에너지 전환' 유형에서 수소 기술은 5.8/7.0점로 나타났으며, 태양광의 경우 3.6점으로 상대적으로 다른 기술에 비해 기술 성숙도가 높은 것으로 평가되었다.

에너지 효율 개선 기술의 경우 이미 항만 현장에서 적용되고 있는 사례가 적지 않으며, 향후 기술적 과제는 이들 기술을 고도화하거나 스마트 항만 기술과 연계하는 방향으로 진행되고 있어 여타 기술에 비해 기술적 난이도가 낮게 평가되었으나, 세부 기술항목 중 스마트 항만 기술, 즉 화물 흐름 개선을 위한 디지털화는 지속적으로 발전하고 있는 IoT, AI 기술 등의 적용, 이를 활용한 최적화 구현 등의 과제로 인해 난이도가 다소 높게 평가되었다.

반면, 전·후 처리 기술은 전반적으로 상당히 높은 기술 난이도로 평가되었다. 항만 내 탄소의 포집(Capture), 저장(Storage), 활용(Utilisation)

전 분야의 난이도가 5.0/7.0 이상으로, 2030년까지의 시장 활용 가능성이 상당히 낮게 나타난 점과 같은 맥락으로 이해할 수 있다. 하지만, 2030년 이후 탄소중립 구현에 있어 중요한 역할을 기대하고 있으며, 따라서 본격적인 연구개발이 시급한 분야로 보인다.

(3) 도입에 따른 효과

〈표 3-27〉 항만 탄소 중립 기술의 도입에 따른 효과

에너지 전환		현재 ~ 2030년			2030- 2050년		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
에너지 생산	태양광	4	4.6	3.4	5	5.1	4.9
	풍력	3.8	4	3.7	5	4.8	5.2
에너지 연계	에너지그리드 (분산 전원)	4.4	4.5	4.3	5.4	5.2	5.7
에너지 소비	전력/배터리	4.6	4.9	4.3	5.5	5.6	5.5
	수소	3.9	4.7	3.1	5.9	6.4	5.3
기술 종합		4.1	4.5	3.8	5.4	5.4	5.3
에너지 효율 개선		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	3.8	4.1	3.5	4.3	4.5	4.2
	차량/트레일러 효율 개선	4.0	4.2	3.8	4.5	4.5	4.4
운영적 방안	화물흐름 개선 (스마트 항만)	4.4	4.5	4.4	5.1	5.2	5.1
기술 종합		4.1	4.3	3.9	4.6	4.7	4.6
전·후 처리		**현재 ~ 2030년**			**2030- 2050년**		
		평균	국내 전문가	해외 전문가	평균	국내 전문가	해외 전문가
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집 (Capture)	3.7	4.3	3.1	5.1	5.3	4.9
	저장 (Storage)	3.7	4.2	3.2	4.9	5.2	4.7
	활용 (Utilization)	3.5	4.3	2.8	5.1	5.4	4.8
기술 종합		3.6	4.2	3	5	5.3	4.8

자료: 저자 작성

항만 탄소중립 기술 도입에 따른 효과(탄소중립 구현에 기여 정도) 역시 시점에 따라서 크게 달라질 것으로 전망된다. 현재~2030년' 기간의 효과 예상값은 '에너지 전환' 기술 4.1/7.0점, '에너지 효율 개선' 기술 4.1/7.0점, 전·후 처리 기술 3.6/7.0점으로 그리 높지 않으나, 2030년 이후에는 대폭 상승되어 5.4점, 4.6점 그리고 5.0점으로 각각 나타났다.

특히, 수소 기술과 탄소 포집 및 저장 기술은 2030년까지 기대하는 효과가 매우 낮으나, 2030년 전후로 탄소중립 이행과정에서 주요기술로 도입·활용될 것으로 예측되며, 이들 기술의 발전 정도에 따라 그 효과가 극대화 될 것으로 판단된다.

3. 종합 분석

다음에서는 해운·항만 부문 탄소중립 구현을 위한 기술 유형 및 항목에 대한, 국내외 기술 전문가들의 주요 평가지표별 평가결과의 상대적인 비교분석을 수행하였다. 1차적인 평가결과에 대한 지표별 재조합 및 비교분석을 통해, 국제협력의 대상이 될 수 있는 주요 기술항목들의 현 위치 및 상황·조건 등을 확인하는 한편, 이를 시각적으로 보다 명확하게 확인하기 위해 방사형 그래프를 활용하였다.

〈표 3-28〉 방사형 그래프의 적용

No.	항 목	적용 방향
1	대상·방향 설정	• 설문에 사용된 평가지표별 평가결과(변수; 개별 축) 시각화 – 지표별 변수의 크기, 중요도 등을 시각적으로 확인하는 한편, – 지표 간 비교분석(직관적/정량적) 용이
2	중심과의 관계 식별	• 그래프의 중심에서 멀어질수록 해당 지표에 대한 평가값이 커지며, • 기술의 종합평가를위한 개별 지표별 평가값의 수준 식별

No.	항 목	적용 방향
3	주요 지표별 수준 파악	• 개별 꼭짓점은 평가 대상 기술유형 및 항목에 대한 평가지표별 평가값으로, – 개별 지표에 대한 평가값의 절대 수준, 타 지표의 평가값에 대한 상대적 수준 등 파악
4	상대적 위치 식별	• 평가 대상인 개별 기술유형 및 항목의 상대적인 위치를 파악하여 – 항목/지표 간의 차이 및 균형/불균형 등을 시각화
5	패턴 식별	• 평가지표 간의 상대적 추세 및 패턴 식별 • 여러 개의 그래프를 비교하여, 개별 항목 또는 지표별 상대적/절대적 변화 추이 확인

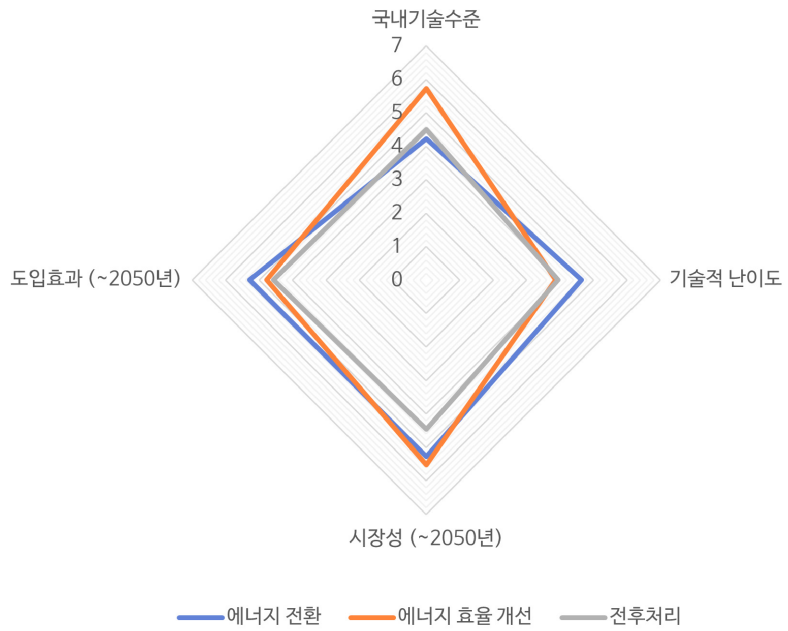
자료: 저자 작성

1) 해운 부문

해운 부문에서는 '에너지 효율 개선' 유형의 기술 수준이 높게 평가된 반면, 여타 '에너지 전환' 및 '전·후 처리' 모두, 특히 전자의 기술 수준에서 상대적으로 큰 격차를 확인할 수 있다. 해운 부문의 탄소중립 기술로 선별된 기술유형은 전반적으로 2030년 이후 탄소중립 이행 트랙에서 실제적으로 상당한 도입효과, 즉 상당한 역할로 탄소중립 구현에 기여함은 물론, 특히 '에너지 전환' 방식의 기술이 이러한 양상을 주도할 것으로 전망할 수 있다.

한편, 탄소중립 기술로 선별된 기술유형 및 항목별 기술적 난이도, 즉 2030년 전·후 시장에 상용화되기 위해 해결되어야 할 기술적 어려움의 정도에 대해서는, '에너지 전환'에서 상대적으로 매우 크게 나타났다. 탄소중립 이행 트랙에서 주요 기준으로 작용하게 될 대안 개념의 재생에너지 및 이를 활용하기 위한 신기술의 탐색에 대한 무한 경쟁이 이미 진행 중임에도, 아직은 가야할 길이 멀다는 의미로 해석할 수 있다.

〈그림 3-13〉 해운부문 탄소중립 기술 지표별 평가 결과



자료: 저자 작성

종합적으로 보았을 때, '에너지 전환' 유형의 기술 수준이 기술 선도그룹 대비 매우 뒤쳐져 있음에도 2030년 이후 도입효과 및 동기간 시장성이 매우 높게 나타나고 있어, 우선 선도그룹의 기술 수준에 근접하기 위한 별도의 노력이 전방위적으로 요구된다고 볼 수 있다. 특히 기술적 난이도가 상대적으로 높게 나타났다는 점에서, 이러한 노력을 국제협력의 측면에서 접근하기 용이한 것으로 해석할 수 있다. 반면, '전·후 처리' 유형의 경우, 타 유형에 비해 2030년 이후 시장수요, 도입에 따른 기여정도가 낮게 나타나, 국제협력 등 별도의 전략적 조치 투입의 당위성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

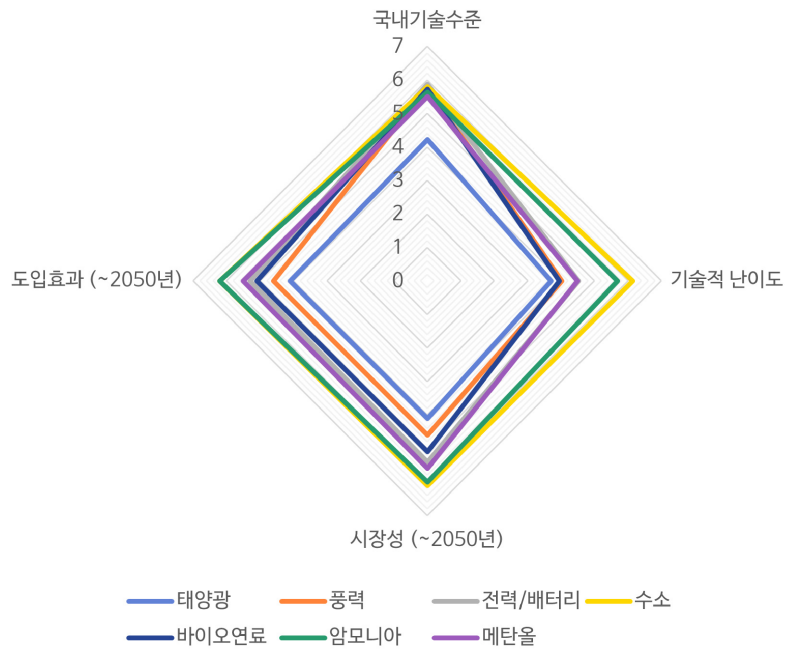
(1) '에너지 전환' 유형 기술

'에너지 전환' 유형에서는, 선박의 저/무탄소 운항을 구현하기 위한 주요 대체 에너지로 평가되는, 수소, 암모니아, 메탄올, 바이오에너지 및 전력·배터리의 국내 기술 수준이 전반적으로 선도그룹에 근접하는 것으로 나타났다. 태양광 기술의 경우는 많은 전문가들이 선체에 태양광 판넬을 탑재·활용하는 방식 자체에 다소 물리적인 한계가 있을 것으로 전망하고 있으며, 같은 이유로 도입에 따른 효과, 2030년 이후의 시장성 또한 상대적으로 부정적인 평가를 하고 있다. 이에 따라, 현재 태양광 기술을 사용하는 선박의 실증 사례 또한 많지 않다.

현재 선박의 대체 연료 후보군 중 유력 대안으로 평가되고 있는 암모니아, 메탄올 및 수소 관련 기술의 경우, 도입에 따른 탄소중립 기여효과 및 2030년 이후 시장성이 매우 높게 평가된 반면, 기술적 난이도 역시 아직 매우 높은 것으로 평가되어, 해당 기술분야의 선도그룹과의 격차를 해소하고, 나아가 선도그룹에 참여하기 위한 전략적인 노력이 요구된다. 이러한 맥락에서, 이들 기술에 대한 적극적인 연구개발 및 투자와 이를 활용하는 국제협력의 기회를 확대해야 할 것으로 보인다. 특히, 암모니아 추진 엔진이 2025년까지 상용화될 것으로 전망되는 가운데, 많은 전문가들이 대형 선박에 적용이 가능한 가장 유력한 솔루션으로 2030년 전·후 시장의 수요가 매우 커질 것으로 판단하고 있다.

바이오 연료의 경우, 도입에 따른 기대효과와 이에 띠른 시장성은 앞서 언급한 대체 연료군에 버금가는 수준으로 평가하고 있으나, 이는 현재 사용하고 있는 기술 인프라를 사용할 수 있음에도 시장성을 확보하기 위해서는 '전과정평가(LCA)'의 개념에서 재생 에너지, 그리고 탄소 포집 등에 의한 탄소 공급이 충분히 보장되어야 한다는 점에서 '차선'의 기술적 방안으로 평가되고 있는 것으로 판단된다.

〈그림 3-14〉 해운 부문: '에너지 전환' 기술 지표별 평가 결과

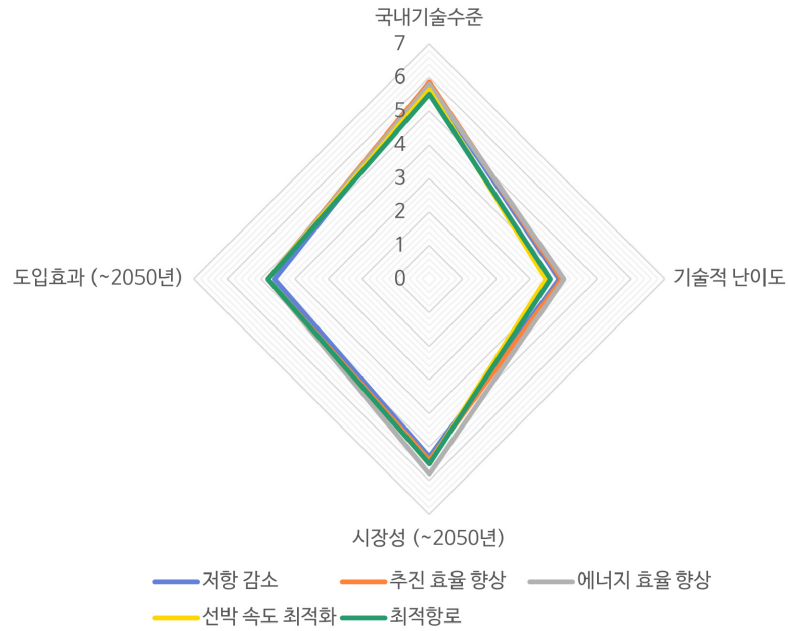


자료: 저자 작성

(2) '에너지 효율 개선' 유형 기술

'에너지 효율 개선' 유형은 '전·후 처리' 유형과 함께, 전반적으로 도입에 따른 탄소중립 기여효과가 '에너지 전환' 유형에 비해 유의미하게 낮게 평가되었으며, 많은 전문가들이 '보조적인' 역할을 기대하고 있는 것으로 나타났다. 이는 탄소 발생을 근본적으로 방지하거나 전주기적인 측면에서 극소화하는 기술 패러다임인 '에너지 전환' 유형에 비해, 선박 운용의 효율성을 극대화하는 방법으로 배출을 저감하는 본질적 특성에 기인한다.

〈그림 3-15〉 해운 부문: '에너지 효율 개선' 기술 지표별 평가 결과



자료: 저자 작성

하지만 여타 유형에 비해 국내 기술 수준이 가장 높게 평가되었으며, 국내 조선 및 해운업계의 관련 기술 수준이 선도그룹에 매우 근접하고 있는 것으로 판단된다. 또한, 다른 유형에 비해 2030년 전·후 시장에서의 수요가 매우 커질 것으로 전망되었으며 현재 상대적으로 선도적인 기술 역량을 이미 보유하고 있는 것으로 볼 수 있어, 지속적인 투자와 선도기술에 대한 연구개발을 통해 '초격차' 위치를 도모해볼 수 있는 분야로 파악된다. 이는, 우리 입장에서 현재 시장에서 인식하고 있는 선도 기술의 기술적 난이도는 높게 평가되지 않으나, 2030년 전·후까지 이를 넘어서는 혁신적인 기술 개념, 즉 상대적으로 기술적 난이도가 높은 기술 패러다임을 개발함으로써 시장에서 주도적인 위치를 점할 수도 있다.

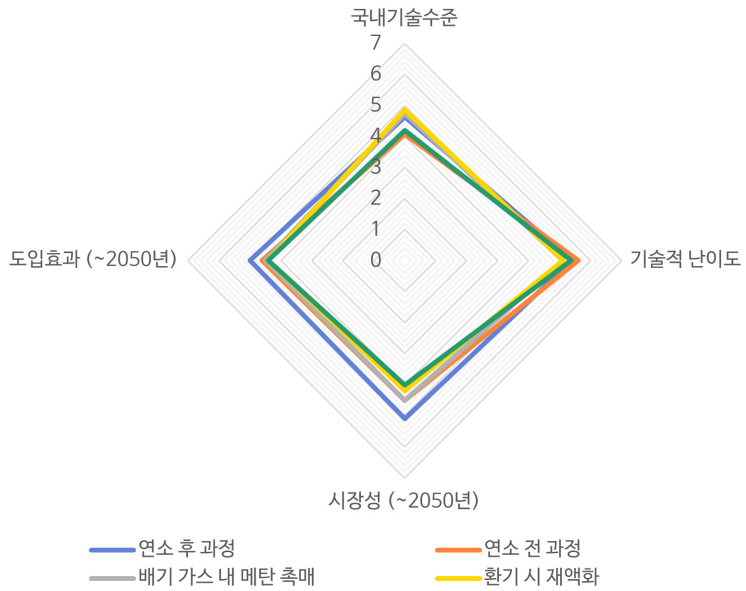
(3) '전·후 처리' 유형 기술

이산화탄소의 배출을 선상에서 포집·방지하거나 방지하기 위한 전·후 처리 기술을 포함하는 '전·후 처리' 유형에 대해서, 많은 전문가들은 배출 후 포집 및 관련 기술을 제외하고는 2030년 전·후 시장 수요 및 기대 효과를 상대적으로 낮게 평가하고 있다. 기술의 발전에도 불구하고 현실적으로 배출을 완벽하게 제로화하기 힘들다는 점에서, 해당 유형 중 가장 높게 평가된 '포집' 관련 기술 역시 2030년 이후 탄소중립 구현에 매우 큰 역할을 하게될 것은 확실하다. 하지만, 이를 선상에서 구현하기에는 극복하기 어려운 현실적 어려움[73], 이를 극복하기 위한 기술개발의 효율성에 대한 의구심 등으로 이러한 평가는 현재, 그리고 2030~2050년 프레임의 기준에서 매우 타당한 것으로 보여진다.

즉, 해당 유형은 2050년을 목표시점으로 하는 패러다임보다는 그 다음 목표 시점에 대한 기술유형으로 볼 수 있다. 2050년 이후 기술 시장을 고려하였을 때 시장의 수요는 견고한 성장이 있을 것으로 예상되지만, 현재 국내외 기술 수준 또는 기술 성숙도(TRL)는 초기 정도로 파악된다. 이러한 판단이 유효하다면, 2050년 전·후 기술 시장에 대한 전략적 접근 차원에서 장기적으로 연구개발 및 이를 위한 투자를 점진적으로 확대할 수 있다. 이러한 판단은, 국내외 전문가들의 평가에서 이 분야 기술들의 기술적 난이도가 매우 높게 나타났다는 사실에서 타당성이 배가된다고 볼 수 있다. 장기적인 안목에서, 유력 국가와의 협력을 통해 2050년 전·후 시장을 공동으로 주도하는 접근 방식을 고려할 수 있다.

73) 포집 및 관련기술 운용을 위한 또다른 에너지 수요의 발생, 기술 적용을 위한 포집-관리 시스템 설치를 위한 선내 공간 확보의 어려움 등

〈그림 3-16〉 해운 부문: '전·후 처리 기술 평가' 기술 지표별 평가 결과



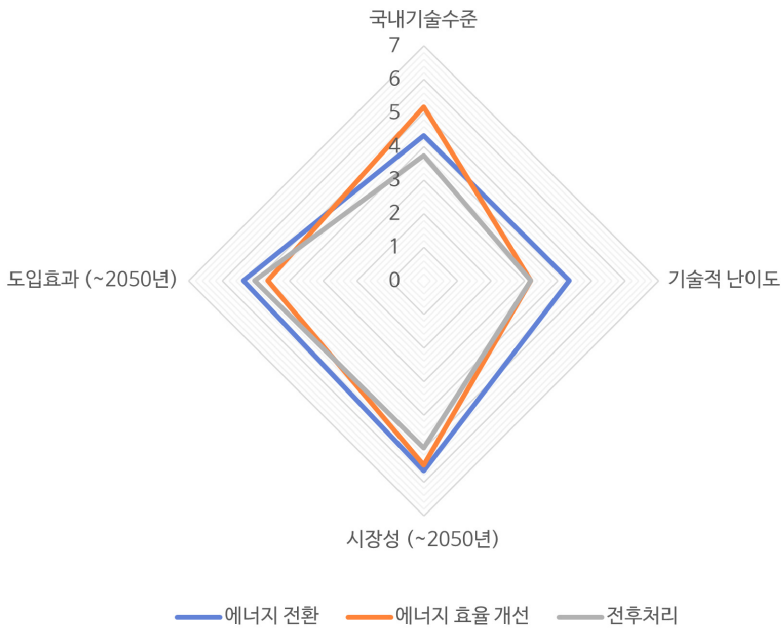
자료: 저자 작성

2) 항만 부문

항만 부문 역시 '에너지 효율 개선' 유형의 국내 기술 수준이 높게 평가된 반면, '에너지 전환' 및 '전·후 처리' 유형 모두 선도 기술그룹과 상대적으로 큰 격차를 보이고 있다. 이는 국내 항만의 친환경 전환 작업은 본격적으로 추진되고 있음에도, 항만, 특히 국내 항만의 배출제로 전환을 위한 신기술의 연구개발 추진은 아직 미미한 상황에 기인하고 있는 것으로 판단된다. 항만 부문에서는 항만 자체의 수요에 따른 기술 개발보다는 육상 및 타분야에서 검증된 탄소중립 기술 및 제품을 도입하거나, 항만장비에 적용하는 데에 그치고 있다.

하지만, 최근 IoT 및 이를 활용하는 빅데이터 기술, 스마트 커넥티드 개념의 항만의 물류 최적화 기술 등의 연구개발, 즉 스마트 항만 구축을 위한 전방위적 연구개발이 활발하게 이루어지고 있어, 이와 관련한 '에너지 효율 개선' 유형의 국내 기술 수준이 높게 평가된 것으로 이해할 수 있다.

〈그림 3-17〉 항만 부문 탄소중립 기술 지표별 평가 결과



자료: 저자 작성

국내외 전문가들은 항만 부문의 탄소중립 기술로 선별된 상기 3개 분야 기술유형 전반에 대해서, 2030년 이후 탄소중립 이행 트랙에서 실제적으로 상당한 도입효과를 기대하고 있으며, 같은 맥락에서 같은 기간 기술 시장의 수요 역시 큰 폭으로 확대될 것으로 전망하고 있다. 이 과정에서, '에너지 전환' 및 '에너지 효율 개선' 유형이 2030년 전·후 항만 탄소중립 기

술시장을 주도하는 한편, 같은 기간 수요가 급격하게 증가할 것으로 예측되는 이산화탄소의 포집·저장 과정에서도 항만이 (임시)저장 및 이송은 물론 자체 배출의 포집에서 중요한 역할을 담당할 것으로 전망된다.

한편, 이들 기술유형이 2030년 전·후 시장에 상용화되기 위해 해결되어야 할 기술적 난이도에 대해서는, '에너지 전환'에서 상대적으로 매우 크게 나타났으며, '에너지 효율 개선' 및 '전·후 처리' 유형 모두 현 기술 수준에서 획기적으로 큰 발전이 요구되지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 항만활동의 특성에 기인하는 고유의 기술 수요를 반영하는 '에너지 전환' 기술의 연구개발, 이로 인한 시장 창출 및 주도가 가능할 것으로 판단된다.

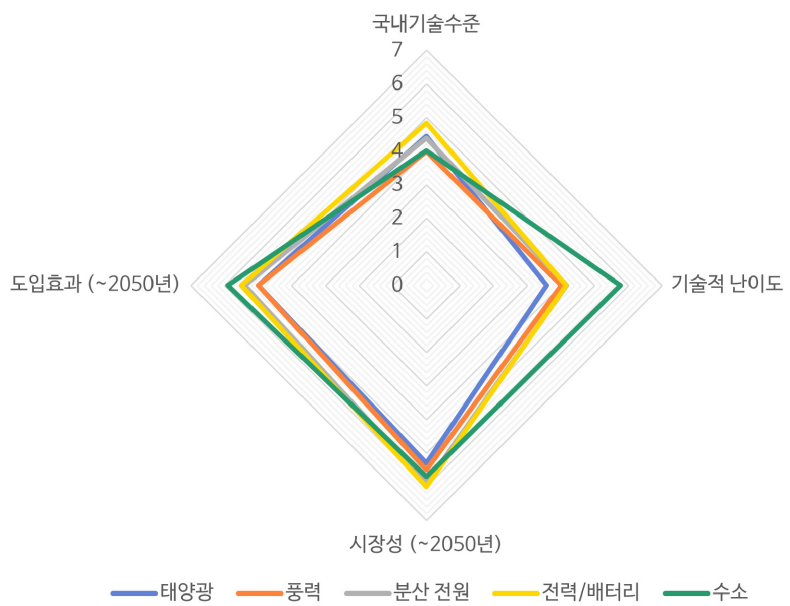
(1) '에너지 전환' 유형 기술

항만의 '에너지 전환' 유형은 전반적으로 국내 기술 수준이 상당히 낮게 평가되었으며, 이는 최근 과도기적인 '저탄소' 개념의 친환경 전환 작업을 추진하면서 그 다음 단계인 본격 무탄소 또는 배출제로 개념의 전환에 대한 항만 차원의 신기술 개발 또는 도입 노력이 상대적으로 미미했던 결과로 보여진다. 하지만, 수소를 제외한 항만 내 에너지 전환 기술항목들은 이미 육상 또는 해당 산업분야에서 상용화되었거나 검증이 어느 정도 되어, 이를 항만 현장에 그대로, 또는 현장의 수요에 운용 가능하도록 '개조'하는 개념으로 도입·적용되고 있어, 차후 극복해야 할 기술적 난이도가 매우 낮게 나타났다.

동시에, 국내외 전문가들은 이들 기술 항목들이 전반적으로 2030년 이후 탄소중립 구현 트랙에서 매우 중요한 역할을 담당하고, 이에 따라서 시장 수요 역시 매우 크게 확대될 것으로 평가하였다. 이러한 평가결과는 추후 항만 차원의 탄소중립 활동의 고유 특성을 반영하는, 이른바 '항만 탄소중립 기술'의 수요에 적극적으로 대응하는 한편 이를 위한 새로운 패러다

임의 가능성을 탐구해야 할 당위성, 그리고 아직 선도그룹과의 기술격차가 크거나 고착화되지 않은 현시점 사업 추진의 시급성을 시사한다. 특히, 항만에 특화된 수소 생산 및 저장, 활용 기술에 대한 적극적인 연구개발, 이를 위한 적극적인 투자와 국제협력을 고려해야할 것으로 보인다.

〈그림 3-18〉 항만 부문: '에너지 전환' 기술 지표별 평가 결과



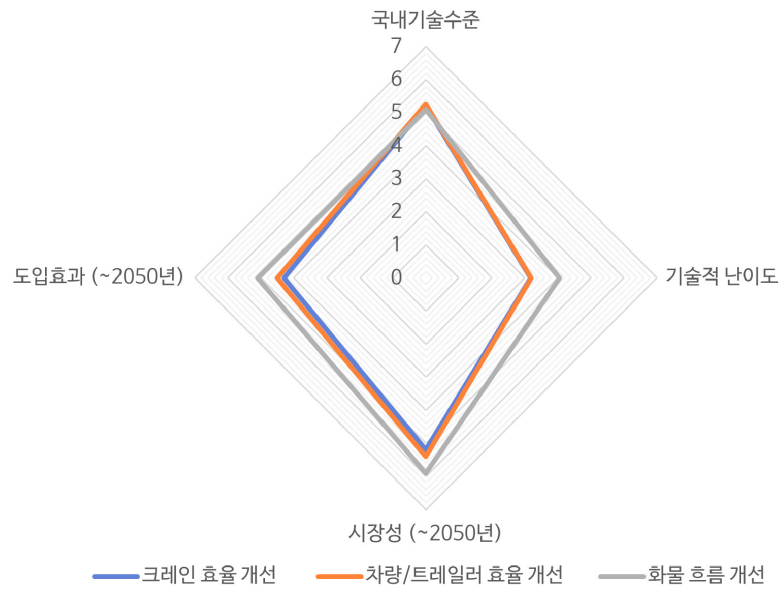
자료: 저자 작성

(2) '에너지 효율 개선' 유형 기술

항만의 '에너지 효율 개선' 유형 역시 해운 부문에서와 유사하게 '전·후처리' 유형과 함께, 도입에 따른 탄소중립 기여효과가 '에너지 전환' 유형에 비해 상대적으로 낮게 평가되었다. 이는 두 유형이 탄소중립 이행에 있어 '보조적인' 역할, 즉. 항만 활동으로 인한 탄소 발생을 근본적으로 방지

하기 보다는 개별 물류요소의 운용 또는 항만 운영과정에서 효율성을 극대화하는 방법으로 배출을 저감하는 본질적 특성에 기인하는 것으로 보인다.

〈그림 3-19〉 항만 부문: '에너지 효율 개선' 기술 지표별 평가 결과



자료: 저자 작성

내연기관의 연비 효율 개선기술이 이미 상당한 수준에 도달해 있고, 최근 물류 최적화를 위한 자동화, 이를 기반으로 하는 최적화 작업이 활발하게 추진되고 있어, 국내외 전문가들은 여타 유형에 비해 국내 기술 수준을 가장 높게 평가하였다. 같은 맥락에서 기술적 난이도 역시 매우 낮은 반면, 스마트화 트랙은 아직 해결해야 할 기술적 문제가 상대적으로 어느 정도 존재하는 것으로 보여진다. 하지만 달리 생각하면, 추후 시장 수요가 매우 커질 것으로 전망되는 데 비해 현재의 기술 수준이 상당한 수준에 근접하고 있음을 감안하면, 스마트와 관련한 세부 기술항목에 따라서 상대적으로 적은 투입으로 미래 시장을 주도할 수 있는 기회가 열려 있다고 볼 수 있다.

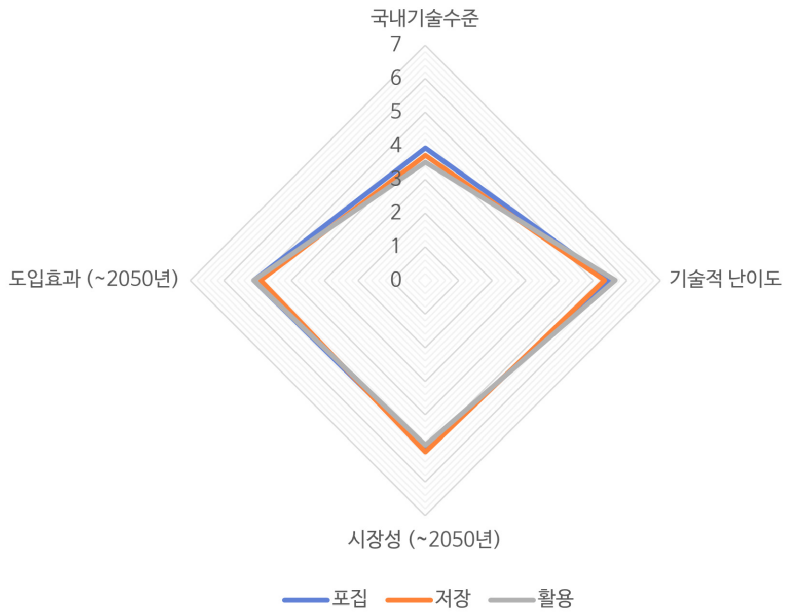
(3) '전·후 처리' 유형 기술

이산화탄소의 포집·활용·저장 기술은 탄소 발생을 근원적으로 방지·제한하는 '에너지 전환' 유형과는 달리 적극적인 배출 제한 노력에도 불구하고 현실적인 이유로 배출된 탄소를 포집·활용하거나 지하 깊은 곳에 저장하는 기술 유형으로, 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC)의 '제6차 평가보고서(AR6)' 역시 탄소중립 목표 달성을 위한 시나리오에서 필수적인 기술로 언급하고 있다. 현재 화력발전소 등 거대 규모 배출원에 대한 포집 및 육상·해상의 지하에 저장하기 위한 수십년째 연구개발이 활발하게 이루어지고 있으나, 대규모 플랜트가 필요하다거나 비용 측면의 문제 등으로 아직은 시범사업의 수준에 머무르고 있다. 하지만, 추후 항만 자체의 배출에 대한 포집 가능성 외에도, 육상의 대규모 배출에 대한 광범위한 포집으로 모아진 이산화탄소를 해상의 저장 플랜트로 이송하기 위한 주요 허브, 이를 위한 (임시) 저장 등의 수요를 항만에서 소화해야 하므로, 2030년 전·후 해당 기술에 대한 시장의 수요는 매우 크다고 할 수 있다.

이러한 이유로, 국내외 전문가들은 국내 기술 수준을 매우 낮은 수준으로, 반면에 해결해야할 기술적 난이도는 매우 높은 수준으로 평가하였다. 하지만, 해당 기술시장 전반의 기술 수준이 아직은 성숙하지 못한 상황이며, 특히 항만에 특화된 기술의 경우는 더욱 그러하다. 한편, 앞서 살펴본 바와 같이 탄소중립 구현을 위한 혁신기술의 투입, 이로 인한 획기적인 배출저감을 기대하는 2030년 이후 해당 기술 시장의 수요는 큰 폭으로 확대될 수밖에 없으며, 도입에 따른 효과 역시 확정적이라할 수 있다.

따라서, 항만의 '전·후 처리' 유형은 현시점 선도그룹과의 격차를 줄이기 위한 적극적인 연구개발, 이를 위한 재원의 투입이 요구되는 분야로, 전략적인 기술개발 전략으로 일환으로 유력 선도그룹과의 공조를 고려해야할 필요가 있다.

〈그림 3-20〉 항만 부문: '전·후 처리 기술 지표별 평가 결과



자료: 저자 작성

제3절 국제협력 대상 기술항목의 식별

2050 탄소중립 목표 달성을 위해 가까운 미래에 전례없이 폭발적으로 성장할 것으로 보이는 새로운 세계 기술 시장을 대비하여, 이미 주요 국가들은 국가 안보 차원의 '기술 주권'을 확보하는 동시에 미래 시장을 주도하기 위해 무한경쟁에 돌입하고 있다. 우리 역시 기술 유형별 주요 대안이 될 '혁신기술'의 선택·결정 과정에 주도적으로 참여하거나 선도적인 위치를 점하기 위해서는 전략적인 국제협력이 필수적이다. 이미 우리가 아직 속하지 못한 기술 선도국 그룹 간 기술 동맹이 구체화 되고있는 상황에서, 우리의 기술 역량을 자체적으로 개선하려는 노력과는 별개로, 국제협력을 통한 역량 제고, 이를 통한 시장 경쟁력 육성을 고려해야 한다.

이를 위해서는 선행적으로 우리의 현실을 올바르게 파악하고, 이를 바탕으로 우리의 강점과 약점, 기술적 개선 수요를 명확히 함으로써, 보다 효과적인 국제협력의 기회를 모색할 수 있다. 다음에서는 앞서 정리한 ① 우리 탄소중립 기술의 현재 위치와 선도국가와의 격차를 파악하기 위한 기술 수준평가, 그리고 기술 유형·항목별 전략적 접근 방향 도출을 위한 ② 개별 기술항목의 시장성, 기술적 난이도, 탄소중립에 기여도 등에 대한 평가의 결과를 바탕으로, 우리의 입장에서 국제협력이 필요한 기술항목을 식별하였다.

