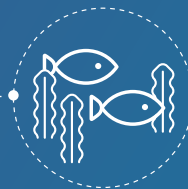


그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구

A Study on Response Strategies for the Transition
to Green Ammonia as Marine Fuel

전서연 · 안용성 · 허성례 · 이향숙 · 이지원 · 이인호



그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구

A Study on Response Strategies for the Transition
to Green Ammonia as Marine Fuel

전서연 · 안용성 · 허성례 · 이향숙 · 이지원 · 이인호



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	전서연, 안용성, 허성례, 이향숙, 이지원, 이인호
내부연구진	연구책임자 전서연 한국해양수산개발원 해운연구본부 전문연구원 공동연구원 안용성 한국해양수산개발원 해양연구본부 부연구위원 공동연구원 허성례 한국해양수산개발원 해운연구본부 전문연구원
외부연구진	공동연구원 이향숙 인천대학교 산학협력단 교수 공동연구원 이지원 인천대학교 산학협력단 연구원 공동연구원 이인호 인천대학교 산학협력단 연구원
연구기간	2025. 1. 1. ~ 2025. 10. 31.
보고서 집필내역	
연구책임자	전서연 연구총괄, 제1장, 제2장 제1절 제2절 일부 제3절, 제3장 제1절 일부 제2절 일부 제3절, 제5장, 제6장
내부연구진	안용성 제4장 1절, 2절 일부 허성례 제2장 제2절 일부, 제3장 제1절 일부 제2절 일부
외부연구진	이향숙 제4장 2절 일부 이지원 제4장 2절 일부 이인호 제4장 2절 일부
산·학·연·정 연구자문위원	김형수 한국선급 수석 박치병 국립한국해양대학교 교수 최홍식 해양수산부 해사산업기술과 주무관

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

오늘날 국제 해운 산업은 기후변화 대응이라는 과제에 직면해 있다. 2023년 7월 국제해사기구(IMO)의 제80차 해양환경보호위원회(MEPC 80)에서 2050년 탈탄소화라는 목표를 채택하면서 해운 분야에서 무탄소 연료로의 전환은 더 이상 선택이 아닌 필수가 되었다. 유럽연합(EU)의 FuelEU Maritime 등과 같은 규제들은 친환경 선박 연료의 선택을 의무화하고 있으며, 연료의 전과정 평가(Well to Wake; WtW)를 도입하여 연료의 생산 단계부터 친환경성을 요구하고 있다.

이러한 국제적인 흐름 속에서 그린 암모니아는 청정성, 기존 인프라 활용의 용이성 등 여러 장점으로 인해 미래 선박 연료의 유력한 대안으로 급부상하고 있다. 국제에너지기구(IEA)는 2050년 해운 분야의 대체 연료 가운데 암모니아가 가장 높은 비중(44%)을 차지할 것으로 전망하고 있으며 세계 각국은 이미 그린 암모니아의 생산, 벙커링 인프라 구축, 이와 관련된 기술 개발에 경쟁적으로 뛰어들고 있다.

그러나 국내에서 그린 암모니아 선박 연료를 도입하기 위한 준비는 아직 미흡한 실정이다. 현재 우리나라는 암모니아를 전량 수입하고 있으며, 정부의 정책은 발전용 등 타 분야에 집중되어 있어 선박 연료로서의 그린 암모니아의 공급 및 활용에 대한 구체적이고 종합적인 계획이 필요한 상황이다.

이에 본 연구는 국내에 그린 암모니아 선박 연료를 도입하기 위한 여건을 공급, 활용, 기술적·제도적인 측면에서 종합적으로 진단하고, 수요와 공급 메커니즘의 동태적인 상호작용을 정량적으로 분석하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 법·제도 정비, 인프라 구축 및 운영, 그린 암모니아 선박 연료 활용 자원이라는 세 가지 기본 방향 하에 정책 과제를 제시하였다. 이를 통해 국내 해운 산업이 그린 암모니아 선박 연료로 전환할 수 있도록 기반을 다지고, 국제 환경 규제에 선제적으로 대응하는 데 기여하고자 한다.

끝으로 본 연구를 수행한 연구진과 적절한 조언으로 연구의 완성도를 높여주시는 자문위원 및 전문가분들께 깊은 감사를 드린다.

2025년 12월
한국해양수산개발원
원장 조 정 희

목차

정책제안 _ i

요약 _ iii

Executive Summary _ xi

01	서론 _1	
	제1절 연구 배경 및 목적	1
	1. 연구 배경 및 필요성	1
	2. 연구 목적	9
	제2절 연구 내용 및 방법	10
	1. 연구 범위 및 주요 내용	10
	2. 연구 방법	13
	제3절 선행연구와 본 연구의 차별성	15
	1. 선행연구 검토	15
	2. 본 연구의 차별성	19
02	그린 암모니아 선박 연료의 특성과 동향 _21	
	제1절 선박 연료로서 그린 암모니아	22
	1. 국제 해운 분야 환경 규제	22
	2. 그린 암모니아 선박 연료의 특성	27
	제2절 그린 암모니아 선박 연료 동향	33
	1. 세계 수급 동향 및 전망	33
	2. 관련 기술 동향	41
	3. 주요국 정책 및 사례	49
	제3절 소결	57

03 국내 그린 암모니아 선박 연료 도입 여건_59

제1절 그린 암모니아 선박 연료 공급 여건	60
1. 공급 관련 정책 및 법·제도	60
2. 생산 및 벙커링 기술	78
3. 인프라 기반	80
4. 산업 부문 동향	82
제2절 암모니아 선박 연료 활용 여건	85
1. 활용 관련 정책 및 법·제도	85
2. 암모니아 추진 선박 기술	91
3. 선사 동향	92
제3절 전문가 인식 조사	93
1. 조사 개요	93
2. 조사 결과	95
제4절 소결	128

04 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 영향 요인 분석_133

제1절 미래 정책 메커니즘의 안정성 평가를 위한 분석도구	134
1. 시스템 다이내믹스의 개요	134
2. 인과지도 및 모형의 구성	135
제2절 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘 분석	136
1. 시뮬레이션 모델의 구조 설계	136
2. 인과지도의 도출	143
3. 목표 지표에 따른 민감도 분석	157
4. 정책적 시사점	161
제3절 소결	163

05	그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 _165	
	제1절 기본 방향	165
	제2절 정책 대응 방안	167
	1. 법·제도 정비	167
	2. 인프라 구축 및 운영	171
	3. 그린 암모니아 선박 연료 활용 지원	175
	4. 추진 로드맵	180
	제3절 기대효과	182
	1. 정책적 기대효과	182
	2. 사회·경제적 기대효과	183

06	결론 및 정책제언 _185	
	제1절 요약 및 결론	185
	제2절 정책제언	188
	1. 그린 암모니아 선박 연료 민간 협력 거버넌스 구축	188
	2. 그린 암모니아 선박 연료 bunker링 통계 관리	188
	3. 그린 암모니아 선박 연료에 대한 인식 개선	189

	참고문헌 _191	
--	------------------	--

	부록 _203	
--	----------------	--

표 목차

〈표 1-1〉 국제 해운 분야 대체에너지 비중 전망	4
〈표 1-2〉 연구 목적	10
〈표 1-3〉 그린 암모니아 선박 연료의 특성과 동향	11
〈표 1-4〉 국내 그린 암모니아 선박 연료 도입 여건	11
〈표 1-5〉 국내 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘 영향 요인 분석	12
〈표 1-6〉 정책협의 및 전문가 자문	14
〈표 1-7〉 선행연구와 본 연구의 차별성	20
〈표 2-1〉 GFI 연간 감축 목표	23
〈표 2-2〉 Fuel EU Maritime 연간 탄소집약도 감축 목표 및 탄소집약도 제한치	26
〈표 2-3〉 선박 연료별 특성 비교	31
〈표 2-4〉 선박 연료별 가격 전망	32
〈표 2-5〉 기존 암모니아 주요 수출입국(2024년 기준)	33
〈표 2-6〉 암모니아 추진 선박 인도 계획	36
〈표 2-7〉 국가별 그린 암모니아 프로젝트 생산 목표치	38
〈표 2-8〉 그린 및 블루 암모니아 프로젝트의 선박 연료 공급 계획	39
〈표 2-9〉 선박 연료용 그린 및 블루 암모니아 프로젝트 현황	40
〈표 2-10〉 수전해 기술별 장단점 비교	42
〈표 2-11〉 그린 암모니아 생산 기술성숙도(TRL)	44
〈표 2-12〉 벙커링 방식 비교	45
〈표 2-13〉 암모니아 선박 연료의 운송 및 벙커링 기술성숙도(TRL)	46
〈표 2-14〉 암모니아 선박 내연기관 엔진기술 개발	47
〈표 2-15〉 암모니아 추진 선박 기술성숙도(TRL)	48
〈표 2-16〉 암모니아 선박 연료 관련 주요국 정책 및 사례	56
〈표 2-17〉 국제 해운분야 환경 규제	57
〈표 3-1〉 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획	62
〈표 3-2〉 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축방안’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획	63
〈표 3-3〉 H2 STAR 프로젝트(안)	65
〈표 3-4〉 ‘제1차 수소경제이행 기본계획’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획	66
〈표 3-5〉 ‘청정수소 생태계 조성방안’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획	67

〈표 3-6〉 암모니아 운송·저장 설비 안전기준 마련(수소 안전관리 로드맵 2.0)	69
〈표 3-7〉 부산 암모니아 친환경에너지 규제자유특구	71
〈표 3-8〉 그린 암모니아 공급 관련 국내 공공 부문 계획(종합)	73
〈표 3-9〉 국내 암모니아 저장시설 규모	80
〈표 3-10〉 국내 암모니아 인수기지 구축 계획	81
〈표 3-11〉 국내 암모니아 수출입 실적	82
〈표 3-12〉 국내 기업의 그린 암모니아 생산 계획	83
〈표 3-13〉 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획’의 암모니아 선박 관련 추진 계획	86
〈표 3-14〉 ‘친환경 선박 전주기 혁신기술 개발 사업’의 암모니아 선박 관련 추진 계획	88
〈표 3-15〉 경남 암모니아 혼소 연료추진시스템 선박 규제자유특구	89
〈표 3-16〉 설문조사 개요	94
〈표 3-17〉 설문조사 응답자 특성	95
〈표 3-18〉 현재 선박 연료 사용(1순위, 2순위, 3순위)	96
〈표 3-19〉 2030년 선박 연료 사용 전망(1순위, 2순위, 3순위)	97
〈표 3-20〉 2040년 선박 연료 사용 전망(1순위, 2순위, 3순위)	98
〈표 3-21〉 2050년 선박 연료 사용 전망(1순위, 2순위, 3순위)	99
〈표 3-22〉 그린 암모니아 추진 선박 전환 시기 판단 이유(서술형)	102
〈표 3-23〉 국내·외 알칼리 전기분해 기술 준비 정도 현황 및 전망	107
〈표 3-24〉 국내·외 고분자 전해질막(PEM) 전기분해 기술 준비 정도 현황 및 전망 ..	107
〈표 3-25〉 국내·외 고체산화물(SOEC) 전기분해 기술 준비 정도 현황 및 전망	108
〈표 3-26〉 국내·외 저온·저압 암모니아 합성 기술 준비 정도 현황 및 전망	108
〈표 3-27〉 국내·외 그린 암모니아 생산의 기술적 준비 정도(종합) 현황 및 전망	109
〈표 3-28〉 암모니아 벙커링 관련 국내 저장 기술 준비 정도 현황 및 전망	110
〈표 3-29〉 암모니아 벙커링 관련 국내 연료 주입 기술 준비 정도 현황 및 전망	111
〈표 3-30〉 암모니아 벙커링 관련 국내 누출 방지·예방·대응 기술 준비 정도 현황 및 전망	111
〈표 3-31〉 국내 암모니아 벙커링 기술적 준비 정도(종합) 현황 및 전망	112
〈표 3-32〉 국내·외 암모니아 추진 선박 4행정 엔진 기술 준비 정도 현황 및 전망 ..	113

〈표 3-33〉 국내·외 암모니아 추진 선박 2행정 엔진 기술 준비 정도 현황 및 전망	114
〈표 3-34〉 국내·외 암모니아 추진 선박 가스터빈 기술 준비 정도 현황 및 전망	114
〈표 3-35〉 국내·외 암모니아 추진 선박 연료전지 기술 준비 정도 현황 및 전망	115
〈표 3-36〉 국내·외 암모니아 추진 선박 그린 파일럿 연료 사용 기술 준비 정도 현황 및 전망	115
〈표 3-37〉 국내·외 암모니아 추진 선박 독성 처리 기술 준비 정도 현황 및 전망	116
〈표 3-38〉 국내·외 암모니아 추진 선박 아산화질소 배출관리 기술 준비 정도 현황 및 전망	116
〈표 3-39〉 국내·외 암모니아 추진 선박 기술적 준비(종합) 정도 현황 및 전망	117
〈표 3-40〉 현재 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항(1순위, 2순위, 3순위)	118
〈표 3-41〉 2030년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1순위, 2순위, 3순위)	119
〈표 3-42〉 2040년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1순위, 2순위, 3순위)	121
〈표 3-43〉 2050년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1순위, 2순위, 3순위)	122
〈표 3-44〉 대체연료 활용을 촉진하기 위한 유인책(서술형)	124
〈표 3-45〉 그린 암모니아 추진 선박의 도입과 확산을 위한 유인책(서술형)	125
〈표 3-46〉 그린 암모니아 추진 선박 활성화를 위한 정책 우선순위(1~6순위)	127
〈표 5-1〉 청정수소 인증 등급	170
〈표 5-2〉 정책 과제별 추진 로드맵	180
〈부록 표 1-1〉 수요 전망 영역 변수 리스트	204
〈부록 표 1-2〉 공급 예측 영역 변수 리스트	206
〈부록 표 1-3〉 기술적 준비 영역 변수 리스트	207
〈부록 표 1-4〉 제도적 준비 영역 변수 리스트	211

그림 목차

〈그림 1-1〉 에너지별 최종 소비량 비중 전망	2
〈그림 1-2〉 선박 연료의 전과정(Well to Wake) 온실가스 배출	4
〈그림 2-1〉 IMO 중기조치 이행 체계	24
〈그림 2-2〉 선박 연료의 전과정(Well to Wake) 온실가스 배출	25
〈그림 2-3〉 생산 방식에 따른 암모니아 구분	28
〈그림 2-4〉 연료별 온실가스 집약도 및 FuelEU Maritime 제한 기준	29
〈그림 2-5〉 사용처별 글로벌 저탄소 암모니아 수요 전망	35
〈그림 2-6〉 해운 분야 대체에너지 비중 전망	37
〈그림 2-7〉 그린 암모니아 생산 기술	43
〈그림 3-1〉 현재 선박 연료 사용(1+2+3순위 종합)	96
〈그림 3-2〉 2030년 선박 연료 사용 전망(1+2+3순위 종합)	97
〈그림 3-3〉 2040년 선박 연료 사용 전망(1+2+3순위 종합)	98
〈그림 3-4〉 2050년 선박 연료 사용 전망(1+2+3순위 종합)	99
〈그림 3-5〉 선박 연료 사용 비중 변화 전망(1+2+3순위 종합)	100
〈그림 3-6〉 국내 선사 암모니아 추진 선박 도입 계획	101
〈그림 3-7〉 그린 암모니아 추진 선박 전환 시기 전망	101
〈그림 3-8〉 그린 암모니아 선박 연료 적용 도입 시기	103
〈그림 3-9〉 국내·외 패네티 및 규제 강도 현황 및 전망	104
〈그림 3-10〉 국내·외 인센티브 및 보조금 지원제도 수준 현황 및 전망	105
〈그림 3-11〉 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 법·제도적 준비 정도 현황 및 전망	106
〈그림 3-12〉 국내 그린 암모니아 생산의 기술적 준비 정도 현황 및 전망	110
〈그림 3-13〉 국내 암모니아 벙커링의 기술적 준비 정도 현황 및 전망	112
〈그림 3-14〉 국내 암모니아 추진 선박 기술적 준비 정도 현황 및 전망	118
〈그림 3-15〉 현재 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항(1+2+3순위 종합)	119
〈그림 3-16〉 2030년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망 (1+2+3순위 종합)	120
〈그림 3-17〉 2040년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망 (1+2+3순위 종합)	121
〈그림 3-18〉 2050년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망	

(1+2+3순위 종합)	122
〈그림 3-19〉 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 변화 전망 (1+2+3순위 종합)	123
〈그림 3-20〉 그린 암모니아 추진 선박 활성화를 위한 정책 우선순위 (1~6순위 종합)	128
〈그림 4-1〉 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 개념모형	138
〈그림 4-2〉 상위 인과지도	144
〈그림 4-3〉 수요 전망 영역 인과지도	147
〈그림 4-4〉 공급 예측 영역 인과지도	151
〈그림 4-5〉 기술적 준비 영역 인과지도	153
〈그림 4-6〉 제도적 준비 영역 인과지도	156
〈그림 4-7〉 공급-수요 격차에 대한 인프라 구축 수준 민감도 분석	158
〈그림 4-8〉 공급-수요 격차에 대한 제도적 준비 정도 민감도 분석	160
〈그림 4-9〉 공급-수요 격차에 대한 기술적 준비 정도 민감도 분석	161

약어 목록

- EMSA(유럽해사안전국): European Maritime Safety Agency
- ICE(내연기관): Internal Combustion Engine
- IEA(국제에너지기구): International Energy Agency
- IRENA(국제재생에너지기구): International Renewable Energy Agency
- RFNBO(비생물계 재생에너지 연료): Renewable Fuels of Non-Biological Origin

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. 문헌 조사를 통해 그린 암모니아 선박 연료의 특성과 수요·공급 및 기술 동향, 해외의 정책 사례 및 국내 도입 환경을 파악함
2. 전문가 대상 설문조사와 자문회의를 통해 국내·외 선박 연료의 현황과 전망, 그린 암모니아 선박 연료의 공급과 활용에 대한 기술적·제도적인 준비 정도, 애로사항, 정책 수요 등을 파악함
3. 시스템 다이내믹스 분석을 통해 국내 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘을 구축하기 위한 공급 및 인프라 준비, 제도적·기술적인 준비 등의 동학적 상호작용을 분석함