1. 국제협력 대상 유형의 구분

이 과정에서, 평가결과(① 국내기술의 수준 및 선도국과의 격차, ② 시장성, 기술적 난이도, 탄소중립에 기여도)를 종합적으로 반영하여, 개별 기술항목의 국제협력의 목적/성격을 도출하였다. 연구진은 과학기술 국제협력을 위한 전략적인 접근의 일환으로, 국제협력 대상 기술유형을 다음과 같

이 ‘선도기술’, ‘공동기술’, ‘협동기술’ 총 3가지로 구분하여 정의하였다.

우선, ‘선도기술’은 기술수준이 이미 최상위권이거나 시장을 선도하고 있으며, 2030년 전후를 기준으로 시장성이 매우 크거나 탄소중립에 기여도가 클 것으로 예상되는 기술유형이다. 이는 연구협력 보다는 집중 투자를 통한 ‘초격차’ 지위 확보 또는 유지해야하는 대상으로 볼 수 있다. ‘공동기술’은 선도국가의 기술 수준에 근접하거나, 빠른 속도로 근접하고 있는 기술 유형으로, 역시 2030년 전후를 기준으로 시장성이 매우 크거나 탄소중립에 기여도가 클 것으로 예상되어 협력의 가치가 충분해야 한다. 마지막으로, ‘협동기술’은 시장성 및 기여도 측면에서는 혁신기술이나 매우 유효한 대안기술로 선택될 확률이 큼에도 불구하고 아직 전세계적으로 기술 성숙도가 낮은, 즉 ‘지금 시작해도 아직은 따라잡을 수 있는’ 기술유형으로, 국제협력을 통해 빠른 기술발전을 도모하여 기술주기의 초기부터 공동으로 시장을 선도할 수 있다.

〈표 3-29〉 국제협력 대상 유형의 선별

구 분	내 용
선 도	• 이미 기술 수준이 최상위권으로, 추후 연구개발을 통해 ‘초격차’ 확보 필요 • 2030년 전후 시장 규모, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형
공 동	• 선도국가의 기술 수준에 근접하거나, 빠른 속도로 근접하고 있는 기술 유형 • 2030년 전후 시장 규모, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형
협 동	• 2030년 전후 시장 규모가 커지거나, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형임에도, 아직 전세계 기술 성숙도가 기술 개발 초반으로 파악되는 경우

자료: 저자 작성

2. 평가지표별 수준급간의 설정

이어서, 기술항목별 국제협력 대상 유형 식별을 위해 다음과 같은 평가지표별 평가결과값의 수준을 지표별 성격에 따라서 단계별로 분류하였다.

〈표 3-30〉 해운 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별

에너지 전환		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)
에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	59.8	4.1	3.7	4.1
	풍력	58.3	4.6	4.0	4.6
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	66.7	5.4	4.5	5.3
	수소	60.6	6.1	6.1	6.2
	암모니아	59.5	6.0	5.7	6.2
	메탄올	60.2	5.6	4.5	5.5
	바이오연료	57.3	5.1	4.0	5.1
종 합		60.3	5.3	4.6	5.3
에너지 효율 개선		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	82.6	5.3	3.9	4.6
	추진 효율 개선	83.8	5.4	3.9	4.8
	에너지 효율 개선	82.9	5.8	4.0	4.8
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	80.6	5.5	3.5	4.8
	최적항로	78.7	5.5	3.6	4.8
종 합		81.7	5.5	3.8	4.8
전·후 처리		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정	66.1	5.1	5.4	5.0
	연소 후 과정	58.2	4.5	5.6	4.6
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매	67.7	4.5	5.1	4.5
	환기 시 재액화	69.4	4.2	5.1	4.4
	플라즈마 감소	60.1	4.0	5.4	4.4
종 합		64.3	4.5	5.3	4.6

자료: 저자 작성

〈표 3-31〉 항만 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별

에너지 전환		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)
에너지 생산	태양광	63.6	5.3	3.6	5.0
	풍력	56.8	5.5	4.0	5.0
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원)	62.6	5.9	4.2	5.4
에너지 소비	전력/배터리	69.1	6.0	4.2	5.5
	수소	57.2	5.7	5.8	5.9
종 합		61.9	5.7	4.3	5.4
에너지 효율 개선		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	74.5	5.2	3.2	4.3
	차량/트레일러 효율 개선	75.0	5.4	3.2	4.5
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	72.8	5.9	4.1	5.1
종 합		74.1	5.5	3.5	4.6
전·후 처리		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집	56.4	5.0	5.5	5.1
	저장	53.2	5.1	5.3	4.9
	활용	50.3	4.9	5.7	5.1
종 합		53.3	5.0	5.5	5.0

자료: 저자 작성

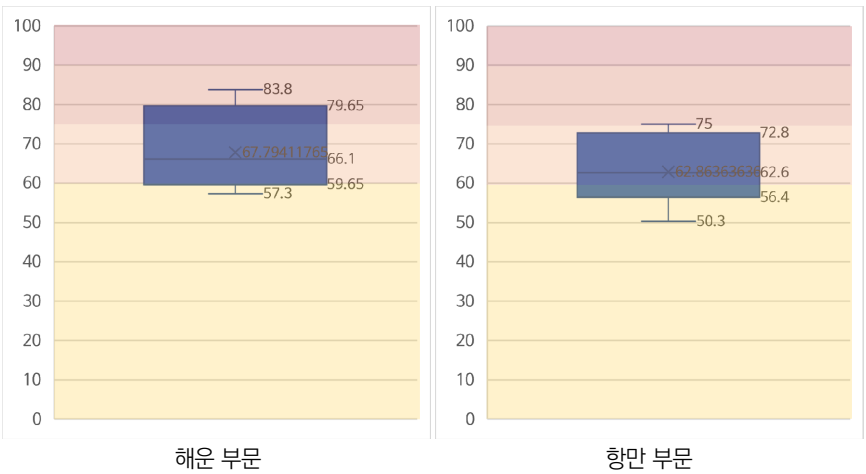
우선, 국내 기술 수준의 경우 기술항목별 평가결과값의 분포, 특히 최소값을 고려하여 상위 0~10% 구간은 국내 기술 수준이 이미 최상위권으로 시장을 주도하고 있는 '최상위', 10~25% 구간은 격차는 존재하나 최상위 수준에 접근 가능한 '최상위 근접', 25~40% 구간은 일정 격차는 존재하는 '상위 근접', 40%~ 구간은 기술 선도그룹과 현격한 기술의 격차가 존재하거나, 기술 개발 초기 단계인 '개발 초기 및 이하' 단계로 구분하였다.

〈표 3-32〉 지표별 수준 구분: 국내 기술 수준(100점)

구 분	평가값 구간
최상위	90~100
최상위 근접	75~89.9
상위 근접	60~74.9
개발 초기, 이하	~60

자료: 저자 작성

〈그림 3-21〉 지표별 수준 구분: 국내 기술 수준



자료: 저자 작성

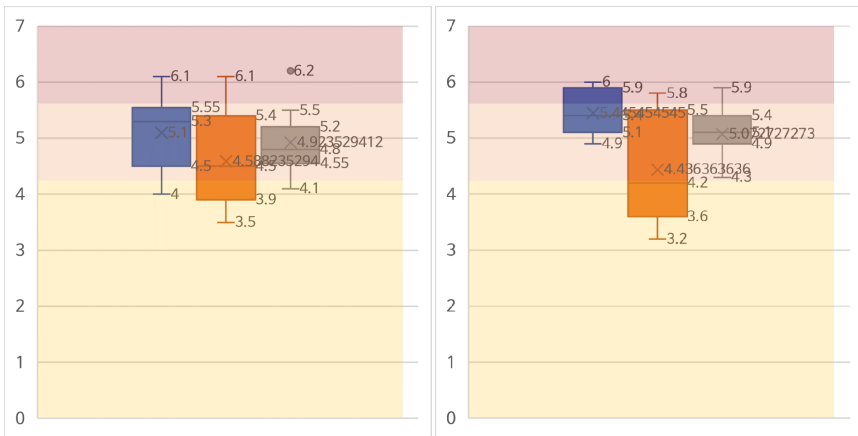
기술 유형별 2030~2050년 사이 시장 수요 전망, 2030년 전·후 시장에 상용화되기 위해 해결되어야 할 기술적 난이도 및 해당 기간 도입에 따른 탄소중립 기여 가능성(도입 효과)에 대해서는, 기술항목별 평가결과값의 분포, 특히 지표별 최소값을 고려하여 그 수준을 아래와 같이 3단계(상위 0~20%; 20~40%; 40%~)로 구분하였다.

〈표 3-33〉 지표별 수준 구분: 2030~2050 기술·시장 전망(7점)

구 분	평가값 구간		
	시장성(2030~2050)	기술적 난이도	도입효과(2030~2050)
매우 높음	5.6~7.0	5.6~7.0	5.6~7.0
높 음	4.2~5.59	4.2~5.59	4.2~5.59
일반, 이하	~4.19	~4.19	~4.19

자료: 저자 작성

〈그림 3-22〉 지표별 수준 구분: 2030~2050 기술·시장 전망



해운 부문 항만 부문

자료: 저자 작성

3. 국제협력 대상 기술항목의 식별

국내외 전문가의 평가결과를 바탕으로 평가수준 급간체계를 적용하여 종합적으로 분석한 결과에 따르면, 현재 해운·항만 부문을 통틀어 국내 기술 중 이미 기술 수준이 최상위권에 진입한 '선도기술'에 해당하는 기술항목은 아직 등장하지 않은 것으로 나타났다.

1) 해운 부문

해운 부문의 탄소중립 기술 그룹에서는, '에너지 소비' 유형의 전력/배터리, 수소, 메탄올 전환·활용과 관련한 기술항목은 선도국가의 기술 수준에 근접하고 있으며 2030년 전·후 시장 규모, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형으로 국제협력 대상 중 '공동기술'에, 아직 기술 수준이 높지 않으나 추후 시장성 및 도입효과가 클 것으로 전망되는 암모니아 및 바이오 연료 기술 항목은 '협동기술'로 분류하였다. 상기 기술항목들은 추후 탄소중립의 배출제로 전환과정의 주요 대안으로, 시장성의 확대가 확실한 반면 아직은 해결해야 할 기술적 난이도가 높은 상태로 존재하기 때문에, 해당 기술분야의 선도그룹과의 격차를 해소하고 나아가 선도그룹에 참여하기 위한 국제협력 등 전략적인 접근에 의한 연구개발이 시급하다.

에너지 효율 개선을 위한 '기술적·운영적 방안' 유형의 주요 기술항목은 대체적으로 최상위 선도그룹과의 기술 격차는 존재하지만 최상위 수준에 접근 가능한 '최상위 근접' 수준으로, 시장성 및 도입효과가 클 것으로 전망되고 있어, 우리 주도의 공동 연구개발을 추진할 수 있는 '공동기술' 영역으로 판단된다.

이산화탄소 및 메탄 슬립의 배출을 선상에서 포집·방지하거나 방지하기 위한 전·후 처리 기술을 포함하는 '전·후 처리' 유형의 기술항목은 다른 유형에 비해 2030년 전·후 시장 수요 및 기대 효과가 낮게 평가되었다. 추후 배출제로 전환기술이 주도하는 시장에서 이를 적용할 수 없는 영역에 대한 현실적 조치로 이에 대한 수요는 확실함에도, 비용 및 현실적인 제약으로 2030~2050년 사이 상용화는 어려울 것으로 판단된다. 이러한 이유에서, 해당 유형의 기술항목은 2050년 전·후 기술 시장을 대비한 장기적 관점에서 연구개발 및 이를 위한 투자를 점진적으로 확대할 필요가 있다.

〈표 3-34〉 해운 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별

에너지 전환		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
에너지 생산 (대체에너지원)	태양광	59.8	4.1	3.7	4.1		
	풍력	58.3	4.6	4.0	4.6		
에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	66.7	5.4	4.5	5.3	공동	
	수소	60.6	6.1	6.1	6.2	공동	시급
	암모니아	59.5	6.0	5.7	6.2	협동	시급
	메탄올	60.2	5.6	4.5	5.5	공동	
	바이오연료	57.3	5.1	4.0	5.1	협동	시급
종 합		60.3	5.3	4.6	5.3	–	–
에너지 효율 개선		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	82.6	5.3	3.9	4.6	공동	
	추진 효율 개선	83.8	5.4	3.9	4.8	공동	
	에너지효율개선	82.9	5.8	4.0	4.8	공동	
운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	80.6	5.5	3.5	4.8	공동	
	최적항로	78.7	5.5	3.6	4.8	공동	
종 합		81.7	5.5	3.8	4.8	–	–
전·후 처리		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
이산화탄소 (OCCS)	연소 전 과정	66.1	5.1	5.4	5.0	공동	
	연소 후 과정	58.2	4.5	5.6	4.6	협동	
메탄가스	배기가스 내 메탄 촉매	67.7	4.5	5.1	4.5	공동	
	환기 시 재액화	69.4	4.2	5.1	4.4	공동	
	플라즈마 감소	60.1	4.0	5.4	4.4		
종 합		64.3	4.5	5.3	4.6	–	–

자료: 저자 작성

2) 항만 부문

항만 부문의 탄소중립 이행은 재생 에너지 기반의 에너지 전환, 동시에 물류 및 에너지 효율의 극대화를 위한 최적화, 그럼에도 배출된 이산화탄소의 포집 및 저장·활용 정도로 요약할 수 있다. 항만 부문 역시 재생 에너지 위주의 에너지 전환이 기술 수요의 가장 큰 부분을 차지하며, 나머지 유형은 이를 보조하거나 보완하는 개념으로 요구된다.

이러한 맥락에서, 국내외 전문가들은 항만 부문에서 '에너지 연계 및 소비' 기술 유형과 스마트화를 통한 '물류 효율 개선' 기술 유형의 2030년 전·후 시장 수요 및 기대 효과를 높게 전망하였다. 이들 기술은 최근 우리가 포함된 경쟁그룹에서 공격적인 기술개발로 인해 발전 속도가 매우 빠른 반면, 기술적 난이도는 우리의 수준에서 도전 가능한 수준으로 평가되어, 유력 선도 기술그룹과의 국제협력을 통해 가까운 미래에 선도그룹에 진입할 수 있을 것으로 판단되는 '공동기술'로 분류하였다.

항만 내 수소 저장 및 활용 등을 위한 기술, 그리고 '탄소 포집 및 저장(CCS)' 기술 유형은 현재 우리의 기술 수준은 선도그룹과 일정한 격차가 확인되나, 선도그룹 역시 지금부터 해결해야할 기술적 난이도가 매우 높고 추후 도입에 따른 기대효과가 매우 크기 때문에, 해당 분야 기술역량을 상대적으로 단기간 내에 육성하기 위한 '협동기술' 유형으로 분류하였다. 특히, CCS 기술은 현재 탄소중립 이행 시나리오에서 2050년까지 배출을 제로화하지 못하는 경우, 적용 가능한 가장 유력한 대안기술로 평가되고 있어, 2030년 전후부터는 시장의 수요가 매우 커질 것으로 예상할 수 있다. 또한, 항만 자체로도 발전이나 산업 부문에 육박하는 대규모 배출 규모를 보이고 있어 포집의 대상으로 충분히 적합하며, 추후 해상 지중저장 시 저장 및 이동을 위한 주요 허브의 역할이 예상되므로, 이에 대한 연구개발이 매우 시급한 것으로 판단된다.

이와 별도로, 항만 내 에너지 효율 개선을 위한 기술적·운영적 방안 역시 타분야에서 검증된 기술을 도입하기보다는 항만활동 특성에 기인하는 고유 수요에 대응하기 위한 특화 기술 및 정책 개발, 이를 위한 지원이 시급하다.

〈표 3-35〉 항만 부문 국제협력 대상 기술유형의 식별

에너지 전환		국내기술 수준 (100)	시장성 (7)	기술적 난이도 (7)	도입효과 (7)	협력 구분	연구개발 시급성
에너지 생산	태양광	63.6	5.3	3.6	5.0		
	풍력	56.8	5.5	4.0	5.0		
에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원)	62.6	5.9	4.2	5.4	공동	시급
에너지 소비	전력/배터리	69.1	6.0	4.2	5.5	공동	시급
	수소	57.2	5.7	5.8	5.9	협동	시급
종 합		61.9	5.7	4.3	5.4	-	-
에너지 효율 개선		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**	**협력 구분**	**연구개발 시급성**
기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	74.5	5.2	3.2	4.3		시급
	차량/트레일러 효율 개선	75.0	5.4	3.2	4.5		시급
운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	72.8	5.9	4.1	5.1	공동	시급
종 합		74.1	5.5	3.5	4.6	-	-
전·후 처리		**국내기술 수준 (100)**	**시장성 (7)**	**기술적 난이도 (7)**	**도입효과 (7)**	**협력 구분**	**연구개발 시급성**
탄소 포집 및 저장 (CCS)	포집	56.4	5.0	5.5	5.1	협동	시급
	저장	53.2	5.1	5.3	4.9	협동	시급
	활용	50.3	4.9	5.7	5.1	협동	
종 합		53.3	5.0	5.5	5.0	-	-

자료: 저자 작성

04
해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력방안

제1절 해양 탄소중립 구현을 위한 과학기술 국제협력 방안

1. 전략적 국제협력·공조 체계 구축

현재, 주요 국가들은 2030년 전후에 형성될 탄소중립 혁신기술 시장을 선점하거나, 이후의 시장을 주도하기 위해 초경쟁의 장에 뛰어들고 있다. 혁신적인 핵심기술에 대한 기술역량 확보는 시장 경쟁력 제고의 문제이기도 하지만, 최근 기후변화, 팬데믹 대응 등 전지구적인 환경·보건 문제로 인해 촉발된 급격한 경제·기술 안보화, 이에 따른 국가 안보 차원의 '기술 주권' 확보의 문제이기도 하다.

따라서, 이를 위한 정교하고 체계적인 전략적 접근, 그러한 전략의 일환으로써 우리의 최상위 기술 역량 확보, 나아가 미래 기술 시장 선점·주도를 위한 국제협력 및 공조체계 구축이 필수적인 시점이다.

1) 체계적 접근을 위한 중장기적 '해양 탄소중립 과학기술 전략' 마련

탄소중립은 이미 전인류의 생존을 위한 전지구적인 목표로, 산업혁명 이전 대비 지구 평균온도의 상승을 1.5℃ 아래로 억제하기 위한 전지구적 목표, 즉 2050년까지 탄소중립을 달성해야 한다. 현재 정해진 목표시한 및 수준, 즉 2050년까지 탄소중립 달성 여부는 2030년 전후까지 시장에 상용화되어 이후 배출을 획기적으로 저감할 수 있는, 이른바 '혁신기술'의 개발 및 상용화 가능 여부, 그리고 이들 기술의 적용 가능성에 성패가 달려 있다 해도 과언이 아니다.

하지만, 현시점에서 '혁신기술'은 불확실성의 대상으로 분야별 기술의 발전 양상, 이에 따른 기여 효과 등에 대한 판단 역시 유동적일 수밖에 없다. 따라서, 이에 대한 예측 및 전망, 이에 따른 우리 기술전략의 방향 및 내용 역시 당분간은 이에 대응할 수 있는 유연한 구조로 마련되어야 한다. 또한, 이러한 전략적 접근은 정교한 설계에 의한 유연한 구조 위에, 기술적 대안의 발전 양상, 이러한 기술 분야별 국내 기술 수준의 위치 및 특성에 대한 면밀하고 정밀한 파악과 분석을 바탕으로 준비할 수 있다.

그럼에도, 현재 정교한 설계를 위한 기초 자료, 즉 선박 및 항만활동의 탄소중립 구현을 위한 기술 전반에 대한 최신 현황정보, 우리 기술의 수준 및 국내외 격차, 관련 현안 및 미래 수요 예측 등에 대한 파악을 위한 노력은 매우 미비한 상황이다. 이러한 기초자료의 미비는 효과적인 계획-이행-평가를 위한 전략적 접근의 가능성을 제한하고 있다.

또한, 최근 해운·항만 분야의 탄소중립 구현을 위한 에너지 및 기술대안에 대한 탐구 및 연구개발 등은 국내외 현안 대응 차원에서 민간 주도 또는 기술 분야별·부처별로 개별적으로 추진되고 있으나, 해당 기술 및 인프라 전반에 대한 종합 현황, 해운·항만의 탄소중립 유니버스 내 개별 기술 항목의 대체 가능성 또는 기술 간 연계에 따른 정(正)·부(負)의 효과 등에 대한

조사·연구는 미진한 실정이다. 그리고, 이는 다시 정책 및 시장의 불확실성을 증대하는 악순환을 초래하는 순환의 구조로 이어지고 있다.

이를 타개하기 위해서는, 우선적으로 해운·항만 분야의 2050 탄소중립 구현을 위한 기술 전반에 대한 현황 및 동향, 국내외 기술 여건(분야별 기술격차 및 현황분석 등) 및 이와 연계한 국내외 현안의 파악, 이와 관련한 기술의 수요에 대한 조사, 그리고 그 결과에 대한 즉각적인 시장 공유가 필요하다. 앞서 살펴본 바와 같이, 국가 중점과학기술(2년 주기) 또는 녹색기술(5년 주기) 등에 대한 기술조사와는 별개로, 해양수산부 또는 유관부처와 공동으로 '해운·항만 분야의 2050 탄소중립 구현을 위한 핵심기술'을 선정하고, 이들의 기술 수준, 이와 관련한 시장 분석 및 전망 등의 정보를 주기적으로 생산하고 이를 시장에 공유해야 한다. 또한, 빠르게 변화하는 연구개발 현장 및 기술시장의 환경을 반영할 수 있도록, 조사 및 결과 공개의 주기를 매우 짧게 '조사-분석-즉각적 시장 공유'의 체계를 구축·운용해야 한다.

또한, 이러한 해운·항만 분야의 2050 탄소중립 구현을 위한 핵심기술 수준 및 현안 평가자료를 바탕으로 우리의 기술 역량 강화 및 육성 등을 위한 전략 마련이 필요하다. 또한, 빠른 속도로 발생·진행되고 있는 기술·제도적 환경의 변화에 따른 기술·정책적 대안의 유효성 등을 1년 혹은 단기의 주기적으로 점검·평가하고 이를 반영하여, 2050 탄소중립 구현을 위한 이행경로 및 목표 등을 주기적으로 점검·보완하도록 해야 한다.[74]

이 과정에서, 해양 부문 탄소배출의 대부분을 차지하는 해운 및 항만 분야의 탄소중립 구현을 위한 전략적 접근, 즉 2050년까지 장기간의 이행 트랙에서 시행착오를 최소화하고 이행·관리의 효율성을 극대화하기 위해서는, 기술 및 정책적 대안의 적용에 의한 감축경로 및 시나리오 구성, 이에

74) 안용성 외(2022), p.105.

따른 목표 및 전략을 수립하는 한편, 특히 국내외 제도 및 기술환경의 변화를 즉각적으로 반영하여 수정·보완하기 위한 '이행점검·평가 및 즉각적 반영체계'를 구축할 필요가 있다.

2) 2030 이후 기술시장 주도를 위한 전략적 국제협력·공조 체계 구축

앞서 제시한 전략적 접근의 일환으로, 우리 기술 역량의 제고 및 이와 연계한 미래시장 주도 기회 창출을 위한 효과적 방안 중의 하나로 '국제협력'의 가능성을 생각해볼 수 있다. 연구개발에 있어 국제협력은 특정 기술분야의 역량 수준의 우위에 있는 상대방의 우수한 기술을 흡수하거나, 양자의 우위 측면을 서로 교차적으로 공유함으로써 시너지에 의한 획기적 발전 기회를 도모할 수 있는 동시에, 요구되는 자원의 공동 투입을 통해 성과의 불확실성에 대한 위험을 공동으로 부담할 수 있다.

하지만, 현실에서는 생각만큼 녹록하지 않다. 최근 미·중 기술패권 경쟁 구도가 형성되고 있음은 차치하더라도, 미래 탄소중립 관련 핵심기술의 시장의 폭발적 성장이 확실한 상황에서, 이러한 전략적 이슈는 단순히 기술역량 및 경쟁력 제고를 넘어서 이른바, 2030년 이후 '기술주권' 개념의 경제·안보 차원의 국가 생존의 문제로 진화하고 있다. 이러한 배경에서 기술선진국 간, 또는 경제안보 측면의 국가그룹 간 기술동맹의 형태가 출현하고 있으며. 우리 역시 이러한 '경제·기술 안보화' 패러다임에 기반한 과학협력 기술동맹 체제에 대한 논의를 본격화해야 할 시점이다.

우리의 제도에서는 최근 제정된 「탄소중립 기본법」, 국가 연구개발 예산의 중장기 투자전략인 「제1차 국가연구개발 중장기 투자전략(2023~2027)」 등에서 '과학기술의 국제협력의 전략성 강화', '국제공동연구 활성화' 등을 선언하고 있으나, 실제 이를 위한 구체적인 사업 및 내용, 재원 및 투자방향 등에 대한 본격 논의는 뒤따르지 못하고 있다.

앞서 평가결과에서도 확인한 바와 같이, 해운 및 항만 분야의 2030 혁신기술의 후보기술군에서는 아직 '선도기술'에 해당하는, 즉 최상위 또는 상위 기술 선도그룹에서 해당 기술의 발전·적용방향을 주도하는 기술 유형을 아직 등장하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 반면, 에너지 전환 등의 주요 분야에서 선도그룹에 근접하는 높은 기술역량 수준에서 '추격'하고 있는 것으로 나타났다.

하지만 미래 시장 선점을 위한 무한 경쟁이 이미 시작된 지금의 현실에서, 우리가 최상위권 기술 선도그룹의 기술역량을 흡수하고 싶다고 해서 그들이 '지구 공동의 선(善)'을 위해 이를 쉽게 허용할 리는 만무하다. 따라서, 우리의 강점과 약점, 이에 따른 연구개발의 수요와 효과적 진화 시나리오 등의 분석을 통해, 협력 및 공조 상대를 선별하고, 그들과 '주고 받을 수 있는' 거리와 이에 대한 상호 타당성에 대한 철저한 준비가 선행적으로 시급하게 요구되는 시점이라 할 수 있다.

〈표 4-1〉 전략적 국제협력·공조 체계 구축

구 분	기존 한계 및 문제점	도입·활용을 통한 개선방안
중장기적 '해양 탄소중립 과학기술 전략' 마련	• 2050 탄소중립 달성을 위한 '혁신기술' 및 활용에 대한 불확실성 증대되는 순환구조 고착화 – 불확실성 최소화, 정교한 대응방안 설계 위한 기초 근거자료 미비 – 종합적인 관점 결여; 특정 기술분야별, 부처/기관별 개별적 연구개발 추진 → 해운·항만 부문의 탄소중립 개별 기술 항목의 대체 가능성, 특정 기술 간 연계에 따른 정(正)·부(負)의 효과 등에 대한 조사·연구 미진	• 우리의 기술 역량 강화 및 육성, 미래 시장 주도를 위한 중장기 전략 마련 ① 2050년까지 장기간 이행·관리 위해, 기술 및 정책적 대안의 적용에 의한 감축경로 및 시나리오 구성 ② 이에 따른 목표 및 전략을 수립 ③ 국내외 제도 및 기술환경의 변화를 즉각적으로 반영하여 수정·보완하기 위한 '이행점검·평가 및 즉각적 반영체계' 구축 → 기술·정책의 불확실성에 기인하는 단기적인 정책 결정과정의 시행착오 최소화

구 분	기존 한계 및 문제점	도입·활용을 통한 개선방안
전략적 국제협력·공조 체계 구축	• 미래 탄소중립 관련 핵심기술 시장, 2030년 이후 '기술주권' 개념의 경제·안보 차원의 국가 생존의 문제로 진화, 경쟁 무한 심화 – 미래 시장환경 변화, 구조 재편 등에 대한 전략적 접근방안 구체화 미비 – 선도국가, 지역경제공동체 위주의 '기술동맹' 구성에서 소외	• 기술전략의 일환으로, 전략적 국제 협력·공조를 위한 정교한 국제 공조 체계 설계, 협력 환경 조성 – 선택과 집중 대상,상대 결정 위한 기초자료 확보,준비 철저 – 연구개발의 수요와 효과적 진화 시나리오 등의 개발,분석 → 협력 및 공조 상대,분야 선별 → 그들과 '주고 받을 수 있는' 상호 교환가치 및 타당성 검증 준비 철저

자료: 저자 작성

2. 한-유럽 탄소중립 공동 연구개발 플랫폼 구축

최근 국내외 관련 규제의 강화 추세에 따라서, 탄소중립 관련 규범의 이행을 위한 기술 및 정책적 방안은 물론 해운·항만 부문을 위시한 해양 탄소중립 구현을 위한 기초·응용 연구의 수요 역시 지속적으로 증가하고 있다. 하지만, 우리의 기술 수준은 아직 최상위 기술 선도그룹에는 미치지 못하고 있으며, 2050 탄소중립 이행 트랙에서 미래 혁신기술 시장의 주도그룹에 참여하기 위해서는 해당 시장이 재편될 것으로 예상되는 2030년 전후까지 짧은 시간 내에 기술 역량의 급격한 성장을 이루어 내야한다.

한편, 유럽연합(EU)은 이미 오랜 시간 동안 분야별 과학기술의 개발, 검증에 의한 고도화 등을 주도하고 있으며, 대기오염 및 온실가스 저감에 이어 탄소중립 메커니즘의 규명, 이를 바탕으로 하는 이행방안의 개발·검증·적용에도 가장 적극적이다. 최근 규제를 강화하고 있는 IMO의 조치와 별도로 역내 통항하는 국제해운 및 항만에 대해서도 강력한 기술·정책적 조치를 선도적으로 개발·시행하고 있으며, 본 연구에서도 국내외 전문가들은 선별된 기술유형 및 항목 중 대부분의 분야에서 유럽을 선도국가로 평가한 바 있다. 따라서, 이들 유력 선도그룹과의 공동연구를 통해, 현행 해양 탄

소중립 과학기술 현황은 물론, 국내기술의 격차 등에 따른 분석으로 매우 유효한 전략적 시사점의 도출을 기대할 수 있다.

또한 이 과정에서, 탄소중립 이행을 위한 국제사회의 진도와는 별개로, 선도적인 기술·정책을 개발·제공하고 있는 국내외 유력 선행연구 그룹과의 공조의 기회를 탐색하는 한편, 이러한 협력·공조체계를 공식화하거나 지속적인 공조, 나아가 미래시장을 공동 주도하기 위한 본격 연구개발 협력 플랫폼을 구축해야 한다.

이는 해양 탄소중립의 성패를 결정하는 해운·항만 분야의 탄소중립을 구현하기 위한 과학기술 및 정책적 대안의 효과 및 적용·확산 가능성, 시장의 수용 등에 대한 불확실성을 최소화하기 위한 전략적 방안 중 하나로, 최신 연구·개발 계획 및 성과, 경험 등을 공유하거나, 연계하여 공동의 성과물을 도출하기 위해, 우리원 주도의 ① 국내 산학연 중심의 국가 해운항만 탄소중립 연구협력 거점 플랫폼 구축에 이어, ② 해외 주요 선행 연구개발 그룹과의 공식적인 협력체계를 구축할 수 있다.

〈표 4-2〉 한-유럽 탄소중립 공동 연구개발 플랫폼 구축

구 분	기존 한계 및 문제점	도입·활용을 통한 개선방안
한-유럽 탄소중립 공동 연구개발 플랫폼 구축	• 해운·항만 부문 탄소중립 구현을 위한 기초·응용 연구의 수요 지속적으로 증가 추세 • 미래 혁신기술 시장 재편 시점(2030년 전후)까지, 우리 기술 역량의 획기적 발전-기술 선도 그룹 합류 위한 시간 촉박	• 탄소중립 기술개발-검증, 적용 주도하고 있는 유럽연합, 선도 기술그룹과의 협력거점 플랫폼 구축 - 국내외 유력 선행연구 그룹의 공조 가능성 탐색 - 협력·공조체계 정례화, 지속적인 체계 유지; 성과 확산 및 후속 공조 과제 창출 - 기술성숙도 낮은 기술의 협동연구 통해, 새로운 시장의 공동 창출; 연구개발의 자원투입, 실패 위험의 분산

자료: 저자 작성

제2절 정책·사업화 제안

1. 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업

1) 배경

앞서 살펴본 바와 같이, 2050 탄소중립 이행 트랙에서 2030년은 새로운 기술 패러다임 기반의 시장이 활성화되는 분기점으로 작용할 가능성이 높다. 채 10년이 남지 않은 현시점에서, 우리의 기술 수준은 전반적으로 아직 최상위권 선도기술에 도달하지 못한 상태로, 해운 및 항만 부문의 에너지 전환을 위한 전력/배터리, 수소, 메탄올 기술, 그리고 에너지 효율 개선을 위한 ICT 기반의 스마트 커넥티드 기술, 이를 활용하는 최적화 솔루션 정도가 상위권에 근접한 '경쟁력 있는 추격자' 정도로 평가되고 있다.

본연구에서 국제협력의 '공동기술' 유형으로 분석된 상기 기술 유형의 기술항목들에 획기적인 역량 향상, 나아가 새로운 기술시장을 주도할 수 있는 선도그룹에 참여할 수 있는 기회를 도모하기 위해서는, 짧은 시간 동안 최상위권과의 격차를 줄이거나 앞서 나갈 수 있는 전략적 접근, 즉 국제협력을 통한 효율적 성장을 시도할 수 있도록, 선택과 집중에 의한 공격적 투자와 지원이 요구된다.

2) 주요 내용

이를 위해서는 우선적으로, 확실한 제도적 근거에 따른 재원 마련, 이를 통한 체계적 재정 지원방안이 구체화되어야 한다. 2050 탄소중립 구현을 위한 중장기적 '해양 탄소중립 과학기술 전략'에 따른 '선도기술 연구개발 프로그램'의 추진을 위한 중장기 재원을 확보하고, 해당 전략의 일환으로

설정한 국제협력 전략에 따라서 ① 국제협력 대상국가/연구그룹 및 대상 기술 및 주제 선별을 위한 국내외 기술 수준평가 및 모니터링·분석, ② 선별된 대상 및 주제의 추진을 위한 우선순위의 설정, ③ 국제협력 전략 로드맵에 따른 시간표에 따라서 개별 연구개발 협력사업에 대한 재정적 지원을 수행할 수 있다.

또한, 이 과정에서 본 연구의 평가기준과 같이 ① 우리 기술 수준의 평가, ② 2030년 전후~2050년까지의 시장성, ③ 도입에 따른 탄소중립 기여효과, ④ 2030년 전후까지 요구 사항 충족 또는 상용화 가능성을 판단할 수 있는 기술적 난이도의 지표별 평가 및 분석결과에 따른 '선택과 집중'이 필요하다. 이 과정에서, 본 연구에서 제안한 국제협력 대상 기술 유형의 선별 체계, 즉 '① 선도기술, ② 공동기술, ③ 협동기술'의 구분, 그리고 자료별 평가결과 및 선별 기준을 적용하여 분석한 결과에 따른 우선순위 선정, 시급성 평가 등의 방법론이 매우 유용할 것으로 판단된다.

이를 통해, ① 상기의 모니터링 및 분석사업을 지속적으로 수행하고 이를 바탕으로 연구 대상 및 주제, 파트너 등을 구체화하거나, ② 해운/항만, 또는 화학·엔진 정도의 엔지니어링 및 ICT 및 최적화 솔루션 기술 등 고유의 영역에서 국내의 해당 기술 유형을 주도할 수 있는 기술 영역별 거점 연구기관 및 대학/민간 컨소시엄 형태의 '국제협력 추진 네트워크(안)'을 지정하여 구성할 수 있다. 이는 국내 거점을 기반으로 특정 주제별 '개방형 혁신' 또는 새로운 융복합 아이디어를 구성하는 한편, 이를 바탕으로 적합한 해외 유력기관과의 역할 분담에 따른 또다른 '개방형 혁신'을 도모하기 위한 정책적 기제라고 할 수 있다.