■ 정책제안

1. 법·제도 정비
 - 그린 암모니아를 선박 연료로서 공급 시 법적 지위를 명확하게 하기 위해 「항만운송사업법 시행령」 별표 6에 저인화점 연료(암모니아 등) 공급선을 별도 유형으로 추가하는 방안과 청정암모니아 인증 제도 마련을 제안함

2. 인프라 구축 및 운영

- 그린 암모니아 항만 인프라를 구축하기 위해 항만의 특성과 기술 성숙도를 고려한 그린 암모니아 항만 구축 전략 수립, 암모니아 저장 기지 구축 및 병커링 선박 도입 지원을 제시함
- 그린 암모니아 연료 공급의 안정적인 확보를 위해 안전사고 예방 대책 및 안전 지침 마련, 누출 사고에 대한 대응 체계 구축을 제시함
- 그린 암모니아 연료와 관련된 전문인력을 확보하기 위해 관련 커리큘럼 개발 및 운영, 교육 인프라 구축 지원을 제시함

3. 그린 암모니아 선박 연료 활용 지원

- 연료 업체와 선사 간 공동 생산 프로젝트 참여 및 장기운송 계약 지원 등 그린 암모니아 선박 연료 협력 체계 구축을 제시함
- 그린 암모니아 선박 연료 연구를 위한 혁신프로그램 등 기술 개발 및 실증 지원 확대를 제시함
- 화석 연료 사용에 대한 규제 강화, RFNBO 연료 사용 의무화 추진, 암모니아 추진 선박의기자재 인증 확대 등을 통한 인센티브 제공 등을 제시함

요 약

그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구

전서연 · 안용성 · 허성례 · 이향숙 · 이지원 · 이인호

1. 연구 배경 및 목적

1) 연구 배경

- 국제 항해 선박에 대한 환경규제가 강화되면서 저탄소 및 무탄소 선박 연료의 중요성이 확대됨
 - IMO는 2050년 해운 분야의 탄소배출 감축 목표를 100%로 상향하고, 선박의 온실가스를 감축하기 위한 중기조치(Net-Zero Framework)를 공식적으로 승인함
 - EU는 해운 분야의 EU-ETS 적용 및 FuelEU Maritime을 통해 해운 부문의 에너지 총 사용량에서 RFNBO의 비중을 최소 1.2%로 의무화함
 - 국제 환경 규제에 대응하기 위해서는 선박의 에너지 효율을 개선하는 것만으로는 한계가 있으며 궁극적으로 무탄소 연료로의 전환이 필요함
- 선박 연료의 전주기 과정이 부각되면서 선박 연료의 생산 과정에 대한 친환경성을 고려할 필요가 있음

-
- IMO, EU 등은 선박 연료에 대한 전과정 평가를 도입하여 선상에서 배출되는 온실가스(Tank to Wake)뿐만 아니라 연료의 채굴, 제조, 유통과정에서 배출되는 온실가스(Well to Tank)를 모두 고려함
 - 이에 따라 화석 연료를 기반으로 한 암모니아는 저탄소·무탄소 연료로서 활용이 어려우며 재생 에너지를 기반으로 한 그린 암모니아가 적합한 연료임
 - 국제에너지기구(IEA)에서는 2050년 해운 분야 에너지에서 암모니아의 비중을 44%로 전망함
 - 국내에서는 전반적으로 친환경 선박 개발·보급 등 활용 측면에 집중하는 경향이 있으며 그린 암모니아 연료 공급 차원의 계획은 부족함
 - 그린 암모니아를 선박 연료로서 전환하기 위한 체계 구축이 필요함
 - 이를 위해 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건에 대한 종합적인 검토가 필요함

2) 국정과제 연계성

- 국정 과제 중 ‘북극항로 시대를 주도하는 K-해양강국 건설(국정과제 56)’, ‘지속가능 미래를 위한 탄소중립 실현(국정과제 40)’에 활용함
- 그린 암모니아 선박 연료 전환을 지원하여 친환경 선박을 중심으로 해운 경쟁력을 제고하고, 무탄소 선박 등 조선업의 도약에 기여함
- 그린 암모니아 선박 연료를 공급하기 위한 항만 인프라를 조성하여 해운 산업 부문의 탄소경쟁력을 강화할 수 있음

3) 연구 목적

- 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건을 종합적으로 분석하고, 향후 안정적인 연료 체계를 구축하기 위한 정책 방향을 제시함

- 그린 암모니아 선박 연료의 수요·공급, 기술, 제도 등 다양한 측면으로 여건을 검토함
- 그린 암모니아 선박 연료 체계를 안정적으로 구축하기 위한 정책 방안을 제시함

2. 연구 방법

- (국내외 문헌 조사) 그린 암모니아 선박 연료의 특성, 그린 암모니아의 수요·공급 및 기술 동향, 해외의 정책 사례 및 국내 도입 환경을 파악함
- (전문가 설문조사) 그린 암모니아 선박 연료의 도입과 관련한 국내·외의 현황 및 전망 조사
 - 선박 연료의 현황과 전망, 그린 암모니아 선박 연료의 공급 및 활용에 대한 기술적·제도적인 준비 정도, 그린 암모니아 선박 도입 시 애로사항, 정책 수요 등을 도출함
- (시스템 다이내믹스) 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘을 구축하기 위한 공급 및 인프라 준비, 제도적·기술적인 준비 등의 동학적 상호작용을 분석함
 - 그린 암모니아 선박 연료 체계의 안정적인 도입 및 운용, 확산 등에 영향을 미치는 요인과 영향 정도 등을 식별함
- (전문가 자문) 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건 파악 및 전문가 대상 설문조사지의 적절성 검토
- (정책협의회) 연구 방향 논의 및 연구 결과의 정책화 모색

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- 해운 분야의 국제 환경 규제가 강화되면서 대체 선박 연료로서 그린 암모니아에 대한 관심이 확대됨
 - IMO는 전 과정을 기준으로 온실가스 배출집약도를 평가하고 탄소세를 부과하는 'Net-Zero Framework'를 승인했으며('25), EU는 2025년부터 FuelEU Maritime 하에 선박 온실가스의 탄소집약도를 제한함
 - 재생에너지로 생산된 그린 암모니아는 생산 과정에서 CO₂ 배출을 최소화하여 전과정 평가를 적용할 때 무탄소 연료로서 장점을 보유함. 단 독성과 낮은 에너지 밀도는 해결 과제임
 - 암모니아 병커링 기술은 실증 단계이며, 암모니아 선박 엔진 기술은 상용화를 앞두고 있음
 - 일본, 중국, 싱가포르, 호주, 네덜란드 등 주요 국가는 그린 암모니아의 생산 및 선박 기술 개발·실증 지원, 병커링 인프라 구축, 안전 지침 및 교육 제도의 마련, 민관 협력 지원 등을 적극적으로 추진 중임
- 국내 그린 암모니아 선박 연료 도입을 위한 공급 여건
 - (생산) 우리나라는 암모니아 전량을 수입하고 있으며, 주로 해외 청정수소 도입의 운반체로 고려 중임
 - (정책·제도) 암모니아는 현행법상 선박 연료가 아닌 유독 물질 및 고압가스로 관리되며 항만 내 병커링 작업은 규제자유특구 등 특례를 통해 실증 중임
 - (인프라) 국내에는 총 18만 7천 톤 규모의 암모니아 저장 시설이 있으며, 정부는 2030년까지 울산항에 21만 톤의 저장탱크, 여수·광양항에 청정 암모니아 인수기지를 구축할 예정임

- **국내 그린 암모니아 선박 연료 도입 여건에 대한 전문가 인식 조사 결과**
 - (활용 전망) 2040년부터 암모니아가 주요 선박 연료로서 사용될 가능성이 높으며, 그린 암모니아 선박 연료의 적정한 도입 시기는 2030년~2040년 이 될 것으로 전망함
 - (애로사항) 현재는 ‘기술적인 불확실성(51.9%)’의 응답 비중이 가장 높으나 2030년 이후에는 ‘연료 비용에 대한 부담(44.4%)’과 ‘연료 공급망의 부족(29.6%)’ 순으로 높게 나타남
 - (정책 우선 순위) 그린 암모니아 추진 선박을 활성화하기 위한 정책적인 우선 순위는 ‘선박의 탄소배출 규제의 강화(22.2%)’, ‘연료 공급 병커링 인프라 구축 및 지원(20.9%)’ 순으로 높게 나타남
- **국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 영향 요인 분석 결과**
 - (인프라 구축) 병커링 인프라 구축 수준은 2036년~2044년 구간에 그린 암모니아 선박연료의 공급과 수요 격차의 변동성을 급격히 확대하는 지렛대 변수임
 - (제도적 준비) 제도적인 준비 정도(규제, 인센티브)의 민감도를 분석한 결과 유효한 정책 도구의 투입 속도와 강도 차이가 공급과 수요 격차에 영향을 줌. 이는 조기에 적극적인 정책적 개입이 필요하다는 것을 나타냄
 - (기술적 준비) 기술적인 준비 정도는 단독 변수로서 공급과 수요 격차 문제를 해결할 수 없으나 장기적으로 선박 연료 공급의 안정성과 확산을 촉진함
 - (시사점) 그린 암모니아 선박 연료의 전환은 인프라 구축, 제도적인 준비, 기술 안정성이 유기적으로 결합하여 통합적인 정책으로 추진되어야 함

2) 정책화 방안

- 기본 방향은 법·제도의 정비, 인프라 구축 및 운영, 그린 암모니아 선박 연료의 활용 지원으로 구분함
- (법·제도 정비) 그린 암모니아 선박 연료를 공급하기 위한 법적 지위의 명확화 및 청정 암모니아의 인증제도 마련
 - 「항만운송사업법 시행령」 별표 6 「항만 운송 관련 사업의 등록 및 신고 기준」에 저인화점 연료(암모니아 등)의 공급선을 별도 유형으로 추가하고, 암모니아 하역 선박 연료 공급선의 안정적인 작업 절차 등을 마련함
 - 청정수소 인증제와 연계하여 선박연료용 암모니아의 청정성을 추가하고, 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」의 별표 22 ‘연료유공급선의 양식’을 개정해야 함
- (인프라 구축 및 운영) 그린 암모니아 항만 인프라의 구축, 그린 암모니아 연료 공급 안전성 확보, 그린 암모니아 연료에 대한 전문인력 확보 등을 추진함
 - 그린 암모니아 항만을 구축하기 위한 전략을 수립하고, 암모니아 저장기지 구축과 암모니아 병커링을 위한 선박 등 인프라 도입을 지원함
 - 그린 암모니아 연료의 공급 안전성을 확보하기 위해 암모니아 병커링의 안전 사고 예방 대책 개발 및 암모니아 병커링 누출 사고에 대한 대응 체계를 구축함
 - 암모니아 선박 연료 관련 커리큘럼 개발 및 운영, 교육 인프라 구축에 대한 지원 등을 통해 그린 암모니아 연료와 관련된 전문인력을 확보함
- (그린 암모니아 선박 연료 활용 지원) 그린 암모니아 선박 연료 협력 체계 구축, 기술 개발 및 실증 지원 확대, 연료 전환에 대한 규제 및 인센티브의 확대

- 그린 암모니아 선박 연료 협력 체계를 구축하여 연료 생산업체와 선사 간의 협력 프로젝트를 지원하고, 그린 암모니아 선박 연료의 공급과 관련한 로드맵을 수립함
- 기술 개발 및 실증 지원을 확대하기 위해 민관 협력의 중점 기술을 선정 및 지원하고, 그린 암모니아 선박 연료 연구 혁신 프로그램을 운영함
- 해운 부문에서 화석 연료 사용에 대한 패널티를 지속하고 RFNBO 사용량을 의무화함. 이와 함께 친환경 선박, 기자재의 인증제도에 그린 암모니아 추진 선박을 적용하여 인센티브를 확대함

4. 기대 효과

1) 정책적 기대 효과

- 그린 암모니아 선박 연료와 관련한 법·제도적인 공백의 해소 및 활용도를 확대함
 - 그린 암모니아를 친환경 연료로 포함한다는 정부의 공식적인 의견을 제시하여 암모니아 선박 연료 공급 사업자의 등록 및 심사 기준을 명확화함
- 그린 암모니아 선박 연료의 공급 준비도를 향상시킴
 - 항만 인프라 구축 및 지원 정책을 통해 그린 암모니아 선박 연료의 안정적인 병커링을 지원함
 - 연료 업체와 선사 간의 협력 체계를 구축을 통해 그린 암모니아 선박 연료의 공급망 리스크에 선제적으로 대응할 수 있음
- 그린 암모니아 선박 연료 관련 기술의 불확실성을 해소함
 - 기술 및 실증 사업 지원을 통해 기술의 안전성을 확보하는 효과를 기대함

2) 사회·경제적 기대 효과

- 고숙련된 일자리의 창출
 - 그린 암모니아의 병커링 및 해기 교육 등을 통해 전문 인력을 확보할 수 있으며 그린 암모니아 선박 연료를 안전하게 취급 가능함
- 그린 암모니아 선박 연료에 대한 사회적인 수용성의 확대
 - 그린 암모니아 병커링 안전 지침의 마련, 안전 사고에 대한 대응 체계의 구축 등을 통해 선사와 화주 및 항만 지역 주민들의 수용성을 확대함

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on Response Strategies for the Transition to Green Ammonia as Marine Fuel

Seo-Yeon Jeon · Yong-Sung Ahn · Sung-Rye Hu · Hyang-Sook Lee ·
Ji-Won Lee · In-Ho Lee

1. Background and Purpose

1) Background

- As environmental regulations for international shipping vessels become increasingly stringent, the importance of low-carbon and zero-carbon marine fuels continues to grow.
- The IMO has increased its 2050 carbon emissions reduction target for the shipping sector to 100% and has officially approved mid-term measures (the Net-Zero Framework) to reduce greenhouse gas emissions from ships.
- The EU has mandated a minimum share of 1.2% for renewable fuels of non-biological origin (RFNBOs) in the maritime sector's total energy consumption through the application of the EU Emissions Trading System (EU ETS) and the FuelEU Maritime

regulation.

- Improving ship energy efficiency alone has limitations in responding to international environmental regulations. Ultimately, a transition to zero-carbon fuels is necessary.
- As the lifecycle approach to marine fuels gains prominence, the environmental sustainability of fuel production processes must be considered.
- The IMO, the EU, and other regulatory bodies have introduced lifecycle assessments for marine fuels. These assessments consider greenhouse gas emissions not only from shipboard operations (Tank-to-Wake) but also from fuel extraction, production, and distribution processes (Well-to-Tank).
- As a result, it is difficult to utilize fossil fuel-based ammonia as a low-carbon or zero-carbon fuel, making green ammonia produced from renewable energy appropriate fuel option.
- The International Energy Agency (IEA) projects that ammonia will account for 44% of the maritime sector's energy mix by 2050.
- In Korea, efforts have generally focused on utilization, such as developing and deploying eco-friendly vessels, However plans for green ammonia fuel supply remain insufficient.
- A systematic framework for transitioning to green ammonia as a marine fuel needs to be established.
- This requires a comprehensive review of the conditions necessary for introducing green ammonia as a marine fuel.

2) Relevance to National Projects

- This study supports the following national policy agendas: ‘Building a K-Maritime Powerhouse Leading the Arctic Route Era (National Agenda No. 56)’ and ‘Achieving Carbon Neutrality for a Sustainable Future (National Agenda No. 40)’.
- Supporting the transition to green ammonia as a marine fuel will enhance the competitiveness of the maritime industry, centered on eco-friendly vessels and contribute to advancing the shipbuilding industry through zero-carbon ships.
- Developing port infrastructure for green ammonia fuel supply can strengthen the carbon competitiveness of the maritime industry.

3) Purpose

- This study provides a comprehensive analysis of the conditions for introducing green ammonia as a marine fuel in Korea and presents policy recommendations for establishing a stable fuel system.
- The study examines conditions from various perspectives, including demand and supply, technology, and institutional frameworks for green ammonia as a marine fuel.
- It also proposes policy measures for establishing a stable green ammonia marine fuel system.

2. Methodology

- (Domestic and International Literature Review) Examining the characteristics of green ammonia as a marine fuel; supply and demand; technological trends; overseas policy cases; and the domestic introduction environment.
- (Expert Survey) Investigating the domestic and international status and prospects related to the introduction of green ammonia as a marine fuel.
 - The survey identifies the current status and prospects of marine fuels, the level of technological and institutional preparedness for supplying and utilizing green ammonia as a marine fuel, the challenges involved in introducing green ammonia-fueled vessels, and policy needs.
- (System Dynamics) Analyzing the dynamic interactions among supply and infrastructure preparedness, and institutional and technological preparedness for establishing the green ammonia marine fuel mechanism.
 - The analysis identifies the factors influencing the stable introduction, operation and diffusion of the green ammonia marine fuel system and the degree of their impact.
- (Expert Consultation) Assessing the conditions for introducing green ammonia as a marine fuel in Korea and reviewing the appropriateness of the expert survey questionnaire.

- (Policy Consultation Meeting) Discussing research directions and exploring the policy implementation of research findings.

3. Results

1) Summary

- As international environmental regulations for the maritime sector intensify, interest in green ammonia as an alternative marine fuel is growing.
- The IMO approved the Net-Zero Framework in 2025, which evaluates the intensity of greenhouse gas emissions on a lifecycle basis and imposes carbon taxes. The EU is limiting the carbon intensity of greenhouse gas emissions from ships under FuelEU Maritime, which comes into effect in 2025.
- Green ammonia produced from renewable energy minimizes CO₂ emissions during the production process, and offers advantages as a zero-carbon fuel when lifecycle assessment is applied. However, toxicity and low energy density remain challenges to be addressed.
- Ammonia bunkering technology is currently at the demonstration stage, while ammonia marine engine technology is approaching commercialization.
- Major countries including Japan, China, Singapore, Australia, and the Netherlands, are actively pursuing green ammonia

production and developing and demonstrating vessel technology, building bunkering infrastructure, creating safety guidelines and training systems, and supporting public-private partnerships.