〈그림 4-1〉 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진 네트워크(예시)



해양수산부 독자 추진체계 (예시)



범부처 추진체계 (예시)

자료: 저자 작성

〈표 4-3〉 주요 추진과제: 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업(2024년~)

추진 사항	추진 주체
• 해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 전략방안 마련 ※「해양 탄소중립 과학기술 전략」에 국제 협력 추진 및 지원 조항 마련 – 국제협력 대상국가/연구그룹 및 대상 기술 및 주제 선별을 위한 국내외 기술 수준평가 및 모니터링·분석 – 선별된 대상 및 주제의 추진을 위한 우선순위 식별 – 국제협력 전략 로드맵에 따른 시간표에 따라서, 개별 연구개발 협력사업 추진, 재정적 지원	해양수산부 국제협력총괄과, 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등

추진 사항	추진 주체
• 해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 파트너, 대상 기술,주제 선별, 우선순위 식별 – 평가지표①: 우리 기술 수준의 평가 – 평가지표②: 2030년 전후~2050년까지의 시장성 – 평가지표③: 도입에 따른 탄소중립 기여효과 – 평가지표④: 2030년 전후까지 요구 사항 충족 또는 상용화 가능성을 판단할 수 있는 기술적 난이도 – 국제협력 대상 기술 유형의 선별 체계 적용: ① 선도기술, ② 공동기술, ③ 협동기술	해양수산부 국제협력총괄과, 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등
• 해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 지원을 위한 재정 확보방안 마련 ※「해양 탄소중립 과학기술 전략」에 해운·항만 탄소중립 핵심기술 개발·지원을 위한 '해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램' 및 재정 확보방안 마련 → 제도적 근거에 따른 '해운·항만 탄소중립 핵심기술 국제협력 지원' 목적의 재원 개발, 체계적 재정 지원,활용방안 구체화	해양수산부 국제협력총괄과, 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등
• 기술 영역별 거점 연구기관 및 대학/민간 컨소시엄 형태의 '국제협력 추진 네트워크(안)' 구성, 지정	해양수산부 독자 추진체계 (1안) – 해양수산부 해양환경정책과 등 범부처 추진체계 (2안) – 해양수산부 해양환경정책과/해양수산과학기술진흥원 – 산업자원통상부/한국산업기술진흥원 등 – 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 등

자료: 저자 작성

2. 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램

1) 배경

현시점은 해운·항만의 '저탄소' 전환 단계를 마치고, '무탄소' 또는 '배출제로' 패러다임으로 진화를 시작하는 한편, 2050 탄소중립 이행 트랙에서 기술 패러다임의 분기점인 2030년을 목전에 두고 있는 매우 도전적인 시기라고 할 수 있다. 다시 말해서, 2030년 전후에 상용화될 수 있는 혁신기술에 대한 역량 수준의 강화, 이들의 시장 양상을 주도하기 위한 전략적 접근을 준비하고, 이에 따른 체계적 노력·자원이 가능한 빨리 투입되어야 하는 국제 경쟁의 새로운 출발점이라 할 수 있다.

2) 주요 내용

이를 위한 실체적 추진방안으로, 2050 탄소중립 구현을 위한 중장기적 '해양 탄소중립 과학기술 전략'을 마련하고, 이에 따른 '해양 탄소중립 선도기술 연구개발 프로그램'의 구성, 출범을 고려해야 한다. 이는, 기존의 배출저감 위주의 기술 패러다임보다는, 2030년 전후 시장 상용화를 목표로 하는 새로운 기술 개념 및 이를 활용하는 새로운 탄소중립 이행 패러다임의 도래를 전제하고, 선제적으로 준비하는 연구개발 기반 작업이라고 할 수 있다.

앞서 제안한 기술전략에 따라서 '선택과 집중'을 위한 우선적 연구개발 대상 기술유형 및 항목, 주제를 선별하고, 선별된 미래 기술의 신속 개발 및 도입을 총괄적으로 지원하기 위한 프로그램으로, 해양수산부 또는 유관 부처와의 범부처 산하에 심사위원회를 구성하여 심사절차 및 기준을 정하고, 이에 따라서 지원 대상 및 규모, 기간 등을 결정하는 '별도의 R&D 트랙'을 전개할 수 있다.

특히, 항만의 경우 항만 활동 고유의 특수성 또는 개별 항만의 수요에 대응하여 새로운 패러다임의 혁신적인 기술을 연구개발하거나 시범적으로 적용하기보다는, 이미 타 분야에서 운용·검증된 기술 및 제품을 항만 현장에 적합하게 개조하거나, 해외 주요 항만에서 기 도입된 기술을 재도입하는 데에 그치고 있어, 이러한 항만 차원의 별도의 선도기술 개발 지원 프로그램의 도입이 더욱 절실하다.

〈표 4-4〉 주요 추진과제: 해양 탄소중립 과학기술 분야 선도 연구개발 프로그램(2024년~)

추진 사항	추진 주체
• '해운·항만 탄소중립 구현을 위한 선도기술 연구개발 프로그램' 개발·도입 + 해운· 항만 탄소중립 구현 위한 우선적 연구개발 대상 기술 유형 및 항목, 주제 선별 + 선별된 미래 기술의 신속 개발 및 도입 총괄 지원 → 동전략의 '해양 탄소중립 과학기술 국제협력 지원 사업'에 연계, 일원화	해양수산부 해양수산과학기술정책과, 해양환경정책과 등

자료: 저자 작성

05
결론

제1절 주요 연구결과 요약

본 연구는 ① ‘2050 해양 탄소중립’ 구현을 위한 과학기술 및 제도환경의 변화에 따른 불확실성, 이를 최소화하기 위한 전략적 방안으로서의 국제협력의 필요성, 이에 대한 현행 정책 및 제도의 한계를 규명하는 한편, ② 해양 부문 탄소배출의 대부분을 차지하는 해운 및 항만 분야의 탄소중립 과학기술 전반에 대한 현황, 국내외 기술 여건(분야별 기술격차 및 현황분석 등) 및 ③ 이와 연계한 국내외 현안 파악, 수요조사 등을 통해 보다 실효적인 국제협력 방안을 제시하고자 하였다.

이를 위해, 우선 탄소중립 구현의 주요 도구인 과학기술 전략, 미래 기술의 연구개발을 위한 국내외 주요 규범, 이들을 관통하는 주요 개념 및 원리를 조사·검토하고, 최근 유럽을 중심으로 활발하게 추진되고 있는 선도적인 친환경 과학기술 연구개발의 국제협력 사례를 조사 및 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 현행 해양 탄소중립 과학기술 정책 패러다임의 한계를 도출하였다.

이어서, 해양 탄소중립 과학기술 국제협력 추진을 위한 국내외 여건을 분석하였다. 우선, 분석을 위한 프레임을 해운 및 항만 부문 각각의 기술유형에 따른 분류체계로 구성하기 위해, 관련 분류체계(Taxonomy)의 사례 분석결과를 바탕으로 두 부문의 여건 분석을 위한 기술유형 및 항목을 도출하고 이를 계층화하였다. 이를 활용하여 우리 해양 탄소중립 구현을 위한 '혁신기술' 대안을 선별하고, 이들의 국제협력 및 연구개발의 대상을 식별하기 위한 평가지표(① 우리 기술 수준의 평가, ② 2030년 전후~2050년까지의 시장성, ③ 도입에 따른 탄소중립 기여효과, ④ 2030년 전후까지 요구 사항 충족 또는 상용화 가능성을 판단할 수 있는 기술적 난이도)에 대한 평가결과의 다면적 분석을 시도하였다.

우선, 해운 부문에서는 '에너지 효율 개선' 유형의 기술 수준이 높게 평가된 반면, 여타 '에너지 전환' 및 '전·후 처리' 모두, 특히 전자의 기술 수준에서 상대적으로 큰 격차를 확인하였다. '에너지 전환' 유형의 기술 수준이 최상위 기술 선도그룹의 수준과 작지 않은 격차가 있음에도 2030년 이후 도입효과 및 동기간 시장성이 매우 높게 나타나고 있어, 상위권 기술 수준에 근접하기 위한 전방위적 지원과 투자가 필요한 것으로 나타났다. 또한, 해당 유형의 기술적 난이도가 상대적으로 높게 나타나 최상위권 그룹과의 국제협력이 매우 시급한 것으로 나타났다. 반면, '전·후 처리' 유형의 경우, 타 유형에 비해 2030년 이후 시장수요, 도입에 따른 기여정도가 낮게 나타나, 국제협력 등 별도의 전략적 조치 투입의 당위성이 가장 낮은 것으로 평가되었다.

항만 부문의 탄소중립 기술유형은 전반적으로 2030년 이후 탄소중립 이행 트랙에서 실제적으로 상당한 도입효과가 기대되며, 같은 맥락에서 같은 기간 기술 시장의 수요 역시 큰 폭으로 확대될 것으로 전망된다. 이 과정에서, '에너지 전환' 및 '에너지 효율 개선' 유형이 2030년 전·후 항만 탄소중립 기술시장을 주도하는 한편, 같은 기간 '순배출제로'를 달성하기 위해 필

수적인 이산화탄소의 포집·저장 과정에서 항만이 (임시)저장 및 이송은 물론 자체 배출의 포집에서 중요한 역할을 담당할 것으로 평가되었다. 추가적으로 2030년 전·후 시장에 상용화되기 위해 해결되어야 할 기술적 난이도가 상대적으로 매우 크게 나타난 '에너지 전환' 유형의 경우, 항만활동의 특성에 기인하는 고유의 기술 수요를 반영하는 '에너지 전환' 기술의 연구개발을 통해, 새로운 시장 창출 및 주도가 가능할 것으로 전망되었다.

지표별 평가결과를 바탕으로 평가수준 급간체계를 적용하여 종합적으로 분석한 결과에 따르면, 현재 해운·항만 부문을 통틀어 국내 기술 중 이미 기술 수준이 최상위권에 진입한 '선도기술'에 해당하는 기술항목은 아직 등장하지 않은 것으로 나타났다.

해운 부문에서는, '에너지 소비' 유형의 전력/배터리, 수소, 메탄올 전환·활용과 관련한 기술항목은 선도국가의 기술 수준에 근접하고 있으며 2030년 전·후 시장 규모, 도입에 따른 탄소중립 기여도가 큰 기술 유형으로 국제협력 대상 중 '공동기술'에, 아직 기술 수준이 높지 않으나 추후 시장성 및 도입효과가 클 것으로 전망되는 암모니아 및 바이오 연료 기술 항목은 '협동기술'로 분류하였다. 에너지 효율 개선을 위한 '기술적·운영적 방안' 유형의 주요 기술항목은 대체적으로 최상위 선도그룹과의 기술 격차는 존재하지만 최상위 수준에 접근 가능한 '최상위 근접' 수준으로, 시장성 및 도입효과가 클 것으로 전망되고 있어, 우리 주도의 공동 연구개발을 추진할 수 있는 '공동기술' 영역으로 분류하였다.

항만 부문에서는 '에너지 연계 및 소비' 기술 유형과 '물류 효율 개선' 기술 유형의 2030년 전·후 시장 수요 및 도입에 따른 기대 효과가 매우 크게 나타났다. 이들 기술은 유력 선도 기술그룹과의 국제협력을 통해 가까운 미래에 선도그룹에 진입할 수 있을 것으로 판단되는 '공동기술'로 분류하였다. 반면, 항만 내 수소 저장 및 활용 등을 위한 기술, 그리고 '탄소

포집 및 저장(CCS)' 기술 유형은 현재 우리의 기술 수준은 선도그룹과 일정한 격차가 확인되었다. 하지만, 선도그룹 역시 지금부터 해결해야할 기술적 난이도가 매우 높고 추후 도입에 따른 기대효과가 매우 크게 나타나, 해당 분야 기술역량을 상대적으로 단기간 내에 육성하기 위한 '협동기술' 유형으로 분류하였다.

제2절 정책 제언

1. 혁신기술 시장 주도를 위한 전략적 접근

앞서 살펴본 바와 같이, '국제협력'은 현시점 우리에게 있어 기술적·정책적 불확실성을 최소화하는 동시에, 혁신기술의 결정 과정에 주도적으로 참여하거나 이로 인해 촉발되는 시장에서 선도적인 위치를 점하기 위한 매우 유효한 전략적 접근방안이라고 할 수 있다.

우선, 우리의 강점 및 최상위권 기술 습득을 위한 정교한 전략을 통해, 선별된 기술 선진국 또는 개도국과 기초 연구단계에서부터 다자 간 플랫폼을 개발·운용하거나 이를 통한 공동연구를 지원하는 등 우리 주도의 다자 협력·지원 생태계를 구축해야 한다. 또한, 이를 바탕으로 장기·호혜적 협력의 기반, 나아가 공동의 기술 수요 창출, 상호 표준화 등을 주도함으로써 기술 시장을 선점하는 동시에 안정적인 시장을 확보할 수 있다. 이를 위해 전략적 협력국가 및 분야, 상호 교차 수요의 창출 및 공통의 적용방안 등을 구체적으로 준비할 필요가 있다.

이와 더불어 위와 같은 기술동맹 관계에 기반한 다자간 플랫폼을 토대로, 플랫폼 내 국가와 탄소중립 과학기술 개발 및 상용화 등을 위한 글로벌 가치사슬 구축을 위한 프로그램 등을 개발할 수 있다. 이러한 전략적 국제협력, 이를 바탕으로 하는 다자 간 기술 협력체계, 시장 형성 등을 주도함으로써, 유력 기술의 개발·활용 역량을 강화하는 동시에, 특정 분야에 대한 핵심기술의 선정 또는 표준화 과정을 주도함으로써, 새로운 시장에서 주도권을 확보할 수 있다.

2. 연구개발 국제협력 주도·지원을 위한 재원 마련

탄소중립 이행을 위해 유력한 핵심기술을 중심으로 사상 최대의 시장 재편, 수요의 급격한 증가가 전망되는 가운데, 현재 상위권 기술에 근접하고 있는 '추격자' 위치의 우리의 입장에서 향후 글로벌 기술 주도권을 확보하거나 새로운 시장을 선점하기 위해서는, 해운·항만 부문의 탄소중립 신규·유망기술 분야에 대한 다각적 지원 확대를 통해 우리의 기술 역량을 획기적으로 제고함은 물론, 선도국 및 유력 연구기관과의 기술동맹 관계 구축이 필수적이다. 하지만, 이를 위해서는 무엇보다 국제협력 R&D에 대한 투자 규모의 확대가 선행적으로 이루어져야 한다.

국제공동연구, 인력 교류, 글로벌 다자협력 프로젝트 참여 촉진 등의 다양한 지원 목적별 투자, 선별된 핵심기술 및 틈새·연계기술의 선택과 집중, 조기 실증, 상용화 및 시장 수요 연계 등 연구단계별 실효적 투자 방안을 모색할 필요가 있다. 또한, 이를 위해 해양수산부 또는 기술 수요에 따른 범부처 통합 개념의 구체적인 시행전략이나 투자 방향에 대한 논의가 필요한 시점이다.

이와 함께 R&D 프로젝트 기획 및 발굴 프로세스를 체계화하여 연구개발 단계별 전주기 국제 공동연구 형태의 중대형 플래그쉽 사업, 글로벌 기후변화 현안 대응을 위한 임무중심적 R&D사업 등을 추진할 수 있다.

제3절 연구의 한계 및 향후과제

본 연구는 '2050년까지 탄소중립의 달성'이라는 목표가 정해졌음에도 이를 구현하기 위한 뚜렷한 대안이 아직 마련되지 못하고 있는 현재의 상황에서 '불확실성'이라는 근원적 문제를 설정하였다. 또한, 제도적 환경과 현시점 기준 과학기술의 유효성과의 괴리에서 기인하는 기술 및 시장의 '불확실성'을 규명하는 한편, "현재의 기준에서 이러한 불확실성을 최소화하고, 나아가 2030년 이후 새롭게 재편될 미래 기술시장에서 우리가 경쟁력을 가지기 위해서는 무엇을 어떻게 준비해야 하는가?"라는 질문에 대한 답으로, '획기적 기술역량 발전 기제'로서의 '국제협력'에 의한 ① 선별된 기술 분야에 대한 우리 기술역량의 제고, ② 교차 수요의 상호 호혜적 협력관계 및 공동의 시장 창출·확대 등을 위한 체계적 접근 방안을 제시하였다.

이 과정에서, 해운 및 항만 부문 전체를 종합적으로 조망·분석할 수 있는 일관성 있는 유형 분류체계 및 분석모형을 제시한 데 이어, 연구개발 및 국제협력의 대상 기술 및 주제, 협력 파트너 등을 선별하고, 이들에 대한 우선 순위를 판별하기 위해 적용할 수 있는 유용한 평가지표 및 도구를 제시하였다. 또한, 이를 활용하여 우리의 기술 수준을 평가하고, 선별된 기술 유형 및 항목에 대한 분석결과, 즉 기술 전략 및 국제협력 정책 수립의 근거로 활용할 수 있는 기초자료의 전형을 처음으로 제시하였다는 데에서 의의가 크다고 할 수 있다.

본 연구는 해당 기술 분야를 선도하고 있는 유럽연합과의 공조의 가능성을 탐구하기 위해, 유럽측 연구자들과 전문가를 대상으로 설문-분석을 수행하였으나, 이를 바탕으로 미국, 이어서 아시아 유력 국가 등으로 대상을 확대한다면, 여실히 우리 기술역량의 획기적 성장, 주도권의 확대 등을 도모하기 위한 국제협력의 모형을 보다 구체화할 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

국내 문헌

기상청 기후변화감시과 (2020), 「지구온난화 1.5℃ 특별보고서」 해설서, 기상청.

김소은·윤서희·성경모(2022), 한국-EU 과학기술 국제협력 강화방안 연구, 기술혁신학회지, 25(4), pp. 589-607.

서인석·이유현(2021), 해양 과학기술분야 탄소중립 정책에 대한 OECD 국가유형의 지속과 변화, 한국정책학회보, 30(4), pp. 347-376.

신현아 외(2023), 탄소중립 과학기술 국제협력 R&D 현황: 감축부문 국가연구개발사업을 중심으로, 녹색기술센터.

안용성 외 (2022), 항만의 탄소중립 이행·관리 표준안 연구, 한국해양수산개발원.

오상진 외(2020.12.), 2020 기후기술 수준조사, 녹색기술센터, 재인용: 신현아 외(2023), 탄소중립 과학기술 국제협력 R&D 현황: 감축부문 국가연구개발사업을 중심으로, 녹색기술센터.

오상진 외(2020.12.), 기후기술 수준조사 및 중점 육성분야 발굴 연구, 녹색기술센터.

윤종민(2014), 과학기술기본법의 체계성 및 정합성 제고를 위한 개정방안, 기술혁신학회지, 17(1), p. 105.

이창훈 외(2021), 탄소중립 시나리오 작성 및 이행점검체계 구축을 위한 기획연구, 한국환경정책평가연구원.

이철주·이정우(2022), 국제공동연구 우선 지원 분야 선정 방법론: 산업기술수준조사와 주성분 분석 활용을 중심으로, 한국혁신학회지, 17(4), pp. 25-47.

장연재·공지영(2022), 국제 신재생에너지 정책변화 및 시장분석, 에너지경제연구원.

장진영 외(2015), 1리터급 엔진을 이용한 암모니아-가솔린 혼소 성능 특성, 한국가스학회지, 19(6).

국외 문헌

Arief, I. S., & Fathalah, A. Z. M.(2022), Review of alternative energy resource for the future ship power, In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 972(1).

Basile, A. et al.(2011), Membrane technology for carbon dioxide (CO2) capture in power plants. In Advanced membrane Science and Technology for sustaina ble energy and environmental applications, Woodhead Publishing, pp. 113 -159.

Baştürk, Selim & Sercan Erol(2023), Optimizing ship speed depending on cargo and wind-sea conditions for sustainable blue growth and climate change mitiga tion, Journal of Marine Science and Technology, pp. 1-16.

Connolly, D.(2017), Economic viability of electric roads compared to oil and batteri es for all forms of road transport, Energy strategy reviews, 18, pp. 235-249.

Cui, X., et al.(2023), A New Five-Port Energy Router Structure and Common Bus Voltage Stabilization Control Strategy, Sustainability, 15(4), p. 2958.

Delft, C. E., & Fraunhofer, I. S. I.(2016), Study on the analysis of market potentials and market barriers for wind propulsion technologies for ships.

Erşan, S., & Park, J. O.(2020), Light-Independent biological conversion of CO2, Joul e, 4(10), pp. 2047-2051.

European Commission(2021), European Green Deal: Commission proposes transf ormation of EU economy and society to meet climate ambitions, Press Rele ase, 14.

European Commission(2022), REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition, Off. J. Eur. Union.

Fahdi, S., M. ELKHECHAFI, & H. HACHIMI(2019), Green port in blue ocean: optimiz ation of energy in Asian ports, 2019 5th International Conference on Optimi zation and Applications (ICOA), IEEE.

Feng, X. et al.(2022.7.), On maritime electrification–electrification technologies, charging infrastructure and energy management strategies, In Journal of Physics: Conference Series, 2311(1), p. 012034.

Gielen, Dolf, et al.(2019), Global energy transformation: a roadmap to 2050.

Gl, D. N. V., SAFER, S., & DNV, G.(2019), Maritime forecast to 2050, Energy transitio n outlook.

IMO(2020), Fourth IMO Greenhouse Gas Study., IMO.

Kermani et al.(2022), A comprehensive technoeconomic solution for demand contr ol in ports: Energy storage systems integration, IEEE Transactions on Industr y Applications, 58(2), pp. 1592-1601.

Lhuillier et al.(2020), Experimental Study on Ammonia/Hydrogen/Air Combustion in Spark Ignition Engine Conditions, Fuel, 269(117448).

Li, X., & Palazzolo, A.(2022), A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities, Journal of Energy Storage, 46, 103576.

Madhavan, R., & Messina, E. R.(2006), Intelligent vehicle systems: a 4D/RCS approa ch, Nova Publishers, pp. 324-325.

Mareev, I., Becker, J., & Sauer, D. U.(2017), Battery dimensioning and life cycle costs analysis for a heavy-duty truck considering the requirements of long-haul transportation, Energies, 11(1).

Mostafa Kermani et al.(2022.1.25.), A Comprehensive Technoeconomic Solution for Demand Control in Ports: Energy Storage Systems Integration, IEEE Tran sactions on Industry Applications, 58(2), pp. 1592-1601.

MRE, Marine Renewable Energy Aquarius(2020), Aquarius MRE: zero emissions pro pulsion and power for ships, Naval Architect, 28.

Nicorelli, G., Villa, D., & Gaggero, S.(2023), Pre-Swirl Ducts, Pre-Swirl Fins and Wak e-Equalizing Ducts for the DTC Hull: Design and Scale Effects, Journal of Marine Science and Engineering, 11(5), p. 1032.

Omid et al.(2023), Numerical performance analysis of solid oxide fuel cell stacks with internal ammonia cracking, International Journal of Hydrogen Energy.

Orestis Schinas(2020.02.), Reduction of GHG Emissions from Ships: Wind Propulsio n, MEPC 79/INF.21, International Maritime Organization.

Romo, L. et al.(2009), Fuel Saving Flywheel Technology For Rubber Tired Gantry Cranes in World Ports-Reducing Fuel Consumption Trough Use of Flywheel Energy Storage System/Vycon Energy.

Smith, S. C., & Sen, P. K.(2008.9.), Ultrapacitors and energy storage: Applications in electrical power system, 2008 40th North American Power Symposium, IEEE, pp. 1-6.

Tabakoli et al.(2022), Carbon capture onboard – a feasibility study, G-NAOE2022, Global conference on naval architecture and ocean engineering.

Ushakov et al.(2019), Methane slip from gas fuelled ships: a comprehensive summar y based on measurement data, Journal of Marine Science and Technology, 24(4), pp. 1308-1325.

Wang, H., et al.(2018), Application of solar panel array on a short route ferry: a life cycle and economic assessment. in Coastal, Offshore & Ocean Engineering Conference 2018.

Wang, K. et al.(2021), Multi-aspect applications and development challenges of digi tal twin-driven management in global smart ports. Case Studies on Transpor t Policy, 9(3), pp. 1298-1312.

WEERNINK, Marissa Oude, et al.(2017), The Blockchain Potential for Port Logistics, White Paper-Blockchain.

Yang et al.(2020), Ship speed optimization considering ocean currents to enhance environmental sustainability in maritime shipping, Sustainability, 12(9), 36 49.

Yang, Y.-C. & W.-M. Chang(2013), Impacts of electric rubber-tired gantries on gree n port performance, Research in Transportation Business & Management, pp. 67-76.

인터넷 자료

ABS(2017), Advisory on Hybrid Electric Power Systems, https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_Hybrid_Advisory_17033.pdf(검색일: 2023.7.27.)

Aegir, Aegir project: Ammonia electric marine power for GHG emission reduction, https://www.aegir-project.net(검색일: 2023.8.3.)

American Bureau of Shipping(2019.4.), Air Lubrication Technology, https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/Air%20Lubrication%20Technology.pdf(검색일: 2023.8.15.)

Analytics Market Research(2022.9.1.), Global Marine Solar Panels Market, https://analyticsmarketresearch.com/reports/marine-solar-panels-market/9368(검색일: 2023.7.29.)

Balaji, C.P. & K. Sivasami(2022), Air Lubrication: A Hull-slide View. MARINE ENGINEERS REVIEW (INDIA), https://imare.in/wp-content/uploads/2022/09/MER-Feb-2022-Issue.pdf(검색일: 2023.8.15.)

Balkan Green Energy News(2021.7.1.), Overhead truck power line starts three-year trial in Germany, https://balkangreenenergynews.com/overhead-truck-power-line-starts-three-year-trial-in-germany/(검색일: 2023.8.17.)

Business Wire(2016.5.26.), Pasha, Port of Los Angeles and California Air Resources Board Partner on Green Omni Terminal Demonstration Project, https://www.businesswire.com/news/home/20160526005281/en/Pasha-Port-of-Los-Angeles-and-California-Air-Resources-Board-Partner-on-Green-Omni-Terminal-Demonstration-Project(검색일: 2023.10.17.)

Carbon Recycling International, https://www.carbonrecycling.is/projects(검색일: 2023.8.3.)

Cilio Automation Factory(2022.1.27.), The Role Of AI In Smart Port Management, https://www.automationfactory.ai/the-role-of-ai-in-smart-port-management/(검색일: 2023.5.10.)

Clean Hydrogen Partnership(2023.3.30.), Press release: Study on hydrogen in ports

and industrial coastal areas, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/news/press-release-study-hydrogen-ports-and-industrial-coastal-areas-2023-03-30_en(검색일: 2023.8.17.)

Clean Hydrogen Partnership(2023.9.30.), Study on hydrogen in ports and industrial coastal areas – Reports, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/media/publications/study-hydrogen-ports-and-industrial-coastal-areas-reports_en(검색일: 2023.10.19.)

Conductix-Wamfler, RTG Electrification, https://www.conductix.com/sites/default/files/downloads/KAT0000-0004-E_E-RTG_RTG_Electrification.pdf(검색일: 2023.8.17.)

createdigital(2019.12.13.), Behind the scenes at Australia's first fully automated international shipping container terminal, https://createdigital.org.au/behind-australias-first-fully-automated-international-shipping-container-terminal/(검색일: 2023.8.23.)

Daphane Technology, Solving the methane challenge in tough-to-decarbonise industries, https://daphnetechnology.com/solutions/slippure(검색일: 2023.10.17.)

DNV(2019), Wind assisted propulsion systems, https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/waps-wind-assisted-propulsion-systems/index.html(검색일: 2023.9.23.)

DNV(2019.6.), Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies in Shipping, https://www.dnv.com/maritime/publications/alternative-fuel-assessment-download.html(검색일: 2023.9.23.)

DNV(2020), Ports: green gateways to Europe, https://www.dnv.com/Publications/ports-green-gateways-to-europe-179372(검색일: 2023.8.17.)

DNV(2021), More than the sun: The solar outlook, https://www.dnv.com/power-renewables/publications/solar-report-series.html(검색일: 2023.7.14.)

DNV(2023), Alternative Fuel Insight, https://afi.dnv.com/statistics/(검색일: 2023.10.27.)

DNV(2023), Maritime Forecast to 2025, https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-2023/index.html(검색일: 2023.10.29.)

Energy Efficiency&Renewable Energy(2022.8.16.), Offshore wind market report: 2022 edition, https://www.energy.gov/eere/wind/articles/offshore-wind-market-report-2022-edition(검색일: 2023.10.17.)

ESCAP(2021.2.), Smart Ports Development Polices in Asia and the Pacific, https://www.unescap.org/sites/default/d8files/event-documents/SmartPortDevelopment_Feb2021.pdf(검색일: 2023.9.3.)

Europe Sustainable Shipping Forum, Sustainable Alternative Power for Shipping Database, https://sustainablepower.application.marin.nl(검색일: 2023.8.3.)

European Commission, Fit for 55 package, https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/(검색일: 2023.8.19.)

European Commission(2020.05.), Taxonomy: Final report of the Technical Expert Group on Sustainable Finance, https://finance.ec.europa.eu/system/files/2020-03/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy_en.pdf(검색일: 2023.8.7.)

European Commission(2020.10.27.), Strategic Plan 2020-2024; Research and Innovation, https://commission.europa.eu/document/download/5ac1ff20-d41e-4c10-9a05-048b7339292e_en?filename=rtd_sp_2020_2024_en.pdf(검색일: 2023.5.7.)

European Commission(2021.4.29.), 2021-2027 long-term EU budget & NextGenerationEU, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/long-term-eu-budget/2021-2027_en(검색일: 2023.7.11.)

European Commission(2023.3.22.), Net-Zero Industry Act: Making the EU the home of clean technologies manufacturing and green jobs, https://ec.europa.eu/social/main.jsp?langId=en&catId=1587&furtherNews=yes&newsId=10534, (검색일: 2023.6.3.)

European Commission(2023.5.22.), Horizon Europe: The EU and the Republic of Korea launch formal negotiations on association to the programme, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/horizon-europe-eu-and-republic-korea-launch-formal-negotiations-association-programme-2023-05-22_en(검색일: 2023.8.10.)

European Commission, CORDIS Datalab, https://cordis.europa.eu/datalab/datalab.php(검색일: 2023.7.9.)

European Commission, Funding & tender opportunities, https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/home(검색일: 2023.7.10.)

European Commission, Horizon Europe funding programmes and open calls, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/(검색일: 2023.07.13.)

European Commission, PORTable Innovation Open Network for Efficiency and Emissions Reduction Solutions, https://cordis.europa.eu/project/id/101037564(검색일: 2023.7.10.)

European Commission, Reducing emissions from the shipping sector, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en(검색일: 2023.5.7.)

European Commission, Research and Innovation funding – Horizon Europe, https://research-and-innovation.ec.europa.eu/index_en.(검색일: 2023.4.7.)

Flagships, https://flagships.eu/(검색일: 2023.8.27.)

Fortune Business Insights(2023), Connected ship Market Size… , https://www.fortunebusinessinsights.com/connected-ships-market-105824(검색일: 2023.11.02.)

Fuelcard Services(2023.6.16.), Electric roads – charging your car while driving, https://www.fuelcardservices.com/electric-roads/(검색일: 2023.8.17.)

Global energy(2023), Solar sails: zero emission cruise ship, https://globalenergyprize.org/en/2023/06/21/solar-sails-zero-emission-cruise-ship/(검색일: 2023.7.27.)

Global Wind Energy Council(2016), Supply chain, port infrastructure and logistics study, https://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/Fowind-study-report_29-06-2016_pages_JWG-update_v2.pdf(검색일: 2023.10.17.)

Gov UK(2023.7.5.), Use of maritime shore power in the UK: summary of call for evidence responses, https://www.gov.uk/government/calls-for-evidence/use-of-maritime-shore-power-in-the-uk-call-for-evidence/outcome/use-of-maritime-shore-power-in-the-uk-summary-of-call-for-evidence-re

sponses(검색일: 2023.10.17.)

Green C Ports, Case studies, https://greencportsproject.eu/case-studies/(검색일: 2023.4.19.)

Green C Ports, Overview, https://greencportsproject.eu/overview/(검색일: 2023.4.25.)

Hamburg Port Authority, SMART - PORT – THE IN - TEL - LI - GEN - T PORT, https://www.hamburg-port-authority.de/de/hpa-360/smartport(검색일: 2023.7.10.)

HM Government(2019.7.11.), Clean maritime plan: Maritime 2050 environment route map, https://www.gov.uk/government/publications/clean-maritime-plan-maritime-2050-environment-route-map(검색일: 2023.6.13.)

HM Government(2020.11.18.), The ten point plan for a green industrial revolution, https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution(검색일: 2023.6.13.)

Horton, Gareth, et al.(2022.1.31.), Technological, operational and energy pathways for maritime transport to reduce emissions towards 2050, https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Technological-Operational-and-Energy-Pathways-for-Maritime-Transport-to-Reduce-Emissions-Towards-2050.pdf(검색일: 2023.8.31.)

HySeas III, https://www.hyseas3.eu/(검색일: 2023.8.27.)

ICCT(2023.2.), Working paper 2023-05, https://theicct.org/publication/marine-ports-electrification-feb23/(검색일: 2023.8.17.)

IEA(2020.9.), Energy Technology Perspectives 2020, https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020(검색일: 2023.7.29.)

IEA(2021.5.), Net Zero by 2050. A Roadmap for the Global Energy Sector, https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050(검색일: 2023.7.3.)

IMO(2020), IMO Action to Reduce Greenhouse Gas Emissions from International Shipping. https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/26620IMO_ACTION_TO_REDUCE_GHG_EMISSIONS_FROM_INTERNATIONAL_SHIPPING.pdf(검색일: 2023.4.17.)

IMO, Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020, https://www.imo.org/en/ourwork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx(검색일: 2023.6.8.)

IMO, Initial IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships, https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO%20submission_Talanoa%20Dialogue_April%202018.pdf(검색일: 2023.5.13.)

IMO, Partnerships and Projects, https://www.imo.org/en/OurWork/PartnershipsProjects(검색일: 2023.7.13.)

International Renewable Energy Agency(2013.1), Technology Briefs, https://www.irena.org/publications/2013/Jan/IRENA-IEA-ETSAP-Technology-Briefs(검색일: 2023.8.3.)

IRENA(2019.10.), Future of wind,https://www.irena.org/publications/2019/Oct/Future-of-wind(검색일: 2023.9.17.)

IRENA(2019.11.), Future of Solar Photovoltaic, https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic(검색일: 2023.10.17.)

itnews(2015.5.26.), Brisbane Port buys two new robot cranes, https://www.itnews.com.au/news/brisbane-port-buys-two-new-robot-cranes-404439(검색일: 2023.8.23.)

Kawasaki(2022), Energy-saving Technology, https://global.kawasaki.com/en/mobility/marine/technology/energy_saving.html(검색일: 2023.9.25.)

KBS뉴스(2019.4.14.), 현대중공업그룹 "2주 동안 선박 5척 잇달아 수주", https://news.kbs.co.kr/news/pc/view/view.do?ncd=417973(검색일: 2023.9.23.)

KEMPOWER(2023.7.17.), Charging Forward in Maritime Transport: Electrifying Ports, Ships, and Boats, https://kempower.com/kempower-electrifies-ports-ships-and-boats-with-plug-and-evoy/(검색일: 2023.10.17.)

KONECRANES, Ecolifting Retrofits: RTG Cable Reel, https://www.konecranes.com/sites/default/files/2021-06/RTG%20Cable%20Reel.pdf(검색일: 2023.8.17.)

Korea Institute of Science and Technology Information, 수소 모빌리티용 수소저장용기, https://repository.kisti.re.kr/bitstream/10580/17972/1/ASTI%20MARKET%20INSIGHT%20078%280712%29.pdf(검색일: 2023.8.19.)

Korea-EU Research Center, Horizon Europe : The EU Research & Innovation Programme 2021-2027, https://k-erc.eu/horizon-europe/(검색일: 2023.08.10)

LR Maritime Decarbonisation Hub(2023.4.13.), Onboard carbon capture and storage, https://www.lr.org/en/knowledge/research-reports/onboard-carbon-capture-and-storage-a-readiness-assessment-for-the-shipping-industry/(검색일: 2023.10.17.)

Mæsk Mc-Kinney Møller Center(2022.9.10.), Reducing methane emissions onboard vessels, https://www.zerocarbonshipping.com/publications/reducing-methane-emissions-onboard-vessels/(검색일: 2023.10.17.)

Mæsk Mc-Kinney Møller Center(2022.10.30.), The role of onboard carbon capture in maritime decarbonization, https://www.zerocarbonshipping.com/publications/the-role-of-onboard-carbon-capture-in-maritime-decarbonization/(검색일: 2023.10.17.)

MAN Energy Solution, The case for two-stroke ammonia engines, https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine(검색일: 2023.7.3.)

Man Energy Solutions(2022), Propeller and Aft Ship solutions, https://www.man-es.com/marine/products/propeller-aft-ship(검색일: 2023.9.25.)

MarineLink(2019.5.5.), Rotor Sail gets Type Approval, https://www.marinelink.com/news/rotor-sail-gets-type-approval-463598(검색일: 2023.9.12.)

Marinelink(2021.12.24.), MOL's Propeller Boss Cap Fins earns Guinness World Record Title, https://www.marinelink.com/news/mols-propeller-boss-cap-fins-earns-493108(검색일: 2023.9.23.)

Maritime Administration(2022.10.), Energy Efficiency and Decarbonization Technical Guide. https://www.maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/2022-11/Energy%20Efficiency%20%26%20Decarbonization%20Technical%20Guide%20%2810-2022%29.pdf(검색일: 2023.7.27.)