- Korea's conditions for introducing green ammonia as a marine fuel:
 - (Production) Korea imports all of its ammonia and is primarily considering it as a means of importing clean hydrogen from overseas.
 - (Policy and Regulation) Under current legislation, ammonia is classified as a toxic substance and a high-pressure gas rather than as a marine fuel. Bunkering operations within ports are being demonstrated through special exceptions, such as in Regulatory-Free Special Zones.
 - (Infrastructure) Korea has ammonia storage facilities with a total capacity of 187,000 tons. The government plans to build a 210,000-ton storage tank in Ulsan Port, as well as clean ammonia import terminals in Yeosu and Gwangyang Ports by 2030.
- Expert perception survey results on the conditions for introducing green ammonia as a marine fuel in Korea:
 - (Adoption Outlook) Ammonia is likely to be used as a major marine fuel starting in 2040, with the appropriate introduction period for green ammonia forecasted to be between 2030 and 2040.
 - (Challenges) Currently, 'technological uncertainty (51.9%)' shows the highest response rate. However, after 2030, 'fuel cost burden (44.4%)' and 'fuel supply chain shortages (29.6%)' are

expected to be the main challenges.

- (Policy Priorities) Policy priorities for promoting green ammonia-fueled vessels are ranked in the following order: ‘strengthening carbon emission regulations for ships (22.2%)’, followed by ‘establishing and supporting fuel supply bunkering infrastructure (20.9%)’.
- **Analysis of factors influencing the green ammonia marine fuel mechanism in Korea:**
 - (Infrastructure Development) The level of bunkering infrastructure development is a leverage variable that drastically amplifies the volatility in the supply-demand gap for green ammonia marine fuel during the 2036-2044 period.
 - (Institutional Preparedness) Sensitivity analysis of the degree of institutional preparedness (regulations and incentives) shows that differences in the speed and intensity with which effective policy instruments are implemented significantly affect the supply-demand gap. This indicates that early and proactive policy intervention is necessary.
 - (Technological Preparedness) The degree of technological preparedness alone cannot resolve the issue of supply-demand gap. However, it promotes long-term stability and the diffusion of marine fuel supply.
 - (Implications) The transition to green ammonia as a marine fuel must be pursued through integrated policies that organically combine infrastructure development, institutional preparedness, and technological stability.

2) Policy Recommendations

- The basic policy directions are divided into legal and institutional improvements, infrastructure development and operation, and support for green ammonia marine fuel utilization.
- (Legal and Institutional Improvements) Clarifying the legal status of green ammonia marine fuel supply and establishing a clean ammonia certification system.
 - Low-flashpoint fuel (ammonia, etc.) supply vessels should be added as a separate category to Annex 6, 'Registration and Reporting Standards for Port Transportation-Related Businesses', of the Enforcement Decree of the Port Transportation Business Act. Safety operating procedures for ammonia bunkering vessels should be established.
 - Ammonia cleanliness standards for marine fuel use should be added in conjunction with the clean hydrogen certification system. Annex 22, 'Format for Fuel Oil Supply Vessels', of the Rules on the Prevention of Pollution from Ships should be amended.
- (Infrastructure Development and Operation) Pursuing green ammonia port infrastructure development, ensuring green ammonia fuel supply stability, and securing a specialized workforce for green ammonia fuel.
 - A green ammonia port development strategy should be established to support the construction of ammonia storage

facilities and the introduction of ammonia bunkering vessels.

- To ensure the stability of the green ammonia fuel supply, safety measures and a leak response system to prevent accidents during ammonia bunkering should be developed.
- A specialized workforce for green ammonia fuel should be secured by developing and operating curricula related to ammonia marine fuel and supporting the establishment of educational infrastructure.
- (Support for Green Ammonia Marine Fuel Utilization)
Establishing a green ammonia marine fuel cooperation system, expanding technology development and demonstration support, and expanding fuel transition regulations and incentives.
- A green ammonia marine fuel cooperation system should be established to support collaborative projects between fuel producers and shipping companies, and a green ammonia marine fuel supply roadmap should be developed.
- To expand technology development and demonstration support, key technologies for public-private collaboration should be selected and supported, and a green ammonia marine fuel research and innovation program should be implemented.
- Penalties for the use of fossil fuels in the maritime sector should be maintained and the use of RFNBOs should be mandated. In conjunction with this, incentives should be expanded by applying green ammonia-fueled vessels to eco-friendly vessel and equipment certification systems.

4. Expected Outcomes

1) Policy Effects

- Resolving legal and institutional gaps related to green ammonia marine fuel and expanding its utilization
- Registration and examination standards for ammonia marine fuel supply operators will be clarified through an official government statement confirming that green ammonia is included as an eco-friendly fuel.
- Improving supply readiness for green ammonia marine fuel
- Stable bunkering support for green ammonia marine fuel should be provided through the development of port infrastructure and support policies.
- Establishing a cooperation system between fuel suppliers and shipping companies will enable proactive responses to supply chain risks for green ammonia marine fuel.
- Resolving technological uncertainties related to green ammonia marine fuel.
- Technological safety is expected to be secured through support for technology development and demonstration projects.

2) Social and Economic Effects

- Creating highly skilled jobs.

- A specialized workforce can be secured through green ammonia bunkering and maritime education, enabling the safe handling of green ammonia marine fuel.
- Expanding social acceptance of green ammonia marine fuel
 - Acceptance among shipping companies, cargo owners, and port area residents can be increased by establishing green ammonia bunkering safety protocols and building safety incident response systems.

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경 및 필요성

1) 연구 배경

세계 각국은 탄소배출의 저감 및 에너지 안보를 위해 청정에너지로의 전환 정책을 추진하고 있다. EU의 REPower Plan¹⁾, 미국의 인플레이션 감축법(Inflation Reduction Act; IRA)²⁾ 등 청정에너지 분야의 투자를 촉진하기 위한 정책이 진행되고 있으며, 2020년 이후 전 세계에서 청정에너지에 직접적으로 투자하는 지원액은 약 2조 달러로서 2007년 투자 지원액의 약 3배이다.³⁾ 또한 2023년 전 세계에서 재생에너지 분야에 투자한 규모는 약 7,500억 달러로 전 세계 GDP의 1%에 근접한다.⁴⁾ 이처럼 각국이 청정

1) REPower Plan은 러시아산 화석연료 수입을 단계적으로 폐지 및 에너지 공급 다각화, 청정에너지 생산 촉진 등을 포함한 계획이다.

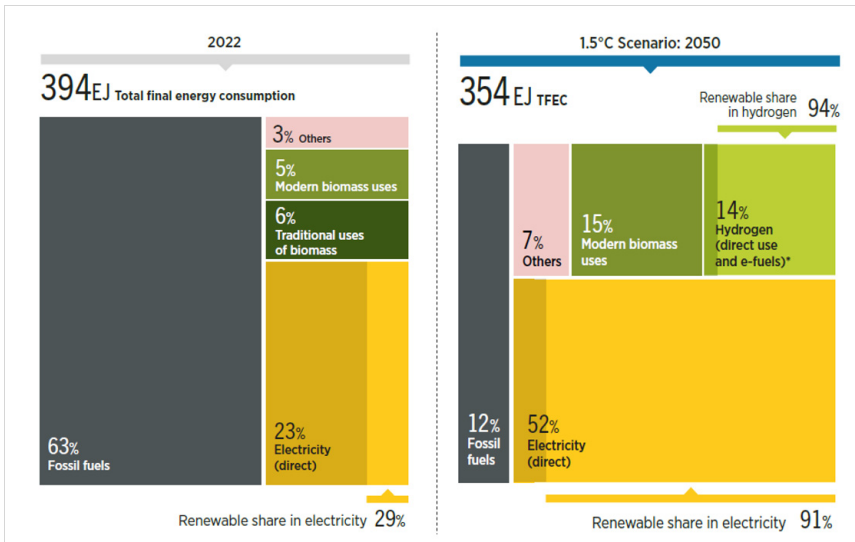
2) IRA는 기후변화 대응 및 청정에너지 활성화를 목표로 하고 있으며 청정에너지에 대한 생산세액 공제 및 투자세액 공제 등을 포함하고 있다.

3) IEA(검색일: 2025.3.26.)

4) IEA(2024), p. 103.

에너지의 비중을 확대하여 에너지 다변화를 모색하면서 최종적인 에너지 소비량에서 석유 소비량의 비중은 2022년 63%에서 2050년 12%로 감소할 것으로 전망된다. 반면에 전기 사용량의 비중은 2022년 23%에서 2050년 52%로 증가하고, 이 가운데 재생에너지원의 비중은 2022년 29%에서 2050년 91%로 증가할 것으로 전망된다. 또한 2050년에는 수소의 사용 비중이 14%가 될 것으로 보이며 이 중 재생에너지원의 비중은 94%로 전망된다.⁵⁾

〈그림 1-1〉 에너지별 최종 소비량 비중 전망



자료: IRENA(2024), p. 34.

이러한 에너지 믹스의 변화는 국제 해운 분야에도 적용된다. 국제 항해 선박에 대한 환경 규제가 강화되면서 저탄소 및 무탄소 선박 연료의 중요성이 확대되고 있기 때문이다. IMO의 MEPC 80차(23.7)에서는 2050년 해운 분야에서의 탄소배출 감축 목표를 기존의 2008년과 대비했을 때

5) IRENA(2024), p. 34.

50%에서 100%로 상향한 초기전략 개정이 가결됐다.⁶⁾ 또한 MEPC 83차(‘25.4)에서는 ‘선박 온실가스 감축을 위한 중기 조치(Net-Zero Framework)’를 공식적으로 승인했으며 이 규제는 2027년부터 5,000톤 이상 대형 선박을 대상으로 시행할 예정이다.⁷⁾ 이에 따라 선박 연료의 온실가스 집약도(GHG Fuel Intensity; GFI)의 연도별 감축 목표를 달성하지 못한 선박은 탄소세를 납부해야 한다.⁸⁾

유럽의회는 ‘Fit for 55’ 법안을 의결했으며, 해당 법안은 해운 분야의 EU-ETS로의 편입과 Fuel EU Maritime을 포함하고 있다. 이에 따라 2024년부터 해운 분야에 EU-ETS가 적용되면서 EU에 기항하는 5,000톤급 이상의 선박은 EU 회원국 역내 배출량의 100%, 역외 배출량의 50%에 대해 탄소배출권을 구매하여 EU에 제출해야 한다.⁹⁾ 또한 Fuel EU Maritime에 따라 EU 항구에서 운항하는 5,000톤급 이상의 상선은 2025년부터 2029년까지 이산화탄소 배출량을 매년 2%씩 줄여야 하며 2050년에는 최종 80%를 감축해야 한다.¹⁰⁾ 또한 재생에너지법 개정안(REDIII)은 2030년부터 해운 부문의 에너지 총사용량에서 RFNBO의 비중을 최소 1.2%로 의무화하고 있다.¹¹⁾¹²⁾

해운 부문이 이러한 환경 규제에 대응하고 탄소중립을 달성하기 위해서는 선박의 에너지 효율을 개선하는 것만으로는 한계가 있으며 궁극적으로 무탄소 연료로 전환할 수밖에 없다. 국제에너지기구(International Energy Agency; IEA)는 해운 분야에서 바이오 연료, 수소 등 대체연료의

6) IMO(2023), p. 6.

7) IMO(2025a), p. 52.

8) 전게서, p. 56.

9) 한국선급(2024d), p. 3.

10) 한국선급(2024c), p. 8.

11) 대한석유협회(2024), p. 1

12) RFNBO는 비생물계 재생에너지 연료를 말하며 바이오매스 외 원료에서 생산되는 수소, 암모니아 등의 연료를 말한다.

비중이 현재는 1% 미만이나 2030년에는 약 15%, 2050년에는 80%까지 증가할 것으로 전망했다. 특히 암모니아 연료의 비중은 2050년에 44%까지 증가할 것으로 보았다.¹³⁾

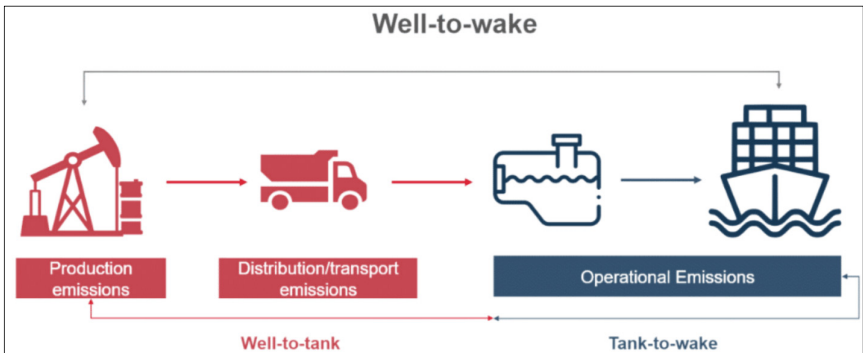
〈표 1-1〉 국제 해운 분야 대체에너지 비중 전망

구분	2022	2030	2035	2050
바이오연료	0%	8%	13%	19%
수소	0%	4%	7%	19%
암모니아	0%	6%	15%	44%
메탄올	0%	1%	1%	3%

자료: IEA(검색일: 2025.5.26.)

한편 선박 연료의 전주기 과정도 부각되고 있다. MEPC 80차(‘23.7)에서는 온실가스 배출 전과정 평가(Life Cycle Assessment; LCA)에 대한 지침서의 초안을 승인했다. 이는 선상에서 연소할 때 배출되는 온실가스(Tank to Wake)뿐만 아니라 연료의 채굴, 제조, 유통과정에서 배출되는 온실가스(Well to Tank)를 모두 고려한다. MEPC 83차(‘25.4)에서 승인된 중기 조치도 전과정(Well to Wake)을 고려하여 GFI를 산정한다.

〈그림 1-2〉 선박 연료의 전과정(Well to Wake) 온실가스 배출



자료: Ammonia Energy Association(2025.3.21.)(검색일: 2025.5.26.)

13) IEA(검색일: 2025.5.26.)

선박 연료에 대한 전과정 평가의 도입은 같은 연료일지라도 에너지원과 생산과정에 따라 친환경성이 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 다시 말해 화석연료를 기반으로 한 기존의 암모니아는 생산 과정에서 전 세계 CO₂ 배출량의 1.4%를 발생하기 때문에 전과정 평가를 도입했을 때 저탄소·무탄소 연료로서는 활용하기가 어렵다.¹⁴⁾ 반면 재생에너지를 기반으로 한 그린 암모니아는 생산 과정에서도 탄소를 배출하지 않아 저탄소·무탄소 연료로 활용할 수 있다.

이에 한국 정부는 친환경 선박으로의 전환을 위해 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(이하 친환경 선박법)」을 제정 및 시행하고, 동 법에 따라 5년마다 ‘친환경 선박 개발·보급 기본계획’을 수립하고 있다. 또한 친환경 선박 연료 생산자 등에 대한 지원 근거를 마련했으며(「친환경 선박법」 제4조), 제1차 기본계획에서는 연료 공급의 인프라 및 운영체계를 구축하기 위한 계획을 수립하였다. 그러나 전반적으로 친환경 선박의 개발·보급 등 활용 측면에만 집중하고 있으며 그린 암모니아 연료의 확보 및 전과정 평가에 대응한 공급 차원의 계획은 부족하다. 이에 2023년에는 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축 방안’을 마련하여 친환경 선박의 연료 공급 확대 및 벙커링용 항만의 저장능력 확보라는 목표를 수립하였다. 다만 동 계획은 ‘수소경제 이행 기본계획’, ‘기후변화 기본계획’ 등 그린 암모니아의 공급과 관련한 정책과의 연계성이 부족하고, 종합적인 그린 암모니아 선박의 연료 체계를 구축하는 데 한계를 갖고 있다.

2) 연구 필요성

(1) 선박 연료용 그린 암모니아 필요성 확대

전술한 바와 같이 선박 연료에 대한 전과정 평가는 연료의 생산부터 선박의 연소 단계까지 전과정에서 배출되는 온실가스를 고려한다. 따라서 천연

14) 한국에너지기술연구원(2021), p. 2.

가스 또는 석탄을 기반으로 한 기존의 암모니아는 생산 과정에서 다량의 탄소를 배출하기 때문에 미래에 대체할 선박 연료로서 활용하는 데 한계가 있다. 반면 그린 암모니아는 재생에너지로 수전해한 그린 수소를 하버보쉬공정을 통해 생산하기 때문에 생산 단계에서도 탄소가 배출되지 않는다. 즉 그린 암모니아 선박의 연료는 생산부터 연소에 이르기까지 전과정에서 탄소를 거의 배출하지 않는다. 이 때문에 그린 암모니아 선박의 연료는 Fuel EU Maritime이 시행될 경우 2050년까지 규제로 인한 편익이 발생한다.¹⁵⁾ 이와 같이 그린 암모니아는 무탄소 선박 연료로서의 의미를 지니며, 선사는 그린 암모니아 연료를 사용하여 탄소배출을 줄이고 규제에 대응할 수 있다.

2024년 12월에 IMO 해사안전위원회(MSC)는 암모니아 선박의 연료 사용을 허용하기 위해 「국제액화가스산적운송코드(IGC Code) 개정안」을 채택했으며, 이 개정안은 2026년 7월 1일에 발효될 예정이다.¹⁶⁾¹⁷⁾ 또한 암모니아 연료를 사용하기 위한 임시 지침도 승인했다. 임시 지침의 목적은 암모니아 연료를 사용하는 선박에 대한 국제표준을 제공하는 것이다. 그리고 암모니아 연료를 사용하는 기계, 장비, 시스템의 배치와 설치, 제어 및 모니터링에 대한 안전 요건을 제시하여 선박, 선원 및 환경의 위험을 최소화하는 것이다.¹⁸⁾ 향후 MSC는 암모니아 연료로 추진하는 선박을 위한 IGF Code를 개발할 계획이다.¹⁹⁾ 이와 같은 국제표준이 마련된다면 선박 연료로서 그린 암모니아의 사용이 활성화될 것이다. 그러나 그린 암모니아를 선박 연료로서 사용하기에는 여전히 어려움이 있다. 가령 암모니아는 현재 상용하는 선박 연료로서의 법적 지위가 확보되지 않아 병커링 등 연료 공급의 과정에서 제약이 있다. 이에 그린 암모니아를 선박 연료로서 안

15) 김진형·최재혁(2024), p. 93.

16) IMO(2024a), p. 1.