Market Growth Reports(2023), By 2030, Air Lubrication System Market Trends, Size, Growth Scenario and Analysis, https://www.wicz.com/story/49049401/By-2030-Air-Lubrication-System-Market-Trends-Size-Growth-Scenario-and-Analysis/(검색일: 2023.9.23.)

MarketsandMarkets(2019), Connected Ship Market worth $14.5 billion by 2030, http

s://www.slideserve.com/sandeeproy/connected-ship-market-worth-14-5-billion-by-2030-at-a-cagr-of-7-4-powerpoint-ppt-presentation(검색일: 2023.9.12.)

Microgrid Knowledge(2018.9.13.), Port of Los Angeles Microgrid Project Nears Finish Line, https://www.microgridknowledge.com/microgrids/industrial/article/11430237/port-of-los-angeles-microgrid-project-nears-finish-line(검색일: 2023.10.17.)

Microgrid Knowledge(2022.3.15.), Port of Long Beach, Schneider Electric start construction on $12.2 million microgrid project, https://www.microgridknowledge.com/google-news-feed/article/11427396/port-of-long-beach-schneider-electric-start-construction-on-122-million-microgrid-project(검색일: 2023.10.17.)

Mitsubishi Heavy Industries(2023.5.10.), LTD. Ahead in Technology unmatched in Performance, https://www.anupamgroup.com/media/docs/Container-Handling-Cranes-and-Bulk-Material-Handling-Equipment.pdf(검색일: 2023.8.23.)

NAPA(2023), NAPA Voyage Optimization, https://www.napa.fi/software-and-services/ship-operations/napa-fleet-intelligence/voyage-optimization/(검색일: 2023.9.12.)

National Renewable Energy Laboratory(2021.9.), Solar futures study, https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/80826.pdf(검색일: 2023.7.30.)

OEMoffhighway(2022.1.26.), Case Study: Electrifying Machinery to Make Ports More Sustainable, https://www.oemoffhighway.com/trends/electrification/news/22006051/danfoss-danfoss-power-solutions-case-study-electrifying-machinery-to-make-ports-more-sustainable(검색일: 2023.8.17.)

precedence research(2023.4.), Smart Port Market (By Technology: Process Automation, Blockchain, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI); By Throughput Capacity: Extensively Busy, Moderately Busy, Scarcely Busy; By Port Type: Seaport, Inland Port) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032, https://www.precedenceresearch.com/smart-port-market(검색일: 2023.7.29.)

Riviera(2023.4.29.), Top 20 container carriers: going for growth – and methanol, https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/top-20-carriers-going-for-growth--and-methanol-75949(검색일: 2023.8.3.)

Safety4sea(2017.3.30.), New solution for routes optimization launched, https://safety4sea.com/new-solution-for-routes-optimization-launched/

Sanoyas. Technology development: Development of eco-friendly technologies with all our heart, https://www.sanoyas.skdy.co.jp/en/technology(검색일: 2023.7.27.)

Ship Technology(2023.5.11.), DP World celebrates successful solar energy trial at London Gateway port, https://www.ship-technology.com/news/dp-world-london-gateway-successful-solar-energy-trial/(검색일: 2023.10.17.)

ShipFC, https://shipfc.eu(검색일: 2023.8.3.)

ShipNerd(2023.3.9.), Weather-Optimized Routing to Enhance Ship Performance with METIS & DTN, https://shipnerdnews.com/weather-optimized-routing-ship-performance/(검색일: 2023.9.12.)

Silverstream technologies(2015.10.14.), The world's first commercial installation of a patented air lubrication system from Silverstream Technologies, https://web.archive.org/web/20220907161542/http://media.wix.com/ugd/0e97b0_30952c7b73754af0990f1256492ff301.pdf(검색일: 2023.9.23.)

Sofar(2023), Always optimized for vessel performance, https://www.sofarocean.com/products/wayfinder.

Stanford Earch Matters magaizne(2019.9.9.), Plastics, fuels and chemical feedstocks from CO2? They're working on it., https://earth.stanford.edu/news/plastics-fuels-and-chemical-feedstocks-co2-theyre-working-it(검색일: 2023.7.29.)

Statens Vegvessen, Hydrogen ferries to Lofoten: "World class climate project", https://www.vegvesen.no/en/fag/trafikk/ferje/hydrogen-ferries-to-lofoten/(검색일: 2023.8.27.)

Streetdrone(2023.5.10.), Benefits of using autonomous fleets in smart ports, https://www.streetdrone.com/benefits-of-using-autonomous-fleets-in-smart-ports/(검색일: 2023.8.23.)

SWZMARITIME(2022.9.15.), The AmmoniaDrive project explained – Ammonia as a marine fuel 'done right', https://swzmaritime.nl/news/2022/09/15/the-ammoniadrive-project-explained-ammonia-as-a-marine-fuel-done-right/(검색일: 2023.9.02)

The Straits Times(2023.4.10.), World's largest automated container terminal opens in Shanghai, https://www.straitstimes.com/asia/east-asia/worlds-largest-automated-container-terminal-opens-in-shanghai(검색일: 2023.8.23.)

The Times(2022.8.28.), An offshore wind revolution has begun — can it meet the UK's power needs?, https://www.thetimes.co.uk/article/an-offshore-wind-revolution-has-begun-can-it-meet-the-uks-power-needs-ph6w5bt09(검색일: 2023.10.17.)

The White House(2021.2.11.), Biden-Harris Administration Launches American Innovation Effort to Create Jobs and Tackle the Climate Crisis, https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/02/11/biden-harris-administration-launches-american-innovation-effort-to-create-jobs-and-tackle-the-climate-crisis/(검색일: 2023.6.22.)

The White House(2022.11.), U.S. Innovation to Meet 2050 Climate Goals: Assessing Initial R&D Opportunities, https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2023/02/US-Innovation-to-Meet-2050-Climate-Goals.pdf(검색일: 2023.6.25.)

U.S. Department of Energy, Department of Transportation, Environmental Protection Agency and Department of Housing and Urban Development(2023), The U.S. National Blueprint for Transportation Decarbonization: A Joint Strategy to Transform Transportation(검색일:2023.6.28.)

U.S. Goverment Accountability Office(2019.5.7.), Automated Trucking: Federal Agencies Should Take Additional Steps to Prepare for Potential Workforce Effects, https://www.gao.gov/products/gao-19-161(검색일: 2023.9.1.)

UK GOV(2019.7.), Clean Maritime Plan. 2019, https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5d24a96fe5274a2f9d175693/clean-maritime-plan.pdf(검색일: 2023.7.28.)

UK GOV(2019.7.), Reducing the Maritime Sector'S Contribution To Climate Change

and Air Pollution, https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5d25f15ce5274a586197f093/maritime-emission-reduction-options.pdf(검색일: 2023.6.3.)

Wallenius Wilhelmsen(2023.1.15.), World's first wind-powered RoRo vessel secures EUR 9M in EU funding, https://www.walleniuswilhelmsen.com/news/worlds-first-wind-powered-roro-vessel-secures-eur-9m-in-eu-funding(검색일: 2023.9.12.)

Wärtsilä(2017.11.7.), Wärtsilä introduces an innovative pre-swirl stator to improve fuel efficiency, https://www.wartsila.com/media/news/07-11-2017-wartsila-introduces-an-innovative-pre-swirl-stator-to-improve-fuel-efficiency(검색일: 2023.9.23.)

Wärtsilä(2020.6.30.), World's first full scale ammonia engine test - an important step towards carbon free shipping https://www.wartsila.com/media/news/30-06-2020-world-s-first-full-scale-ammonia-engine-test---an-important-step-towards-carbon-free-shipping-2737809(검색일: 2023.7.3.)

Wartsila(2021), One of the world's most technologically advanced bulk carrier features Wärtsilä hybrid and solar energy solution, https://www.wartsila.com/media/news/21-12-2021-one-of-the-world-s-most-technologically-advanced-bulk-carrier-features-wartsila-hybrid-and-solar-energy-solution-3026475(검색일: 2023.7.27.)

Wartsila(2023), Electric shipping and hybrid ships, https://www.wartsila.com/marine/products/ship-electrification-solutions(검색일: 2023.8.27.)

Well Expertise, CCS, https://www.wellexpertise.com/services/ccs(검색일: 2023.9.12.)

WinGD(2023.7.18.), WinGD on track to deliver ammonia engines in 2025 https://www.wingd.com/en/news-media/press-releases/wingd-on-track-to-deliver-ammonia-engines-in-2025/(검색일: 2023.8.3.)

World Ports Sustainability Program, Port of Rotterdam – PortXchange Pronto, Port of Rotterdam-PortXcahnage Pronto, https://sustainableworldports.org/project/port-of-rotterdam-portxchange-pronto/(검색일: 2023.9.1.)

과학기술정보통신부 보도자료, KDI 경제정보센터(2023.5.19.), 한국형 탄소중립 100대 핵심기술 확정 - 본격적인 탄소중립 기술개발 청사진 제시, https://eiec.kdi.re.

kr/policy/materialView.do?num=238761&pg=&pp=20&topic=P(검색일: 2023.6.27.)

과학기술정보통신부(2021.12.21.), 국가 필수전략기술 선정 및 육성 보호전략 발표, https://www.korea.kr/multi/visualNewsView.do?newsId=148897251(검색일: 2023.7.5.)

관계부처 합동(2022.10.26.), 탄소중립 녹색성장 기술 혁신 전략, https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156543865(검색일: 2023.8.18.)

관계부처 합동(2022.10.26.), 탄소중립 녹색성장 추진전략, https://www.kier.re.kr/resources/download/tpp/policy_221026_1.pdf(검색일: 2023.8.18.)

관계부처 합동(2023.4.), 탄소중립 · 녹색성장 전략 및 기본계획(안), https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1462&menuLevel=2&menuNo=16(검색일: 2023.5.31.)

교육부 공식 블로그(2012.9.8.), CO2 잡는 기술? 이산화탄소 포집 및 저장 기술!, https://if-blog.tistory.com/2084(검색일: 2023.7.29.)

국가녹색기술연구소(2021.10.31.) 유럽연합의 ESG 동향과 국내에의 정책적 시사점, https://www.nigt.re.kr/gtck/annualall.do?mode=download&articleNo=2557&attachNo=3615(검색일: 2023.7.2.)

국가녹색기술연구소(2022), 2020 기후기술 수준조사 개요, https://nigt.re.kr/gtck/researchall.do?mode=download&articleNo=2487&attachNo=3435(검색일: 2023.7.28.)

국무조정실(2022.3.22.), 탄소중립 비전과 온실가스 감축 의지 법제화, 2050 탄소중립 사회로 나아갑니다, https://www.kier.re.kr/resources/download/tpp/policy_20220322_report.pdf(검색일: 2023.4.7.)

권성훈(2022.10.20.), 과학기술 국제협력 현황과 개선방향, https://www.nars.go.kr/report/view.do?cmsCode=CM0155&brdSeq=40442(검색일: 2023.7.11.)

글로벌이코노믹(2020.7.30.), 현대重·현대삼호重, LNG운반선 8척에 '공기 윤활 기술' 적용, https://news.g-enews.com/article/Industry/2020/07/202007291412221945ce58317c16_1?md=20200729162803_U(검색일: 2023.9.23.)

기술과혁신, 02-수소의 저장, 운송 및 충전, http://webzine.koita.or.kr/201909-specialissue/02-%EC%88%98%EC%86%8C%EC%9D%98-%EC%A0%80%EC%9

E%A5-%EC%9A%B4%EC%86%A1-%EB%B0%8F-%EC%B6%A9%EC%A0%84(검색일: 2023.8.19.)

나라경제(2021.09.), 국제협력 없이는 기후변화 해결도 없다, https://eiec.kdi.re.kr/publish/columnView.do?cidx=13486&sel_year=2021&sel_month=09(검색일: 2023.6.3.)

네이버 지식백과, 탄소포집, https://terms.naver.com/entry.naver?docId=5737141&cid=64516&categoryId=64516(검색일: 2023.9.12.)

대한상공회의소(2022.2), 대한상의 ESG 뉴스레터 제10호, https://www.korcham.net/new_pdf/target/2022-2%EC%9B%94%20%EB%8C%80%ED%95%9C%EC%83%81%EC%9D%98%20ESG%20%EB%89%B4%EC%8A%A4%EB%A0%88%ED%84%B0-%EC%A0%9C10%ED%98%B8.pdf(검색일: 2023.7.11.)

대한상공회의소(2022.4), 대한상의 ESG 뉴스레터 제12호, https://www.korcham.net/new_pdf/target/2022-4%EC%9B%94%20%EB%8C%80%ED%95%9C%EC%83%81%EC%9D%98%20ESG%20%EB%89%B4%EC%8A%A4%EB%A0%88%ED%84%B0-%EC%A0%9C12%ED%98%B8-%EC%B5%9C%EC%A2%85.pdf(검색일: 2023.6.18.)

머니투데이(2021.7.24.), "5년뒤 120조 규모"…글로벌 ESS 배터리, 이유있는 폭풍성장, https://news.mt.co.kr/mtview.php?no=2021072215131894798(검색일: 2023.8.17.)

부산항만공사(2022.1.18.), BPA, 항만드나드는 차량 활용해 전력 생산 압전발전 시스템 기술개발 착수보고회 개최, https://www.busanpa.com/kor/Board.do?mode=view&idx=27168&mCode=MN1445(검색일: 2023.4.5.)

부산항만공사, 6.24 BPA 신항사업소에서 태양광 실증사업 준공식, https://www.busanpa.com/_Include/Webzine.do?flag=det&id=webzine&idx=7937&temp_idx=231&len=ko(검색일: 2023.7.5.)

산업통상자원부(2021.11.26.), 제 1차 수소경제 이행 기본계획, https://h2hub.or.kr/main/info/policy-industry-techinfo.do?mode=view&articleNo=673&article.offset=30&articleLimit=10(검색일: 2023.4.5.)

산업통상자원부(2021.12.3.), 2050 탄소중립 에너지기술 로드맵, https://www.motie.go.kr/common/download.do?fid=bbs&bbs_cd_n=81&bbs_seq_n=164944&file_seq_n=2(검색일: 2023.5.31.)

산업통상자원부(2023.1.30.), 2023년 한국형친환경선박(Greenship-K) 개발 시행계획, https://www.motie.go.kr/motie/ne/announce2/bbs/bbsView.do?bbs_cd_n=6&biz_anc_yn_c=Y&bbs_seq_n=68219(검색일:2023.7.14.)

삼성중공업 블로그(2018.5.2.), 삼성重, `공기윤활시스템` 세계 최초로 컨테이너선에 적용, https://blog.samsungshi.com/730(검색일: 2023.9.23.)

여수광양항만공사, 신재생에너지 자립 항만 실천, https://www.ygpa.or.kr/kr/esg/environment/renewable_energy/index.jsp(검색일: 2023.4.5.)

울산항만공사, EGS경영-신재생에너지 자립 항만 구축- 직영시설 50% 전력공급, https://www.upa.or.kr/contents.do?mId=0010150120030010000(검색일: 2023.4.5.)

인천항만공사(2022.5.15.), IPA, '지능형 신재생에너지 통합관리시스템' 구축으로 신재생에너지 운영 최적화, https://www.icpa.or.kr/article/view.do?articleKey=21780&boardKey=217&menuKey=400&currentPageNo=2(검색일: 2023.4.5.)

조선일보(2021.7.13.), 10년 뒤 年 12조원 수소탱크 시장… 일진 뛰고, SK·한화·롯데 쫓고, https://biz.chosun.com/industry/company/2021/07/13/52Q4YMONJNEVTCISIZKJ4FG2BA/(검색일: 2023.8.23.)

주한 EU대표부(2021.8.17.), Horizon Europe-Associated Countries, https://k-erc.eu/horizon-europe/(검색일: 2023.11.02)

주한유럽연합대표부(2020.7.5.), 유럽그린딜, https://www.eeas.europa.eu/delegations/south-korea/%EC%9C%A0%EB%9F%BD%EA%B7%B8%EB%A6%B0%EB%94%9C_ko?s=179(검색일: 23.04.19.)

한겨레(2019.11.19.), 대우조선해양, 공기윤활시스템 LNG운반선에 세계 첫 적용, https://www.hani.co.kr/arti/economy/marketing/917399.html(검색일: 2023.9.23.)

한국ESG연구소(2022), 한국과 EU 택소노미 비교와 향후 과제, http://www.kesgresearch.com/inc/vDown.php?idx=742&BODY_IDX=4924(검색일: 2023.7.19.)

한국경제정보센터(2023.3.7.), 최초로 법제화된 중장기 투자전략 수립 "5년간 170조원 투자하여 2030년 과학기술 5대 강국 도약", https://eiec.kdi.re.kr/policy/materialView.do?num=236154&topic=C&recommend=(검색일: 2023.7.28.)

한국산업기술진흥원(2019.9.11.), 호라이즌 유럽 (Horizon Europe 2021-2027) : EU의 제9차 프레임워크 프로그램, https://www.gtonline.or.kr/kor/data/issue/dataView.do?data_sid=234099(검색일: 2023.4.7.)

해양수산부(2021.11.26.), 수소경제 확산을 위한 항만의 도전이 시작된다, https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?menuSeq=971&bbsSeq=10&docSeq=43856(검색일: 2023.4.5.)

해양수산부(2022.12.27.), 해양수산 신산업 시장 30조원, 기업 2천개 육성 추진, https://www.mof.go.kr/jfile/readDownloadFile.do?fileType=MOF_ARTICLE&fileTypeSeq=48424&fileNum=2(검색일: 2023.7.5.)

해양수산부(2023.2.13.), 대한민국 해운산업, 바다위 무탄소 운송 이끈다, https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=49155&menuSeq=971&bbsSeq=10(검색일: 2023.4.7.)

화학공학소재연구정보센터, 최신수소저장소재 기술저장- 1. 수소에너지 개요: 수소의 생산, 저장 및 이용, https://www.cheric.org/files/research/ip/p202105/p202105_101.pdf(검색일: 2023.8.19.)

환경부(2021.12.30.), 한국형 녹색분류체계 가이드라인https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do;jsessionid=6kx0h2E92-uX+EsIoXDmi43a.mehome1?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10263&orgCd=&condition.orderSeqId=7854&condition.rnSeq=43&condition.deleteYn=N&seq=7853(검색일: 2023.6.19.)

법률

기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법(2023.6.9., 법률 제19430호)

신에너지 및 재생에너지 개발 · 이용 · 보급 촉진법(2022.11.15., 법률 제19040호)

부록 1. 해양 탄소중립 과학기술 동향 (2023년 기준)

1. 해운 부문 탄소중립 과학기술

본 연구에서는 앞서 서술한 국내외 녹색기술 분류체계 및 해운 분야 탄소중립 구현을 위한 주요 기술 유형 분류체계의 사례의 검토 결과, 이를 바탕으로 연구진이 구성한 '해양(해운·항만) 탄소중립 과학기술 분류안'을 한-유럽 전문가 위원회에서 검토·수정하여, 국제협력 여건 분석 및 전략 개발을 위한 '해양(해운·항만) 탄소중립 과학기술 분류체계(안)'을 제시하였다.[75]

다음에서는 본 연구에서 도출한 분류체계에 따라서, 항만 및 해운 부문 각각의 탄소중립 구현을 위한 과학기술 항목을 크게 3가지, '에너지 전환', '에너지 효율 개선', '전·후처리' 유형으로 구분하여, 이들 기술 유형 및 개별 항목의 개념 및 최신 동향을 정리하였다.

75) 제3장 제2절 1. 설문-분석모형의 구성 내용 참조

1) 에너지 전환

(1) 대체 에너지(생산)

가. 태양광

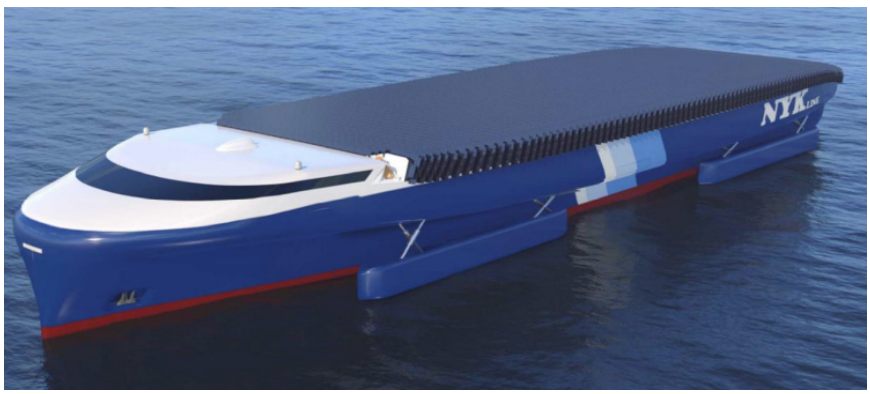
태양 전지는 일반적으로 반도체 재료(일반적으로 실리콘)의 1개 또는 2개 층으로 구성된다. 빛이 셀에 투사되면 태양광 패널 단자에서 DC 전압을 생성하는 전기장이 생성되며, 이는 빛의 강도가 클수록 커지는 특성을 가진다. 이를 활용하는 태양광 산업은 지난 10여년 동안, 규모의 경제와 이에 다른 기술의 발전으로 시스템 비용이 80% 이상 감소하였으며,[76] 이를 바탕으로 빠르게 성장하고 있다.

태양광 발전은 Sun21, PlanetSolar, Solar Voyager, Duffy London, Greenline, SoelYachts와 같은 소형 선박 (요트)에 적용한 이력이 있으며[77], M/V Auriga Leader, M/V Emerald Ace, Motor Ship (MS) Tûranor와 같은 대형 선박에 적용이 확대되고 있다.[78] Wärtsilä는 Solbian과 협력하여 업계 최초로 PV 태양 에너지 시스템과 결합된 고유한 하이브리드 전력 시스템을 M/V Paolo Topic에 설치 및 시운전을 완료하였다. 해당 전력 시스템에는 전력망에 보조 전력을 공급하는 에너지 관리 시스템과 배터리가 포함되며, 태양관 패널이 에너지원으로 결합하면서 운영 비용을 낮추는 동시에 환경 영향을 줄이는 역할을 한다.[79]

76) DNV(2021), More than the sun: The solar outlook(검색일: 2023.7.14.)
77) Wang, H., et al.(2018)
78) ABS(2017)(검색일: 2023.7.27.)
79) Wartsila(2021)(검색일: 2023.7.27.)

Hurtigruten은 지속적으로 강화되는 환경 규제에 발맞춰 Net-zero를 달성하기 위한 방안으로 태양 전지판을 설치한 135미터 길이의 유람선인 Sea Zero를 건조할 계획임을 밝혔다.[80] NYK Line 역시 Ecoship 2050 프로젝트를 추진하고 있다. 해당 선박은 9,000m^{2}를 활용하여 태양광 패널 전용 표면적을 최대화하고, 태양광 패널을 통해 총 에너지 수요의 12%를 충당할 계획이다.[81]

〈부록 그림-1〉 NYK Line Ecoship 2050 컨셉



자료: Maritime Administration, Energy Efficiency and Decarbonization Technical Guide. 2022.

선박에 태양광 시스템을 적용 시 태양광 패널 설치를 위해 선박의 표면적의 많은 부분을 할애하는 것은 실용적이지 않다. 또한, 현재의 기술 수준에서는 대부분의 선박에 태양광 시스템 적용 시 2% 미만의 에너지 절감을 기대할 수 있기 때문에 적용에 따른 효용성에 대해 신중한 고려가 필요하다. 하지만, 상대적으로 활동량이 적은 소형 여객선의 경우 태양광을 활용하여 100% 동력을 대체할 수 있으며, 이 과정에서 선박의 형태 및 운항 시나리오는 태양광 적용 여부를 결정하는 주요 결정 요인으로 작용할 수 있다.

80) Global energy(2023)(검색일: 2023.7.27.)
81) Maritime Administration(2022.10.)

Analytics Market Research(2022)의 분석 결과에 따르면, 세계 해양 태양광 패널 시장은 2022년 10억 2,000만 USD에서 2030년 24억 8,000만 USD로, 연평균 10.5%로 성장할 것으로 예상된다.[82] 현실적인 기술의 제약으로 태양광 발전이 당장 선박의 에너지 수요 전체를 충당하는 것은 어려우나, 예인선과 같이 전력 및 에너지 요구 사항이 상대적으로 낮은 선박들에 태양 전지를 통해 생산된 에너지를 활용하거나, 남은 에너지를 통해 녹색 수소 또는 암모니아를 생산해서 추가로 활용할 수 있는 방안 등이 지속적으로 연구되고 있다.[83]

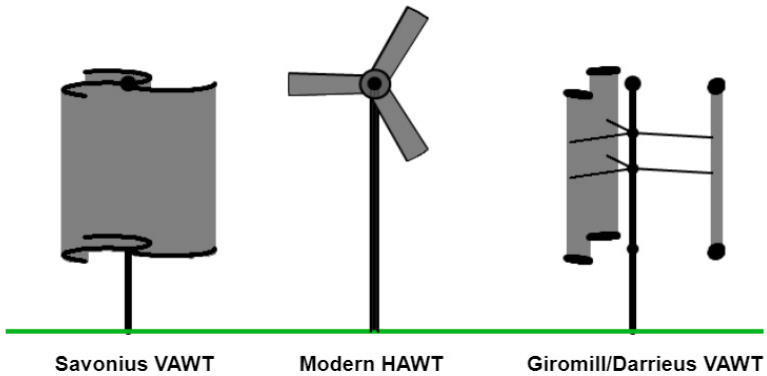
나. 풍력

풍력 에너지는 가장 빠르게 성장하는 재생 에너지 기술 분야 중 하나로, 지속적인 기술 발전에 힘입어 풍력 발전으로 생산되는 에너지 비용은 이제 석탄 및 가스를 통한 화력 발전으로 생산되는 전기 생산비용에 근접하고 있다.[84]

공기의 압력 구배에 의해 발생하는 공기의 흐름인 바람은 태양광과 마찬가지로 지구에서 가장 풍부한 천연자원으로, 풍력을 활용하는 돛은 수백 년 동안 선박 추진의 지배적인 형태였다. 현재 기술의 발전 방향에서도, 풍력은 선박의 추진을 위한 에너지를 생산하는 역할보다는 추진 효율을 개선하는 목적으로 활용되고 있다.

82) Analytics Market Research(2022.9.1.)(검색일: 2023.7.29.)
83) National Renewable Energy Laboratory(2021.9.)(검색일: 2023.7.30.)
84) Arief, I. S., & Fathalah, A. Z. M.(2022)

〈부록 그림-2〉 풍력 터빈의 주요 기본 유형인 수직축 풍력 터빈 (VAWT)과 수평축 풍력 터빈 (HAWT)



자료: Arief, I. S., & Fathalah, A. Z. M.(2022)

다. 선박용 풍력 및 태양광 발전의 융합

현재 사용 가능한 PV 모듈을 기준으로 태양광만으로 기대할 수 있는 선박의 연료 절감 효과는 크지 않으며, 풍력을 이용한 추진 역시 단독 사용으로 인한 효율 향상에는 한계가 있다. 이러한 한계점을 보다 효율적으로 극복하기 위한 방안으로 태양광과 풍력을 함께 활용할 수 있는 시스템이 제안되기도 하였다. Aquarius MRE(Marine Renewable Energy)는 이 아이디어를 적용한 최근의 사례로, 풍력을 활용한 항해 보조 추진과 태양광 시스템을 결합한 선박 재생 에너지 시스템을 적용하였다.

〈부록 그림-3〉 선박용 풍력 및 태양광 발전 시스템 적용 예시



자료: RE, Marine Renewable Energy Aquarius(2020), p. 28.

Hurtigruten이 계획하고 있는 유람선 Sea Zero호 역시 태양 전지 뿐만 아니라 세개의 접을 수 있는 돛을 설치하여 풍력에너지를 추진에 이용하도록 설계되었다.[85] 이 세 개의 돛은 총면적 1,500m^{2}의 태양광 패널과 풍력 터빈을 결합한 3개의 자율 발전기로 구성되며, 완전히 확장 시 높이 50미터, 총면적은 750m^{2}에 이른다.

(2) 대체 에너지(소비, 활용)

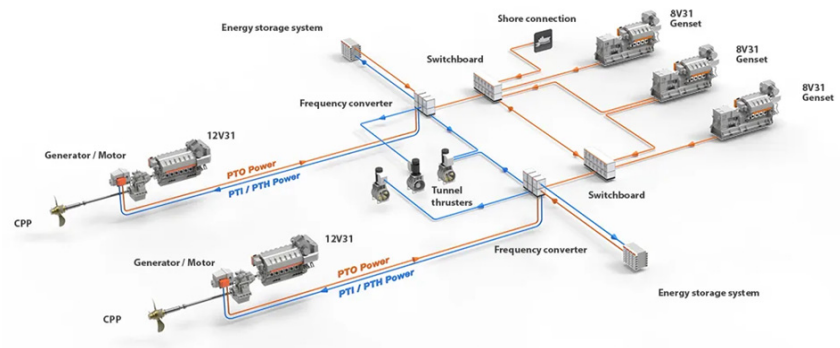
가. 전력/배터리

선박은 추진 및 주요 장비의 구동은 물론, 거주구 등에 전력 공급을 위해 전기 에너지가 필수적이다. 기존에는 주로 디젤 엔진의 발전 방식으로 이를 수급하였으나, 최근 배터리의 등장으로 정박 시 항만의 육상 전력망으로부터 충전을 하고 운항 시 충전된 에너지를 사용하는 방식으로 진화하고 있다. 이 과정에서 배터리를 주요 전력원으로 사용할 수도 있으나, 주요 전력은 기존 디젤 발전을 통해 수급하고 배터리의 사용을 통해 전체적인 시

85) Global energy(2023)(검색일: 2023.7.27.)

스템 효율을 높이는 '하이브리드 시스템' 방식이 더 많이 사용되고 있다. 이와 관련하여, 최근 전기 시스템과 기계식 추진 시스템을 결합하여 배터리를 통해 시스템 효율을 최적화하는 복합 추진 솔루션들이 등장하고 있으나, 대형 선박의 경우 제한적인 배터리 용량의 한계와 상대적으로 높은 가격, 제한된 효과 등의 이유로, 아직까지는 본격 적용한 사례가 많지 않다.

〈부록 그림-4〉 복합 선박 추진 시스템의 예시

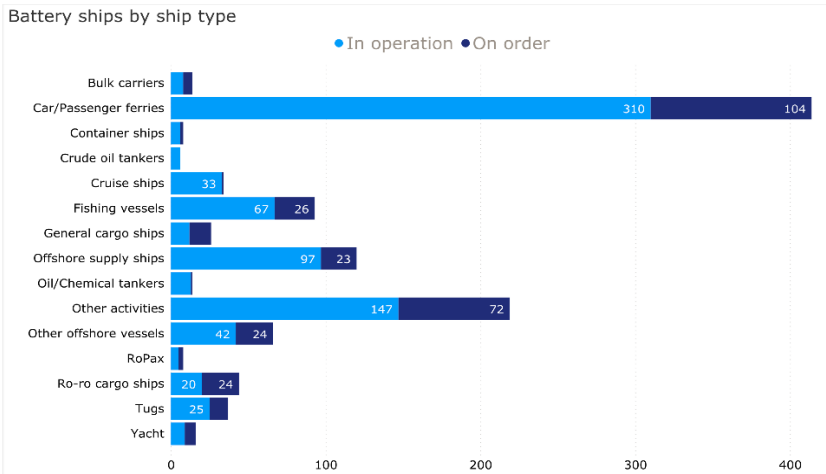


자료: WARTSILA (2023)(검색일: 2023.8.27.)

2023년 현재. 전 세계적으로 배터리를 장착한 선박이 약 800척 운항 중이며, 이 중 하이브리드 방식은 63%, 순수 전기 방식 22%, 그 외는 플러그인 하이브리드 등 기타 방식으로 파악된다.[86] 선종별로는 카페리나 여객선에 절대적으로 많이 적용되고 있고, 대형선의 경우 크루즈 선외에는 적용 사례가 많지 않다. 지역별 도입 비중은 노르웨이 37%, 유럽 35%, 아시아 14% 등으로 파악되고 있다.[87]

86) DNV(2023), Alternative Fuel Insight(검색일: 2023.10.27.)
87) DNV(2023), Alternative Fuel Insight(검색일: 2023.10.27.)

〈부록 그림-5〉 전세계 선종별 배터리 적용 사례 수



자료: DNV(2023), Alternative Fuel Insight(검색일: 2023.10.27.)

순수 전기 추진 방식의 경우 효율이 매우 높으나 현재 기술 수준에서 운항 시 저장할 수 있는 에너지양이 제한되고, 충전 시설을 제공하고 있는 항만 등이 제한적이어서 경로가 일정한 여객선에 주로 적용되고 있으며, 그 외의 경우 하이브리드 방식으로 시장을 넓혀가고 있다. 향후 기술 발전에 따라 다른 대체 연료를 사용하는 경우, 출력 제한의 단점을 보완하기 위해 하이브리드 방식의 수요가 더욱 증가할 것으로 보인다. 현재는 노르웨이의 Corvus라는 회사가 거의 독점적으로 시장을 지배하고 있는데, 해당 회사는 배터리셀 제품을 해양 환경에 맞게 패키징한 모듈을 공급하는 서비스를 제공하고 있으며, 폭발적으로 늘어나고 있는 노르웨이 국내 수요를 토대로 성장하고 있다.

나. 수소

수소는 화석연료와 달리 사용과정에서 온실가스 또는 오염물질의 직접 배출이 발생하지 않는다. 또한 생산 과정이 간단하여 기후 위기에 맞서 기

존 화석 연료를 대체하는 청정 에너지원으로 활발히 연구 및 산업에 적용되고 있다.

하지만, 차후 유럽 및 IMO에서 도입이 확정된 해운 분야 전 과정 평가 개념의 규제를 만족하기 위해서는, 수소 자체의 생산 단계에 대한 고려 역시 매우 중요하다. 현재 시장의 수소 대부분은 천연 가스를 이용해 생산되며, 이 과정에서 발생하는 온실가스 배출로 인해 '회색 수소(Gray hydrogen)'로 분류된다. 동일 생산 과정에 이산화탄소 포집 기술을 적용하는 '청색 수소(Blue hydrogen)'는 생산 과정에서 회색 수소에 비해 온실가스 배출의 상당한 저감 효과를 기대할 수 있다. 이와 달리, '녹색 수소(Green hydrogen)'는 생산 과정에서 필요한 전기에너지를 신재생에너지를 통해 생산하여야 하는 이른바 '청정 에너지'로, 전기 에너지를 사용하여 주로 물을 전기 분해하는 방식으로 생산한다.

수소는 선박의 연료로 고려함에 있어서, 기본적으로 청정 에너지라는 장점이 있음에도 불구하고, 도입·적용을 위해서는 상당한 기술적 난이도를 해결해야 한다. 수소의 체적 에너지 밀도가 매우 낮아, 주로 액화시키거나 고압으로 압축하여 보관이 되어야 하지만 여전히 기존 연료에 비해 상당히 낮은 밀도를 가지기 때문에 연료 탱크 배치에 어려움이 있기 때문이다. 또한, 폭발성이 높고, 극저온, 고압 등의 특성으로 취급 및 저장·운용에 기술적 어려움이 있다.

수소를 실제 유용한 에너지로 전환하기 위해서는 연료전지를 통해 직접 전기를 발생하거나, 내연기관이나 가스터빈을 통해 연소과정을 통해 열에너지를 운동에너지로 변환하는 방식을 거쳐야 한다. 연료 전지 방식의 경우, 배출의 발생이 없고 효율이 높은 반면 현재 기술 장벽이 높지 않아 현재 다양한 분야에서 많은 실증 프로젝트들이 진행되고 있다. 이에 비해 내연기관을 통한 수소의 연소방식의 경우, 4행정 중소형 엔진 중심으로 개발

이 되고 있으나 아직 기술적 성숙도가 낮고, 연소 과정에서 질소 화합물이 발생할 수 있다.

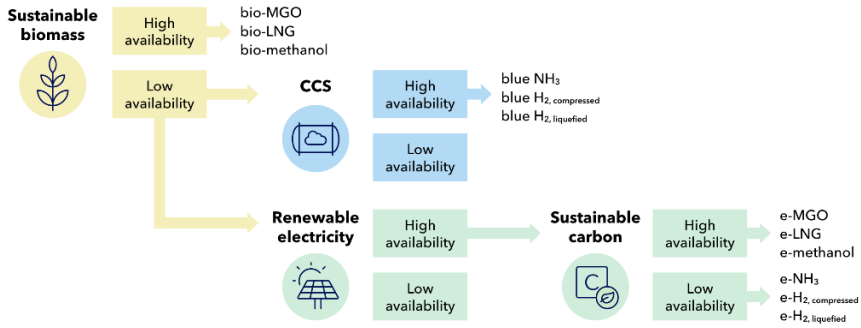
전자의 경우, 노르웨이에서 소형 차도선 MF Hydra에 2023년 세계 최초로 액화 수소의 연료전지 방식으로 적용하여 운항을 개시한 바 있으며, 정부 주도로 노르웨이 북부 지방의 중거리 여객선을 수소 연료전지 추진 방식의 선박으로 교체하고 2025년부터 실제 운항하기 위한 사업을 진행 중이다.[88] 그 외에 'FLAGSHIP'[89]이나 'HySeaS Ⅲ'[90]와 같은 EU Horizon 2020 프로젝트에서도 내륙 소형 화물선이나 소형 여객선에 실증 과정을 수행하고 있다.