17) 암모니아 운반선에서 암모니아를 연료로서 사용할 수 있다.

18) IMO(2025b), p. 1.

19) IGF Code는 가스 또는 저인화점 연료를 사용하는 선박의 안전에 관한 국제 코드를 말한다.

정적으로 도입하고 활용하기 위한 추가 연구가 필요하다.

(2) 그린 암모니아 선박 연료 관련 종합적인 정책 부족

선박 연료로서 그린 암모니아에 대한 필요성은 증가하고 있으나 이에 대한 정부의 정책은 산발적으로 추진되고 있다. 국내 암모니아 선박의 연료 공급 인프라와 관련한 계획은 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획(’21~’30)’과 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축 방안’에 포함되어 있다. 제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획에서는 R&D와 연계한 시험용 암모니아 연료의 공급 인프라 구축(~’25)과 병커링 기술의 개발 및 표준화(~’31)를 계획했다. 또한 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축 방안’에서는 2030년까지 20만 톤의 병커링용 암모니아를 저장하기 위한 인프라의 구축 계획을 수립했다.²⁰⁾ 한편 그린 암모니아의 생산 및 공급에 관련된 계획을 별도로 추진하고 있다. ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’에서는 암모니아 혼소의 상용화 시점과 연계하여 2030년까지 총 927만 톤의 청정 암모니아(블루 및 그린 암모니아)를 도입할 계획이다. 그러나 해당 수요처는 발전 부문과 승용·상용차로 한정되어 있으며 선박은 제외한다. 청정 암모니아의 인수기지 역시 발전소가 밀집한 지역의 인근 항만에 건설될 계획이다.²¹⁾

이처럼 국내에는 그린 암모니아 선박 연료의 생산 등 공급 부문을 포함한 체계적인 계획이 부족한 실정이다. 그러나 2025년 2월 암모니아 이중연료를 이용한 첫 번째 컨테이너선이 ONE에 인도되고, 2026년부터는 HD현대미포조선에서 암모니아 이중연료 선박이 인도되기 시작하는 등 암모니아 추진 선박은 점차 현실화되고 있다.²²⁾ 따라서 그린 암모니아 선박 연료의 공급과 연계한 계획이 마련되지 않는다면 적시에 해당 연료가 공급

20) 관계부처합동(2023), p. 3.

21) 관계부처합동(2021), p. 20.

22) 양범수(2025.6.23.)(검색일: 2025.7.23.)

되지 못할 가능성이 높다.²³⁾ 이러한 경우 암모니아 선박을 도입한 선사는 운항 계획에 차질이 발생하게 되고 경영상 손실을 입을 수 있다. 결국 그린 암모니아를 선박 연료로 선택하려는 선사들이 점차 감소할 수 있으며 이는 해당 연료의 활용을 저해하는 요인이 된다.

따라서 다가오는 그린 암모니아 선박 연료의 활용에 대비하여 그린 암모니아 선박 연료의 전환 체계를 구축하기 위해서는 생산부터 활용까지 전과정을 고려한 통합적 관점의 연구가 시급하다.

(3) 그린 암모니아 선박 연료 체계 구축을 위한 도입 환경 분석 필요

우리나라는 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(친환경 선박법)」 제3조에 근거하여 ‘친환경 선박 개발·보급 기본계획’을 5년마다 수립한다. 제1차 기본계획(‘21~’30)에서는 무탄소 선박의 기술을 확보하기 위한 일환으로 연안 선박용 암모니아 연료의 전지 시스템과 대형선박의 내연기관용 암모니아 연료의 공급 시스템의 개발을 포함하였다. 또한 암모니아를 단독으로 사용하기에 앞서 혼합연료의 브릿지 기술을 개발하고 동시에 안전에 대한 기준의 마련도 추진할 계획이며 이와 더불어 친환경 선박의 보급을 확대하기 위한 친환경 선박으로의 전환 보조금을 지원한다.²⁴⁾

이와 같이 암모니아 선박의 개발·보급에 대한 정책이 추진되고 있으나 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건에 대한 종합적인 검토는 부족하다. 암모니아 선박의 개발과 보급을 원활히 추진하기 위해서는 그린 암모니아 선박의 연료 체계를 구축할 필요가 있다. 그리고 이를 위해서는 정책, 법·제도적인 현황, 인프라, 기술적·제도적인 준비 수준 등 도입 여건에 대한 조사가 선행되어야 한다.

23) 쉬핑뉴스넷(2024.1.17.)<검색일:2025.5.28.>

24) 관계부처합동(2020), pp. 16-17.

2. 연구 목적

앞서 살펴본 바와 같이 그린 암모니아 선박 연료의 사용 시점이 가까워지고 있음에도 불구하고 우리나라는 이에 대한 준비가 미흡한 실정이다. 이러한 상황에서 암모니아를 연료로 추진하는 선박이 본격적으로 도입 및 확대된다면 적시에 안정적인 연료를 공급하는 것이 어려울 수 있다. 따라서 본 연구는 국내의 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건을 종합적으로 분석하고, 향후 안정적인 연료 체계로의 구축을 위한 정책 방향을 제시하는 데 그 목적이 있다. 이는 국정과제인 ‘북극항로 시대를 주도하는 K-해양강국 건설’ 가운데 친환경 선박을 중심으로 해운경쟁력을 제고하고자 하는 내용과도 연관성이 있다.²⁵⁾

이를 위해 먼저 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건을 공급 및 활용 측면에서 검토하고자 한다. 즉 국내의 그린 암모니아 선박 연료의 공급 및 활용에 관한 정책과 법·제도적인 현황, 인프라, 기술적·제도적인 준비 정도 등의 실태를 파악하여 앞으로 추진해야 할 정책 방향을 모색하고자 한다. 또한 선박 연료로서 그린 암모니아의 수요에 대응하기 위한 공급 및 인프라, 제도적·기술적인 준비 등 주요 인자의 동학적 상호작용을 분석하여 해당 메커니즘의 안정적인 도입 및 운용, 확산 등에 영향을 미치는 요인을 식별하고자 한다.

끝으로 그린 암모니아 선박 연료의 수요·공급, 기술, 제도 등 다양한 요소에 대한 통합적인 접근을 통해 그린 암모니아 선박 연료의 상용화를 촉진할 수 있는 정책적 기반을 마련하는 것이 본 연구의 목적이다. 이를 통해 국내 그린 암모니아 선박의 연료 체계를 안정적으로 구축하고 체계적으로 유지할 수 있는 기반이 조성될 것으로 기대된다. 또한 관련한 메커니즘의 주요 추진

25) 대한민국정부(2025), p.118.

주체 및 이해관계자들은 이러한 기반을 바탕으로 그린 암모니아 선박 연료의 실질적 활용과 확산을 보다 효과적으로 추진할 수 있을 것이다.

〈표 1-2〉 연구 목적

연구 목적	기대효과
• 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건 검토 • 국내 그린 암모니아 선박 연료 체계의 구축을 위한 정책 방안 제시	• 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 안정적 운영 • 국내 그린 암모니아 선박 연료의 활용 도모

자료: 저자 작성

제2절 연구 내용 및 방법

1. 연구 범위 및 주요 내용

본 연구의 목적은 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건을 파악하고, 종합적이고 안정적인 연료 체계를 구축하기 위한 정책 방안을 제시하는 데 있다. 연구의 범위는 선박 연료용 그린 암모니아로 한정한다. 또한 정책 대응 방안으로는 병커링 및 활용을 중심으로 도출하고자 한다. 먼저 제1장에서는 연구 배경과 목적, 연구 내용과 방법, 선행연구와 본 연구의 차별성을 제시하였다.

제2장에서는 선박 연료로서 그린 암모니아의 필요성을 확인하기 위해 그린 암모니아의 특성과 동향을 정리하였다. 이를 위해 국제 해운 분야의 환경 규제 하에 그린 암모니아가 선박 연료로서 갖는 장점을, 그 특성을 중심으로 서술하였다. 또한 세계적인 그린 암모니아 선박 연료의 수요와 공급에 대한 동향, 그린 암모니아의 생산·병커링 등 공급과 관련된 기술의 성숙도 및 암모니아 선박 기술의 성숙도, 주요국의 정책 등을 파악하였다.

〈표 1-3〉 그린 암모니아 선박 연료의 특성과 동향

구분	내용	비고
선박 연료로서 그린 암모니아	국제 해운 분야 환경 규제	• 국제해사기구 환경 규제 • EU 환경 규제
	선박 연료로서의 그린 암모니아의 특성	• 선박 연료로서 그린 암모니아의 기본 특성 • 타 선박 연료와의 비교
그린 암모니아 선박 연료의 동향	그린 암모니아의 세계적인 수급 동향 및 전망	• 그린 암모니아 및 선박 연료용 그린 암모니아의 수요 동향 및 전망 • 그린 암모니아 및 선박 연료용 그린 암모니아의 공급 동향 및 전망
	관련 기술 동향	• 그린 암모니아 선박 연료의 공급 관련 기술 • 암모니아 추진 선박 기술
	주요국 정책 및 사례	• 일본, 호주 정책 • 해외 암모니아 벙커링 사례

자료: 저자 작성

제3장은 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 환경을 공급 측면과 활용 측면에서 파악하였다. 즉 그린 암모니아 선박 연료의 공급 및 활용 여건을 파악하기 위해 관련 정책 및 법·제도적인 현황, 기술 현황, 인프라 등을 검토하였다. 또한 도입 여건에 대한 국내 전문가들의 인식도를 조사하였다.

〈표 1-4〉 국내 그린 암모니아 선박 연료 도입 여건

구분	내용	비고
그린 암모니아 선박 연료 공급 여건	공급 관련 정책 및 법·제도 현황	• 공급 관련 공공 부문 계획 • 관련 법·제도 현황
	생산 및 벙커링 기술 현황	• 국내 그린 암모니아 생산 기술 현황 • 국내 암모니아 벙커링 기술 현황
	인프라 기반 현황	• 국내 암모니아 저장 시설 규모 • 국내 암모니아 인수기지 구축 계획
	산업 부문 동향	• 국내 기존 암모니아 수출입 실적 • 국내 민간 및 공기업의 그린 암모니아 생산 계획

구분	내용	비고
암모니아 선박 연료 활용 여건	활용 관련 정책 및 법·제도 현황	• 활용 관련 공공 부문 계획 • 관련 법·제도 현황
	암모니아 추진 선박 기술 현황 주요국 정책 및 사례	• 국내 조선사 암모니아 추진 선박 기술 현황
전문가 인식 조사	조사 개요	• 목적, 조사대상, 방법, 기간, 내용
	조사 결과	• 그린 암모니아 선박 연료 활용 및 전망 • 국내 제도적 준비 정도 • 국내 기술적 준비 정도 • 정책 수요

자료: 저자 작성

제4장은 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘 모형을 설계하고, 시뮬레이션 분석을 수행하여 선박 연료로서의 그린 암모니아의 생산, 저장, 활용 등 전방위적인 메커니즘의 안정성 제고 및 확산 가능성을 파악하였다. 그리고 시뮬레이션 분석을 통해 전체 메커니즘의 안정성 제고 및 확산 가능성과 관련한 주요 영향 요인들을 도출했으며 민감도 분석을 통해 어느 변수가 수요에 대비한 준비 정도와 기술혁신 시스템의 반응 속도에 민감하게 반응하는지를 식별하였다.

〈표 1-5〉 국내 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘 영향 요인 분석

구분	내용	비고
분석 방법	미래 정책 메커니즘의 안정성 평가를 위한 분석 도구	• 시스템 다이내믹스의 개요 • 인과지도 및 모형 구성
그린 암모니아 선박 연료 메커니즘 분석	시뮬레이션 모델의 구조 설계	• 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘 식별 • 핵심 영향요인의 구성 • 인과지도 도출
	인과지도 도출	• 상위 인과지도 • 수요 및 공급 영역 인과지도

구분	내용	비고
		• 기술적 준비 영역 인과지도 • 제도적 준비 영역 인과지도
	목표 지표에 따른 민감도 분석	• 수요 대비 준비 정도 • 기술혁신의 시스템 반응 속도

자료: 저자 작성

제5장에서는 앞장들의 결과를 토대로 그린 암모니아 선박 연료의 전환에 대응하기 위한 방안을 제시하였다. 이에 따라 ‘선박 연료로서의 그린 암모니아’ 체계를 구축하기 위한 정책 대응 방안을 도출하였다. 끝으로 제6장에서는 본 연구의 요약 및 결론과 정책제언을 제시했다.

2. 연구 방법

본 연구는 문헌 조사, 전문가 자문회의, 전문가 대상 설문조사, 시스템 다이내믹스 분석 등 다양한 연구 방법을 통해 수행하였다. 연구 내용별로 연구 방법을 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 국내·외 문헌 조사를 수행하였다. 먼저 그린 암모니아 선박 연료의 특성과 동향을 조사하기 위해 국제기구 및 관련 기관에서 발간한 문서와 국내·외 학술논문 및 발간물을 조사하였다. 그리고 그린 암모니아 선박 연료의 수요와 공급, 기술 동향, 해외 정책 및 사례를 알아보기 위해 IEA, DNV 등 해외에서 발간한 자료와 학술지 논문, 기사 등을 수집·정리하였다. 또한 우리나라의 그린 암모니아 도입 환경을 파악하기 위한 공급 및 활용 측면의 정책과 법·제도, 인프라, 기술, 산업 동향 등을 알아보기 위해 정부의 보도자료, 관련 법령, 관련 기관의 발간 자료, 기사 등을 분석·정리하였다.

둘째, 전문가 자문과 정책협의를 진행하였다. 전문가 자문에서는 앞선 문헌 조사를 통해 조사된 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건에 대한 사실 확인과 추가 내용을 확보하였다. 그리고 전문가 대상 설문조사를 수행하기에 앞서 해당 질문에 대한 적절성을 검토하였다. 또한 정책협의를 통해 본 연구의 추진방향을 논의하고 결과를 정책화하기 위해 노력하였다.

〈표 1-6〉 정책협의 및 전문가 자문

구분	시기	기관	내용
정책협의회	2025.1.7	• 해양수산부	• 연구 추진방향 논의
중간보고회	2025.5.21	• 해양수산부	• 연구 내용 검토
1차 전문가 자문회의	2025.7.4	• 에너지경제연구원 • 울산테크노파크	• 청정 암모니아 관련 정책 및 법 • 규제자유특구 추진 현황
2차 전문가 자문회의	2025.7.5	• 한국에너지기술연구원	• 그린 암모니아 생산기술 동향
3차 전문가 자문회의	2025.7.8	• 한화오션 • 삼성중공업 • 롯데정밀화학 • 한국기계연구원	• 그린 암모니아 공급 동향 • 암모니아 추진 선박 기술 동향
4차 전문가 자문회의	2025.7.9	• HD현대중공업	• 암모니아 추진 선박 기술 동향
5차 전문가 자문회의	2025.7.15	• 부산테크노파크 • 경남테크노파크 • MS가스	• 규제자유특구 추진 현황 • 암모니아 벙커링 관련 사항
6차 전문가 자문회의	2025.7.18	• 롯데정밀화학 • 삼성중공업 • HMM • DNV • 선박해양플랜트연구소 • 한국에너지기술연구원 • 한국석유공사 • 울산항만공사 • 경기평택항만공사 • 부산테크노파크	• 업계별 그린 암모니아 관련 동향 • 그린 암모니아 선박 연료 도입 시 애로사항 • 그린 암모니아 선박 연료로의 전환 대응 방안
7차 전문가 자문회의	2025.7.21	• 아헤스	• 업계별 그린 암모니아 관련

구분	시기	기관	내용
		• 포스코플로우 • 현대글로비스 • 한화오션 • 한국선급 • 퓨어스에너지솔루션 • 한국기계연구원 • 인천항만공사	동향 • 그린 암모니아 선박 연료 도입 시 애로사항 • 그린 암모니아 선박 연료로의 전환 대응 방안
최종보고회	2025.9.17	• 해양수산부	• 연구 내용 검토

자료: 저자 작성

셋째, 전문가를 대상으로 한 설문조사를 통해 선박 연료의 현황과 전망을 파악하였다. 또한 그린 암모니아 선박 연료의 공급과 활용의 기술적·제도적인 준비 정도에 대한 현황과 전망, 그린 암모니아 선박 도입 시 애로사항, 정책 수요 등을 도출하였다.

넷째, 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘을 구축하기 위한 공급 및 인프라의 준비, 이와 관련된 제도적·기술적인 준비 등의 동학적 상호작용을 분석하기 위해 시스템 다이내믹스 분석방법을 활용하였다. 이를 통해 그린 암모니아 선박 연료 체계의 안정적인 도입 및 운용, 확산 등에 영향을 미치는 요인과 영향 정도 등을 식별하였다.

제3절 선행연구와 본 연구의 차별성

1. 선행연구 검토

본 연구는 국내 그린 암모니아 선박 연료의 안정적인 도입과 확산을 위

한 정책을 발굴하는 것으로 이와 관련된 선행연구는 그린 암모니아 선박의 연료와 그린 암모니아 연료의 공급에 관한 연구로 구분할 수 있다.

1) 그린 암모니아 선박 연료 관련 선행연구

그린 암모니아 선박 연료를 다룬 기존의 연구들은 경제성 분석과 기술적 분석 및 환경적 영향을 평가하고, 선박 연료로서의 활용 가능성과 한계 등을 제시하고 있다.

Mallouppas et al.(2022)는 대체연료로서 그린 암모니아의 활용 가능성을 기술적, 경제적 측면에서 검토하였다. 이 연구에서는 암모니아가 수소보다 상대적으로 낮은 저장 비용과 운송의 용이성을 갖고 있으며, 기술적 측면에서는 내연기관과 연료 전지에 모두 적용이 가능하다고 언급하였다. 그러나 독성과 함께 낮은 점화 능력 및 NO_x의 배출 문제, 규제의 미비 등의 한계가 있어 이를 해결하기 위한 기술의 개발과 정책이 필요하다고 제언하였다.