현재 수소 연료의 적용은 배터리와 마찬가지로 노르웨이를 비롯한 유럽권 위주의 정부 주도 연구개발 프로젝트를 중심으로 이루어지고 있으며, 이에 발맞추어 현지 PowerCell이나 캐나다의 Ballard 등이 PEM[91]방식의 연료전지가 상용화하여 시장에 출시하였다. Teco2040과 Corvus은 토요타나 AVL과 같은 회사에서 스택을 제공받아, 패키징한 제품을 제공하고 있다.

수소 연료전지 방식은 낮은 에너지 밀도 및 취급의 난이도로 인해, 우선 내수용의 중소형 선박 위주로 도입·적용될 것으로 보인다. 에너지/연료 시장 내 점유율은 가능한 여러 시나리오에 따라 달라질 수 있으나, DNV(2022) 등 최근 발표자료에 따르면 시장의 선호도는 가격과 공급량이 같다면 바이오 연료/합성유, 암모니아, 수소의 순으로 결정될 것으로 예측되고 있다. 하지만 바이오매스 및 CCS 기술의 개발, 이에 따른 활용도가 저조하거나 재생에너지의 생산량이 제한적인 경우, 전주기적 측면에서 상대적으로 효율이 가장 높은 수소와 암모니아 위주로 시장이 재편될 수 있다.

88) Statens Vegvessen(검색일: 2023.8.27.)
89) Flagships(검색일: 2023.8.27.)
90) HySeaS III(검색일: 2023.8.27.)
91) Proton exchange membrane

〈부록 그림-6〉 해운의 미래 연료 믹스를 결정할 세 가지 요인들



자료 DNV(2023), Maritime Forecast to 2025(검색일: 2023.10.29.), p. 54.

다. 암모니아

또다른 대체 연료로 주목받고 있는 암모니아는 주로 비료의 원료로 사용되어왔으나, 화학 구성(NH_3)에 탄소(C)를 포함하지 않고 수소를 다량 포함하고 있어, 청정 수소를 운반할 수 있는 운반체로서도 가까운 미래의 유력한 후보로 인식되고 있다. 특히 액화 암모니아의 경우, 같은 부피에서 액화 수소보다 최대 60% 더 많은 수소를 운반할 수 있다. 또한, 암모니아는 25˚C, 0.99MPa에서 액체 상태를 유지하기 때문에 저장이 상대적으로 용이하다는 잇점이 있어, 해운 분야에서는 기존 디젤 연료의 잠재적인 대안으로 최근 주목받고 있다. 하지만 암모니아는 맹독성 물질로 취급과 운용에 주의를 요하며, 구리, 구리 합금 및 아연과 같은 일부 재료에 강한 부식성이 있다. 이와 더불어, 저인화점 연료로 이전까지 선박에 연료로 사용된 이력이 없기 때문에 추후 효율적인 연소 등을 위해 추가적으로 많은 연구와 노력이 요구된다.

암모니아 역시 에너지로 변환하기 위해서, 내연기관 또는 연료전지를 사용하는 방법이 유력하다. 하지만, 낮은 화염 속도와 높은 증발열과 같은 특

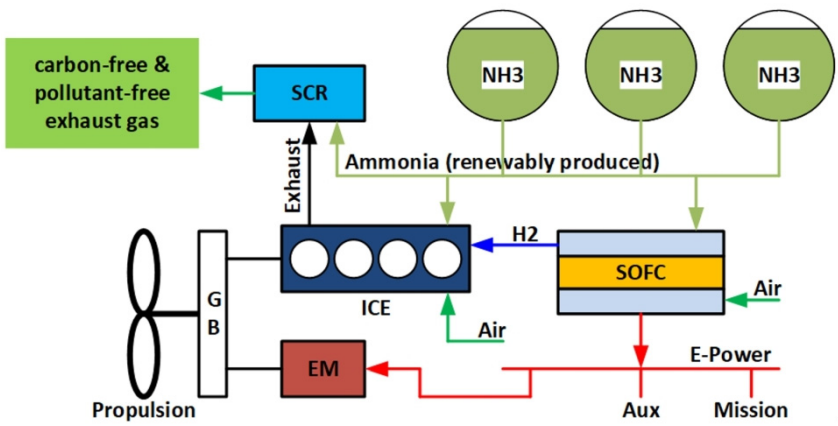
성으로 인하여 일반 경유나 천연가스 대비 연소 자체에 어려움이 있다.[92] 그리고, 연소 시에 이산화탄소보다 지구온난화 기여도가 약 250배에 달하는 아산화질소(N_2O)를 발생하기 때문에, 온실가스 배출 측면에서 오히려 역효과를 유발할 수 있으며, 이를 컨트롤하기 위한 연소 제어기술이 매우 중요하다. 최근, 이러한 연소 시 문제점을 보완하기 위해 디젤이나 수소 등을 혼소하여 사용하고 있는데, 이 혼소율을 최소화하는 것이 기술 개발의 핵심이기도 하다.

한편, 암모니아를 고온에서 질소와 수소로 분해하는 크래킹 공정을 통해 수소를 추출할 수 있으며, 이 과정에서 전용 크래커를 사용하거나, 고온 연료전지인 SOFC(고체 산화물 연료전지)을 활용할 수 있으며, 복합 사용 역시 가능하다. 하지만, 이러한 경우 전체적인 시스템 효율을 개선할 수 있는 반면 운전의 복잡도가 올라가고 SOFC 재질의 중독을 막기 위한 조치가 요구되기 때문에 추가적인 연구개발이 필요하다.[93]

대형 선박에서 주로 사용하는 2행정 저속엔진의 주요 기술사인 MAN Energy Solution[94]과 WinGD[95]는 각각 2024년, 2025년까지 첫번째 암모니아 엔진을 조선소에 공급하는 것을 목표로 개발하고 있다. 4행정 중속엔진의 경우 Watsila에서 상용화를 위한 Full-scale 실험실 테스트를 진행중에 있으며, 암모니아 연료 비율을 높이기 위해 지속적인 기술 개발을 수행하고 있다.[96] 국내에서는 최근 한국에너지 기술연구원이 암모니아 70%, 가솔린 30% 혼합 비율로 사용 시 운전이 용이하다는 연구 결과를 발표한 바 있다.[97]

92) Lhuillier et al.(2020), p. 1
93) Omid et al.(2023), p. 2
94) MAN Energy Solution(검색일: 2023.7.3.)
95) WinGD(2023.7.18.)(검색일: 2023.8.3.)
96) Wärtsilä(2020.6.30.)(검색일: 2023.7.3.)
97) 장진영 외(2015), p. 1

〈부록 그림-7〉 암모니아(NH_3) 연료추진 선박 개념도



자료: SWZMARITIME(2022.9.15.)(검색일: 2023.9.02)

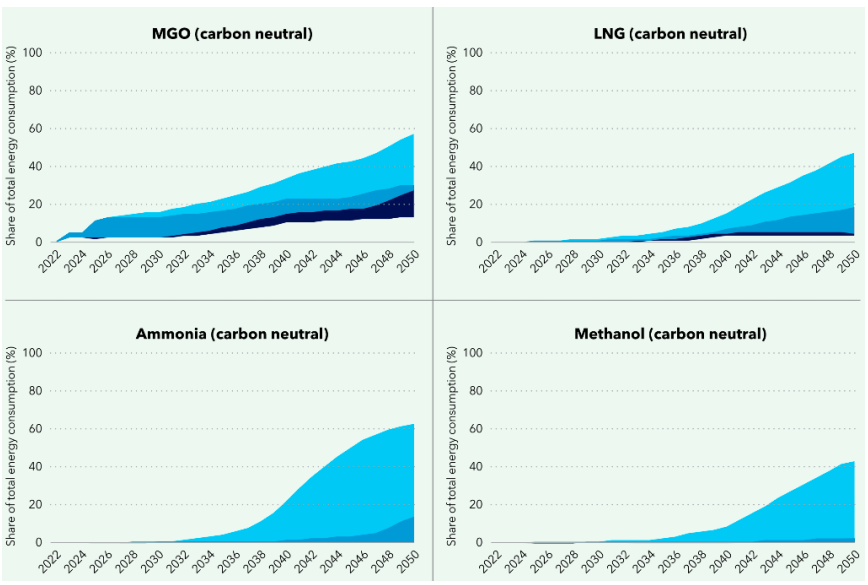
최근 SOFC를 사용하여 크래킹(분해공정)과 발전을 동시에 할 수 있는 시스템이 개발되고 있으나, 아직 파일럿 테스트 수준에서 개념 증명 정도 연구개발이 진행 중에 있다. 이와 관련하여, 덴마크 공대(Technical University of Denmark)와 SINTEF Industry, Ballard 등의 파트너들이 참여한 'AEGIR-Project'에서는 SOFC를 보조 전원 및 크래킹 장치로 사용하여 수소를 생산하고 ,이를 정제하여 PEM 연료전지에서 사용하는 복합 시스템을 제안하고 개념 증명을 한 바가 있다.[98] EU Horizon 2020 프로그램의 일환으로 수행된 ShipFC 프로젝트의 경우, 오프쇼어 지원선에 암모니아를 주연료로 하는 200kW급 SOFC를 설치, 실증하는 연구를 진행 중이다.[99]

암모니아 활용을 위한 관련 규정 개발 역시 활발히 진행되고 있다. 국제해사기구(IMO) 제105차 해사안전위원회(MSC)에서는 암모니아를 사용하

98) Aegir(검색일: 2023.8.3.)
99) ShipFC(검색일: 2023.8.3.)

는 선박에 대한 가이드라인 검토가 제안되었다. 이에 따라서, 2023년까지 가이드라인 개발을 완료하기로 합의하고, 암모니아 연료 추진선의 안전 대책 등이 추가적으로 논의되었다. DNV(2022)에 따르면, 암모니아의 적용을 위한 기술적 문제들이 해결된다면 2035년 이후 암모니아 연료의 시장 점유율이 본격적으로 증가하여 2050년에는 전체 에너지 소비 중 약 60% 이상 차지할 것으로 전망하고 있다.

〈부록 그림-8〉 탄소중립 연료별 향후 시장 점유율 예측



자료: GI, D. N. V., SAFER, S., & DNV, G.(2019), p. 65.

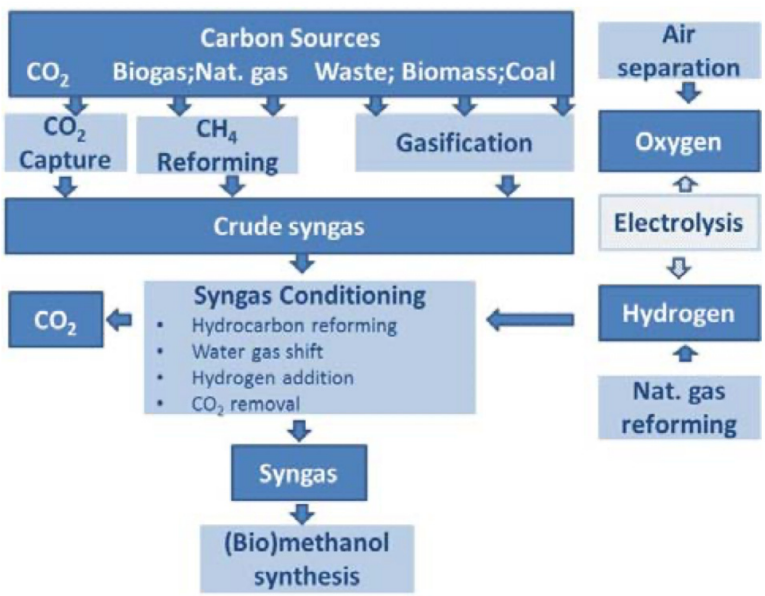
라. 메탄올

메탄올은 앞서 살펴본 암모니아나 수소와 달리 탄소를 연료 성분에 포함하고 있으나, 이 탄소의 원천이 화석연료에서 기인하지 않고 대기에서 생물학적·인위적 포집에 의한 경우 탄소중립 연료로 인정을 받을 수 있다. 이

에 따라, 식물의 바이오매스(Biomass)를 활용하여 바이오 메탄올을 생산하거나, 재생에너지 또는 탄소 포집 등의 방법을 적용하여 생산한 그린·블루 수소를 합성하여 e-메탄올을 생산할 수 있다.

메탄올은 대기압에서 상온 보관이 가능하고 체적당 에너지 밀도가 LNG보다도 약 20% 높아, 대체 연료로서 우수한 특성을 가지고 있다. 또한, 내연기관에서 연소하기가 비교적 용이한 연료이고, 독성이 있지만 이는 음용 시에 발생하는 것으로 누출에 따른 위험도가 크지 않다.

〈부록 그림-9〉 바이오 / 합성 메탄올 생산 과정



자료: International Renewable Energy Agency(2013.1)(검색일: 2023.8.3.), p. 1.

아이슬란드는 재생에너지를 이용하여 연간 4,000톤의 e-메탄올을 생산하는 George Olah 플랜트를 운영하고 있으며, 노르웨이 역시 연간 100,000톤을 생산할 수 있는 Finnfjord Project에 대한 투자를 2024년까

지 결정할 예정이다.[100] 바이오 메탄올의 경우, 대형 컨테이너사 위주로 바이오·합성 메탄올의 공급망을 확보하는 한편 신조선을 메탄올 추진선박으로 발주하고 있다.[101] 내연기관의 경우, MAN ES, WinGD, Wartsil 등 주요 업체에서 기존 디젤엔진의 일부 디자인 변경을 통해 메탄올을 연료로 사용할 수 있는 엔진을 개발 완료하였으며, 제품을 시장에 공급하고 있다. 메탄올은 본디 내연기관에 유리한 연료이므로 선박용 연료전지의 개발에 대한 연구개발은 미미하나, 메탄올을 연료로 하는 휴대용 연료전지는 이미 개발된 바 있으며, 아직은 출력 당 가격이 높은 편이다.

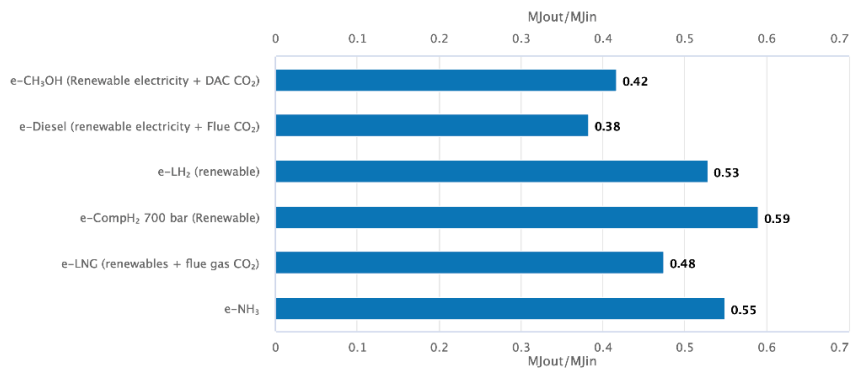
마. 바이오 연료

바이오·합성 연료는 재생에너지 또는 다른 방법으로 생산된 청정 수소에 탄소 포집을 통해 모인 이산화탄소를 합성하여 만들어진 일반 경유나 천연가스와 유사하거나 동일한 연료를 지칭하며, 유럽 연합(EU) 등은 합성 연료 및 e-연료를 온실가스 배출량의 실질적 감축을 위한 유망한 솔루션으로 주목하고 있다. 이들은 기존 내연기관 및 저장 장치와 공급 인프라를 그대로 사용 가능하다는 장점이 있기 때문에, 기존 연소 기술과 인프라를 탈탄소 패러다임으로 전환하는 과정에서 매우 유효한 'Bridge'로 활용할 수 있으며, 당장 새로운 기술의 적용이 어려운 분야에 활용할 수도 있다는 데에서 경쟁력을 가진다.

100) Carbon Recycling International(검색일: 2023.8.3.)
101) Riviera(2023.4.29.)(검색일: 2023.8.3.)

합성 연료는 생산 과정에서 부산물로 물이 생성되는데 물에는 수소가 포함되어 필연적으로 에너지 손실이 발생하며, 이로 인해 전체적인 효율이 떨어지는 점이 이 연료의 가장 큰 단점이다. 네델란드 해사연구소(MARIN)의 분석에 따르면, 합성 액화천연가스(e-LNG)의 Well-to-tank(WTT)[102] 효율은 50%가 되지 않고, 합성 디젤(e-diesel)의 경우는 40% 이하로 나타나고 있다.

〈부록 그림-10〉 재생에너지로부터 생성된 연료의 WTT효율



자료: Europe Sustainable Shipping Forum(검색일: 2023.8.3.)

향후 환경 규제의 전제가 현재 추세와 같이 '전과정평가(LCA)'의 개념으로 설정되는 경우, 합성 연료의 경쟁력이 보다 힘을 얻을 수 있다. 이에 따라서, 이미 자동차 및 항공 업계에서도 합성 연료 활용을 위한 다양한 연구개발을 추진하고 있다. 하지만, 합성 연료가 본질적으로 시장성을 가지기 위해서는 재생에너지의 공급은 물론 탄소 포집 등에 의해 탄소의 충분한 공급의 지속가능성이 보장되어야 한다. DNV(2022)에 따르면 이러한 시나리오를 조건으로, 합성유의 시장 점유율이 2050년에는 40%까지 이를 수 있다고 전망하고 있다.

102) 에너지의 자원상태(Well)로 부터 저장 상태(Tank)에 이르기까지의 변환 손실을 감안한 효율

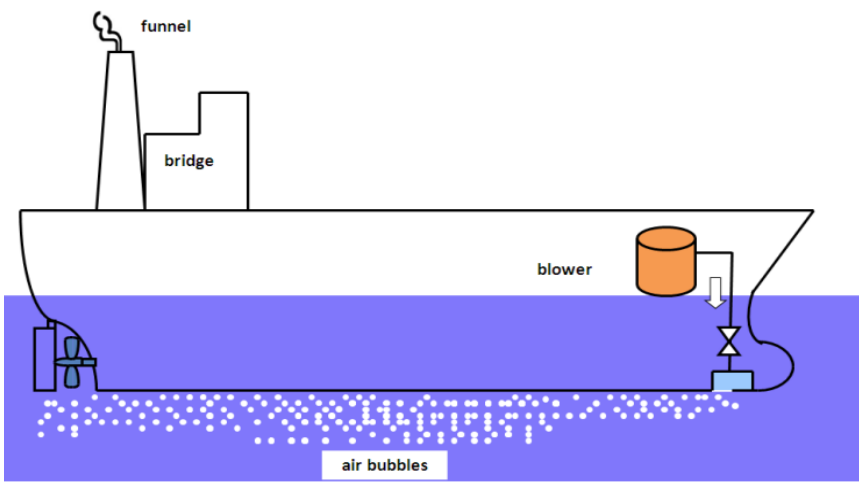
2) 에너지 효율 개선

(1) 기술적 방안(선박 설비)

가. 저항 감소

선박은 움직임에 반하는 수중의 마찰 저항에 의해 에너지 손실이 필연적으로 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 '선체 공기 윤활 시스템(Air lubrication system)'은 선체 하단에 공기를 주입하여, 마치 코팅한 것 같이 선체와 수면의 마찰, 이로 인한 저항을 저감하게 된다. 이는 선박 운항 성능을 향상시키는 혁신적인 기술로, 선박의 저항을 감소시켜 에너지 효율성을 약 10% 정도 향상시키는 것으로 보고되고 있다.[103]

〈부록 그림-11〉 IMO MEPC.1/Circ. 815 부록의 공기 윤활 시스템의 개략도



자료: American Bureau of Shipping(2019.4.)(검색일: 2023.8.15.)

103) Balaji, C.P. & K. Sivasami(2022)(검색일: 2023.8.15.)

이 시스템은 간단하면서도 효과적인 방식으로 작동한다. 선체 하단에 압축 공기를 주입하면, 공기가 선체 주변으로 흘러가며 선체와 물의 경계층을 부분적으로 제거한다. 이 과정에서 선체와 수면 사이에 저압 구간이 형성되어 저항이 유의미하게 감소하게 된다. 이러한 원리를 적용하여, 국제해사기구(IMO)는 '에너지 효율 설계 지수(EEDI)'에서 해당 기술을 신조선에 적용하는 경우 '청정기술'로 인정하고 있으며, 기존 선박이 '기존 선박에 대한 에너지 효율 지수(EEXI)'의 준수, 즉 효율성 등급을 개선하기 위한 핵심 수단 중 하나로 인식되고 있다. 뿐만 아니라, '탄소집약도 지수(CII)'의 요구 사항을 충족하기 위한 기술적 방안으로, 탄소 배출을 저감하는 데에 명확하게 기여할 수 있다.

〈부록 표-1〉 선체 공기 윤활 시스템의 특장점

구 분	내 용
에너지 효율성 향상	• 경계층 감소로 인해 선박의 저항 감소 → 연료 소비 감소; 환경 친화적인 운항과 연료 비용 절감에 기여
소음 및 진동 감소	• 선박 운항 시 발생하는 소음과 진동 저감 → 승무원, 승객 편의 향상
선박 성능 향상	• 저항 감소로, 선박의 속도,성능 향상 → 운항 시간, 비용 최적화 가능
환경 친화성	• 유해한 화학 물질을 사용하지 않으므로 생물학적 오염을 일으키지 않으며 해양 환경에 미치는 영향 최소화

자료: 저자 작성

선체 공기 윤활 시스템은 1세대와 2세대로 구분할 수 있다. 1세대는 압축 공기를 수직으로 분사하는 방식으로, 윤활 효과가 낮고 설계가 복잡한 단점이 있다. 2세대는 1세대의 단점을 보완하여 해수와 수평으로 공기를 분사하는 방식으로, 적은 공기량으로도 우수한 윤활 효과를 얻을 수 있으며, 제어 시스템과 선박 정보 시스템에 연계하여 자동으로 작동한다. 영국의 Silverstream Technologies는 2세대 시스템 'Silverstream System'을 개발하고, MSC, Shell, Maersk, Carnival, Grimaldi, CSSC, HHI, Vale

등 여러 선주들과 계약을 체결하였다. Silverstream System은 Lloyd's Registry, Bureau Veritas, ABS, DNV 및 RINA에 의해 검증되었고, 세계 최초로 크루즈선에도 적용되었다.[104] 2020년에는 현대중공업과 현대삼호중공업이 건조하는 LNG 운반선 8척에 이 시스템을 공급한 바 있다.[105]

국내에서는 현대중공업이 2세대 공기 윤활 시스템을 사용한 'Hi-ALS'를 순수 국내 기술로 개발한 바 있으며, 이를 지속적으로 LNG 운반선에 적용하여 그 기술력을 인정받고 있다.[106] 대우조선해양 역시 2세대 공기 윤활 시스템 'DSME ALS'을 개발하였으며, 2019년 세계 최초로 LNG 운반선에 적용하였다. 이 시스템을 적용하면 기존 LNG 선박 대비 5% 이상의 연료를 절감할 수 있는 것으로 확인되었다.[107] 삼성중공업이 자체 개발한 '삼성 공기 윤활 시스템 (SAVER Air)'은 2018년 세계 최초로 2만 TEU 이상 초대형 컨테이너선에 탑재되었다. 컨테이너선과 같은 고속 선박은 마찰 저항 비중이 적어 공기 윤활 시스템 적용이 어렵다고 알려져 왔으나, SAVER Air 기술은 마찰저항 저감 기술의 한계를 극복하고 컨테이너선에서 4% 이상의 연료 절감 효과를 입증하였다.[108]

선체 공기 윤활 시스템(ALS) 시장은 연료 절감 및 환경규제 이행을 위한 선박 소유자들의 수요 증가로 향후 꾸준히 성장할 것으로 예상되고 있다.[109] 선박 연료는 선박 운영 비용에서 매우 큰 비중을 차지하는 요인이며, ALS를 통해 선박의 연료 효율을 개선함으로써 연료 비용을 절감할 수 있기 때문이다. 또한, 궁극적으로 선박의 운항으로 인한 배출을 저감할 수 있다는 데에서, 최근 강화되고 있는 환경규제의 이행을 위한 유효한 선택

104) Silverstream technologies(2015.10.14.)(검색일: 2023.9.23.)
105) 글로벌이코노믹(2020.7.30.)(검색일: 2023.9.23.)
106) KBS뉴스(2019.4.14.)(검색일: 2023.9.23.)
107) 한겨레(2019.11.19.)(검색일: 2023.9.23.)
108) 삼성중공업 블로그(2018.5.2.), 삼성重, '공기윤활시스템' 세계 최초로 컨테이너선에 적용, https://blog.samsungshi.com/730(검색일: 2023.9.23.)
109) Market Growth Reports(2023)(검색일: 2023.9.23.)

지로 이해할 수 있다. 그럼에도, 상대적으로 높은 초기 설치비용과 유지보수 비용은 시장 성장의 주요 제한 요인으로 작용할 것으로 예상된다.

나. 추진 효율 개선

(가) 선미 덕트·핀 기술

선박의 추진 효율을 개선하기 위한 방안으로, 선박의 선미에 설치하는 덕트(duct) 및 풍력 보조 추진장치(Wind-assisted propulsion)가 많이 적용된다. 선미 덕트 기술은 선박의 선미에 특정 장치를 설치하여 와류 제어 등을 통해 추진 효율을 개선하며, 다음과 같이 다양한 기술을 적용할 수 있다.[110]

〈부록 표-2〉 선미 덕트 기술의 종류

기술 구분	개 요
Flow control fin	• 선박의 선미에 설치된 날개 모양의 장치로, 선박의 선미에서 발생하는 와류를 제어하여 선박의 수면과의 마찰을 저감
Propeller boss cap fin	• 선박의 프로펠러에 설치된 날개 모양의 장치로, 회전하는 프로펠러 뒤에 형성되는 와류에서 낭비되는 에너지를 회수하고 이 와류를 깨뜨려 추력을 향상
Stern duct	• 선박의 선미에 설치된 덕트로, 선박의 추진 방향으로 공기를 유도하고 프로펠러 주변의 난류를 줄이는 방식을 통해서 저항을 감소시키고 선박의 추진 효율을 향상
Wake equalizing duct	• 프로펠러 전단 양쪽에 두 개의 노즐모양의 하프링 덕트를 설치함으로써 후류를 균등하게 만들어 추진효율을 향상
Pre-swirl duct	• 덕트와 고정날개가 결합된 형태를 가지며 덕트의 추력 및 반류개선 효과와 전류고정날개의 회전에너지 회수 효과를 통해 추진효율을 증가
Pre-swirl stator	• 후류에서의 회전방향 운동에너지 손실을 최소화함으로써 선박의 추진 효율을 향상

자료: 저자 작성

110) Nicorelli, G., Villa, D., & Gaggero, S.(2023)

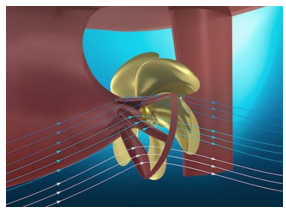
선미 덕트·핀 기술은 꾸준히 대중화되었으며, 현재 컨테이너선, 유조선 및 유람선 등 다양한 선박에 적용되고 있다. 일본 선사 Mitsui O.S.K. Lines(MOL)은 1986년 Propeller boss cap fin 개발에 성공한 이후, 설치에 따른 3~5% 에너지 절감 효과를 입증한 바 있으며, 특히 대형 선박 위주로 꾸준하게 시장을 확대하고 있다.[111] Wärtsilä는 최적화된 유입으로 프로펠러의 후류에서 발생하는 전력 손실을 저감하는 방식으로 연료 효율을 최대 10%까지 향상시키는 'EnergoFlow'를 개발하여 시장에 출시하였다.[112] MAN Energy Solutions는 이 기술을 적용하는 경우 3~5%의 연료 절감 효과를 확인하는 한편, 추진 효율을 향상시킬 수 있도록 이 기술과 프로펠러의 맞춤형 설계 및 결합에 대해 지속적인 연구개발을 진행하고, 이를 적용하고 있다.[113] Kawasaki는 'RBS-F(Rudder Bulb System with Fins)'을 적용하여 2~7%의 추진 에너지 절감을 확인하고, LNG, LPG, Bulk carrier 등 100척 이상의 선박에 이 시스템을 설치하였다. 또한 'SDS-F(Semi-Duct System with contra Fins)' 장치는 3~7%의 에너지 절감 효과를 기대할 수 있으며, 이 시스템을 5척의 Oil tanker에 설치하여 효용성을 입증하였다.[114]

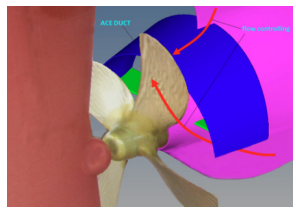
유조선 및 벌크선과 같이 차단 계수가 높은 선박의 경우, 선회류 고정자와 가속 덕트를 결합하여 연료를 더욱 절약할 수 있다. 예를 들어, Sanoyas는 'STF(Sanoyas Tandem Fins) 시스템'과 '향상된 흐름 제어 및 에너지 절약(ACE; Advanced flow Controlling and Energy saving) DUCT 시스템'을 결합하여 프로펠러 전방의 빌지 와류를 제어함으로써, 연료 소비량을 약 8% 절감할 수 있다고 발표하였다.

111) Marinelink(2021.12.24.)(검색일: 2023.9.23.)
112) Wärtsilä(2017.11.7.)(검색일: 2023.9.23.)
113) Man Energy Solutions(2022)(검색일: 2023.9.25.)
114) Kawasaki(2022)

〈부록 그림-12〉 00000


MOL, Propeller boss cap fin


Wartsila pre-swirl stator



Sanoyas, ACE DUCT

자료: (좌)Marinelink(2021.12.24.) (중)Maritime Administration(2022.10.), (우)Sanoyas

(나) 풍력 보조 추진장치

또다른 선박 추진 효율 향상 기술로, 풍력 보조 추진 장치가 있다. 이는 바람을 이용한 추진 시스템(WAPS; Wind-assisted propulsion system)으로, 바람의 힘을 이용해 공기역학적 힘을 생성하여 선박의 추진력을 보완하는 기술로 정의할 수 있다. 선박에 적용하는 경우 에너지 효율 설계지수(EEDI)에 긍정적인 영향을 미칠 수 있으며, 이와 동시에 연료의 소비 절감, 이에 따른 배출의 저감을 기대할 수 있어 상당한 주목을 받고 있다. 주 추진 시스템을 대체할 만한 추력을 얻는 것은 불가능하지만, 기상 조건에 따라 주력을 보조하는 방식으로 효율을 개선할 수 있다.[115]

이러한 풍력 보조 추진 장치 시스템은 Rigid/Soft wing sails, Flettner rotors, Ventilated foils, 연(Kite)를 활용하는 방식 등, 다양한 기술 개념이 연구개발 중에 있다. 현재 이러한 방식의 최신 시스템은 최첨단 지능형 제어 및 자동화 시스템을 활용하여 추가 인력 없이 안전한 방식으로 작동하도록 설계된다. 설계 시 고급 공기 역학, 자동화, 컴퓨터 모델링 및 현대 재료를 종합적으로 고려하고 적절히 조합하여, 원양 선박을 위한 차세대 혁신적인 항해 시스템으로 진화하고 있다. DNV(2019)의 선박 소유자 및 운영자에 대한 조사결과에 따르면, 풍력 보조 추진 장치 시스템의 적용에

115) DNV(2019), Wind assisted propulsion systems(검색일: 2023.9.23.)

다른 연료 절감 효과는 이미 4.5~9% 정도로 보고되고 있으며, 추가적인 개조를 통해 최대 25%의 절감 효과를 달성할 수 있는 잠재력이 있는 것으로 평가되고 있다.[116] 또한, 운영과 관련된 에너지 비용이 상대적으로 적은 것이 특징이며, 연료 절감 효과 외에도 투자 비용과 운영 비용을 적절히 고려하여 선박의 운항 경로의 특성에 맞게 적용할 수 있다.[117]

〈부록 그림-13〉 풍력 보조 추진장치 예시



자료: DNV(2019.6.), Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies in Shipping(검색일: 2023.9.23.)

이와 관련해서, Norsepower Oy Ltd.는 2019년, Rotor Sail 기술을 이용한 풍력 보조 추진 시스템을 세계 최초로 DNV-GL로부터 형식 승인을 받은 바 있다. 30×5m Rotor Sail로 설계된 이 기술은 승인을 득하고, 같은 해에 Maersk Pelican LR2 유조선에 탑재되었다. Norsepower Oy Ltd.의 Rotor Sail 솔루션은 현재까지 3척의 선박에 설치되어 총 35,000시간 이상의 운용 시간을 달성했다. 이 과정에서 4,500톤 이상의 CO_2 배출 저감 효과와 함께, 최대 20%까지 에너지 효율이 개선되었다.

116) DNV(2019), Wind assisted propulsion systems(검색일: 2023.9.23.)
117) DNV(2019.6.), Assessment of Selected Alternative Fuels and Technologies in Shipping (검색일: 2023.9.23.)

〈부록 그림-14〉 Maersk Pelican에 탑재된 30m × 5m Norsepower Rotor Sail 솔루션



자료: MarineLink(2019.5.5.)(검색일: 2023.9..12.)

Wallenius Wilhelmsen과 11개의 기관 및 업체 파트너들은 Horizon Europe 프로그램의 지원으로, 세계 최초의 풍력 Ro-Ro 선박 건조사업을 출범하였다. 총 900만 유로의 기금으로 운용되는 이 사업을 통해, 향후 5년(2023~2027년) 동안 풍력 추진 선박 'Orcelle Wind'의 계획, 건조 및 운영 등, 전과정을 수행할 계획이다. Orcelle Wind는 풍력으로 구동되는 총길이 220m의 Pure Car Truck Carrier로, 이론적으로 배출에 영향을 미치는 모든 요인이 조정되는 경우 최대 90%까지 배출 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 전망하고 있다.[118]

118) Wallenius Wilhelmsen(2023.1.15.)(검색일: 2023.9..12.)

〈부록 그림-15〉 Orcelle Wind 프로젝트의 Pure Car Truck Carrier 구상도



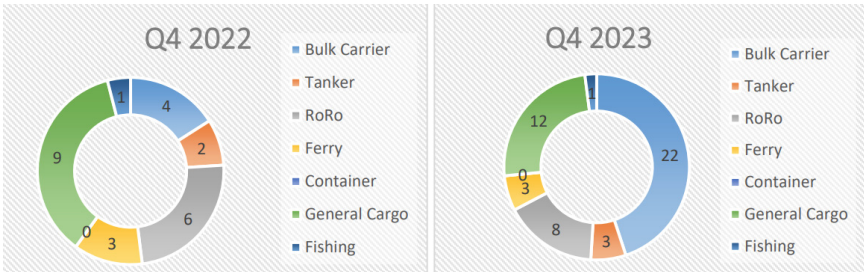
자료: Wallenius Wilhelmsen(2023.1.15.)(검색일: 2023.9..12.)

WASP 돛 시스템의 양력 및 항력 특성은 유익한 추력을 생성할 뿐만 아니라 횡경사력도 생성한다. 선박 선체는 이 새로운 횡력의 균형을 맞춰야 하기 때문에 이를 반영하는 새로운 선박 작동 조건이 고려되어야 한다. 경우에 따라서는 이로 인해 선박 저항이 증가할 수 있으며, 이는 다시 오히려 공기역학적 추력을 상쇄할 수 있다. 하지만, 운영 비용의 저감, 그리고 최근 증대되고 있는 환경규제 압력에 대응하기 위한 방안으로, 선주들이 연료 소비와 배출량을 줄이는 방법을 모색함에 따라 해당 시스템 역시 주목받고 있다.

세계풍력선박협회(IWSA)는 2022년 말까지 풍력 보조 추진 장치가 총 25척의 대형 상업용 선박에 설치될 것으로 예상하고 있으며, 이에 따라서 총 120만 DWT(Ro-Pax/Ro-Ro 선박용 GT)에 51개의 Rigs, 2023년 4분기까지는 총 49척의 선박, 약 330만 DWT에 105개의 Rigs를 포함하는 WAPS가 설치될 것으로 전망하고 있다.[119]

119) Orestis Schinas(2020.02.)

〈부록 그림-16〉 선박 유형 별 WAPS 적용 현황/예정



자료: Orestis Schinas(2020.02.)

Delft & Fraunhofer(2016)는 벌크선과 탱커가 WAPS의 최대 잠재 시장이 될 것으로 예상하고, 벙커 연료의 가격, 선박 속도 등의 다양한 요인을 고려하여 2030년까지 3,700~10,700 세트의 WAPS가 설치·운용될 것으로 전망하였다.[120] 같은 맥락에서, 영국 교통부의 보고서(2019)는 잠재적인 WAPS 시장 규모가 2020년대의 300만 GBP 규모에서 2050년대에 이르러서는 1,900~2,100만 GBP 규모까지 확대될 것으로 예측하고 있다.[121]

(2) 운영적 방안

가. 선박 속도 최적화

선박 속도 최적화는 연료 소비 및 배출을 최소화하기 위해 선박이 항해할 수 있는 최적의 속도를 찾는 작업으로, 선박의 종류, 기상 조건, 항로 등 영향을 미칠 수 있는 여러 요인을 고려하여 가장 적절한 속도를 설정하는 과정으로 정의할 수 있다. 이 과정에서 가능한 경우 속도를 줄이고, 가장 효율적인 프로펠러 피치를 사용하고, 불필요한 조종을 피하는 등 선박의 효율성을 개선하기 위해 다양한 친환경적 운용기술을 적용할 수 있다. 또한 최근 IT 기술의 발전으로, 인공지능(AI), 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅

120) Delft &Cenhofer(2016)
121) UK GOV, Clean Maritime Plan. 2019(2019.7.)(검색일: 2023.7.28.)

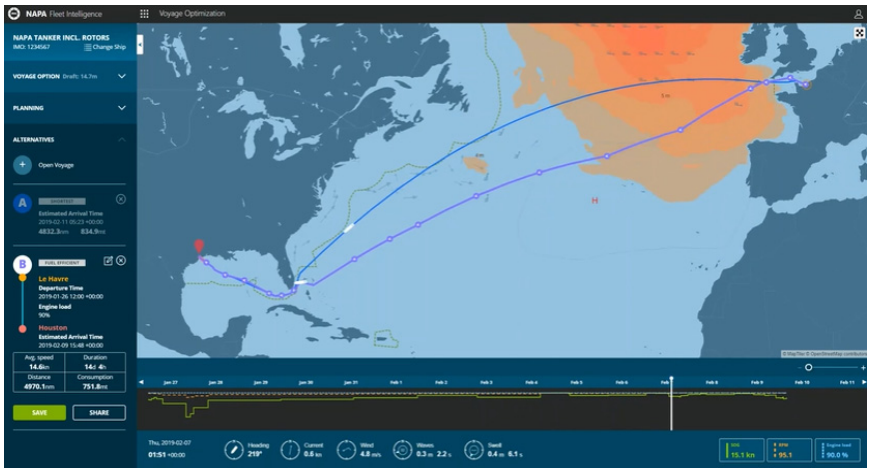
기술 등이 보다 정교한 선박 속도 최적화 소프트웨어를 개발하는 데에 활용되고 있다.

이와 관련하여, 선박의 속도 최적화를 통해 연료 절감을 달성하기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. Baştürk and Erol(2023)은 선박의 화물량과 대양의 바람 상태에 따른 선박의 최적 속도를 결정하여, 연료 소모량 절감을 목표로 연구를 수행하였다. 유전자 알고리즘 방법을 적용하여 Ro-Ro 화물선의 최적 운항 속도를 결정하고, 이를 적용한 대상 선박에서 약 18%의 배출 감소를 확인하였다.[122] Yang et al.(2020)은 해류의 영향을 고려한 속도 최적화 모델을 제안하였다. 전체 항해에 대한 총 연료 소비를 최소화하기 위해 고정된 선박 항로을 운행하는 대상 선박 탱커에 최적화 모형을 적용하여, 총 280시간 항해 동안 2.2%의 연료 절감, 26.12MT의 CO_2 배출저감을 확인하였다.[123]

한편, AI를 활용한 지능형 분석을 수행하는 METIS Cyberspace Technology는 글로벌 데이터 분석·기술 회사인 DTN과 협업하여 AI를 기반으로 하는 최적화 소프트웨어 'METIS Augmented Routing Optimization'을 개발하고 있다. 이는 AI 기반 분석을 통해 선박의 효율성 뿐만 아니라 변화하는 운영 환경을 즉각적으로 반영하여 최적의 속도를 즉각 계산하여 제공하게 된다.[124] 해사 소프트웨어그룹 NAPA 역시 운항 효율성을 개선하기 위한 솔루션으로 'NAPA Voyage Optimization'을 개발하였다. 모든 항로에 대해서 바람, 파도, 해류, 수심 및 날씨를 고려하여 최적의 속도를 계산하여 제공한다. 특히, 소프트웨어 내에서 도착 시간, 정속, RPM, 엔진 부하, 일일 최대 이익, 전체 비용 절감과 같은 특정 목표를 선택할 수 있으며, 이 목표에 적합한 최적의 선택을 사용자에게 제안한다.

122) Baştürk, Selim & Sercan Erol(2023)
123) Yang et al.(2020)
124) ShipNerd(2023)

〈부록 그림-17〉 NAPA Voyage Optimization의 사용자 인터페이스



자료: NAPA(2023)

나. 최적 항로

선박의 항로 최적화는 속도 최적화와 궤를 같이하는 개념으로, 날씨, 해상 조건, 연료 소비, 화물 적재 조건, 화물 유형, 안전 및 규제 등과 같은 다양한 영향 요인를 복합적으로 고려하여, 항해 비용을 줄이고 에너지 효율을 향상하는 동시에 운송의 환경 영향을 완화하기 위한 최적의 항로를 도출하는 과정으로 정의할 수 있다. 선박의 속도 최적화 과정과 마찬가지로, 인공지능(AI), 빅데이터, 클라우드 컴퓨팅 기술 등을 활용하여 최적의 항로를 탐색한다.

이 과정에서 중요하게 활용되고 있는 최적화 기술 중, '가변 속도 알고리즘'은 연료 소비, 배출, 안전 및 규정과 같은 다양한 요소를 기반으로 선박 속도 프로필을 최적화하는 기술이다. '화물 및 밸러스트 최적화'는 연료 소비와 배출량을 줄이기 위해 선상 화물과 밸러스트 수의 분배를 최적화하는 기술로, 밸러스트 적재 여부에 따라 선박은 다르게 작동하며, 민감한 화물

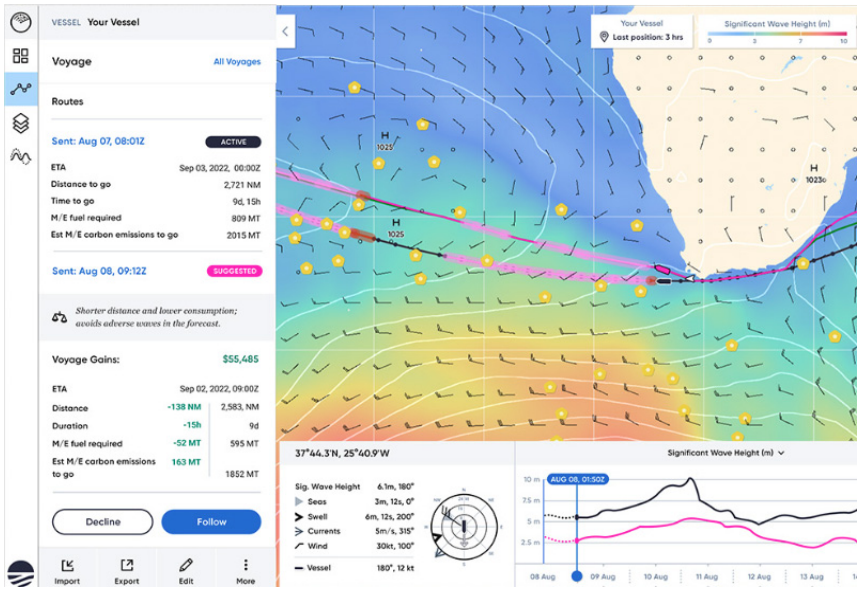
을 적재한 선박은 벌크 화물이 있는 선박의 경로보다 덜 공격적인 경로가 필요하다는 사실에 기반한다. 'Seakeeping'은 거친 바다 조건에서 선박의 안정성과 안전 최적화를 제공한다.

Sofar Ocean의 'Wayfinder'는 해양 네트워크에서 제공하는 기상 정보를 사용하여 경로 최적화 서비스를 제공한다. 수집된 정보를 활용하여 다른 플랫폼에서 제공하는 서비스보다 20%~50% 더 정확한 파도 및 너울 예보를 생성하며, 6시간마다 업데이트되는 일기 예보 정보를 바탕으로 총 1억 개 이상의 경로 옵션을 평가하여, 지속적으로 항로를 최적화한다. CargoSmart가 개발한 'Route Master'는 해상 화물 물류 회사가 과거 3개월부터 향후 6개월까지의 경로를 검색하고 비교할 수 있도록, 과거 운송 경로 및 기록된 여정의 데이터베이스를 제공한다. 또한 운송 시간, 신뢰성, 비용 및 운송업체를 포함하여 제한된 수의 맞춤형 매개변수를 기반으로 경로 계획을 세울 수 있도록 시스템을 지원한다.[125]

Fortune Business Insights(2023)은 선박 속도 최적화와 항로 최적화를 포괄적으로 포함하는 선박 항해 관리 시스템의 시장 규모가 2022년 1억 9,590만 USD에서, 2023년 2억 2,040만 USD, 2030년에는 5억 5,530만 USD로, 연평균 14.1%씩 성장할 것으로 예측하였다. Markets and Markets(2019)은, 선박 교통 관리, 선단 운영, 선단 상태 모니터링 등을 포함하는 '커넥티드 선박'의 글로벌 시장 규모가 2030년까지 연평균 7.4% 성장하여 2030년에는 총 145억 USD에 달할 것으로 전망하고 있다.[126]

125) Safety4sea(2017.3.30.)
126) MarketsandMarkets(2019)(검색일: 2023.9.12.)

〈부록 그림-18〉 Wayfinder의 항로 최적화 시스템(예시)



자료: Sofar(2023)

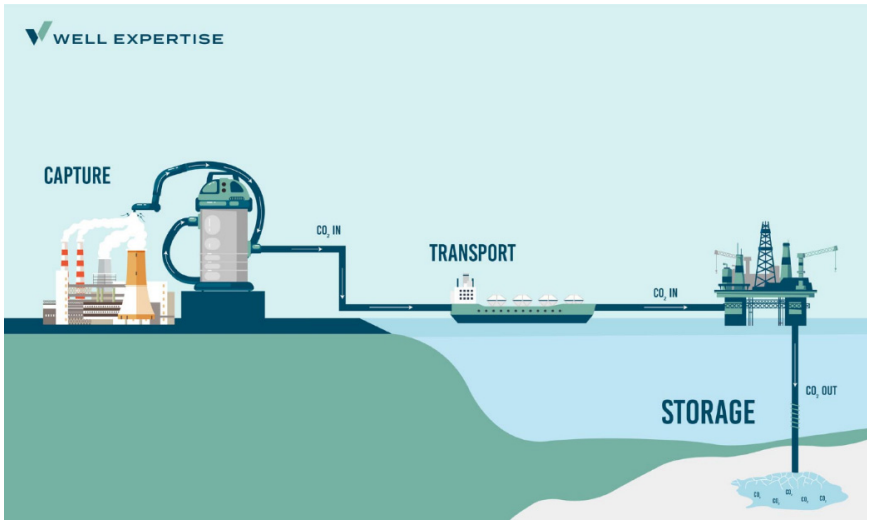
3) 전·후처리

(1) 탄소 배출 포집(OCCS)

탄소 포집은 화석연료 연소 시 발생되는 CO_2를 모으는 기술로, '연소 후 포집 기술(post-combustion technology)'과 '연소 전 포집 기술(pre-combustion technology)'로 분류할 수 있다.[127] 그리고, 포집된 이산화탄소의 활용·저장 여부에 따라서, 포집된 탄소로 제품을 생산하는 '탄소 포집 활용(CCU)' 기술과 탄소를 폐가스전 등 지하에 저장하는 '탄소 포집 저장(CCS)' 기술로 구분한다.

127) 네이버 지식백과(검색일: 2023.9.12.)

〈부록 그림-19〉 탄소포집 및 저장 개념도



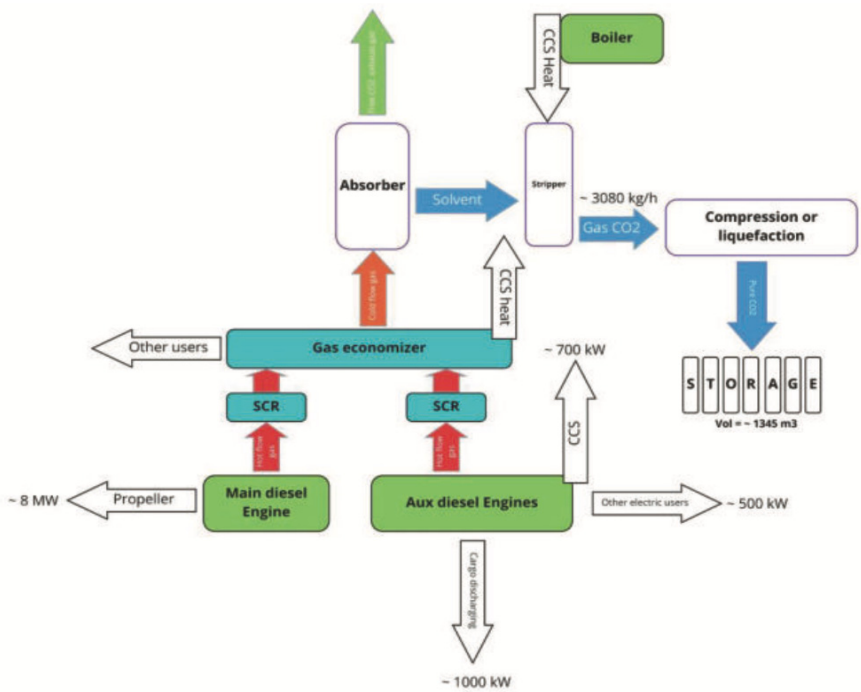
자료: Well Expertise(검색일: 2023.9.12.)

선박의 운항 및 활동으로 발생하는 이산화탄소를 선내에서 포집하는 'Onboard CCS(OCCS)'는 주기와 보기 엔진 및 보일러에서 발생하는 이산화탄소를 포집하여 선상에 저장하고, 이를 항만에 하역하는 개념으로 개발 중이다. 선상 포집의 경우, 육상에서도 주로 사용되는 아민계 용해액을 사용하여 배기가스로부터 이산화탄소를 흡수하고, 보관을 위해서 이 용해액에서 이산화탄소를 재추출한 후 액화시켜 보관하게 된다.

OCCS은 육상 포집기술에 또다른 기술적 난이도가 추가되어, 현재의 기술 수준에서는 현실적 대안으로 선택하기 어려운 상황이다. 우선, 선박의 엔진에서 발생하는 배기가스 내에 이산화탄소 함유 비중이 상대적으로 작아, 포집 효율을 올리기 위해서는 상대적으로 더 많은 에너지와 설비가 필요하다. 이를 보완하기 위해 공기에 산소 함량을 높이는 방법을 사용할 수 있으나, 포집 효율과 양을 더 크게 하려면 더 많은 열에너지를 투입해야 하고, 이산화탄소를 액화시키는 에너지 역시 더욱 많이 필요하게 된다. 이

러한 이유로, 전체적인 연료 소모량이 증가하고 이에 따른 이산화탄소 배출의 증가로, 실제로 100% 포집율을 달성하는 것이 불가능하다. 그리고, 포집된 이산화탄소는 선상에 액체 상태로 보관해야 하는데, 이산화탄소의 중량이 사용된 연료양의 2.5배에서 3.2배에 달하는 데다, 포집과 저장에 필요한 설비 역시 중량과 체적이 매우 크기 때문에, 선박 내 설치·운용이 현실적으로 어렵다.

〈부록 그림-20〉 선상 탄소포집 및 저장 (OCCS)의 개념도



자료: Tabakoli et al.(2022)

미츠비시 중공업은 2029년 최종 상용화(TRL 9)를 목표로, 아민 용해제 기반 시스템을 개발하고 있으며, Wartisila 역시 같은 방식의 시스템을 2025년을 목표시한으로 개발하고 있다. DNV는 OCCS의 상용화 시점을

2030년으로 전망하고 있으며, 로이드선급은 현재 CCS의 기술 수준(TRL), 투자 준비 수준(IRL)과 사회·시장의 수용 수준(CRL)을 수치화하여, OCCS의 TRL은 6/9, IRL은 2/6, CRL은 3/6으로 평가하였다. 국내에서는 대우조선해양이 2022년 10월 OCCS 장비를 실제 LNG운반선에 탑재하여 성능 검증을 성공적으로 수행하였다. 하지만, 일반적인 용해제를 활용한 방식이 아니고 화학반응을 이용하여 탄산칼슘의 형태로 저장하는 방식으로 수행하였기 때문에, 이후 하역 및 저장과정에 대한 불확실성을 해결하지 못한 상태이다.

〈부록 그림-21〉 CCS의 기술, 투자 준비, 시장의 준비 수준 평가

		Supply chain stage		
	Scored out of	Capture and onboard storage	Transportation	Conversion and permanent storage
TRL rating	9	6	5	8
IRL rating	6	2	2	3
CRL rating	6	3	2	2

자료: LR Maritime Decarbonisation Hub(2023.4.13.), p. 9.

OCCS의 시장은 대체 연료 시장의 발전과 기술적 한계에 대한 극복 여부에 매우 밀접하게 연계되어 있다. 현재는 OCCS의 탄소 회피 비용이 톤당 200-300 USD 정도로,[128] 추후 다른 연료의 가격과 비교하여 이 비용의 비교우위의 정도에 따라 시장 점유율이 결정될 것으로 예상된다. 또한, 기술적 한계로 인해 100% 회수가 불가능한 점을 어떻게 해결할 것인지도 향후 시장 형성에 영향을 줄 것으로 보인다.

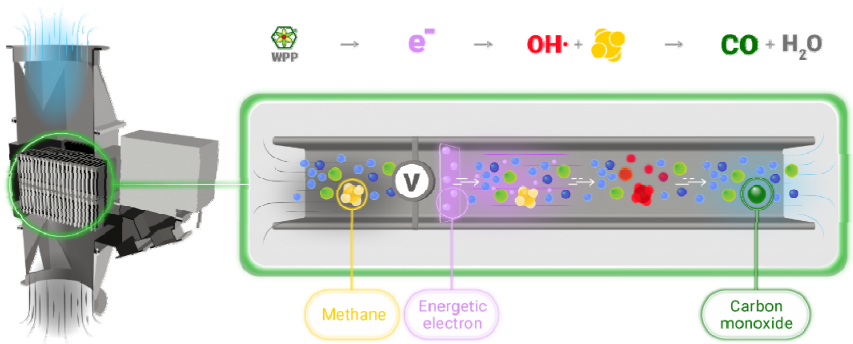
128) Mæsk Mc-Kinney Møller Center(2022.10.30.)(검색일: 2023.10.17.), p. 10.

(2) 메탄가스 후처리

천연가스 및 합성 천연가스를 내연기관의 연료로 쓰는 경우, 연소실 내 불완전 연소로 주성분인 메탄이 배기가스에 소량 섞여서 배출된다. 메탄은 이산화탄소 대비 지구온난화 기여 정도가 약 20배 높은 온실가스로, 소량이라 하더라도 그 영향은 상당하므로 이에 대한 대책이 필요하다. 메탄 가스를 줄이는 방법은 크게 세 가지로 구분할 수 있는데, 엔진의 자체 연소를 개선하거나, 후처리 개념의 기술, 또는 시스템 솔루션을 적용할 수 있다.

우선, 엔진의 연소방식으로 디젤 사이클을 택하여 실린더에 고압의 가스를 직접 주입하여 연소 효율을 증가시키거나, 배기가스 순환(EGR)을 통해 재연소하는 방법, 연소 제어 튜닝이나 부품 개선을 통해 엔진의 자체 연소를 개선할 수 있다. 배출 후 처리 방식으로는, 산화 촉매를 사용하여 메탄을 산화시키거나 고전압 플라즈마를 이용하여 메탄을 환원시키는 방식을 적용할 수 있다. 마지막으로, 시스템 솔루션을 통해 엔진의 평균 로드를 올리거나 배터리나 육상 전력의 사용으로 엔진 자체의 사용을 줄이는 방법 역시 적용할 수 있다.

〈부록 그림-22〉 플라즈마 환원 방식 개념도



자료: Daphane Technology(검색일: 2023. 10.17.)

현재, 주로 엔진의 기술적 개선을 통해 메탄 슬립의 배출을 최소화하는 방식 위주로 기술 개발이 이루어지고 있다.[129] 후처리 방식은 아직 대부분 파일럿 테스트 중으로, MAN ES가 4행정 이중연료 엔진에 산화 촉매장치를 개발하여 시험 중에 있으며, 2025년 출시 예정이다. 그 외에도 Topsoe Catalyst, 히다치 조선이 각각 2024년, 2026년 출시 목표로 해당 기술을 개발, 실증 테스트 중이다.[130] Daphane Technolgy는 플라즈마 방식의 'PureSlip' 제품을 출시하였다.

아직까지는 메탄 슬립에 대한 규제가 없고, 실제 절감에 대한 인센티브 역시 없기 때문에, 시장 자체가 형성되지 않고 있다. 하지만, 향후 규제가 도입되고 천연가스의 연료 시장 점유율이 상승하게 되면, 수요가 점차 증가할 것으로 보인다.

2. 항만 부문 탄소중립 과학기술

1) 에너지 전환

(1) 대체 에너지(생산)

가. 태양광

태양광 발전(PV; Photovoltaics)은 패널을 통해 햇빛을 전기로 직접 변환하는 방식으로, 항만에서 사용되는 가장 일반적인 유형의 태양광 기술이며 시설 및 건물의 옥상, 주차장 및 기타 햇빛이 충분한 곳에 설치할 수 있다. 특히, CSP(Concentrating Solar Power)는 대규모 발전을 위한 유망한 기술로, 거울이나 렌즈를 사용하여 햇빛을 수신기에 집중시킨 다음

129) Ushakov et al.(2019)
130) Mæsk Mc-Kinney Møller Center(2022.9.10.)(검색일: 2023.10.17.), p. 13.

열을 발생시키며, 열은 전기를 생성하거나 다른 목적을 위한 열에너지를 제공하는 데에 사용할 수 있다.

〈부록 그림-23〉 런던 Gateway항에 설치된 PV solar panel(예시)



자료: Ship Technology(2023.5.11.)(검색일: 2023.10.17.)

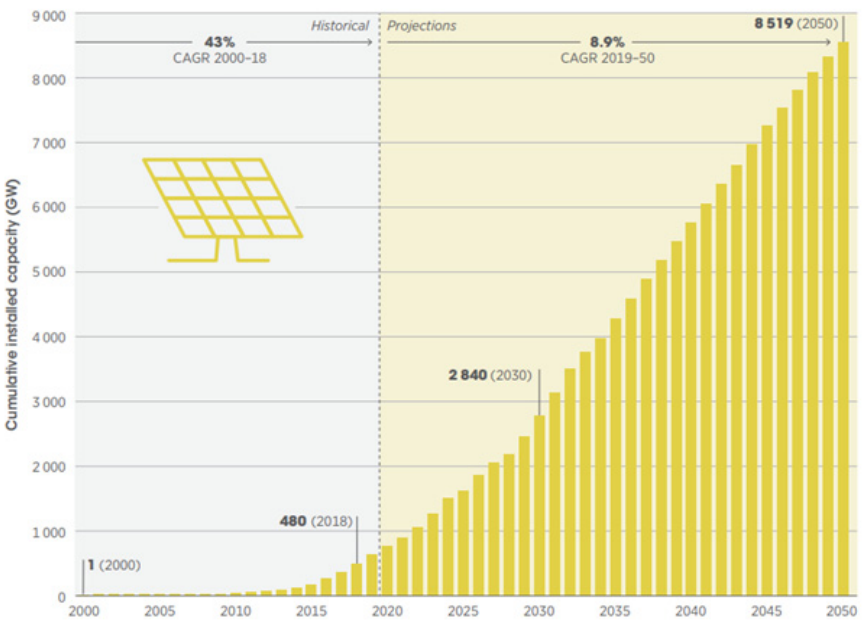
항구에서 사용되는 특정 태양광 기술은 항구가 받는 햇빛의 양, 기술 비용 및 항구의 요구 사항을 포함한 여러 요인에 따라 달라질 수 있으나, 항구의 환경적 영향을 줄이고 에너지 비용을 절감할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.

태양광 자체 기술 시장은 향후 몇 년 동안 계속해서 급격하게 성장할 것으로 예상된다. 특히 태양광(PV) 발전 설비는 재생에너지 부문에서 가장 지배적인 에너지 전환방식으로, 2018년 말까지 태양광 PV 설치 및 그리드 연결형 태양광 PV 용량은 480GW에 도달하여 전년 대비 20% 성장했으며, 2000년 이후 거의 43%에 가까운 연평균 성장률을 기록하고 있다.[131]

131) Gielen, Dolf, et al.(2019)

풍부한 자원 가용성, 상당한 시장 잠재력에 경쟁력 있는 비용으로, 태양광 기술은 향후 10년 동안 다양한 지역·분야에서 재생에너지 기술시장 성장의 원동력이 될 것으로 예상되고 있다. 국제재생에너지기구(IRENA)의 'Energy roadmap(2019)' 분석에 따르면, 태양광 PV 발전 설비의 용량은 향후 10년 동안 약 6배 규모로 확대되어, 2030년까지 2,840GW, 2050년까지는 8,519GW(2018년 대비 18배 증가)로 급증할 수 있다. 또한, 전 세계적으로 2050년까지 총 태양광 PV 용량의 약 60%가 유틸리티 규모, 나머지 40%는 옥상 설치로 구성될 것으로 예측하고 있다.[132]

〈부록 그림-24〉 2018년 대비 태양광 누적용량



자료: Gielen, Dolf, et al.(2019), p. 22.

132) IRENA(2019.11.)(검색일: 2023.10.17.), p. 9.

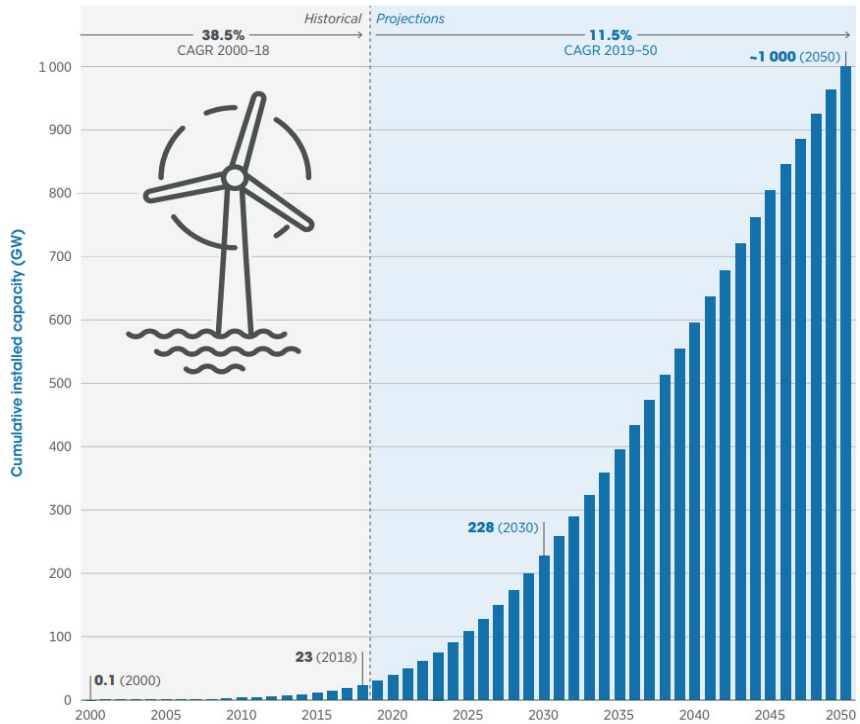
나. 풍력

항만에서 풍력 기술의 활용 양상은 해상풍력 터빈(Offshore wind turbine)과 육상풍력 터빈(Onshore wind turbine)으로 구분할 수 있다. 일반적으로, 해상 풍력 터빈은 육상풍력 터빈보다 규모가 크고, 제조, 건설 및 운영 등을 지원하기 위해 별도의 항만시설이 필요하다.[133] 또한, 육상풍력 터빈보다 상대적으로 큰 비용이 요구됨에도 더 많은 전력을 생산할 수 있고 소음이 적다는 장점이 있는 반면, 설치 및 유지 관리가 어렵다는 단점이 있다. 육상풍력 터빈 (Onshore wind turbine)은 비교적 저렴하고 설치가 쉬우나, 소음이 심하고 미관상으로 좋지 않아 항만 내 또는 인근 설치가 쉽지 않다.

하지만, 부유식 해상 풍력 플랫폼, 하이브리드 시스템, 디지털화 및 강화된 통합 그리드와 같은 새로운 설계·기술의 출현으로 지속적인 기술 혁신을 추진하고 있으며,[134] 네덜란드 로테르담항은 이를 도입·적용하여 100만 가구에 전력을 공급할 수 있는 70MW급 해상풍력 발전단지를 설치·운용하고 있다.[135] 또한, IRENA(2019.10.)는 전세계 해상풍력 설치용량 규모가 2018년 23GW에서 2030년 약 228GW, 2050년에는 약 1,000GW까지 증가할 것으로 전망하고 있으며, 이는 전체 풍력 용량의 약 17% 규모이다.[136]

133) Global Wind Energy Council(2016)(검색일: 2023.10.17.), p. 30.
134) Energy Efficiency&Renewable Energy(2022.8.16.)(검색일: 2023.10.17.), p. 70.
135) The Times(2022.8.28.)(검색일: 2023.10.17.)
136) IRENA(2019.10.)(검색일: 2023.9.17.), p. 40

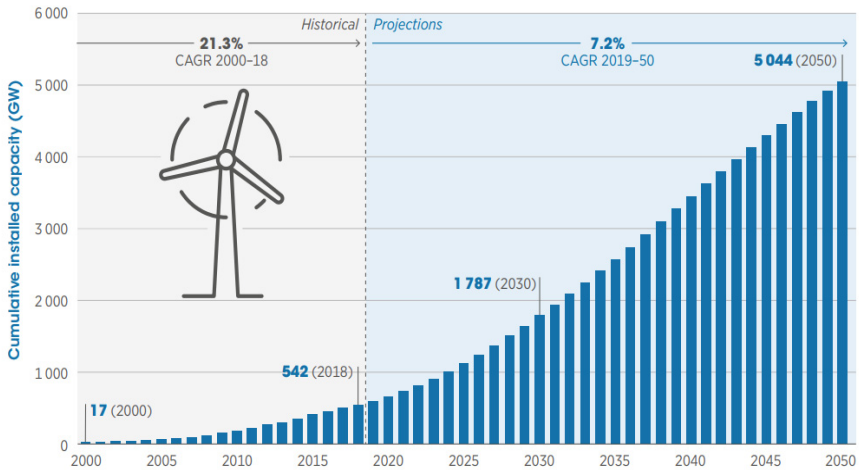
〈부록 그림-25〉 해상풍력 용량 규모 전망



자료: IRENA, Future of wind. 2019.p.40.

육상풍력 발전기술은 풍부한 자원, 시장 잠재력 및 비용 효율성으로 인해 다양한 지역·분야에서 재생에너지 시장 성장의 주요 동인이 될 것으로 예상된다. IRENA(2019)에 따르면, 육상풍력 설치용량은 향후 30년 동안 연평균 7% 이상의 성장으로, 2018년(542GW)에 비해 2030년까지 약 3배(1,787GW), 2050년까지 10배(5,044GW) 정도까지 도달할 것으로 전망된다. 이 과정에서 요구되는 토지 면적은 1,008,800~1,664,520km^2, 총 파괴 면적은 50,440~83,226 km^{2}으로 추정하고 있으며, 이는 전체 토지 및 사용 가능한 잠재적 풍력 자원에 비해 육상풍력 설비가 상대적으로 작은 설치 공간을 차지한다는 것을 의미한다.[137]

〈부록 그림-26〉 2050년까지 육상 풍력 누적 설치 용량 예상 추정 그래프



자료: IRENA(2019.10.)(검색일: 2023.9.17.), p. 25.

(2) 에너지 연계

가. 분산전원 기술

항만의 에너지 그리드는 항만 지역의 전력 생산, 송전, 배전 및 소비가 상호 연결된 네트워크를 의미하며, 기존의 화석 연료, 재생 가능 에너지 또는 그리드에서 부두에 있는 선박까지의 육상 전력 공급과 같은 다양한 전력원이 포함될 수 있다.[138] 이는 항구의 에너지 효율성, 안정성, 보안 및 지속 가능성을 개선하기 위한 방안으로, 에너지 저장 시스템, 스마트 그리드(Smart-grid) 또는 마이크로그리드(Microgrid) 등 다양한 유형의 분산 전원 기술을 적용할 수 있다. 구체적으로, 스마트 그리드 기술은 항만 에너지 그리드의 효율성과 신뢰성을 개선하는 데 사용되고 있으며 센서와 통신 기술을 사용하여 그리드의 전력 흐름을 모니터링하고 제어한다. 이를 통해 피크 수요를 줄이고 전력 품질을 개선하는 한편, 중단에 대한 그리드의 탄

137) IRENA(2019.10.)(검색일: 2023.9.17.)
138) Gov UK(2023.7.5.)

력성을 높일 수 있다. 또한, 마이크로그리드는 중앙 그리드와 독립적으로 작동할 수 있는 소형 독립형 전력 그리드로서, 정전 시 백업 전원을 제공하거나 중앙 그리드에서 중요한 항만활동을 격리하기 위한 방안으로 사용되고 있다.[139]

항만의 에너지를 효율적으로 분배·제어하기 위한 방안으로, 주요 항만을 중심으로 다양한 분산전원 기반의 마이크로그리드 구축사업을 계획·추진 중에 있다. 미국 롱비치 항만(POLB; Port of Long Beach)은 2018년, 항만의 에너지 관리 및 효율성을 향상시키기 위한 'POLB 마이크로그리드 프로젝트'에 착수하였다. 300kW 태양광 PV 어레이, 330kW 고정식 배터리 및 250kW 휴대용 배터리를 포함하는 마이크로그리드 시스템을 기반으로, 항구, 공항, 철도, 폐수 처리 시설 및 매립지에서 에너지 소비를 최적화함으로써 전력 사용을 효율적으로 관리하고 효과적인 에너지 부하 관리를 도모하고 있다.[140] 이를 통해 항만의 에너지 수요-공급체계의 효율 및 비용 구조를 개선함으로써 안정적인 서비스를 보장하는 한편, 터미널 운영에 의한 환경 영향을 최소화할 수 있다. LA항만(POLA)은 항만의 온실가스 배출을 완전히 제로화하고, 이 과정에서 대상 항만의 에너지 수요를 100% 재생에너지로 전환하기 위한 'Green Omni Terminal' 프로젝트의 일환으로 마이크로그리드 시스템을 개발·도입하였다. 이는 1.03MW 태양광 PV 어레이와 2.6MWh 배터리 저장 시스템, 양방향 충전 설비, 에너지 관리 시스템, 그리고 Simens의 그리드 컨트롤러 'SICAM' 등으로 구성된 마이크로그리드 시스템으로, 정전 시 또는 메인 그리드에서 분리된 경우에도 자율적으로 작동할 수 있다.[141]

139) Cui, X., et al.(2023)
140) Microgrid Knowledge(2022.3.15.)(검색일: 2023.10.17.)
141) Microgrid Knowledge(2018.9.13.)(검색일: 2023.10.17.)

〈부록 그림-27〉 LA항만(POLA)의 Green Omni Terminal



자료: Business Wire(2016.5.26.)(검색일: 2023. 10.17.)

항만의 분산전원 기술 중 마이크로그리드의 개념은 기존의 그리드와는 별개로 항만의 에너지 수요를 재생에너지로 생산한 에너지/전력으로 전환하는 과정에서, 재생에너지의 가변성을 효과적으로 조절하여 안정적으로 신재생에너지 설치용량을 확장할 수 있는 솔루션으로 최근 주목받고 있다.