Gerlitz et al.(2022)은 발트해 지역을 중심으로 선박 연료로서 암모니아의 활용 가능성을 기술적, 경제적, 인프라 측면에서 검토하였다. 이 연구는 선박 연료로서의 암모니아를 선박용 경유, LNG와 비교하였으며 그 결과 암모니아는 기존 연료와 대비했을 때 온실가스의 배출이 현저히 낮고 비용이 높았다. 그러나 장기적으로는 친환경의 규제에 의한 비용을 줄일 수 있어 경제성이 확보될 수 있다고 언급하였다. 기술적인 측면에서는 암모니아의 느린 연소 속도와 높은 발화점 등의 특징으로 인해 선박용 엔진의 설계 변경이 필요하며 안전 설비에 대한 확보가 필수적인 것으로 나타났다. 또한 인프라 측면에서 발트해 지역은 기존의 LNG 인프라를 일부 활용할 수 있으나 암모니아 전용 병커링 및 저장설비의 구축이 필요하다고 언급하였다.

Zincir(2022)은 근해운송을 대상으로 암모니아 연료의 환경적·경제적 타당성을 평가하여 기존의 화석연료와 대비했을 때 암모니아가 온실가스 및 대기오염물질의 저감에 유의미한 효과가 있음을 확인하였다. 이 연구는 LCA 전과정을 기반(Well to Wake)으로 한 분석을 통해 그레이, 블루, 그린 암모니아 각각의 CO₂ 배출량과 비용구조를 비교하였다. 그린 암모니아는 거의 제로 수준의 CO₂ 배출이 가능하며 GHG 배출량은 초저유황유와 대비하여 약 70~90%로 낮게 나타났다. 또한 균등화 비용 분석 결과 현재는 암모니아 연료의 가격이 초저유황유와 대비하여 2~4배 높아 경제성이 낮다고 평가하였다. 그러나 톤당 200유로의 탄소세가 도입될 경우 그린 암모니아는 초저유황유보다 경쟁력이 있다고 밝혔다. 한편 근해운송은 정기 노선, 짧은 거리, 공급 안정성의 확보가 용이하여 암모니아를 연료로 추진하는 선박 운항 항로의 테스트베드로서 적합하다고 언급하였다.

Wu et al.(2023)은 광저우항에 암모니아 및 수소 연료를 사용하는 선박이 입항하는 시나리오를 시뮬레이션하여 온실가스의 배출 저감 효과와 비용 편익을 분석하였다. 그 결과 두 연료 모두 기존의 화석연료와 대비하여 온실가스 배출을 현저히 줄일 수 있으며, 특히 이산화탄소, 황산화물, 미세먼지의 배출에서 유의미한 감축 효과를 확인하였다. 그린 암모니아는 저장·운송 측면에서 상대적으로 유리하며 현재의 기술로도 내연기관 및 연료 전지 시스템에 적용할 수 있는 가능성이 높다고 평가되었다. 또한 암모니아 연료의 기술과 응용이 확산함에 따라 공급 비용은 점차 낮아질 수 있으며, 2035년경에는 암모니아가 기존의 연료보다도 경제성이 높을 것으로 전망하였다.

지재훈(2023)은 What-if 위험도 평가 분석을 활용하여 암모니아 연료로 추진하는 선박에 대한 위험인자를 식별하고 위험도를 측정하였다. 이 연구는 암모니아 연료 시스템을 구성하는 하위시스템을 선정하고, 여기에서 발생할 수 있는 위험 요인과 영향 정도, 대응 방안을 도출하였다. 분석

결과 암모니아는 독성과 누출 위험이 있으며 이에 따라 기술적으로 안전을 확보할 수 있는 수단이 반드시 수반되어야 함을 제언하였다. 또한 인체에 대한 유해성과 장비의 부식성 등의 문제가 있어 새로운 안전관리 체계의 필요성을 강조하였다. 이와 더불어 국제해사기구의 IGF Code 등의 규제를 선제적으로 반영한 국내 안전관리 시스템 도입의 중요성을 언급하였다.

2) 그린 암모니아 연료 공급 관련 선행연구

Zhao(2024)는 그린 암모니아 공급망을 시장 구조 측면에서 분석하였다. 공급망 구조의 초기 단계는 수직 통합된 구조가 적합하며 생산, 저장, 운송, 병커링을 단일 기업 구조 또는 협력을 통한 통합적인 구조를 제안했으며, 중간 단계에서는 시장 규모의 확대 및 공급자의 다양화에 따라 구조적인 분리가 필요하다고 언급하였다. 성숙단계에서는 경쟁에 기반한 시장 구조로 전환하여 자산의 소유권과 운영 주체의 분리, 단기 및 현물 시장의 형성, 가격 경쟁의 유도 등이 필요하다고 제안하였다. 또한 초기 시장을 형성하기 위한 정부 및 공공투자의 필요성과 선박 연료 시장을 중심으로 한 저점 항만 간 연계 투자 전략의 중요성을 강조하였다.

Wang et al.(2023)은 녹색해운항로를 통한 그린 암모니아 기반의 해상 운송 체계 구축 가능성을 분석했다. 이 연구는 그린 암모니아의 생산 및 병커링에 가장 적합한 위치를 식별하고, 생산비와 운송비 간 비용의 상쇄 관계를 분석했으며 지역별 생산비 절감이 향후 그린 암모니아 시장에서 경쟁우위로 연결된다고 강조하였다. 또한 저자들은 칠레, 호주 등 생산비가 저렴한 지역에서 북미, 유럽, 동아시아 등 수요지까지의 장거리 운송에 충분한 경쟁력을 갖출 수 있으며 단일 선박이나 항만 단위가 아닌 항로 단위의 접근이 그린 암모니아 선박 연료 도입의 효과성과 실현 가능성을 높일 수 있다고 제시하였다.

Guerra et al.(2020)는 칠레에서 생산된 그린 암모니아의 일본 수출 시나리오에 대해 기술성 분석과 경제성 분석을 수행하였다. 그린 암모니아의 순현재가치와 투자 수익성에 영향을 미치는 변수들을 플랜트 운영시간, 전해조 용량, 전기 단가, 전해조 장비비, 합성 장비비, 암모니아 판매 단가로 구성하였다. 그 결과 투자회수기간은 7.62년이며 암모니아의 합성 플랜트 크기와 전기요금이 순현재가치에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났다. 특히 전기의 단가가 낮아질수록 투자 수익성이 급격하게 개선되었다. 또한 칠레에서 생산된 그린 암모니아를 일본으로 수출하는 것이 기술적·경제적으로 실현 가능성이 높다고 언급하였다.

이후경 외(2021)는 온실가스 감축을 위한 암모니아의 활용 필요성을 검토하고, 국내·외 관련된 정책의 현황 및 경제성 분석을 수행하였다. 또한 연구개발에 대한 지원과 시장 보급의 가속화를 위한 정책 및 제도, 기술 및 정책과 관련된 국제협력이 유기적으로 마련되어야 한다고 제안하였다.

2. 본 연구의 차별성

기존 선행연구들은 그린 암모니아 선박 연료의 경제성, 환경성에 대한 평가 및 기술성에 관한 분석과 선박 연료로서 그린 암모니아의 장점과 장애요인 등을 다루는 연구들이 주를 이뤘다. 또한 그린 암모니아 연료의 공급에 관한 연구는 시장 구조적인 측면에서의 분석과 녹색해운항로 또는 그린 암모니아 연료의 수송 항로 등을 중심으로 기술적·경제적인 분석을 수행하였다.

본 연구는 그린 암모니아 연료의 기술적, 경제적, 환경적 분석을 다룬 기존의 연구와 달리 국내의 도입 여건을 분석하고, 이를 바탕으로 종합적인 체계를 구축하기 위한 정책 방안을 제시하고자 하였다.

〈표 1-7〉 선행연구와 본 연구의 차별성

구분	주요 선행연구		본 연구
	요약	문헌	
연구 목표	- 그린 암모니아 선박 연료 활용의 기술적·경제적 분석 - 그린 암모니아 선박 연료의 기술적, 경제적, 인프라 측면의 검토 - 암모니아 선박 연료의 환경적·경제적인 타당성 평가 - 암모니아 추진 선박에 대한 위험인자의 식별과 위험도 측정	- Mallouppas et al.(2022) - Gerlitz et al.(2020) - Zincir(2022) - Wu et al.(2023) - 지재훈(2023)	- 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건 검토 - 국내의 그린 암모니아 선박 연료 체계 구축을 위한 정책 방안 제시
연구 대상	그린 암모니아 선박 연료의 활용	- Mallouppas et al.(2022) - Gerlitz et al.(2020) - Zincir(2022) - Wu et al.(2023) - 지재훈(2023)	그린 암모니아 선박 연료 생산, bunker링, 활용
	그린 암모니아 연료의 공급	- Zhao(2024) - Wang et al.(2023) - Guerra et al.(2020) - 이후경 외(2021)	
연구 범위	- 발트해 지역 선박 연료의 활용 - 칠레 생산 그린 암모니아 연료의 일본 수출 - 광저우항의 암모니아 및 수소 연료 선박 입항	- Gerlitz et al.(2020) - Guerra et al.(2020) - Wu et al.(2023)	- 그린 암모니아 선박 연료의 특성 및 동향 - 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건 - 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 구성 요인
연구 방법	- 문헌 연구 - 회귀분석 - 사례연구 - 전문가 인터뷰 - What-if 위험도 평가 - 환경영향 및 경제성 평가	- Mallouppas et al.(2022) - Gerlitz et al.(2020) - Zincir(2022) - Wu et al.(2023) - 지재훈(2023) - Zhao(2024) - Wang et al.(2023) - Guerra et al.(2020) - 이후경 외(2021)	- 문헌 연구를 통해 그린 암모니아 선박 연료의 특성 및 동향, 국내·외 정책 조사 - 전문가 자문회의 및 설문조사를 통해 그린 암모니아 선박 연료의 전망, 국내의 기술적·제도적인 준비 정도, 정책 수요 조사 - 시스템 다이내믹스를 통해 국내 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘 분석

자료: 선행연구들 토대로 저자 정리

02

그린 암모니아 선박 연료의 특성과 동향

본 장에서는 선박 연료로서 그린 암모니아의 필요성을 살펴보기 위해 그린 암모니아의 특성과 동향을 조사하였다. 제1절에서는 국제 해운 분야의 환경 규제가 변화함에 따라 선박 연료로서 그린 암모니아가 갖는 장점을 그 특성을 중심으로 서술하였다. 이를 위해 국제해사기구(IMO)와 EU의 선박에 기인한 온실가스 배출 규제를 알아보았다. 또한 그린 암모니아 선박 연료의 기본 특성과 함께 타 연료와의 차이점을 살펴보았다. 제2절에서는 세계 그린 암모니아의 수요·공급에 대한 동향과 전망, 관련 기술 동향, 주요국의 정책 및 사례를 조사하였다. 이를 통해 세계 그린 암모니아 선박 연료의 수급 동향과 전망, 암모니아의 생산 및 병커링 관련 기술과 선박 기술의 성숙도, 주요국의 정책 등을 파악하고자 하였다.

제1절 선박 연료로서 그린 암모니아

1. 국제 해운 분야 환경 규제

1) 국제해사기구(IMO)

(1) Net-Zero Framework

국제해사기구(IMO)는 2025년 4월, 제83차 해양환경보호위원회(MEPC 83)에서 MARPOL Annex VI 통합개정안(IMO Net-Zero Framework)을 승인하였다. Net-Zero Framework는 해운 부문의 온실가스 감축이라는 목표를 달성하기 위해 무탄소 또는 무탄소에 가까운(zero or near zero) 연료 및 기술의 도입을 가속화하고 공정하고 공평한 전환(just and equitable transition)을 지원하기 위한 중기조치이다. 이 개정안은 2028년부터 발효될 예정이다.²⁶⁾

이번 조치를 통해 선박 연료의 생산부터 공급 및 사용까지 모두 포함한 전과정(Well to Wake; WtW)을 기준으로 온실가스의 배출 집약도(GHG Fuel Intensity; GFI)를 평가하고, 이를 초과하는 배출량에 대해 탄소세를 부과할 수 있게 되었다. 따라서 적용 대상인 총 톤수 5,000톤 이상의 모든 국제 해운 선박은 2027년 10월 1일까지 IMO GFI에 등록소 계정을 개설해야 하며 2028년 1월 1일부터 GFI 데이터의 보고 의무를 시작하고 설정된 GFI 기준을 준수해야 한다.²⁷⁾ GFI 기준은 기본목표(Base Target)와 직접목표(Direct Compliance Target)로 구분된다. 2035년의 GFI 기본목표와 직접목표는 각각 30%, 43%이며, 2040년까지의 GFI 기본목표와 직접목표는 MEPC에서 2032년 1월 1일까지 결정할 계획이다.²⁸⁾

26) IMO(2025.4.11.)(검색일: 2025.8.5.).

27) IMO(2025a), p. 57.

〈표 2-1〉 GFI 연간 감축 목표

구분	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
기본목표	4.0%	6.0%	8.0%	12.4%	16.8%	21.2%	25.6%	30.0%
직접목표	17.0%	19.0%	21.0%	25.4%	29.8%	34.2%	38.6%	43.0%

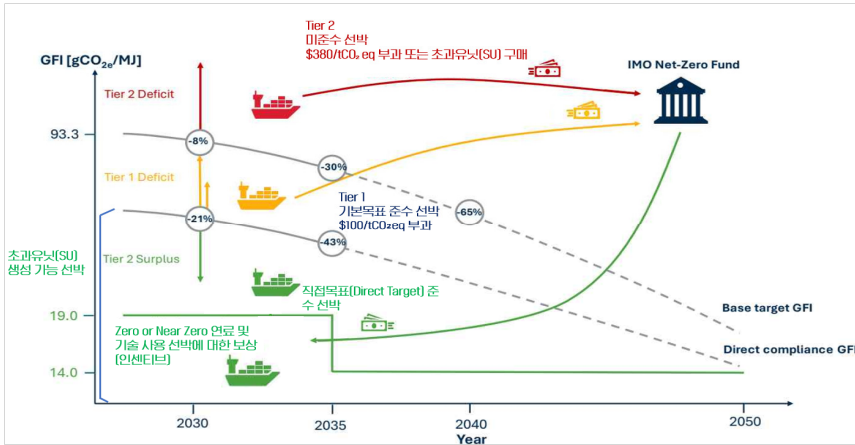
주: GFI 기준 값은 93.3gCO₂eq/MJ
 자료: IMO(2025a), p. 55.

GFI 미준수에 대한 부과금은 두 개 구간을 기준으로 차등적으로 발생한다. 먼저 Tier 1은 기본목표는 준수했으나 직접목표는 미준수한 구간이며, Tier 2는 두 개의 기준을 모두 충족하지 못한 경우이다. 2028년부터 2030년까지는 Tier 1의 미준수 구간에서 \$100/tCO₂eq, Tier 2의 미준수 구간에서 \$380/tCO₂eq의 추가 부과금(Remedial Unit; RU)이 발생한다. Tier 2의 미준수 구간에서는 RU 또는 초과 유닛(Surplus Unit; SU)을 구매할 수 있다.

반면에 온실가스의 제로 또는 제로에 가까운 연료 및 기술을 사용한 선박은 재정적인 보상을 받을 수 있다. 2034년까지는 19.0g/tCO₂eq, 2045년 이후는 14.0g/tCO₂eq 기준을 만족한 선박이 자격 대상이다. 이는 선사가 선박 연료의 구매 가격뿐만 아니라 온실가스의 배출 부과금까지 고려해야 하는 구조이다.

28) 전게서, p. 56.

〈그림 2-1〉 IMO 중기조치 이행 체계



자료: ABS(2025), p. 5.

(2) 선박 연료 온실가스 전과정 평가(LCA)

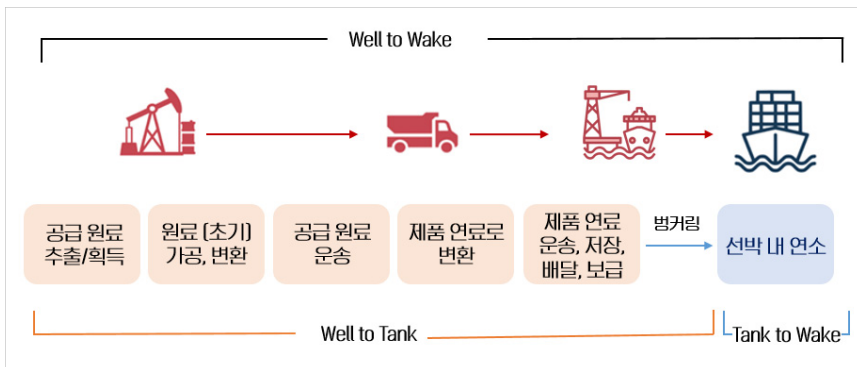
2023년 7월, 제80차 해양환경보호위원회(MEPC 80)에서는 ‘선박 연료 온실가스 전과정 평가(LCA: Life Cycle Assessment; LCA) 지침’이 승인되었다. 이후 연료별 배출계수의 산정, 지속가능성의 기준 등 추가적인 논의를 위해서 지속적인 개정이 이뤄지고 있으며 현재는 해양환경보호 과학자문단(Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection; GESAMP)의 LCA 작업반에서 연료별로 배출계수를 검토하고 있다. 앞으로 2026년 MEPC 제84에서 1차 개정 내용을 검토 및 채택하고, 2027년 MEPC 제86에서 최종적으로 개정안을 채택할 계획이다.²⁹⁾

LCA는 연료 생산 단계에서의 원료 추출(Well to Tank; WtT) 및 운송과 처리뿐만 아니라 선박에서의 연소(Tank to Wake; TtW)를 포함하는 것으로 LCA 지침을 개발하여 선박 연료의 전과정에서 배출되는 온실가스

²⁹⁾ 한국해사협력센터(2025), p. 13.

의 규제 수단을 마련하게 되었다. 이에 따라 LCA의 도입은 미래 선박의 연료 선택에 영향을 미친다. 이전에는 선박에서의 연소 과정에서 발생하는 이산화탄소만을 고려하여 연료의 친환경성을 평가했으나 LCA 지침에 따른 규제를 적용한 이후부터는 동일한 연료라도 에너지원과 생산과정에 따라 친환경성이 달라지기 때문이다.³⁰⁾

〈그림 2-2〉 선박 연료의 전과정(Well to Wake) 온실가스 배출



자료: IMO(2024b), p. 5.

2) 유럽연합(EU)

(1) FuelEU Maritime

유럽연합(EU)은 해상운송에서 재생 가능성 및 저탄소 연료 사용을 촉진하기 위해 2023년에 'FuelEU Maritime'을 채택하였다. 이 규정은 선박 연료의 온실가스 집약도에 대한 최소 의무 기준을 설정했으며, 2025년 1월 1일부터 EU 지역 내 총 톤수 5,000톤 이상의 모든 입출항 선박에 적용되었다. 한도는 메가줄(MJ)당 CO₂ 환산량 91.16g을 기준값으로 하며 2025년부터 5년 단위로 강화된다(〈표 2-2〉 참고).³¹⁾ 온실가스 집약도는

30) 현재까지 IMO가 개발한 LCA 지침은 128개의 연료 생산경로를 식별했으나 배출계수와 관련한 정보는 아직 미미하다.

전과정 배출량(WtW)을 기준으로 산정되기 때문에 저탄소 연료는 가장 높은 온실가스의 감축 효과를 갖는다.

〈표 2-2〉 Fuel EU Maritime 연간 탄소집약도 감축 목표 및 탄소집약도 제한치

구분	2025	2030	2035	2040	2045	2050
감축 목표	-2%	-6%	-14.5%	-31%	-62%	-80%
탄소집약도 (gCO ₂ eq/MJ)	89.34	85.69	77.94	62.90	34.64	18.23

자료: 한국선급(2024c), p. 8.

또한 FuelEU Maritime은 선박의 총 사용 에너지량과 대비하여 비(非)생물계 재생에너지 연료(renewable fuels of non-biological Origin; RFNBO)의 사용량을 규제한다.³²⁾ 2031년까지 선박의 에너지 총 사용량 가운데 RFNBO 사용량이 1% 미만일 경우 2034년부터 RFNBO의 의무 할당량이 2%로 상향되어 적용될 수 있다.³³⁾ 이와 함께 RFNBO의 사용에 대한 보상을 해주기 위해 연간 사용한 RFNBO의 온실가스 배출량은 절반으로 계산된다. 이러한 산정 방법은 2033년 12월까지 적용된다.³⁴⁾

(2) EU ETS

2024년 1월 1일부터 EU ETS에 해운이 포함되었으며, 적용 대상은 EU의 항만에 기항하는 총 톤수 5,000톤 이상의 화물선 또는 여객선이다.³⁵⁾ 기항지별로 온실가스 배출량을 다르게 적용하여 EU/EEA 회원국과 EU/EEA 비 회원국의 기항지 간 항차에는 배출량의 50%, EU/EEA 회원국

31) 한국선급(2024c), p. 8.

32) RFNBO는 EU 재생에너지 지침(RED III)에서 화석연료와 대비하여 최소 70%의 온실가스를 감축한 연료로 정의되고 있으며 e-fuel로도 일컫는다. 또한 바이오매스 외의 재생에너지원으로부터 생산된 수소, 암모니아 등을 포함하고 있다.

33) 한국선급(2024c), p. 12.

34) 한국선급(2024c), p. 12.

35) 한국선급(2024d), p. 3.

간 기항지 간 항차와 EU/EEA 회원국의 항구 내에서는 배출량의 100%를 적용한다.³⁶⁾ 2027년 이후부터는 5,000톤 이상의 해양지원선까지 적용 대상이 확대될 예정이며 그 이후에 400GT 이상의 해양지원선 및 일반화물선의 포함여부를 결정할 계획이다.³⁷⁾

EU ETS 규제 대상의 온실가스 범위는 단계적으로 확대된다. 2025년까지는 이산화탄소만을 규제하며, 2026년부터는 메탄과 아산화질소도 포함된다.³⁸⁾ 또한 배출권으로 충당해야 하는 온실가스의 배출량 비율도 점차 확대하여 2025년에는 전체 이산화탄소 배출량의 40%, 2026년에는 전체 이산화탄소 배출량의 70%, 2027년부터는 전체 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 배출량의 100%를 적용한다.³⁹⁾

2. 그린 암모니아 선박 연료의 특성

1) 기본 특성

(1) 그린 암모니아의 특성

암모니아는 수소와 질소의 화합물로서 생산 방식에 따라 그레이 암모니아, 블루 암모니아, 그린 암모니아로 나눌 수 있다. 그레이 암모니아는 화석연료를 개질하여 제조한 것으로 기존의 암모니아 대부분이 이러한 방식으로 생산된다. 또한 블루 암모니아는 그레이 암모니아의 생산과정에서 발생하는 탄소를 포집·저장하여 탄소배출량을 줄이는 방식으로 제조된다. 반면에 그린 암모니아는 풍력이나 태양광 등 재생에너지를 이용해 수전해한

36) 전계서, p. 3.

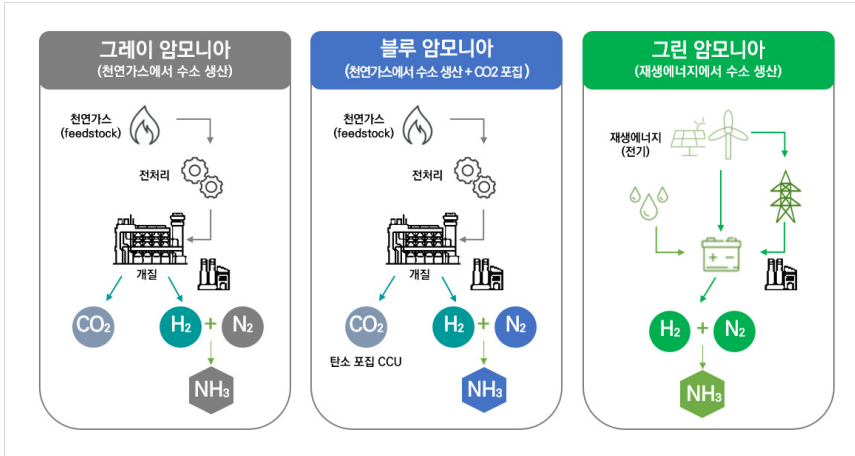
37) 전계서, p. 3.

38) 전계서, p. 3.

39) European Commission(2024), p. 17.

그린 수소를 사용하여 생산된다.

〈그림 2-3〉 생산 방식에 따른 암모니아 구분



자료: Matjaž Matošec(2024.1.25.)(검색일: 2025.8.7.)

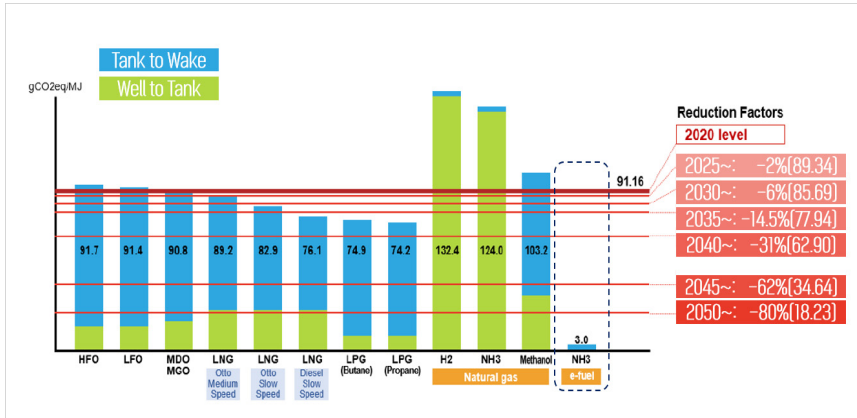
그린 암모니아 생산의 핵심은 재생에너지에서 생산된 전기를 이용한다는 것이며, 이를 통해 생산과정에서 이산화탄소의 배출을 최소화할 수 있다.⁴⁰⁾ 따라서 국제해사기구의 선박 연료 전과정 평가(LCA)와 유럽연합의 FuelEU Maritime을 시행했을 때 그린 암모니아는 무탄소 선박 연료로서의 장점을 극대화할 수 있다.⁴¹⁾ 일례로 그린 암모니아의 탄소집약도는 FuelEU Maritime의 연도별 탄소집약도의 제한치를 넘지 않는다.(〈그림 2-4〉 참고). 또한 김진형·최재혁(2024)이 FuelEU Maritime의 연료별 기본 계수를 기준으로 전과정 온실가스 배출량을 계산한 결과 그린 암모니아 선박 연료는 메가줄당 5.27gCO₂e에 불과했다.⁴²⁾

40) K.Machaj et al.(2022), p. 13.

41) IMO에서 현재 시행 중인 탄소집약도지수(Carbon Intensity Indicator; CII) 규제는 연료의 연소과정(Tank to Wake)에서의 온실가스 배출량을 대상으로 하나 온실가스 중기결합조치는 연료의 생산과 운송(Well to Tank)까지 포함한 전과정에 대해 평가를 실시한다.

42) 김진형·최재혁(2024), p. 91.

〈그림 2-4〉 연료별 온실가스 집약도 및 FuelEU Maritime 제한 기준



자료: Class NK(2024), p. 9.

(2) 암모니아 선박 연료의 특성

암모니아 선박 연료는 대기압에 가까운 압력 및 냉장 조건(-33℃)에서 선박 내에 보관이 가능하고, 상온에서도 액체 상태를 유지할 수 있어 저장과 보관이 용이하다.⁴³⁾ 뿐만 아니라 암모니아는 보편적으로 활용되고 있는 화학물질로 오래 전부터 해상 무역이 이뤄졌기 때문에 운송에 대한 인프라가 이미 구축되어 있다.⁴⁴⁾ 또한 가연 범위가 좁고 발화 조건이 까다로워 화재 위험성이 비교적 낮다. 이로 인해 암모니아 선박 연료는 파일럿 연료를 사용하여 점화를 해야 한다.

반면에 암모니아 연료는 에너지 밀도가 낮아 디젤연료와 대비하여 약 4.1배 크기의 탱크가 필요하다는 단점도 존재한다.⁴⁵⁾ 또한 연소 시에는 질소산화물(NO_x)이 생성되며, 배기가스 내 일산화질소(NO)와 반응하여 아산화질소(N₂O)를 형성할 수 있으므로 이에 대한 저감 방법을 고려해야 한다.

43) 한국선급(2023), p.10.

44) Bicer & Dincer(2018), p. 4585.

45) 한국선급 홈페이지(검색일: 2025.8.7.)

선박 연료로서 암모니아를 사용할 때 가장 우려되는 특성은 독성이다. 독성으로 인해 치명적인 인명 피해를 낼 수 있기 때문이다. 그러나 일각에서는 그동안 육상에서 암모니아를 안전하게 사용해왔기 때문에 선박 연료로도 안전하게 사용할 수 있다고 말한다.⁴⁶⁾ 또한 암모니아 선박 연료의 독성 문제를 해결하기 위한 다수의 연구가 진행되고 있으며, 각국의 주요 선급에서는 암모니아 연료의 안전에 관한 가이드라인을 설정하였다.⁴⁷⁾

2) 타 선박 연료와의 비교

기존의 선박 연료를 대체하기 위한 연료로는 암모니아, LNG, 메탄올, 수소 등이 언급되고 있다. LNG는 암모니아에 비해 에너지 밀도가 높지만 극저온(-162℃)에서 저장해야 한다.⁴⁸⁾ 또한 화석연료에 기반하였기 때문에 연소 시에는 이산화탄소가 배출된다. 반면에 메탄올은 상온 및 상압에서 저장이 쉽다. 그러나 독성, 폭발, 화재 등의 위험이 있고 연소 시 배출되는 이산화탄소의 양이 화석연료와 비슷한 수준이기 때문에 저탄소 연료로서 그린 메탄올 또는 블루 메탄올이 대안으로 제시된다.⁴⁹⁾

수소는 암모니아와 마찬가지로 무탄소를 배출하는 연료다. 그러나 암모니아보다 에너지 밀도가 낮고, 극저온(-253℃) 조건에서 액화하기 때문에 저장 및 보관이 어렵다.⁵⁰⁾ 또한 체적 에너지 밀도가 낮아 중유(HFO)와 대비하여 약 4.63배의 연료탱크가 필요하다.⁵¹⁾ 일부 전문가들이 외항 선박에 수소 연료를 도입하는 것을 검토했으나 저장 공간 및 자연 유실 등의 문제로 인해 어렵다고 판단하였다. 다만 충전을 자주 할 수 있는 소형선박

46) 최우석(2023), p. 13.

47) 양종서(2023), p. 26.

48) 한국해사협력센터(2024a), p. 11.

49) 양종서(2023), p. 18.

50) ClassNK(2025), p. 30.

51) ClassNK(2025), p. 30.

은 가능할 수도 있다고 보았다.⁵²⁾⁵³⁾

〈표 2-3〉 선박 연료별 특성 비교

구분	중유(HFO)	암모니아	수소	메탄올	LNG
단위 부피당 에너지 밀도 (HFO=1)	1	3.07	4.63	2.47	1.89
액체 질량 밀도(ton/m ³)	0.96	0.68	0.07	0.79	0.42
동일한 에너지 효율 톤수 (HFO=1)	1	0.04	0.01	0.92	0.82
액화 저장탱크 용량 (HFO=1)	1	3.07	4.63	2.47	1.89
액화 온도	-	-33℃	-253℃	65℃	-161℃
저위발열량	40.2	18.6	120.0	19.9	48.0
가연성(Vol%)	0.7~5	15~33.6	4~75	6~50	5~15
최소 점화 에너지(MJ)	-	680	0.017	0.14	0.3
TtW CO ₂ 배출(/MJ) (HFO=1)	1	0	0	0.90	0.73
TtW GHG 배출(/MJ) (HFO=1)	1	0.04	0.01	0.92	0.82
배출오염물질	NOx SOx PM	NOx 암모니아슬립 N ₂ O	NOx 수소슬립	NOx 메탄슬립 포름알데하드	NOx 메탄슬립

자료: ClassNK(2025), p. 30.

한편 암모니아는 다른 대체연료에 비해 운송 기술이 확보되었다.⁵⁴⁾ 현재 전 세계 120여개 항구에 암모니아 터미널이 구축되어 있다.⁵⁵⁾ 또한 그레이 암모니아의 경우 대용량 합성 기술에 따른 안정적인 연료 공급과 운송·저장 측면에서 타 연료 대비 저렴한 비용이 선박 연료로서의 사용 가능성을 높이는 요소이다. 반면에 그린 암모니아의 경우 타 연료 대비 높은 생산

52) 자문회의(2025.7.18., 대한민국 부산).

53) 자문회의(2025.7.21., 대한민국 서울).

54) 한국선급(2021), p. 17.

55) 암모니아 수출항 38개, 수입항 88개, 수출입항 6개이다.

가격과 재생에너지 전력 단가에 따른 변동성이 선박 연료로서 우려되는 요인이다. 그러나 다수의 연구에서 향후 재생에너지 가격의 하락과 수전해 기술의 발전 및 보급 확대에 따른 그린 수소 가격의 하락, 선박 연료의 탄소세 규제 확대 등으로 인해 그린 암모니아 선박 연료가 가격경쟁력을 확보할 가능성이 높다는 결과를 도출하였다.⁵⁶⁾⁵⁷⁾⁵⁸⁾⁵⁹⁾⁶⁰⁾ DNV·RICARDO (2023) 역시 그린 암모니아 연료와 기존의 화석연료(VLSFO, LNG) 간 가격 격차가 점차 줄어들고 있으며, 2050년에는 그린 암모니아 연료의 가격이 그린 메탄올 및 바이오디젤 연료보다 낮아질 것으로 전망하였다(〈표 2-4〉 참고).

〈표 2-4〉 선박 연료별 가격 전망

(단위: USD/GJ)

구분	2022년	2030년	2050년
그린 암모니아	50~62	33~48	19~39
그린 수소	40~58	23~31	18~26
그린 메탄올	30~65	37~51	26~35
바이오디젤	18~40	19~34	21~43
저유황유(VLSFO)	11~13	11~14	11
LNG	39~41	8~12	8~11

자료: DNV·RICARDO(2023), p. 133.

56) 양종서(2023), p. 34.

57) BloombergNEF(2020), p. 6.

58) IRENA(2022), p. 63.

59) 한국에너지기술연구원(2021), p. 2.

60) Olli&Voovere(2021), p. 5.

제2절 그린 암모니아 선박 연료 동향

1. 세계 수급 동향 및 전망

1) 수요 동향 및 전망

(1) 그린 암모니아 수요 동향 및 전망

가. 기존 암모니아 수요 동향

전 세계의 암모니아 생산량은 2024년 기준으로 2억 70만 톤으로 생산된 암모니아의 70%는 비료 제조에 사용되었으며 나머지 30%는 화학산업 분야 등에 활용되었다.⁶¹⁾ 그러나 암모니아의 국제 무역 규모는 생산량의 약 10%에 불과한데 그 이유는 암모니아 및 비료 기업이 식량의 공급 안정을 위해 현지에 생산 설비를 구축하기 때문이다.⁶²⁾

암모니아 무역에서 주요 수출국은 사우디아라비아, 미국, 캐나다, 알제리, 러시아이며 주요 수입국은 인도, 미국, 모로코, 한국이다(〈표 2-5〉참고).⁶³⁾ 우리나라는 암모니아 전량을 수입하고 있으며, 2024년 총 수입량은 110만 톤으로 세계 4위를 차지했다.

〈표 2-5〉 기존 암모니아 주요 수출입국(2024년 기준)

(단위:천 M/T)

순위	주요 수출국		주요 수입국	
	국가명	수출량	국가명	수입량
1	사우디아라비아	2,595	인도	2,406
2	미국	1,153	미국	2,093

61) S&P Global(2024), p. 2.

62) BloombergNEF(2024), p. 5.

63) S&P Global(2024) pp. 8-9.

순위	주요 수출국		주요 수입국	
	국가명	수출량	국가명	수입량
3	캐나다	1,063	모로코	1,595
4	알제리	994	한국	1,102
5	러시아	684	터키	879

자료: S&P Global(2024) pp. 8-9.