(3) 대체 에너지(소비, 활용)

가. 전력/배터리

항만의 전기화는 항만의 하역 및 이송, 저장과정, 즉 선박 및 하역·이송 장비 및 시설 등을 전기 구동방식으로 전환하거나, 이를 위한 육상 전원 공급 장치, 해안 간 충전, 선박 간 충전 또는 선박 간 에너지 전송 등,[142] 재생에너지 기반으로 공급된 전력과 이를 활용하기 위한 전기 추진·구동, 배터리 기술을 포함한다.

142) KEMPOWER(2023.7.17.)(검색일: 2023.10.17.)

이를 현장에서 구현하기 위해서는 전력 인프라 요구 사항에 상당한 영향을 미치게 된다. 특히, 항만 내에서도 상이한 수요에 따라서 충전소와 저장 및 연결 인프라 등을 구축해야 한다.[143] 특히, 포괄적인 육상 충전 인프라, 부두에서 선박까지의 충전 기술 및 관련 전력망, 이와 관련한 인프라 역시 필수적이다. 현재, 육상 충전에 사용되는 충전기술 유형은 버스바(Busbars) 시스템에 사용되는 전기 유형에 따라 AC 또는 DC 범주로 다음과 같이 분류할 수 있다.[144]

〈부록 표-3〉 육상 충전 기술의 구분

구 분	내 용
IEC 60092-201	• AC/DC 분배 시스템, 접지, 보호, 모터 회로 등을 포함하는 표준 전기 시스템 내의 일반 설계 요소를 기술
IEC 60092-503	• AC 공급 시스템은 1kV ~ 36kV 범위의 AC 공급 시스템에 중점; 절연, 전기 보호, 고전압 장비, 변압기, 리액터, 컨버터 등과 같은 측면을 기술
IEC/IEEE 8005-1	• 고전압 연결 시스템(HVSC; High Voltage Shore Connection Systems); 온보드 및 육상 애플리케이션 모두를 위한 HVSC 시스템의 설계, 테스트 및 설치 • 고전압은 1MVA 이상을 요구하는 선박을 지칭 • 주제는 고전압 배전 시스템, 해안과 선박 간 연결, 변압기/리액터, 제어 시스템, 모니터링, 연동 및 전력 관리를 포함
IEC PAS 8005-2	• 저전압 연결 시스템(LVSC; Low Voltage Shore Connection Systems); HVSC 시스템과 유사; 최대 1MVA가 필요한 선박에 적용 • 고전압 배전, 해안과 선박 간 연결, 변압기/리액터, 제어 시스템, 모니터링, 연동 및 전력 관리와 같은 측면을 기술

자료: 저자 작성

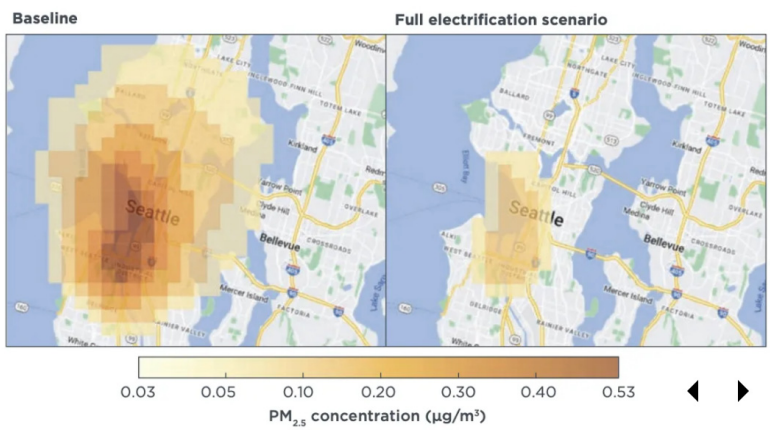
또한, 부두에 정박해 있는 동안 선박이 보조엔진이나 보일러 대신 육상의 전원을 연결하여 사용하거나 화물 처리 장비나 시설 등을 전기 작동방식으로 전환함으로써, 직간접 배출 개념에서 배출을 크게 감소하거나 심지

143) DNV(2020)(검색일: 2023.8.17.)
144) Feng, X. et al.(2022.7.), p. 7.

어 배출제로에 지향할 수 있으며, 유지·보수 비용을 절감하는 등, 항만의 친환경 전환은 물론 운영 효율의 개선, 이로 인한 비용의 절감을 기대할 수 있기 때문에, 최근 많은 항만이 이를 추진하고 있다.

이와 관련하여, 국제 청정운송 협의회(ICCT, 2023)의 시뮬레이션에 따르면 미국 시애틀항의 주요 배출원, 즉 국제항행 선박(OGV)과 그 외 선박이 정박 시 100% 육상 전원을 이용하는 경우, $PM_{2.5}$ 배출이 기존(2019년 기준) 대비 75% 저감하는 것으로 나타났으며 이에 따른 대기질 개선으로 인해 지역 주민의 조기 사망률이 유의미하게 감소하는 등, 연간 2,700만 USD 상당의 보건적 편익이 산정되었다.[145]

〈부록 그림-28〉 미국 시애틀 항, 전기화에 따른 연평균 PM2.5 농도 변화

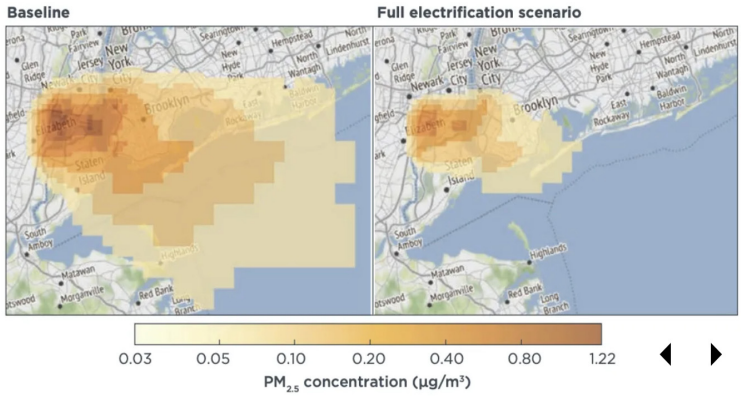


자료: ICCT(2023.2.)(검색일: 2023.8.17.)

같은 연구에서, 뉴욕/뉴저지항에 대해서는 선박에 이어 항만 진출입 트럭까지 전기화(Full-electrification)하는 경우 $PM_{2.5}$ 배출이 기존(2019년 기준) 대비 69% 저감하고 이에 따른 보건적 편익은 연간 최소 1억 5천만 USD 상당으로 산정되었다.[146]

145) ICCT(2023.2.)(검색일: 2023.8.17.), pp. 6-8.

〈부록 그림-29〉 미국 뉴욕/뉴저지 항, 전기화에 따른 연평균 PM2.5 농도 변화



자료: ICCT(2023.2.)(검색일: 2023.8.17.)

그 외에도, RTG(Rubber-tyred gantry) 크레인은 항구에서 ISO 규격 컨테이너를 지상에 적재하기 위해 사용되는 이동형 갠트리 크레인으로, 기존에는 100~600kw의 디젤 발전기 시스템을 사용하고 있다. 디젤 동력 RTG는 시간당 최대 38L/h의 디젤 연료를 소모하며, 항구에서 가장 CO_2를 많이 배출하는 장비 중 하나이다.[147] 전기 RTG 크레인은 장비에 동력을 공급하기 위해 디젤 엔진 대신 전기 공급 시스템을 사용하여 작동하며, 전기 공급 방식에 따라 크게 2가지 방식으로 구분할 수 있다.

우선, '모터 구동 케이블 릴 방식(Motor driven cable reel)'은 전동식 케이블 릴과 전기를 공급하는 변압기가 크레인에 설치된다. 일반적으로 케이블은 컨테이너 적재 구역의 인근에 보관되며, 이 케이블은 항구의 주전원이 공급되는 소켓에 연결되어 전기를 공급한다. '컨덕터 바 방식(Conductor bar)'은 일반적으로 컨덕터 레일을 지상에 볼트로 고정된 스틸 구조물의 상부에 설치하며, 전기 에너지는 RTG 크레인에 부착된 트롤리를 사용하여 컨덕터 레일을 통해 공급된다.

146) ICCT(2023.2.)(검색일: 2023.8.17.), pp. 9-11.
147) Romo, L. et al.(2009)

〈부록 그림-30〉 전기 RTG의 전력 공급 방식

<모터 구동 케이블 릴 방식> <컨덕터 바>



자료: KONECRANESI(검색일: 2023.8.17.).(좌), Conductix-Wamfler(검색일: 2023.8.17.)(우)

전기 RTG 크레인은 이동 또는 작업이 필요할 때만 전력을 끌어오는 방식으로, 디젤 연료 사용을 95%까지 절감할 수 있다. 관련 연구결과에 따르면, 한 대의 전기 RTG는 기존의 디젤 동력 RTG 대비, CO_2 배출을 67% 저감하고, 동시에 에너지 효율은 86% 개선하는 것으로 나타났다.[148] 또한 Fahdi, S. 외(2019)에 따르면, 홍콩 항구의 운영사인 HIT and Modern Terminals Ltd는 그들이 운영하는 항구내 70%의 RTG를 디젤 타입에서 전기 타입으로 변경하였으며, 이를 태양광 발전 시스템과 연계하여 운용한 결과 연간 약 120,000kW의 에너지를 절감하였다.[149] 일본 도쿄항은 컨테이너 처리 장비에서 발생하는 CO_2 배출을 줄이기 위해 회생 전력을 사용하는 방식과 전기 방식의 RTG를 도입하였고, 이를 통해 온실가스 배출을 기존 대비 40%까지 저감하였다. 중국 상하이항은 중국 교통부가 2008년 발표한 「항만 에너지 절약 및 CO2 제한에 대한 지침」을 이행하기 위해 수립한 「저에너지 소비 및 고효율 컨테이너 취급 장비로의 전환 전략」에 따라서, 2015년까지 모든 RTG 크레인을 전기 방식으로 변경할 예정이다.

148) Yang & Chang(2013)
149) Fahdi, ELKHECHAFI & HACHIMI(2019)

Yang & Chang(2013)의 RTG와 E-RTG의 자본 회수 기간과 성능을 비교 분석한 연구결과에 따르면, 전기 RTG로 전환 시 연간 약 1,890,000 USD를 절감할 수 있으며, 투자 회수 기간은 약 2.2년에 불과한 것으로 나타났다.[150] 이는 항만의 친환경 규제 이행 측면 뿐 아니라, 국제유가 상승에 따른 운영비 부담이 증가하는 경우에도 전기 RTG로의 전환이 항만 물류산업이 선택할 수 있는 주류 대안이 될 수 있음을 시사한다.

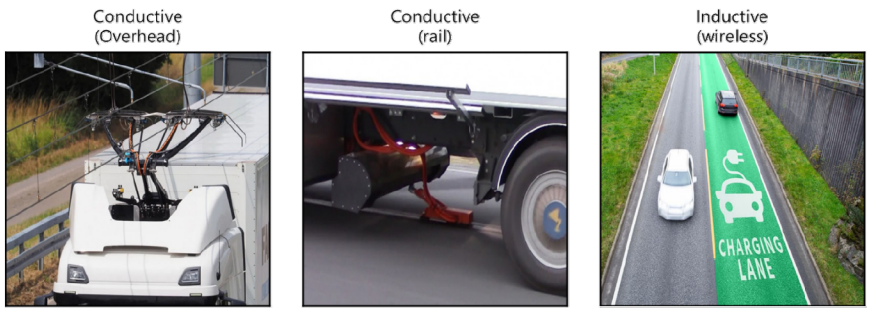
미국 조지아주 항만청(GPA; Georgia Ports Authority)은 역내 컨테이너 항만의 크레인을 전기화하는 사업을 추진하였다. 이에 따라, 작동 시간당 약 18분 동안 자체 동력을 공급하며 기존 디젤 방식보다 85% 정도의 비용 절감 및 배출저감 효과를 확인하였다. 완전무인 자동화 터미널인 롱비치 컨테이너 터미널(LBCT; Long Beach Container Terminal)역시 크레인을 전기화하여 미세먼지 배출을 88% 저감하였으며, 이를 AI 기반 컨테이너 분류 시스템에 통합적으로 컨테이너 하역과정의 효율성을 개선하고, 이에 따라서 매년 약 1천만 kWh의 에너지 절감 효과를 확인하였다.

한편, 기존에는 배터리 기술의 기술적인 제약, 즉 높은 에너지 요구 사항과 낮은 에너지 밀도로 인해, 대형 트럭에는 적합하지 않은 것으로 여겨졌다.[151] 하지만, 최근 배터리 기술의 발전으로 추후 배터리 가격이 크게 하락할 것으로 예상되는 만큼 대형 전기 트럭의 수명 주기 비용도 대형 디젤 트럭보다 낮아질 것으로 예상되고 있다. 또한 시장에서 요구하는 특정 기술적 요구사항 역시, 혁신적인 틈새기술 등을 적용하여 항만에서 적용 가능한 수준으로 현실화되고 있다. 예를 들어, 높은 배터리 용량의 수요에 대한 기술적 대안은 배터리 기술의 고도화를 통해 용량을 향상하는 방법 외에도, '전기 도로 시스템(ERS; Electric road system)'과 같은 기술을 적용하여 해결할 수 있다. 전기 도로 시스템은 도로 위의 차량에 동적 동력 전달을

150) Yang & Chang(2013)
151) Mareev, Becker, & Sauer(2017)

수행할 수 있는 전기 도로로, 공간적 범위가 제한적이며, 일정한 루트를 반복적으로 순환하는 항만, 특히 항만 내 육상구역의 특성 상 기술적 난이도 대비 그 효용이 매우 클 수 있다. Connolly(2017)는 이와 관련하여, 차량의 저용량 배터리와 결합된 전기 도로 시스템이 대용량 배터리를 사용하는 차량보다 향후 더 저렴한 솔루션이 될 것이라고 지적한 바 있다.[152]

〈부록 그림-31〉 전기 도로 시스템 적용 방식



자료: Balkan Green Energy News(2021.7.1.)(검색일: 2023.8.17.)(좌), Fuelcard Services(2023.6.16.)(검색일: 2023.8.17.)(중), Fuelcard Services(2023.6.16.)(검색일: 2023.8.17.)(우)

또한, 충전 인프라 역시 화물트럭과 하역장비의 전기화를 위한 전제 조건이다. 전기 트럭과 하역장비는 높은 충전 출력을 필요로 하므로, 여러 대가 동시에 충전하는 경우 항만의 전력망에 상당한 영향을 미친다. 따라서 항만 내 충전소를 설치하기 위해서는 전기 트럭 및 하역장비 등의 잠재적 경로를 기반으로 하는 시공간 차원의 전력수요 분석이 필수적이다.

앞서 살펴본 바와 같이 항만의 에너지, 특히 전기화된 에너지 수요의 폭발적 증가에 대응하기 위해, '에너지 저장 시스템(ESS; Energy storage system)'의 필요성 역시 지속적으로 증대되고 있다. 현재 가장 각광받고 있는 ESS 중 하나인 '울트라커패시터 ESS(UCES; Ultracapacitor energy

152) Connolly, D.(2017)

storage)'는 전기 화학적 에너지 저장 장치의 한 종류로, 콘덴서와 배터리의 장점을 결합한 기술이다. 항만에서 사용되는 크레인 작업에서 발생하는 갑작스러운 전력들을 처리하는데 적합한 ESS 방식으로, 기존 콘덴서보다 더 높은 전력 밀도, 빠른 충전 및 방전 속도, 긴 수명이 장점이다.[153] UCES의 용량과 성능은 재료 과학, 전력 전자 및 기타 기술의 발전에 따라 다양한 산업별 용도에 맞게 조정될 수 있으나, 기존 배터리보다 비용이 비싸고 안전하지 않다는 기술적 이슈가 있어서 추가적인 연구 개발이 요구된다.[154] 또 다른 ESS인 '플라이휠 ESS(FES; Flywheel energy storages)'는 에너지를 운동에너지 형태로 저장하며, 충전 및 방전 주기 동안 모터와 발전기 역할을 모두 수행할 수 있다. FES는 약 100만 사이클 또는 20년의 수명으로 상대적으로 긴 수명과 높은 전력 밀도, 환경 영향 최소화, 빠른 응답 및 전압 안전성 등 높은 전력 품질 등의 장점을 가지고 있다.[155]

특히, 최근 수요가 커지고 있는 항만에 대해서는 주로 두 개 이상의 ESS 방식을 결합하여 단점을 보완하고 장점을 극대화시키는 다양한 '하이브리드 에너지 저장 시스템(HESS)' 구성이 제안되고 있다. 항만의 피크 전력 수요에 대응하기 위해 BES 또는 FES와 UCES를 결합하거나, UCES와 BES를 결합한 사례가 대표적이다.[156]

ESS는 신·재생 에너지의 보급과 본격적인 탄소중립 이행 트랙의 전개에 따라서 시장 수요가 최근 크게 성장하고 있으며, 전력 품질 개선, 전력 부하 관리, 재생 에너지 출력 안정화, 전기 요금 절감, 비상 전력 공급 등 다양한 용도로 활용될 수 있다. ESS의 세계시장 규모는 2021년 기준으로 약 22조원이며, 2026년에는 약 120조원에 달할 것으로 전망된다.[157] 국내

153) Mostafa et al.(2022.1.25.)
154) Smith, S. C., & Sen, P. K.(2008,9.)
155) Li, X., & Palazzolo, A.(2022)
156) Kermani et al.(2022)
157) 머니투데이(2021.7.24.)

시장 규모는 ESS 특례 요금제, 공공기관 ESS 설치 의무화, 재생에너지 연계 ESS의 공급인증서 가중치 확대 등 정부의 ESS 지원 정책 시행으로 수요가 증가하고 있으며, 2018년 상반기 기준 1.8GWh로 이는 전년 대비 20배 이상 증가한 규모리며, 향후 연간 3.7GWh씩 설치될 전망이다.

나. 수소

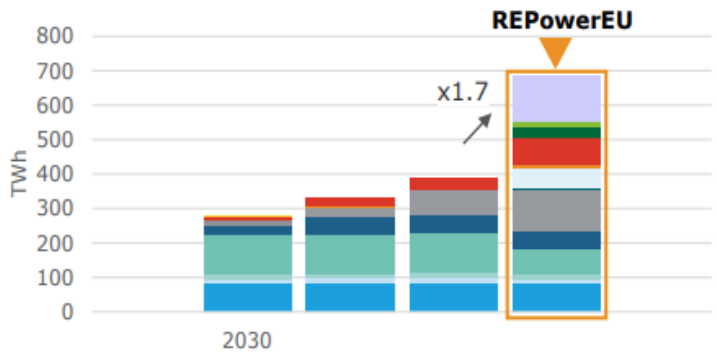
수소는 연소에 의한 구동 또는 연료전지 방식에 의한 전력 에너지화를 통해 항만의 다양한 활동 및 운영을 배출제로 또는 NEZ(Near Emission-Zero) 방식으로 전환 운용하는 데에 매우 중요하게 사용할 수 있는 에너지 운반체이다. 일반적으로 재생 가능한 전기에너지와 천연 가스 또는 기타 저탄소 공급원 등에서 수소를 생산할 수 있으며, 다양한 형태로[158] 수소를 저장하거나 분배하여 항만의 각종 장비 및 차량 등에 수소를 사용할 수 있다.[159]

수소 중에서도 특히 그린 수소(Green Hydrogen)는 유럽연합의 에너지 전환 정책에서, 탈탄소화하기 어려운 산업(예: 정유, 암모니아, 철강, 화학 등) 및 운송(중장비 도로 화물, 운송, 항공 등) 부문에서 기존의 화석 연료를 대체하는 유력 대안으로 주목받고 있다.[160] 이와 관련하여, 현재의 연구 및 혁신단계를 국제적 차원의 생산 및 인프라 구축 단계로 확장하기 위한 「EU 수소전략(EU Hydrogen strategy, 2020)」는 2020~2024년까지 최대 1Mt(33TWh)의 재생 가능한 수소를 생산할 수 있는 최소 6GW의 전해조 용량을 배치함으로써, 현재의 수소 생산과정을 탈탄소화하고 산업 공정 및 장거리 운송에 수소를 사용할 수 있도록 하는 데 중점을 두었다. 2025~2030년까지는 최대 10Mt(333TWh)의 재생 가능한 수소를 생성할

158) 압축 기체, 액체 또는 암모니아 등
159) OEMoffhighway(2022.1.26.)(검색일: 2023.8.17.)
160) Clean Hydrogen Partnership(2023.3.30.)(검색일: 2023.8.17.)

수 있는 최소 40GW의 전해조 용량을 배치하고, 수소충전소 및 대규모 저장시설 네트워크 구축 기존 가스 그리드의 일부를 용도 변경하여, 유럽 전역에 기본적인 수소 그리드를 구축하게 된다. 2030~2050년까지는 성숙한 수소 기술에 중점을 두고, 이러한 기술이 항공, 해운과 항만 그리고 산업 설비와 같이 전통적인 고탄소 산업군, 즉 탈탄소화하기 어려운 부문에도 널리 적용하게 된다.[161]

〈부록 그림-32〉 유럽의 연간 수소 수요 전망



자료: Clean Hydrogen Partnership(2023.9.30.)(검색일: 2023.8.19.)

2030년까지 수소의 생산, 운송 및 최종 사용을 위한 인프라의 적시 개발 등을 위한 규제 및 정책 프레임워크를 마련하기 위한 「Fit for 55 package(2021)」[162]에서는, 「재생에너지 지침(RED; Renewable energy directive) III」의 개정으로 2030년까지 재생 가능한 수소가 모든 산업에 사용되는 수소의 수요 중 50% 이상 차지해야 한다고 규정하였다. 또한 대체 연료 인프라 규정에서, 도로 차량, 선박 및 고정 항공기에 적합하도록 EU 전역에 수소 연료 보급소를 배치하기 위한 필수 국가 목표를 도입하도록 하고, 'FuelEU 해양 이니셔티브'는 2025년부터 선박에 대한 엄격한 탄

161) Clean Hydrogen Partnership(2023.9.30.)(검색일: 2023.10.19.), p. 18.
162) European Commission, Fit for 55 package(검색일: 2023.8.19.)

소 강도 제한을 시행하여 수소를 포함하는 대체 연료로 전환을 유도하고 있다.[163]

이에 따라, 「REPowerEU Plan」은 2030년 유럽 전역의 재생 가능한 수소의 수요를 연간 20Mt로 예상하고 있으며,[164] 추후 수소의 생산 또는 수급 및 공급, 저장 그리고 활용에까지 공급망에서 중요한 역할을 수행해야 하는 항만의 인프라 개발과 인근 산업 및 운송 사용자와의 연결이 매우 중요할 것으로 전망하고 있다. 또한, 이러한 수요에 대응하기 위해 2030년까지 10Mt의 재생 가능한 수소를 생산하는 한편, 나머지 10Mt는 수입해야 할 것으로 예측하고 있다.[165]

한편, 수소의 수요가 증가함에 따라 수소를 저장하고 이송하는 방식에 대한 기술 수요 역시 매우 커지고 있다. 수소를 저장하는 장치는 수소의 상태에 따라 분류될 수 있으며, 수소의 운송과 활용방식에 따라 다양한 형태와 용량으로 구현되며, 크게 '고압기체 저장 장치', '액체수소 저장장치', '금속 흡착 저장장치'로 구분할 수 있다. 고압기체 수소 저장용기는 수소를 압축하여 실린더 또는 카트리지에 저장하는 방식으로, 현재 국내에서도 널리 사용되고 있다. 액체수소 저장용기는 수소를 대기압 기준 영하 253℃까지 냉각하여 액체 상태로 탱크에 저장하는 방식으로, 대량의 수소를 저장하고 운송할 수 있는 장점이 있다. 금속 흡착 저장장치는 수소를 금속, 합금, 유기물, 나노구조물 등의 소재에 흡착·흡수·화학결합 등의 방식으로 저장하는 방식으로, 고압이나 저온이 필요하지 않고 안전성이 높다는 장점이 있다. 그 외에도, 액상 수소 저장소재는 수소를 액상 유기화합물, 암모니아, 유무기 복합체 등의 소재에 결합하거나 용해하여 저장하는 방식으로, 상온·상압과 유

163) European Commission(2021), European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions
164) European Commission(2022), REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition
165) Clean Hydrogen Partnership(2023.9.30.)(검색일: 2023.10.19.)

사한 조건에서 수소를 운송하고 저장할 수 있는 장점이 있다.[166]

수소의 이송장치는 수소의 상태와 거리에 따라 다양한 방식으로 구현되며, 크게 기체 이송방식과 액체 이송방식으로, 액체 이송은 다시 액화/액상 이송으로 나누어진다. 기체 이송방식은 튜브 트레일러로 운송하는 방법과 배관을 통해 운송하는 방법으로 구분되는데, 튜브 트레일러는 수소를 고압으로 압축하여 실린더 또는 카트리지에 담아 트럭이나 선박으로 운송하는 방식으로, 중·장거리에 중·소규모 단위로 공급하는 곳에 적합하다. 반면, 배관 이송 방식은 수소를 저압 또는 고압으로 배관을 통해 운송하는 방식으로, 수소 운송량이 적고 소비지가 수소 생산시설과 인접하여 배관 건설비용이 사용량 대비 효율성이 있을 때 주로 사용된다. 액화 이송은 수소를 대기압 기준 영하 253℃까지 냉각하여 액체 상태로 탱크로리를 통해 운송하는 방식으로, 대량의 수소를 운송할 수 있는 장점이 있다. 마지막으로, 액상 이송은 수소를 액상 유기화합물(LOHC; Liquid Organic Hydrogen Carrier), 유무기 복합체 등의 소재에 결합하거나 용해하여 운송하는 방식으로, 상온·상압과 유사한 조건에서 수소를 운송할 수 있다는 장점이 있다.[167]

항만에서 수소를 저장·이송하기 위해서는 수소의 상태에 따른 임시 저장용기가 필요하며, 이는 현재 고압으로 압축된 수소를 저장하는 '고압수소 저장용기(CHS; Compressed Hydrogen Storage)'와 냉각한 수소를 액체 상태로 저장하는 '액화수소 저장용기(LHS; Liquid Hydrogen Storage)'로 구분된다. LHS는 CHS보다 더 많은 양의 수소를 저장할 수 있지만 기술적 난이도와 유지·보수에 어려움이 있어, 일반적으로 CHS가 사용되고 있다. CHS는 강철로만 제작된 연료탱크, 일부 유리섬유를 사용해 경량화한 형태, 경량화된 알루미늄 합금과 탄소섬유로 제작한 형태, 현재 개발 중인 특수한 패턴의 탄소섬유(강체) 연료탱크 등 4가지 형태가 있다.[168]

166) 화학공학소재연구정보센터, p. 1.
167) 기술과혁신, p. 1.

수소 저장·이송장치의 세계시장은 2019년 4,680억 USD에서, 이후 연평균 8.4%의 성장률로 2025년에는 7,593억 USD까지 증가할 것으로 전망된다. 이 중 수소 저장용기 시장은 연평균 32%의 높은 성장률로, 2026년에는 2억 8,300만 USD 규모, 전체 가스 저장용기 시장의 6.12%를 차지할 것으로 전망된다.[169]

2) 에너지 효율 개선

(1) 기술적 방안(항만 설비)

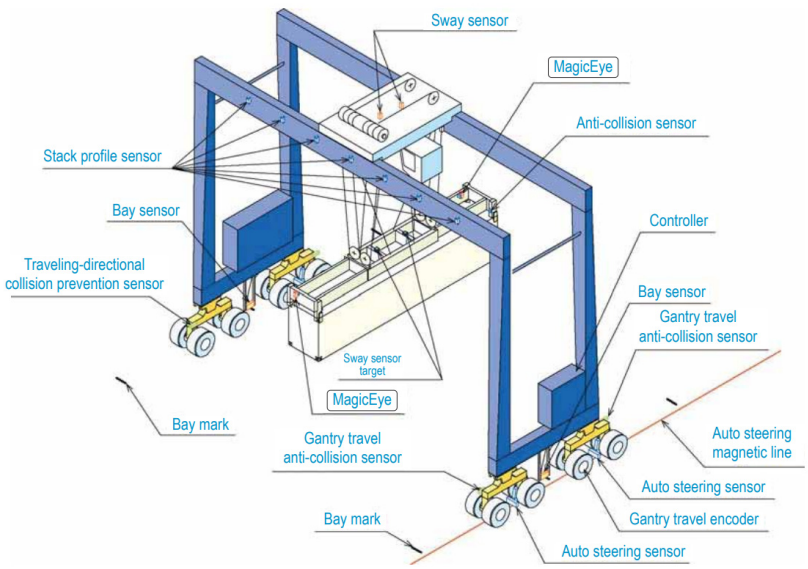
항만 내 하역장비와 화물트럭은 선박을 제외한 항만의 주요 배출원으로 항만의 육상활동으로 인한 배출의 대부분을 차지한다. 따라서, 배출 저감 측면은 물론, 동시에 운영 전반의 비용 절감 측면에서도 이들에 대한 에너지 효율 개선은 필수적이다.

가. 크레인 효율 개선

자동 크레인은 IoT 및 인공 지능(AI) 기술을 적용, 자율적으로 작업을 수행하거나 사람이 원격으로 제어할 수 있으며, 크레인에 부착된 센서 및 물체 감지 기능을 통해 주변에 있는 작업자나 물체 등을 식별할 수 있다. 이러한 기능을 활용하여 작업 성능을 최적화 하는 동시에 기존 크레인에서 사람의 실수로 인해 발생할 수 있는 사고, 부상 및 지연의 위험을 줄일 수 있으며, 작업 수행에 소요되는 시간 단축, 장비 및 화물 손상 감소, 인력 부상 감소는 물론, 이와 관련한 비용 절감이 가능하다.

168) Korea Institute of Science and Technology Information, p. 2.
169) 조선일보(2021.7.13.)(검색일: 2023.8.23.)

〈부록 그림-33〉 자동 크레인 개념도



자료: Mitsubishi Heavy Industries(2023.5.10.)(검색일: 2023.8.23.)

중국 상하이(Shanghai) 항만은 2017년 12월, 세계 최대의 자동화 컨테이너 터미널 시범 운영을 시작하였으며, 이를 통해 70%의 노동비용 감소 50%의 운용효율 증대로 운용 장비당 80,000 USD를 절감하는 한편, 총 탄소 배출의 10% 정도를 절감할 것으로 전망하고 있다.[170] 호주 브리즈번(Brisbane) 항만은 2014년 반 자율 항로의 전환을 위해 2억 5천만 AUD를 투자하였으며, 항만 운영사 DP World는 2017년 2대의 새로운 자동 스태킹(Stacking) 크레인을 도입하여 운용하고 있다.[171] 멜버른(Melbourne) 항만의 빅토리아 국제 컨테이너 터미널(VICT)은 6억 5천만 AUD 규모의 호주 최초 완전 자동화 터미널로, 총 660m 부두에 5대의 Neo Panamax STS 크레인을 운용하고 있다. 또한 육상측과 부두측 모두

170) The Straits Times(2023.4.10.)(검색일: 2023.8.23.)
171) itnews(2015.5.26.)(검색일: 2023.8.23.)

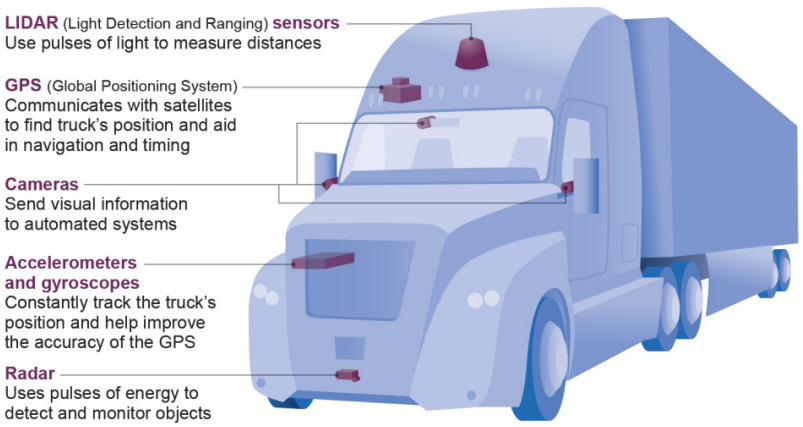
에서 트럭과 컨테이너 스태킹 블록(Container Stacking Block)과의 교차 처리를 위한 총 20개의 자동 스태킹 크레인을 운용하고 있다.[172]

나. 차량/트레일러 효율 개선

자율주행 트럭은 위성 및 고해상도 GPS를 기반으로 원격조작 작동 모드가 포함된 반자율 작동 모드를 적용하고 있다. 완전 자율 운용 모드 시 무인 시스템은 인간의 개입 없이 입력된 범위 내에서 임무를 완수하며, 원격조작 작동 모드에서는 조작자가 비디오나 센서을 통한 피트백을 활용하여 테더링되거나 라디오로 연결된 컨트롤 장치를 통해 직접적으로 통제하거나 목표를 할당할 수 있다. 또한 비디오나 센서를 통한 피드백 없이도, 차량 외부에서 연결된 무선 장치를 통해 지속적으로 무인 차량을 직접 제어할 수 있다.[173] 자율주행 트럭은 운전자의 휴식이 필요하지 않으므로 24시간 작동 가능하고, 교통 법규를 준수하고 충돌 등을 회피하도록 프로그램되어 있어 기본적으로 안정성이 보장된다. 또한 초기 입력 및 관리에 따라서, 유지 관리가 덜 필요하고 효율적인 운용으로 연료 소비가 상대적으로 낮아, 비용 절감 효과를 기대할 수 있다.[174]

172) createdigital(2019.12.13.)(검색일: 2023.8.23.)
173) Madhavan & Messina(2006), pp. 324-325
174) Streetdrone(2023.5.10.)(검색일: 2023.8.23.)

〈부록 그림-34〉 자율주행 트럭의 개념도



자료: U.S. Goverment Accountability Office(2019.5.7.)(검색일: 2023.9.1.), p. 14.

(2) 운영적 방안(항만 운영)

가. 화물 흐름 개선

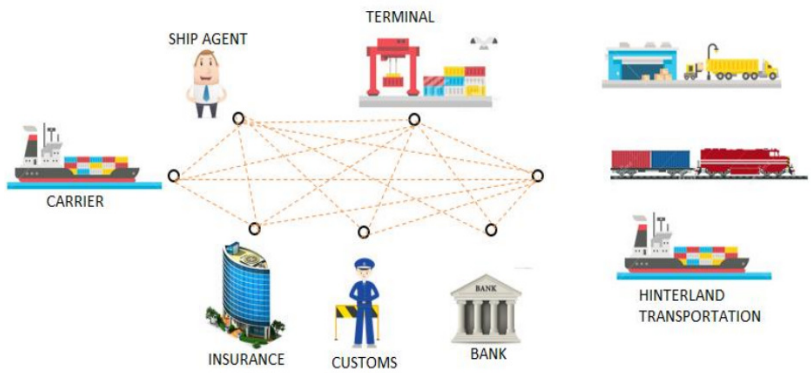
최근 물류 규모의 거대화, 산업 및 사회 복잡성의 증대, 이에 따른 물류 흐름의 불확실성 역시 커지면서, 항만 역시 4차 산업의 혁신적 변화를 구성하는 신기술을 도입하여 복합운송 운영의 효율성을 높이기 위한 방안을 강구하고 있다. Jesús 등이 제안한 '컨테이너 통합 추적 시스템'은 ICT 기술을 이용하여 컨테이너 내부에 부착된 센터를 통해 컨테이너의 위치를 파악하고 이를 통해 운영자는 화물의 선적 작업에 이 정보를 활용할 수 있도록 하고 있다.

블록체인 기술 역시 신뢰성, 보안, 가시성, 네트워크 확장 및 공급망 흐름의 통합을 통해 항만 물류 및 디지털화에 크게 기여하고 있다.[175] 사물인터넷(IoT) 기반의 시스템에 블록체인에 저장된 정보를 연계하면 보다 효율적으로 데이터베이스를 구축할 수 있으며, 이렇게 구축된 블록체인 플랫

175) WEERNINK, Marissa Oude, et al.(2017), pp. 5-9

폼을 통해 자유롭게 화물 정보가 저장된 블록에 실시간으로 접근할 수 있어, 업무 프로세스의 가속화를 도모할 수 있다. 또한, 선박 금융이나 보험 등의 분야에 활용하여 관세 프로세스 등을 근본적으로 개선할 수 있다.

〈부록 그림-35〉 화물 운송 과정에서의 블록체인 정보흐름



자료: WEERNINK, Marissa Oude, et al.(2017), p. 9.