나. 그린 암모니아 수요 전망

그린 암모니아의 경우 선박 연료, 발전, 수소캐리어 등 기존의 암모니아와는 다르게 새로운 사용처가 발생할 것으로 보인다. MPP(Mission Possible Partnership)는 2050년 Net-Zero 시나리오에서 암모니아 수요는 기존의 암모니아 수요에서 최소 3억 3천만 톤, 최대 9억 톤까지 증가할 수 있다고 전망하였다. 사용처별로 추가 수요는 선박 연료에서 2억 9천만 톤~6억 8천만 톤, 발전에서 3천 5백만 톤~1억 5백만 톤, 수소 캐리어에서 최대 1억 1천만 톤으로 전망했다.⁶⁴⁾⁶⁵⁾

한편 S&P Global은 2050년 기준으로 저탄소 암모니아의 연간 수요를 1억 7,600만 톤으로 전망하였다. 사용처별로는 비료 및 화학 부문에서 2천 5백만 톤, 선박 연료 부문에서 8천 2백만 톤, 전력 부문에서 2천 7백만 톤, 수소캐리어 부문에서 4천 1백만 톤의 수요가 발생할 것으로 전망하였다(〈그림 2-5〉 참고).⁶⁶⁾ 또한 2040년의 그린 암모니아 수출량을 4만 9천 톤으로 전망했으며, 주요 수입 지역은 유럽으로 2만 4천 톤의 그린 암모니아를 수입할 것으로 예상하였다. 그리고 일본과 한국은 그린 암모니아와 블루암모니아를 동시에 수입하여 각각 1만 2,500톤, 4,300톤을 수입할 것

64) MPP는 세계경제포럼(WEF), 에너지전환위원회(Energy Transitions Commission), 로키마운틴연구소(Rocky Mountain Institute), 위민비즈니스연합(We Mean Business Coalition)이 운영하는 비영리기관으로서 중공업 및 운송업의 탈탄소화를 가속화하는 것을 목표로 하고 있다.

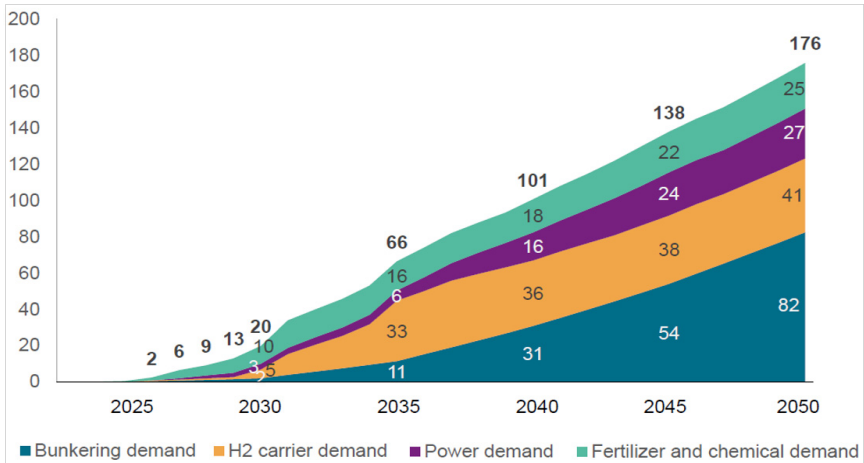
65) MPP(2022), p. 30.

66) Lloyd's Register(2024), p. 32.

으로 전망하였다.⁶⁷⁾

〈그림 2-5〉 사용처별 글로벌 저탄소 암모니아 수요 전망

(단위: 백만 M/T)



자료: S&P Global(2024), p. 15.

(2) 선박 연료용 암모니아 수요 동향 및 전망

가. 암모니아 추진 선박 현황

현재 암모니아 연료를 사용한 상업용 선박은 운항하지 않으나 2025년 12월부터 HD현대미포에서 건조한 중형 암모니아 추진선이 인도될 예정이다.⁶⁸⁾ 엔진 제조사들은 암모니아 이중연료 엔진의 출시를 앞두고 있다. 이에 따라 암모니아 선박에 대한 관심은 증가하고 있다.

2025년 6월 기준으로 발주된 암모니아 선박은 총 43척으로 전체 대체연료 선박 발주량(1,187척)의 3.6% 수준에 불과하다. 선종별로는 벌크선 18척, 컨테이너선 1척, 원유선 3척, 석유제품운반선 2척, LPG선 18, LPG·암

67) S&P Global(2024), pp. 13-14.

68) 양범수(2025.6.23.)(검색일: 2025.7.23.)

모니아 운반선 1척이다.⁶⁹⁾

〈표 2-6〉 암모니아 추진 선박 인도 계획

구분	2025년	2026년	2027년	2028년	2029년
암모니아 선박	1	16	15	9	2

주: 5000GT 이상 선박

자료: ClassNK(2025), p. 7.

나. 선박 연료용 암모니아 수요 전망

국제에너지기구(International Energy Agency; IEA)는 해운 분야에서 바이오 연료, 수소 등 대체연료의 비중이 현재는 1% 미만이나 2030년에는 약 15%, 2050년에는 80%까지 증가할 것으로 전망했다.⁷⁰⁾ 특히 암모니아 연료의 비중은 2030년 6%, 2040년 15%, 2050년 44%로 점차 증가할 것으로 보았다.⁷¹⁾

DNV도 2050년에 저탄소 및 무탄소 연료의 비중을 전체 선박 연료의 84%로 전망하여 IEA의 전망과 유사하게 나타났다.⁷²⁾ 그리고 암모니아 연료의 비중은 2030년 1%, 2040년 13%, 2050년 36%로 전망했다.⁷³⁾ 또한 DNV는 선박 연료로서 암모니아의 수요는 2030년 연간 230만 톤에서 2040년 6,200만 톤, 2050년 2억 4500만 톤으로 증가할 것으로 예측했다.⁷⁴⁾⁷⁵⁾

69) ClassNK(2025), p. 7.

70) IEA(검색일: 2025.5.26.)

71) IEA(검색일: 2025.5.26.)

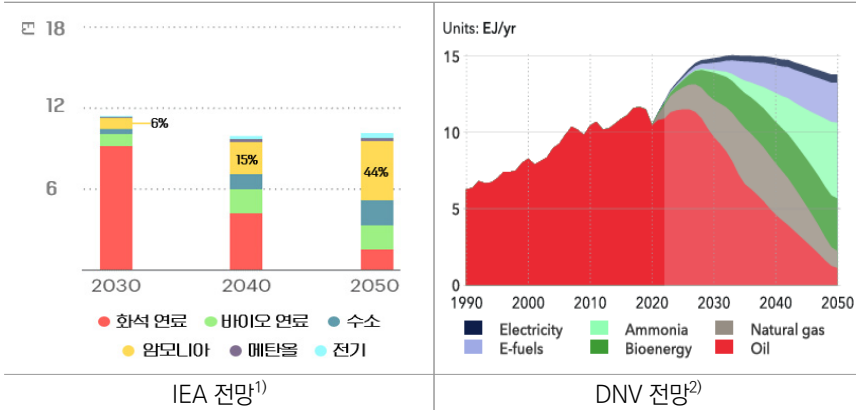
72) DNV(2023), p. 22.

73) DNV(2023), p. 58.

74) DNV(2024), p. 21.

75) 그린 암모니아와 블루 암모니아를 포함한 암모니아 수요를 말한다. DNV는 선박 연료로서 암모니아는 그린 암모니아와 블루 암모니아만 사용될 것으로 보고 있다.

〈그림 2-6〉 해운 분야 대체에너지 비중 전망



자료: 1) IEA(검색일: 2025.5.26.)

2) DNV(2023), p. 22.

2) 공급 동향 및 전망

(1) 그린 암모니아 생산 프로젝트 현황 및 공급 전망

2023년 기준 161개의 그린 암모니아 및 블루 암모니아 프로젝트가 있으며 45개국, 257개의 이해관계자들이 참여하고 있다.⁷⁶⁾ 현재까지 발표된 프로젝트의 총 생산 능력은 연간 2억 4,400만 톤이며 이 가운데 그린 암모니아가 2억 542만 톤으로 84%를 차지한다.⁷⁷⁾ 그러나 현재의 프로젝트 진행 상황을 고려하면 실제 공급량은 더 적을 것으로 전망된다.

위의 그린 암모니아 전체를 생산하기 위해서는 약 2,050TWh의 재생에너지가 필요하며 이는 전 세계 재생에너지 생산량의 6.8%에 해당한다.⁷⁸⁾ 따라서 공급 원료인 재생에너지의 가용성이 그린 암모니아 생산 위치를 결정하는 핵심 요소 중 하나가 될 것이다.⁷⁹⁾ 호주는 재생에너지가 풍부한 국

76) DNV(2024), p. 6.

77) 전계서, p. 10.

78) 현재 전기분해 및 합성 기술에 필요한 전력은 약 10MWh/tNH₃임.

79) IEA(2021), p. 9.

가로 그린 암모니아의 주요 수출지로 부상할 것으로 보인다. 실제로 그린 암모니아 생산 프로젝트의 국가별 분포를 보면 호주의 생산량이 연간 5,371만 톤으로 전체 생산량의 약 26.15%로서 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 그 다음으로 사우디아라비아(10.32%), 모리타니(8.52%) 순으로 생산량이 높게 나타난다.

〈표 2-7〉 국가별 그린 암모니아 프로젝트 생산 목표치

국가	연간 생산 목표치(백만 톤)	비중(%)
호주	53.71	26.15
사우디아라비아	21.20	10.32
모리타니	17.50	8.52
오만	14.87	7.24
파푸아뉴기니	11.50	5.60
카자흐스탄	11.24	5.47
이집트	10.36	5.04
케냐	9.70	4.72
모로코	9.58	4.66
칠레	9.46	4.61
인도	7.50	3.65
중국	3.04	1.48
캐나다	2.89	1.41
브라질	2.69	1.31
미국	2.25	1.10
기타	114.15	55.57
총합	205.42	100

자료: DNV(2024), p. 8.

DNV는 그린 암모니아 생산 프로젝트를 바탕으로 2030년 그린 암모니아의 생산량을 연간 2,100만 톤~3,500만 톤으로 예측하였다.⁸⁰⁾ MPP는 2050년까지 전 세계적으로 1,000여개의 플랜트가 가동되어 연간 8억 3천

80) DNV(2024), p. 16.

만 톤의 그린 암모니아를 생산할 수 있을 것으로 전망했다.⁸¹⁾ 또한 전체 암모니아의 생산량 가운데 그린 암모니아의 생산 비중이 2030년에 12~38%, 2050년에 69~94%를 차지할 것으로 전망했다.⁸²⁾

(2) 선박 연료용 그린 암모니아 공급 동향 및 전망

DNV에서 그린 및 블루 암모니아 프로젝트의 총 생산량 2억 4,400만 톤에 대해 최종적인 사용처별 공급 계획을 전망한 결과 선박 연료를 단독 사용처로 한 생산 용량은 2,080만 톤이었다.⁸³⁾ 또한 그린 및 블루 암모니아 프로젝트 가운데 1억 8천만 톤의 생산량은 에너지, 비료, 선박의 혼합 용도로 계획되어 해당 분야의 시장 수요에 따라 공급량이 결정될 것으로 보인다.⁸⁴⁾ 이를 토대로 DNV는 선박 연료 전용 암모니아의 최소 공급량을 연간 500만 톤, 최대 공급량을 연간 3,220만 톤으로 추정하였다.⁸⁵⁾

〈표 2-8〉 그린 및 블루 암모니아 프로젝트의 선박 연료 공급 계획

구분	용도	MTPA ¹⁾	비중(%) ²⁾	비고
단일 사용처	선박 연료	21	8.61	선박 연료 목적
	비료 및 선박 연료	7	2.87	비료, 선박 연료에 모두 사용
복합 사용처	에너지 ³⁾ , 선박 연료, 비료	59	24.18	모든 사용처에 적용
	에너지, 선박 연료	109	44.67	에너지 또는 선박 연료에 사용

주 : 1) Million Ton Per Annual)

2) 총 생산량 2억 4,400만 톤에 대한 비중

3) 발전 또는 수소 운송용

자료: DNV(2024), p. 14.

선박 연료용 그린 및 블루 암모니아 프로젝트는 총 10개국에서 30개가 발표되었으며, 연간 생산량은 총 2,080만 톤이다. 주요 생산국가는 호주

81) MPP(2022), p. 18.

82) MPP(2022), p. 13.

83) DNV(2024), p. 14.

84) 전게서, p. 14.

85) 전게서, p. 17.

(49%)와 이집트(33%)이다.⁸⁶⁾

〈표 2-9〉 선박 연료용 그린 및 블루 암모니아 프로젝트 현황

프로젝트명	국가	연간 생산량 (백만 톤)	비중(%)
AREH	호주	9.9	47.7
Ra	이집트	1.6	7.7
Total-2	이집트	1.5	7.2
Green Ammonia in SCZone	이집트	1.0	4.8
Magallanes Wind to Ammonia	칠레	1.0	4.8
ReNew Power-2	이집트	0.9	4.3
Argentina REnewables-2	캐나다	0.5	2.5
Green Pegasus	칠레	0.5	2.2
AMEA-1	이집트	0.4	1.9
AMEA-2	이집트	0.14	1.9
Heroya Green Ammonia(HEGRA)-Energy	노르웨이	0.4	1.9
Baotou Renewable Ammonia	중국	0.4	1.9
Total-1	이집트	0.3	1.4
The Port Pirie Green Hydrogen	호주	0.2	1.0
EDF Renewable-2	이집트	0.2	1.0
Project Saouda Iverson E-fuels	노르웨이	0.2	1.0
Courant	캐나다	0.2	0.8
Khalifa Industrial Zone AbuDhabi(KIZAD)-2	아랍에미리트	0.2	0.8
EDF Renewable-1	이집트	0.1	0.7
MEP	이집트	0.1	0.6
Aquamarine	독일	0.1	0.5
North Ammonia Arendal	노르웨이	0.1	0.5
Nujio'qonik-1	캐나다	0.1	0.5
ReNew Power-1	이집트	0.1	0.5
Slagen Terminal	노르웨이	0.1	0.5
Egypt Green Ammonia(Two plants)	이집트	0.1	0.4
Argentina Renewables-1	캐나다	0.1	0.4

86) DNV(2024), pp. 14-15.

프로젝트명	국가	연간 생산량 (백만 톤)	비중(%)
Green Fuel Iceland-2	아이슬란드	0.1	0.3
Green Fuel Iceland-2	아이슬란드	0.0	0.1
INOEX-led	일본	0.0	0.0
총합		20.8	100

자료: DNV(2024), p. 15.

2. 관련 기술 동향

1) 그린 암모니아 선박 연료 공급 관련 기술

(1) 생산기술

가. 수전해 기술

수전해를 통한 그린 수소의 생산은 그린 암모니아의 생산과정에서 필수적이다. 현재 개발되고 있는 주요 수전해 기술로는 알칼리 수전해(Alkaline Water Electrolysis; AE), 고분자전해질막 수전해(Polymer Electrolyte Membrane; PEM), 고체산화물 수전해(Solid Oxide Electrolysis Cell; SOEC) 등이 있다.⁸⁷⁾

알칼리 수전해(AE)는 알칼리 전해액을 이용해 수전해하는 방식으로 기술 성숙도와 가격 경쟁력이 높다. 그러나 수소와 산소의 혼합으로 인한 폭발의 위험이 있으며, 전류 밀도가 낮아 큰 면적의 수전해 장치가 필요하다는 단점이 있다. 반면에 고분자전해질막 수전해(PEM)는 양이온 교환막을 전해질로 사용하는 기술로 전류 밀도와 에너지 효율이 높아 수전해 장치를 소형화할 수 있다. 단점은 귀금속을 촉매로 사용하기 때문에 생산 비용이 증가한다는 것이다.⁸⁸⁾ 한편 고체산화물 수전해(SOEC)는 고체산화물 전해

87) 백종민, 김수현(2024), p. 16.

질을 이용해 700~800도의 고온 수증기를 수전해시키는 기술로 앞서 언급한 두 기술보다 에너지 효율이 높다.⁸⁹⁾ 또한 귀금속 촉매가 필요하지 않아 비용 면에서 잠재력을 갖고 있다. 고체산화물 수전해 전지는 알칼리 전기 분해와 비슷한 비용 수준에 도달하여 장기적으로 기술적인 우위를 가질 것으로 전망되기도 한다.⁹⁰⁾ 그러나 현재로서는 관련 연구가 부족하고 다른 수전해 기술보다 기술성숙도가 낮다.

〈표 2-10〉 수전해 기술별 장단점 비교

구분	장점	단점
알칼리 수전해(AE)	• 높은 기술성숙도와 안정성 • 비귀금속 전기 촉매	• 기체 혼합 위험 • 낮은 전류 밀도
고분자전해질막 수전해 (PEM)	• 고순도 수소 생성 • 전류변동에 대한 반응성 탁월	• 귀금속 전기 촉매 • 시스템 구성요소의 높은 비용
고체산화물 수전해 (SOEC)	• 높은 전압 효율 • 비귀금속 전기 촉매	• 높은 작동 온도 • 낮은 기술성숙도

자료: 백종민, 김수현(2024), p. 16.

나. 합성 기술

그린 암모니아의 생산 기술은 크게 3세대로 구분할 수 있다. 1세대는 하버보쉬공정이다. 하버보쉬공정은 이미 상용화된 기술로 고온(400℃ 이상)·고압(200bar)을 사용하기 때문에 많은 양의 에너지가 필요하다.⁹¹⁾ 2세대는 저온(350℃)·저압(50bar)에서 암모니아를 합성하여 생산하는 기술로써 에너지 소모가 적으며 수소의 저장 비용을 줄일 수 있다.⁹²⁾ 해당 기술은 미국을 중심으로 기술 개발이 진행되는 중이나 아직은 파일럿 규모의 수준

88) 에너지정보문화재단(2024.11.18.)(검색일:2025.3.26.)

89) 남궁윤(2021.5.12.)(검색일:2025.3.26.)