네덜란드 로테르담(Rotterdam) 항만이 도입한 'PRONTO(Port Rendezvous of Nautical and Terminal Operation)' 시스템은 해운회사, 위탁자, 터미널 등의 각종 이해관계자들에게 기항지 정보를 포함한 모든 상황에 대한 정보를 실시간으로 전달하며, 선박 도착 예정시간 등을 정확히 예측함으로써 선박의 정박 시간을 최소화할 수 있다.[176]

나. 스마트 항만

전통적인 개념의 항만은 종종 혼잡, 지연 등 다양한 비효율성에 직면하게 되며, 이는 비용 증가와 생산성 저하로 이어질 수 있다. 고급 기술과 간

176) World Ports Sustainability Program(검색일: 2023.9.1.)

소화된 프로세스를 활용하여 이러한 비효율성을 줄이고 생산성을 향상시킬 수 있다. 스마트 항만은 '스마트 커넥티드' 개념을 구성하는 첨단 기술을 활용하여 이와 같은 비효율을 지양하고, 항만 운영을 자율적으로 관리하는 동시에 물류 흐름을 최적화하는 기술적 패러다임으로 정의할 수 있다. 즉, 항만물류의 운영 최적화, 비즈니스 프로세스 간소화, 비용 및 처리 시간 감소, 작업 생산성 및 효율성 향상, 환경 영향 최소화 등을 목적으로, AI, Big Data, IoT 및 Blockchain 등의 4차 산업혁명 기술을 활용한 통합정보관리, 합리적인 의사결정, 효율적인 자원 활용 등을 위한 솔루션을 적용하여 항만시설 자동화와 자율성을 구현한 항만이라고 할 수 있다.[177]

〈부록 표-4〉 스마트 항만 구현에 적용 가능한 기술 목록

기 술	특 징	적용 분야
인공지능 (AI)	• 인간처럼 논리적인 사고, 학습 및 판단 방식을 사용 • 축적된 경험과 학습 기반 예측 모델 • 딥러닝, 머신러닝 등 기반 • 초기 영상 및 음성인식, 번역 등에 사용 되었으나 현재는 자율, 추천 서비스, AI 로봇 등으로 확장됨	• 최적의 경로 탐색 및 권장 사항. • 행동 예측 모델에 기반한 의사 결정 지원 시스템 • 드론을 이용한 항만시설 관리
사물 인터넷 (IoT)	• ICT 기반의 연결을 통해 사람과 장비 간, 장비 간 정보 교환 및 소통을 위한 지능형 인프라 및 서비스 기술 • 컨테이너, 화물, 장비, 선박, 트럭, 도로 등에 IoT 센서를 부착하여 실시간 정보 수집 • 안벽에 카메라(영상인식), IoT 센서 등을 부착하여 선박의 정박을 지원	• 실시간 화물 흐름 추적 • 화물 및 선박 모니터링 • 데이터 중심 의사 결정 포트 • 지능형 부두 벽
빅 데이터	• 가치 있는 데이터(정형, 반정형, 비정형 데이터) 추출 및 결과 분석 • 복잡한 데이터 처리 로직 및 분산 처리 기술을 사용	• 선박운항 효율성 분석 • 자율 선박 분석 • 기상정보 등 외부정보와 연계한 방재 및

177) ESCAP(2021.2.)(검색일: 2023.9.3.)

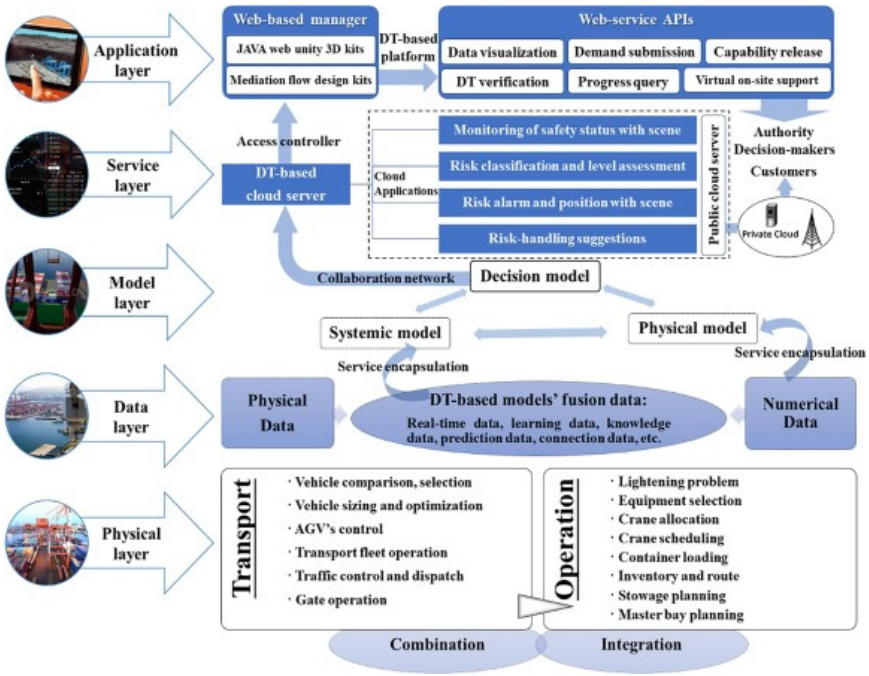
기 술	특 징	적용 분야
	• 분석 결과를 바탕으로 행동 및 패턴에 대한 예측 정보 제시 • Hadoop, R, NoSQL 등 개방형 S/W 사용	선박안전운항
5G	• 초고속, 초저지연 통신 서비스. • 데이터 전송 속도와 정확도 향상. • 항만 인프라 개선에 따른 항만 운영 효율성 고려	• 원격 제어 및 모니터링 • 5G 기반 항만 인프라 개선

자료: 저자 작성

현재 구현 가능한 물리적 사이버시스템, 즉 디지털 트윈(Digital Twin)기술을 적용하여 스마트 항만을 구축하기 위해서는 항구의 물리적 개체, 가상 모델, 데이터, 통합 방법, 분석 방법 및 서비스 등 항만 활동의 전주기 프로세스를 구현해야 한다. 이를 위해, 실시간 연결된 센서를 항만 전역에 설치하여 물류 프로세스 및 활동과 관련된 처리, 운영 및 환경 데이터를 '스마트 커넥티드' 기술을 통해 수집한다. 이렇게 수집된 데이터는 관련 알고리즘과 시각화 프로그램을 통해 구현된 디지털 트윈에 반영되고, 인공지능은 디지털 트윈 기반의 모델을 시뮬레이션하고 예측하게 된다.[178] 인공지능은 사물인터넷 센서와 블록체인 데이터베이스에서 수집한 실시간 데이터를 알고리즘에 연결하여, 선박의 도착 시간과 항구 내의 물류 흐름의 패턴을 예측하고 진단하여 효율적인 계획 수립과 항구 운용 효율을 극대화한다.[179]

178) Wang et al.(2021)
179) Cilio Automation Factory(2022.1.27.)(검색일: 2023.5.10.)

〈부록 그림-36〉 디지털 트윈으로 구축된 스마트 항만의 주요 체계



자료: Wang et al.(2021)

최근 주요 항만들은 이와 같은 디지털 트윈과 AI 기술을 도입하여, 물류 업무 체계의 최적화를 위한 스마트 항만을 구축하는데 많은 투자를 하고 있다. 독일 함부르크항은 지능형 네트워킹 기술을 활용한 'smartPORT' 프로그램을 출범하였으며, 주요 사업으로 선박, 트럭, 크레인, 교통 흐름, 인력 등 항만의 물류 자원을 실시간으로 연계하는 시스템을 구성·운용하고 있다. 이는 IoT 기술 기반의 클라우드 통신 플랫폼으로, 개별 물류요소와 실시간 통신으로 선박에 도킹 위치와 시간, 화차와 크레인 등에 할당된 공간 등을 고지하고, 이러한 과정에서 캡처한 데이터는 지속적으로 통합되고 다시 분석된다. 또한 플랫폼과 연결된 다양한 센서, 카메라 시스템 및 도로의 스마트 조명을 사용하여, 교통량을 모니터링하고 교통량이 많은 상황에

서 원활한 바지선 이동을 가능하게 하는 등, 안전한 작업 환경을 보장하고 있다. 함부르크항은 이러한 시스템 운용을 통해, 항만 운영 비용을 75% 절감하고 항만 정체율을 15% 완화하였다.[180]

〈부록 표-5〉 주요 항만별 적용 분야 및 방식

항 만	국 가	데이터 수집 방법	적용 분야
발렌시아 (Valencia)	스페인	• IoTs	• 화물 취급 효율성 향상
싱가포르 (Singapore)	싱가포르	• GPS Lands	• 교통 모니터링 시스템
로테르담 (Rotterdam)	네덜란드	• IoTs Cloud Server	• 화물 취급 및 운송
마완 (Mawan)	중국	• IoTs	• 컨테이너 터미널의 운영 및 보관
함부르크 (Hamburg)	독일	• 5G Technology	• 데이터 통신 및 공유
바르셀로나 (Barcelona)	스페인	• 5G Communications and Wi-Fi	• 데이터 통신 및 공유
리보르노 (Livorno)	이탈리아	• LiDAR and WDR Cameras	• AR/VR 시각화 및 위험 예측
울루 (Oulu)	핀란드	• IoTs	• 환경 보호 및 지속가능성

자료: Wang et al.(2021)

추가적으로, 스마트 항만의 글로벌 시장 규모는 2022년 268,000만 USD에서 2032년 2,511,000만 USD으로, 연평균 성장률 25.09%의 급속한 성장이 예상된다.[181]

180) Hamburg Port Authority(검색일: 2023.7.10.)
181) precedence research(2023.4.)(검색일: 2023.7.29.)

〈부록 그림-37〉 스마트 항만 시장 전망



자료: precedence research(2023.4.)(검색일: 2023.7.29.)

3) 전·후처리

(1) 탄소 배출 포집 및 저장(CCS)

탄소 포집, 활용 및 저장(CCUS; Carbon capture utilization and storage) 기술은 화석연료 사용으로 인해 발전소, 철강, 시멘트 공장 등 대규모 발생원이 배출하는 이산화탄소를 포집한 후, 압축 및 수송하는 과정을 거쳐 육지 또는 해양의 지중(地中)에 안전하게 저장하거나 유용한 물질로 전환하는 일련의 과정으로 정의할 수 있다.

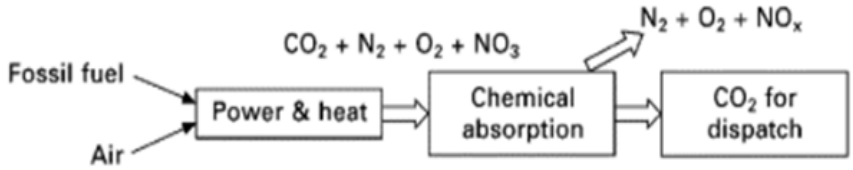
가. 포집(Capture)

이산화탄소 포집기술은 CCS 전체 비용의 70~80%를 차지하는 핵심 기술로, '연소 후 회수기술(Post-combustion technology)', '연소 전 회수기술(Pre-combustion technology)', 그리고 '순 산소 연소기술(Oxy-fuel combustion technology)'로 구분할 수 있다.[182]

182) 교육부 공식 블로그(2012.9.8.)(검색일: 2023.7.29.)

'연소 후 회수기술'은 연소 후 배기가스에 포함된 이산화탄소를 포집하는 기술로, 기존 발생원에 적용하기 가장 쉬운 기술이다. 흡수·흡착제, 분리막 등을 이용하여 이산화탄소를 흡·탈착하는 분리 공정에서 기술은 흡수제의 효능향상과 공정 개발 등에 중점을 둔 연구개발이 진행 중에 있다.

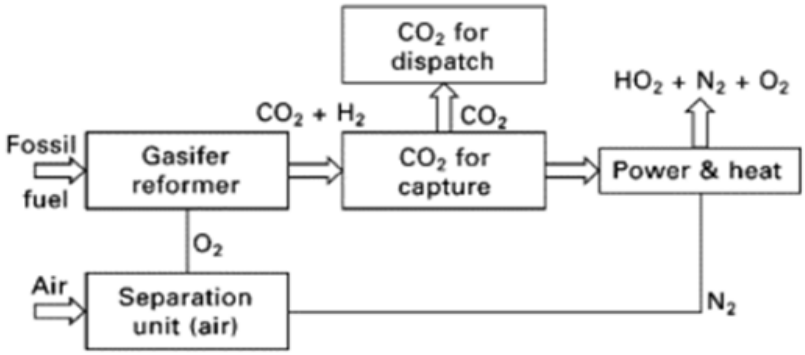
〈부록 그림-38〉 연소 후 회수 기술 개요



자료: Basile, A. et al.(2011)

'연소 전 회수기술'은 연소과정에서 이산화탄소가 발생하지 않도록 하는 공정기술로, 화석연료의 부분 산화, 천연가스 개질 및 수성가스 변위 반응 등을 통해 생성된 수소와 이산화탄소를 분리하여 수소를 생산한다.

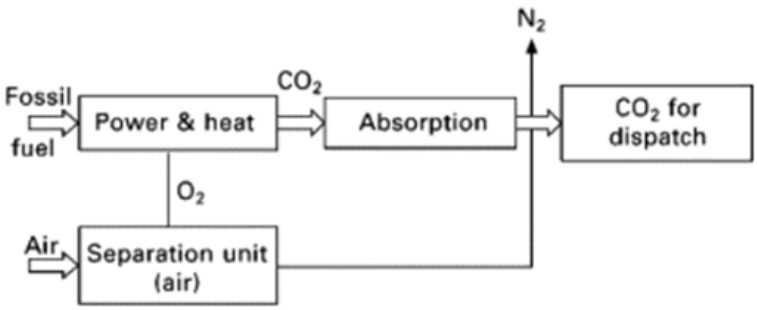
〈부록 그림-39〉 연소 전 회수 기술 개요



자료: Basile, A. et al.(2011)

'순 산소 연소기술'은 공기 중의 산소와 질소를 분리하여 산소만을 연소기에 공급하여, 연소과정에서 배출된 고농도의 이산화탄소 배기가스를 회수하는 기술이다.

〈부록 그림-40〉 순 산소 연소기술 개요



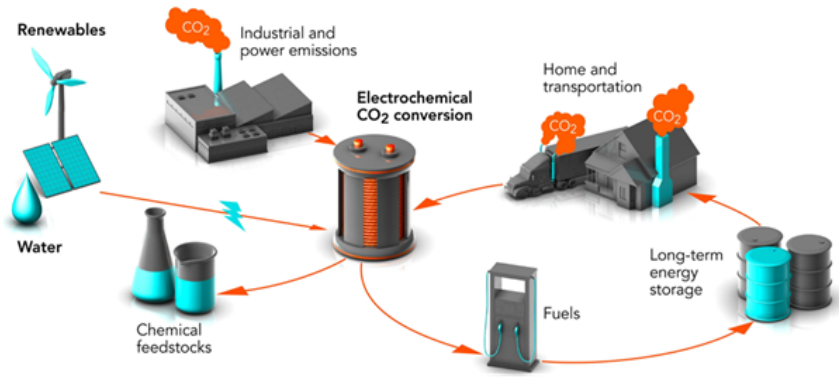
자료: Basile, A. et al.(2011)

나. 활용(Utilization)

이산화탄소를 유용한 물질로 전환·재사용하는 이산화탄소 전환기술은 화학적 전환과 생물학적 전환으로 구분할 수 있다. CO_2를 화학적으로 전환시키는 방법은 '대량의 CO_2 전환에 의한 재사용'의 개념으로, 고부가가치 물질을 생산함으로써 'Carbon-3R(Reduction, Reuse, Recycle)' 기반의 저탄소 녹색성장기술 및 지속성장 가능한 기술의 특징을 가지고 있다.

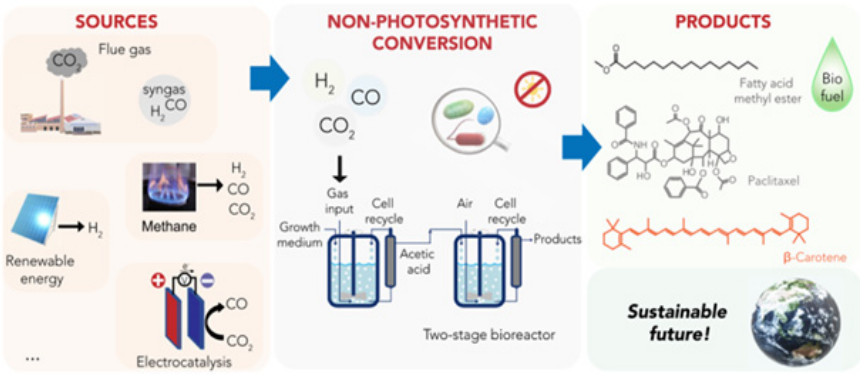
미세조류를 이용하는 생물학적 전환 방법은 화학적 전환 방법과 달리 배기가스에서 CO_2를 분리하기 위한 별도의 공정 없이 태양에너지를 주 에너지원으로 활용하므로, CO_2 처리에 요구되는 에너지량이 상대적으로 적다. 또한, 초기 투자비용 및 운전비용이 적게 투입되는 반면, 고부가가치 물질을 부가적으로 생산할 수 있다는 점에서 차세대 유망기술로 주목받고 있다.

〈부록 그림-41〉 화학적 전환 방법을 통한 탄소의 활용



자료: Stanford Earch Matters magaizne(2019.9.9.)(검색일: 2023.7.29.)

〈부록 그림-42〉 생물학적 전환 방법을 통한 탄소의 활용



자료: Erşan, S., & Park, J. O.(2020)

McKinsey & Company(2022)에 따르면, 국제사회가 목표로 설정한 배출제로 또는 탄소중립을 달성하기 위해서는 CCUS 기술의 활용 규모가 2050년까지 120배 증가해야 할 것으로 전망하였다. 이를 위해서는 이산화탄소의 포집이 연간 최소 4.2GTPA(Gigatons per annum) 규모에 도달해야 하며, 이러한 경우 산업부문에서 아직 배출하고 있는 배출의 45% 정도를 탈탄소화할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

이러한 맥락에서, 미국은 「2022 Inflation Reduction Act」에서 CCUS 부문에 대한에 투자를 장려하기 위한 방안으로, 관련 시설 및 사업에 대한 45Q 세금 공제 혜택을 확대한 바 있다.[183] 이어서, 2023년에는 에너지부(DOE)가 CCU를 포함하는 연료 및 화학산업의 배출 강도를 2035년까지 85%까지 감축하기 위한 대체 경로를 지원하는 'Clean Fuels & Products Shot' 프로그램을 출범했다.[184]

CCU 공급망은 화석연료 기반 합성 연료 생산 및 CCS와의 시너지 효과를 기대할 수 있다. 현재 운영 중인 시범 규모의 저배출 합성 연료 생산 사례는 아직 소수에 불과하지만, Sasol, Shell 및 Synfuels China와 같은 대규모 엔지니어링/정유·가스 회사들은 과거부터 오랫동안 초거대 규모의 화석연료 기반 합성 연료 공장을 운영해오고 있으며, 이러한 경험을 바탕으로 준비된 인프라와 기술 역량을 이전함으로써 용이하게 활용 가능할 것으로 보인다. 하지만, 합성 연료나 또다른 화학 물질로 전환하기 위해 CO_2를 대량으로 사용하려면, 선행적으로 파이프라인과 터미널, 선박 및 트럭을 포함한 대규모 운송 인프라의 배치, 이를 위한 투자가 필요하다.

183) 이에 따라서, CO2 톤당 60 USD 상당의 세금 공제를 제공하게 된다.
184) IEA(2020.9.)(검색일: 2023.7.29.)

부록 2. 국내외 전문가 설문조사 양식

항만/해운의 탄소 중립 과학 기술의 수준 평가를 위한

전문가 설문 조사

안녕하십니까?

귀한 시간을 허락해 조사에 참여해 주셔서 대단히 감사합니다.

본 조사는 한국해양수산개발원이 유럽 조선해양 전문가협회와 공동연구로 수행하고 있는 '해양 탄소중립 과학기술 국제협력 방안 연구'의 일환으로, 항만과 국제해운의 탄소중립 구현에 있어 우리 탄소중립 기술의 기술 수준 및 미래 수요, 이와 관련한 현안에 대한 귀하의 의견을 수렵, 반영하고자 하는 목적으로 시행되는 것입니다.

이번 조사결과는 항만 및 해운 부문 탄소중립 구현을 위한 우리 과학기술의 국제협력 전략은 물론, 최근 급성장하고 있는 국제 탄소중립 시장에 대응하고 우리 기술의 경쟁력을 제고하기 위한 기술전략 마련 작업에 소중하게 사용될 것 입니다. 전문가 여러분의 현명하고 정확한 판단에 기반한 적극적 의견 개진을 부탁드립니다.

또한, 여러분께서 개진하신 내용은 비밀이 보장되며, 연구목적 이외의 어떠한 용도로도 사용되지 않을 것임을 약속드립니다.

추가적으로 연구 결과와 관련하여 궁금하신 사항은 아래 연락처로 문의해 주시기 바랍니다. 설문에 응해주셔서 대단히 감사합니다.

2023 년 8 월

안용성 외 연구진 드림

응답자 정보 입력란

1. 응답일자: 2023 년 월 일 2. 응답자 성명 :

3. 연락처: (전화) (E-mail)

4. 소속/직위: (소속) (직위)

5. 근무기간: ① 1 년 미만( ) ② 1 년~2 년( ), ③ 2 년~5 년( ) ④ 5 년~10 년( ) ⑤ 10 년 이상( )

6. 주민등록번호:

7. 계좌번호: (은행명:)

문의 및 회신처	한국해양수산개발원 해양연구본부 김주형 전문연구원 부산광역시 영도구 해양로 301 번길 26 (동삼동)(우 606-080) (전화: +82-797-4796, 이메일: jhkim7664@kmi.re.kr) ※ 응답하신 설문지는 위의 연락처(이메일 또는 우편)로 회신 부탁 드리겠습니다.

(설문 배경)

우리 연구진은 항만 및 해운 부문의 탄소중립 과학기술 관련 국내외 동향 조사 및 비교분석, 기술 분야별 국내외 전문가 그룹과의 심층 인터뷰 등을 통하여 '항만 및 해운 부문의 탄소 중립 과학 기술 분류 체계'를 아래 [표 1]과 같이 도출하였습니다. 이를 요약하면, 항만과 해운 부문에 대한 대분류로 에너지 전환, 에너지 효율 개선, 전/후처리로 구분하고 (대분류), 중분류 이하에서는 각 탄소 중립 과학 기술을 분류 됩니다. [표 1]에 제시된 기술분류체계에 따라 하기의 설문 문항들에 대한 본인의 전문적 견해을 기반으로 답변을 부탁 드립니다.

(기술분류 체계의 자세한 세부 사항은 제일 마지막 페이지에 있습니다. 답변에 참고해 주시면 감사하겠습니다.)

* 항만 기술: 항만에 적용 가능한 탄소 중립 기술 // * 해운 기술: 선박에 적용 가능한 탄소 중립 기술

[표 1] 해양 탄소 중립 과학 기술 분류 체계(안)

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">에너지 전환</th><th colspan="2">에너지 효율 개선</th><th colspan="2">전후처리</th></tr>
<tr><td rowspan="6">항만</td><td rowspan="3">에너지 생산 (대체 에너지 원)</td><td>태양광</td><td rowspan="3">기술적 방안 (항만 설비)</td><td>크레인 효율 개선</td><td rowspan="4">CCS</td><td>Capture</td></tr>
<tr><td>풍력</td><td>차량/트레일러 효율 개선</td><td>Storage</td></tr>
<tr><td rowspan="2">에너지 연계</td><td rowspan="2">에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)</td><td rowspan="2">운영적 방안 (항만 운영)</td><td rowspan="2">화물 흐름 개선 (스마트 항만)</td><td rowspan="2">Utilization</td></tr>
<tr><td rowspan="2">에너지 소비 (대체 연료)</td><td>전력/배터리</td><td colspan="3" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>수소</td></tr>
<tr><td rowspan="6">해운</td><td rowspan="3">에너지 생산 (대체 에너지원)</td><td>태양광</td><td rowspan="3">기술적 방안 (선박 설비)</td><td>저항 감소</td><td rowspan="3">이산화탄소 (OCCS)</td><td>Post-combustion</td></tr>
<tr><td>풍력</td><td>추진 효율 향상</td><td>Pre-combustion</td></tr>
<tr><td>에너지 효율 향상</td></tr>
<tr><td rowspan="3">에너지 소비 (대체 연료)</td><td>전력/배터리</td><td rowspan="3">운영적 방안 (선박 운영)</td><td>선박 속도 최적화</td><td rowspan="3">메탄가스</td><td>Methane catalyst in exhaust</td></tr>
<tr><td>수소</td><td rowspan="2">최적 항로</td><td>Reliquifaction in venting</td></tr>
<tr><td>암모니아</td><td>Plasma reduction</td></tr>
<tr><td rowspan="2">메탄올</td><td colspan="4" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>바이오연료</td></tr>
</table>

1. 국내 항만/해운의 탄소 중립 기술의 국가별 수준 평가

먼저 하기에 제시된 항만/해운의 탄소 중립 기술항목별 국내 (대한민국)의 기술 수준을 해당 분야의 선도적 리딩 그룹으로 평가되는 미국, 일본 유럽과 비교하고자 합니다. 하기 설문 작성 예시에 따라 작성하여 주십시오.

□ 설문 작성 예시 (참고용)

먼저 **현재 기술 수준 1 위 국가라고 생각하시는 나라의 평가칸에 100 을 기입**하시고, 우리나라의 평가칸에 해당 국가의 수준 대비 우리 기술의 수준을 1~100 사이의 숫자로 작성하여 주시기 바랍니다.

항만 부문			우리나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 전환	에너지 생산	태양광	70	100			
		풍력	60			100	
	에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)	75		100		

아래에서 제시한 **우리나라, 미국, 일본, 유럽 중 현재 기술 수준 1 위 국가가 없다고 판단하신다면,** 가장 오른쪽의 기타의 평가칸에 생각하시는 나라의 이름을 기입해주시고 해당 국가의 수준 대비 우리 기술의 수준을 1~100 사이의 숫자로 작성하여 주시기 바랍니다.

항만 부문			우리나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 전환	에너지 생산	태양광	70				캐나다

만약, 판단하시기에 **우리나라의 기술 수준이 현재 세계 1 위라면** 우리나라의 칸에 100 을 기입하시면 됩니다.

항만 부문			우리나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 전환	에너지 생산	태양광	100				

1-1. 항만 부문 탄소중립 기술 항목별 국가별 수준평가

항만은 육해상의 교통, 운송 등이 교차하는 물류의 중추적 허브로 이해할 수 있습니다. 우리 연구진은 다양한 산업활동이 이루어지는 항만의 고유 특성을 반영하여, 항만의 2050 탄소중립은 ① 분산전원(DR, Distributed Resources) 개념을 항만에 적용하는 신·재생에너지 기반의 에너지 생산* 및 연계, 항만 내 에너지 연계·활용의 최적화, 선박, 하역장비 등 항만 내 물류요소의 에너지 전환, ② 추가적으로 이들에 대한 에너지 효율 개선 또는 ③ 전·후처리 개념의 배출제로 또는 Near-Emission-Zero 화 정도의 기술을 통해 구현할 수 있을 것으로 예상하고 있습니다.

*항만 내 자급 또는 항만 인근 신·재생에너지 기반의 에너지 생산의 전용 또는 연계 등

항만의 2050 탄소중립 구현을 위한 기술항목별로, 국가별 현재 기술의 수준을 평가하고자 합니다. 상기 예시에 따라 하기 표를 채워주시기 바랍니다.

항만 부문			우리나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 전환	에너지 생산	태양광					
		풍력					
	에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)					
	에너지 소비	전력/배터리					
		수소					
에너지 효율 개선	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선					
		차량/트레일러 효율 개선					
	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)					
전후처리	CCS	Capture					
		Storage					
		Utilization					

1-2. 해운 부문 탄소중립 기술 항목별 국가별 수준평가

해운분야의 2050 탄소중립 구현은, 선박의 ① 신·재생에너지 기반의 에너지 전환, ② 에너지 효율 개선을 위한 기술적·운영적 방안, ③ 전·후처리 개념의 배출제로 또는 Near-Emission-Zero 화 정도의 기술을 통해 구현할 수 있을 것으로 예상하고 있습니다.

해운 부문의 2050 탄소중립 구현을 위한 기술항목별로, 국가별 현재 기술의 수준을 평가하고자 합니다. 상기 예시에 따라 하기 표를 채워주시기 바랍니다.

해운 부문			우리나라	미국	일본	유럽	기타
에너지 전환	에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광					
		풍력					
	에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리					
		수소					
		암모니아					
		메탄올					
		바이오연료					
에너지 효율 개선	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소					
		추진 효율 향상					
		에너지 효율 향상					
	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화					
		최적항로					
전후처리	이산화탄소 (OCCS)	Post-combustion					
		Pre-combustion					
	메탄가스	Methane catalysts in exhaust					
		Reliquifaction in venting					
		Plasma reduction					

2. 항만 탄소중립 대안기술의 시장전망 시나리오 기반 유효성 평가

2-1. 항만 부문 탄소중립 기술의 시장 도입 ·적용 가능성(2030; 2050)

본 설문 문항에서는 하기 제시된 기술적 방안들 중 향후 항만의 환경·기술 관련 국내외 시장에서 주요 대안기술로 우선적으로 도입·적용될 것으로 예상되는 기술들을 선별하고자 합니다. '현재~2030 년'과는 '2030 ~ 2050 년' 사이에 시장에서 우선적으로 선택될 것으로 예상되는 방안을 아래 점수 표를 참고하여 평가해주시기 바랍니다.

매우 낮음	낮음	약간 낮음	보통	약간 높음	높음	매우 높음
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦



항만 부문			현재 ~ 2030 년	2030 ~ 2050 년
에너지 전환	에너지 생산	태양광		
		풍력		
	에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)		
	에너지 소비	전력/배터리		
		수소		
에너지 효율 개선	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선		
		차량/트레일러 효율개선		
	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)		
전후처리	CCS	Capture		
		Storage		
		Utilization		

2-2. 항만 부문 탄소중립 기술 항목별 상용화의 기술적 난이도 평가

본 문항에서는 하기 제시된 기술적 방안들의 개발 및 상용화 과정의 난이도를 평가하고자 합니다. 기술 측면에서 구현하기 어렵거나 현실적인 대안으로 상용화하는 과정의 난이도가 높은 것으로 판단되는 매우 도전적인 기술의 경우라도 특정 기술의 경우 탄소중립의 구현과정에서 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대할 수 있는 반면, 현재 기술 대비 크게 도전적이지 않은 기술임에도 상용화 및 시장 도입에 따른 효과가 그리 크지 않을 것으로 평가될 수 있습니다.

하기 제시된 기술 방안들이 늦어도 2040 년 전후까지 상용화되어 시장에서 현실성 있는 주요 대안으로 등장하기 위해 해결되어야 하는 기술적 난이도를 아래 점수 표를 참고하여 평가해주시기 바랍니다.

매우 낮음	낮음	약간 낮음	보통	약간 높음	높음	매우 높음
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦



항만 부문			기술적 난이도
에너지 전환	에너지 생산	태양광	
		풍력	
	에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)	
	에너지 소비	전력/배터리	
		수소	
에너지 효율 개선	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선	
		차량/트레일러 효율개선	
	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)	
전후처리	CCS	Capture	
		Storage	
		Utilization	

2-3. 항만 부문 탄소중립 기술 항목별 도입에 따른 효과 평가

본 문항에서는 하기 제시된 기술 방안들의 도입에 따른 효과, 즉 2050 탄소중립의 분기점으로 예측되는 2030 년 전후, 그리고 최종 목표시한인 2050 년 항만의 탄소 중립 구현에 실제 기여할 수 있는 정도를 식별하고자 합니다.

하기 제시된 기술 방안들이 '현재~2030 년'과 '2030 ~ 2050 년' 사이에 시장에서 선택, 도입되는 경우, 실제 탄소중립 구현에 기여할 수 있는 정도를 아래 점수 표를 참고하여 평가해주시기 바랍니다.

매우 낮음	낮음	약간 낮음	보통	약간 높음	높음	매우 높음
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦



항만 부문			현재 ~ 2030	2030 ~ 2050
에너지 전환	에너지 생산	태양광		
		풍력		
	에너지 연계	에너지 그리드 (분산 전원 기술 항만)		
	에너지 소비	전력/배터리		
		수소		
에너지 효율 개선	기술적 방안 (항만 설비)	크레인 효율 개선		
		차량/트레일러 효율개선		
	운영적 방안 (항만 운영)	화물 흐름 개선 (스마트 항만)		
전후처리	CCS	Capture		
		Storage		
		Utilization		

3. 국제해운 탄소중립 대안기술의 시장전망 시나리오 기반 유효성 평가

3-1. 해운 부문 탄소중립 기술의 시장 도입 ·적용 가능성(2030; 2050)

본 설문 문항에서는 하기 제시된 기술적 방안들 중 향후 국제 해운의 친환경·기술 시장에서 주요 대안기술로 우선적으로 도입·적용될 것으로 예상되는 기술들을 선별하고자 합니다. '현재~2030 년'과 '2030 ~ 2050 년' 사이에 시장에서 우선적으로 선택될 것으로 예상되는 방안을 아래 점수 표를 참고하여 평가해주시기 바랍니다.

매우 낮음	낮음	약간 낮음	보통	약간 높음	높음	매우 높음
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦

해운 부문			현재 ~ 2030	2030 ~ 2050
에너지 전환	에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광		
		풍력		
	에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리		
		수소		
		암모니아		
		메탄올		
		바이오연료		
에너지 효율 개선	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소		
		추진 효율 향상		
		에너지 효율 향상		
	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화		
		최적항로		
전후처리	이산화탄소 (OCCS)	Post-combustion		
		Pre-combustion		
	메탄가스	Methane catalysts in exhaust		
		Reliquifaction in venting		
		Plasma reduction		

3-2. 해운 부문 탄소중립 기술 항목별 상용화의 기술적 난이도 평가

본 문항에서는 하기 제시된 기술적 방안들의 개발 및 상용화 과정의 난이도를 평가하고자 합니다. ('2-2. 항만 부문 탄소중립 기술 항목별 상용화의 기술적 난이도 평가' 설명 참조)

하기 제시된 기술 방안들이 늦어도 2040 년 전후까지 상용화되어 시장에서 현실성 있는 주요 대안으로 등장하기 위해 해결되어야 하는 기술적 난이도를 아래 점수 표를 참고하여 평가해주시기 바랍니다.



해운 부문			기술적 난이도
에너지 전환	에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광	
		풍력	
	에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리	
		수소	
		암모니아	
		메탄올	
		바이오연료	
에너지 효율 개선	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소	
		추진 효율 향상	
		에너지 효율 향상	
	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화	
		최적항로	
전후처리	이산화탄소 (OCCS)	Post-combustion	
		Pre-combustion	
	메탄가스	Methane catalysts in exhaust	
		Reliquifaction in venting	
		Plasma reduction	

3-3. 해운 부문 탄소중립 기술 항목별 도입에 따른 효과 평가

본 문항에서는 하기 제시된 기술 방안들의 도입에 따른 효과, 즉 2050 탄소중립의 분기점으로 예측되는 2030 년 전후, 그리고 최종 목표시한인 2050 년 국제 해운의 탄소 중립 구현에 실제 기여할 수 있는 정도를 식별하고자 합니다.

하기 제시된 기술 방안들이 '현재~2030 년'과 '2030 ~ 2050 년' 사이에 시장에서 선택, 도입되는 경우, 실제 탄소중립 구현에 기여할 수 있는 정도를 아래 점수 표를 참고하여 평가해주시기 바랍니다.

매우 낮음	낮음	약간 낮음	보통	약간 높음	높음	매우 높음
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦



해운 부분			현재 ~ 2030	2030 ~ 2050
에너지 전환	에너지 생산 (대체 에너지원)	태양광		
		풍력		
	에너지 소비 (대체 연료)	전력/배터리		
		수소		
		암모니아		
		메탄올		
		바이오연료		
에너지 효율 개선	기술적 방안 (선박 설비)	저항 감소		
		추진 효율 향상		
		에너지 효율 향상		
	운영적 방안 (선박 운영)	선박 속도 최적화		
		최적항로		
전후처리	이산화탄소 (OCCS)	Post-combustion		
		Pre-combustion		
	메탄가스	Methane catalysts in exhaust		
		Reliquifaction in venting		
		Plasma reduction		

***** 응답해주셔서 감사합니다. *****

일반사업 2023-15-02

해양 탄소중립 과학기술 국제협력 여건 조사·분석

인 쇄 2023년 12월 29일
발 행 2023년 12월 31일

발 행 인 김 종 덕
발 행 처 한국해양수산개발원
주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)
연 락 처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)
등 록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 갭스앤디 컴퍼니 (051-911-9890)

비매품