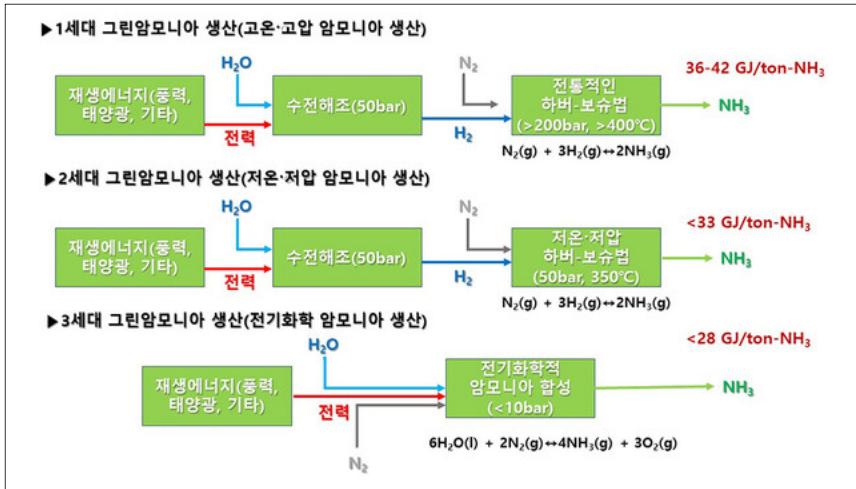
90) Laval et al.(2020), p. 14.

91) 안지영·이태의(2023), p. 34.

92) 윤재현(2025.3.12.)(검색일: 2025.3.26.)

이다. 3세대는 전기화학 방법으로 그린 암모니아를 생산하는 것이다. 이 기술은 10bar 이하에서 물, 질소, 전기 공급을 통해 암모니아를 생산하는 기술로 연구개발 단계의 수준에 있다.⁹³⁾

〈그림 2-7〉 그린 암모니아 생산 기술



자료: 양인범(2024.4.9.)(검색일: 2025.4.9.)

유럽해사안전국(European Maritime Safety Agency; EMSA)은 그린 암모니아 생산의 기술성숙도(Technology Readiness Level; TRL)를 제시한 바 있다. 수전해 기술은 알칼리 전기분해(TRL9), 고분자전해질막 수전해(TRL8~9), 고체산화물 수전해(TRL3~5) 순으로 기술성숙도가 높게 나타났다. 합성 기술의 경우 이미 상용화된 하버보슈 기술(TRL9)과 달리 전기화학적인 암모니아 합성 기술(TRL1~3)은 아직 미성숙한 단계이다.

93) 양인범(2024.4.9.)(검색일: 2025.4.9.)

〈표 2-11〉 그린 암모니아 생산 기술성숙도(TRL)

구분	주요 기술	TRL
수전해	알칼리 수전해	9
	고분자전해질막 수전해	8-9
	고체 산화물 수전해	3-5
합성	하버-보쉬	9
	전기화학적 암모니아 합성	1-3

주: TRL 1= 기본 원리 관찰, 2=개념 수립, 3=실험적 개념 증명, 4=실험 검증, 5=시뮬레이션 환경에서 검증, 6=시뮬레이션 환경에서 시연, 7=운영 환경에서 시스템 프로토타입 시연, 8=시스템 완전성 및 적격성 확인, 9=실제 운영 환경에서 시스템 입증

자료: EMSA(2022), p. 23.

(2) 운송·병커링 기술

암모니아의 운송·병커링 기술은 그린 암모니아와 일반 암모니아를 구분할 필요가 없다. 그린 암모니아와 일반 암모니아는 생산 과정에서 차이가 있으나 물리적 생산물은 동일하기 때문이다. 따라서 선박 연료로서 그린 암모니아를 활용한다면 이미 글로벌 시장이 형성되어 있는 일반 암모니아의 기존 인프라를 활용할 수 있으며 운송 기술 역시 확보된 상황이다.⁹⁴⁾⁹⁵⁾

암모니아 선박 연료의 병커링 기술 개발은 아직 진행 중이다. 선박에 암모니아 연료를 공급하는 병커링 작업은 트럭 대 선박(Truck to Ship; TTS)과 선박 대 선박(Ship to Ship; STS) 방식이 있다. TTS는 육상에서 트럭을 통해 선박으로 암모니아를 공급하는 방식으로 연료의 공급량을 조절할 수 있고 초기의 투자비용 및 인프라의 규모가 작다. 그러나 저장·이송 용량이 제한적이고 작업 시간이 길다는 단점이 있다. STS 방식은 TTS와 대비하여 단시간에 연료 공급이 가능하고 병커링과 하역 작업이 동시에 가능하다는 장점을 지닌다. 그러나 병커링 선박의 건조 및 운영과 관련된 초기의 투자 비용이 높다.

94) 박상우(2024.10.10.)(검색일: 2025.3.30.)

95) 한국선급(2021), p. 17.

〈표 2-12〉 벙커링 방식 비교

구분	Truck to Ship	Ship to Ship
장점	- 연료 공급량(트레일러 대수)의 조정이 가능함 - 초기 투자 비용 및 인프라의 규모가 작음 - 운영의 유연성	- TTS 대비 대량의 수소연료를 단시간에 공급이 가능함 - 벙커링과 하역의 동시 작업이 가능함 - 사고 발생 시 인명, 재산, 환경 등에 미치는 피해를 최소한으로 제어가 가능함
단점	- 트럭의 제한된 저장 용량 및 이송 용량이 있음 - 작업 복잡성 및 긴 작업 시간이 필요함 - 항만 내 다른 작업에 영향을 미침 - 항만 내 다른 교통수단, 작업자 등에 쉽게 노출됨	- 벙커링 선박 설계, 조달, 건조 및 운영과 관련된 높은 초기 투자비용이 발생함 - 항구의 조건에 따라 벙커링 선박 제원이 제한적임
방식		

자료: 한국선급(2024a), p. 10.

옥스퍼드 리서치(2021)에 따르면 암모니아의 운송 및 저장 시스템은 이미 비료 및 산업용 암모니아 거래에서 사용되고 있기 때문에 TRL9 단계에 있다. 암모니아 선박 연료의 벙커링 기술은 실증단계(TRL7)로 안전 등에서 기술적인 과제가 존재한다. 예를 들어 암모니아 누출 시 차단 밸브를 작동하기 위한 원격 제어 시스템 기술이 필요하다.⁹⁶⁾

96) Oxford Research(2021), p. 35.

〈표 2-13〉 암모니아 선박 연료의 운송 및 벙커링 기술성숙도(TRL)

구분	주요 기술	TRL
운송	저장 및 운송 시스템	9
벙커링	상업적 암모니아 벙커링	7

주: TRL 1= 기본 원리 관찰, 2=개념 수립, 3=실험적 개념 증명, 4=실험 검증, 5=시뮬레이션 환경에서 검증, 6=시뮬레이션 환경에서 시연, 7=운영 환경에서 시스템 프로토타입 시연, 8=시스템 완전성 및 적격성 확인, 9=실제 운영 환경에서 시스템 입증

자료: Oxford Research(2021), p. 35.

2) 암모니아 추진 선박 기술

암모니아 엔진 기술은 암모니아 추진 선박의 상용화에서 가장 중요한 기술로, 암모니아 선박 연료를 내연기관에 직접적으로 연소하는 방법과 연료 전지에 연료를 주입하는 방법이 있다.

내연기관 엔진의 경우 현재 에버런스(구 만에너지솔루션즈)와 바르질라(Wärtsilä), WinGD, HD현대중공업 그룹, STX 엔진 등 주요 엔진사에서 암모니아 선박 엔진을 개발하고 있다.⁹⁷⁾ 에버런스는 2023년 6월 자사의 테스트 센터에서 2행정 암모니아 엔진 테스트를 시작했으며 2026년 말까지 암모니아 엔진을 제공할 예정이다.⁹⁸⁾ WinGD는 현재 5MW에서 31MW까지의 2행정 암모니아 엔진을 준비하고 있다.⁹⁹⁾ WinGD 엔진은 2025년에서 2027년 사이에 인도될 예정인 벌크선 시리즈에 주문되었으며, 같은 기간에 가스 탱커 2척과 컨테이너선 1척에도 탑재될 예정이다.¹⁰⁰⁾ 암모니아의 4행정 엔진 기술은 2행정 엔진 기술보다 약간 앞서 있다.¹⁰¹⁾

97) 김기두(2023.11.8.), p. 62.

98) DNV(2025), p. 11.

99) 전게서, p. 11.

100) 전게서, p. 11.

101) DNV-RICARDO(2023), p. 26.

〈표 2-14〉 암모니아 선박 내연기관 엔진기술 개발

구분	2행정 엔진	4행정 엔진
2023년	• (에버런스) 자사테스트 센터에서 엔진 테스트 시작 • (WinGD) 암모니아 엔진의 AIP인증 획득	• (바르질라) 저압/고압 암모니아 엔진의 육상 실증 • (HD현대중공업·HD한국조선해양) 암모니아 엔진의 육상 실증(고압, 1MW급)
2024년	• (에버런스) Full Scale Test 및 선박에 탑재할 준비	• (HD한국조선해양) 암모니아 엔진의 육상 실증(저압, 1MW급) • (STX엔진) 암모니아 엔진의 육상 실증 • (HD현대중공업) 암모니아 엔진 2종의 형식승인 절차(1MW급, 3~4MW급) • (바르질라) 암모니아 엔진 1종의 출시(2~3MW급) • (IHI) 암모니아 엔진 1종의 터그선 적용(1.6MW급)
2025년	• (WinGD) 2025~2027년 벌크선 선박에 탑재할 예정	• (STX엔진) 암모니아 엔진의 선박 실증
2026년	• (에버런스) 엔진의 출시 예정(상용화)	• (IHI) 암모니아 엔진 1종의 가스선 적용(1.3MW급) • (에버런스) 엔진의 출시 예정(상용화)

자료: 김기두(2023.11.8.), p. 62.

암모니아 선박 연료는 느린 화염속도, 높은 자연발화온도와 발화에너지, 좁은 연소 범위(15~25%)로 단독 연소가 불안정하기 때문에 이중연료 엔진에서 가솔린 등의 보조 연료와 함께 사용하는 것이 권장된다.¹⁰²⁾ 또한 암모니아 선박 연료의 점화를 돕기 위한 파일럿 연료의 사용 역시 필요하다. 현재 암모니아 선박 연료의 연소를 위해 2행정 엔진에서는 약 5~15%, 4행정 엔진에서는 최대 30% 수준의 파일럿 연료가 필요한 것으로 나타났다.¹⁰³⁾ 이 때문에 암모니아가 완전한 무탄소 연료가 되기 위해서는 친환경 파일럿 연료가 필요하나 관련 기술은 진척되지 않은 상황이다.¹⁰⁴⁾ 또한 암모니아에는 질소가 포함되어 있어 암모니아를 선박 연료로 활용할 때 질소

102) 이종윤·이복직(2022), p. 47.

103) Maersk Mc-Kinney Møller Center(2023), p. 10.

104) Oxford Research(2021), p. 37.

산화물이 생성된다. 그러나 현재 암모니아 선박 엔진용 배기가스의 후처리 장치에 대한 연구·개발은 미흡한 실정이다.¹⁰⁵⁾

한편 암모니아 연료전지의 경우 선박에 적용할 가능성이 높은 연료전지는 고분자 전해질 연료전지와 고체산화물 연료전지이다.¹⁰⁶⁾ 일반적으로 연료전지는 내연기관보다 효율이 높으나 중·대형 선박에 적용할 경우 연료전지의 설치 공간 확보 및 전기 변환에 따른 손실 등의 문제가 존재한다.¹⁰⁷⁾ 암모니아 연료전지 선박의 시범 운용은 2020년대 후반이 될 것으로 예상되나 상용화는 2030년대 후반일 가능성이 높다.¹⁰⁸⁾ 다만 연료전지는 보조 전력 생산에 사용될 가능성도 있어 보조 전력용 연료전지의 상용화는 2030년대 후반보다 더 앞당겨 이뤄질 수 있다.¹⁰⁹⁾

선행연구에 따르면 암모니아 추진 선박의 기술성숙도는 <표 2-15>와 같다. 4행정 엔진과 2행정 엔진은 각각 TRL8, TRL7 수준으로 실용화 단계에 있으며, 연료전지는 개발 초기 단계(TRL5)이다. 또한 그린 파일럿 연료의 사용 기술과 아산화질소 배출관리 기술 역시 개발 초기 단계(TRL5) 수준이다.

<표 2-15> 암모니아 추진 선박 기술성숙도(TRL)

주요 기술		TRL
엔진 기술 ¹⁾	4행정 엔진	8
	2행정 엔진	7
	연료전지	5
그린 파일럿 연료 기술 ²⁾		5
아산화질소(N ₂ O) 배출관리 기술 ²⁾		5

주: TRL 1= 기본 원리 관찰, 2=개념 수립, 3=실험적 개념 증명, 4=실험 검증, 5=시뮬레이션 환경에서 검증, 6=시뮬레이션 환경에서 시연, 7=운영 환경에서 시스템 프로토타입 시연, 8=시스템 완전성 및 적격성 확인, 9=실제 운영 환경에서 시스템 입증

자료: 1) DNV·RICARDO(2023), p. 26.

2) Oxford Research(2021), p. 39, p. 41.

105) Maersk Mc-Kinney Møller Center(2023), p. 18.

106) 한국선급(2025a), p. 13.

107) 한국선급(2024b), p. 34.

108) DNV·RICARDO(2023), p. 27.

109) 전계서, p. 26.

3. 주요국 정책 및 사례

1) 일본

일본은 기후변화 대응을 경제성장의 기회로 활용하기 위해 ‘녹색성장전략’을 수립하였다. 동 전략에서는 14개의 성장 산업을 제시했으며, 이 가운데 수소·암모니아 연료 산업을 포함하였다.¹¹⁰⁾ 또한 2조 엔 규모의 ‘그린 이노베이션 기금’을 조성하여 ‘녹색성장전략’에 포함된 산업의 연구개발과 실증 사업을 지원한다.¹¹¹⁾ 암모니아 연료의 경우 공급 측면에서는 그린 암모니아의 생산 기술 개발·실증 사업, 금융지원, 암모니아 저장탱크의 대형화, 항만시설의 정비 등을 추진할 계획이며, 활용 측면에서는 암모니아 추진 선박의 기술 개발·실증 및 도입 확대를 추진할 계획이다.¹¹²⁾ 또한 연료 이용 시 안전을 확보하기 위해 청정 연료 암모니아 협회(CFAA) 내에 안전 관련 작업반을 구성하여 위험 평가 및 기술적·제도적·운영적인 대응방안을 검토하고 규제 당국과 협의를 진행해 나갈 예정이다.¹¹³⁾

2023년 6월에는 ‘기본수소전략’을 수립하였다. 동 계획에 따르면 2030년경 저탄소 수소·암모니아의 공급을 계획하고 있는 업체를 대상으로 적절한 이윤에 대한 보전을 검토하는 중이다. 15년간 기준가격과 참고가격의 차액을 보조금으로 지원하는 방식이며, 지원 기간이 종료한 후에는 10년간 공급 의무를 부과해 자국 내 공급 기반을 확보할 수 있도록 한다.¹¹⁴⁾ 또한 일본은 공급망을 구축하기 위해 국제협력은행 등 공공기관을 통한 지원 및 자금 조달을 지원할 예정이다.¹¹⁵⁾

110) 임지영·김창훈(2021), p. 5.

111) 임지영·김창훈(2021), p. 9.

112) 일본경제산업성(2021), p. 11.

113) 전게서, p. 43.

114) 일본경제산업성(2023), p. 7.

115) 전게서, p. 7.

2020년에 수립된 ‘국제 해운 탈탄소 로드맵’에서는 2028년부터 2030년까지 무탄소 배출 선박의 도입 목표 기간으로 정하였다. 이 기간 동안 무탄소 배출 선박의 건조 및 운영을 위한 기술 연구개발과 실증의 가속화, 국제적인 규제 체계 및 표준에 대한 검토, 저탄소·무탄소 연료의 공급망 및 인프라 구축 등을 제시하였다.¹¹⁶⁾ 세부적인 추진과제로는 2028년 상업 운항을 목표로 한 암모니아 추진 선박의 R&D와 파일럿 프로젝트의 추진(∼’26), 저탄소·무탄소 선박 연료의 안전 지침 마련, 선원의 훈련 및 역량과 관련한 제도의 개발(∼’28), 무탄소 배출 선박에 대한 인센티브 마련(∼’30), 연료 공급망 구축(’28∼’50) 등이 있다.

한편 민간 부문에서는 일본 이토추상사가 암모니아 병커링선의 실용화를 추진한다. 이를 위해 2025년 6월에 사사키 조선, 이즈미 강업과 암모니아 병커링선 및 탱크의 제조 계약을 맺었다. 이 병커링 선박은 2027년 9월에 인도될 예정이며, 싱가포르에서 병커링 실증을 거친 후 2028년에 상용화될 계획이다.¹¹⁷⁾ 또한 IHI는 네덜란드의 저장·물류기업 Vopak과 공동으로 일본 내 암모니아의 수입·저장 터미널 개발에 착수했으며,¹¹⁸⁾ 인도의 ACME 그룹과 합작하여 인도 내 40만 톤급의 그린 암모니아 생산 프로젝트를 추진한다.¹¹⁹⁾

2) 중국

세계 최대의 암모니아 생산국이자 소비국인 중국은 2022년부터 저탄소 암모니아 생산으로의 전환을 추진해 왔으며 2024년 기준으로 계획 중이거나 건설 중인 그린 암모니아 프로젝트가 100여개이다.¹²⁰⁾ 특히 치펑 넷제로

116) 일본 국토교통성·JSTRA·일본재단(2020), p. 34.

117) 한국해운신문(2025.7.17.)(검색일: 2025.8.20.)

118) 강미주(2025.7.14.)(검색일: 2025.8.20.)

119) 홍영표(2025.9.11.)(검색일: 2025.10.1.)

산업단지(Chifeng Net Zero Industrial Park)에 조성된 그린 수소-암모니아 플랜트는 세계 최초로 상업용 그린 암모니아를 생산했으며 2028년까지 연간 150만 톤의 그린 암모니아를 생산할 계획이다.¹²¹⁾ 이 프로젝트는 뷰로 베리타스(Bureau Veritas)로부터 ISCC(International Sustainability & Carbon Certification) Plus를 세계 최초로 획득하여 재생 가능한 암모니아로서 친환경성과 지속가능성을 입증받았다.¹²²⁾¹²³⁾

동 프로젝트를 추진하고 있는 엔비전 에너지(Envision Energy)는 2025년 7월, 자사에서 생산된 그린 암모니아 연료를 활용하여 세계 최초로 병커링 작업을 실시하여 성공적으로 완료했다.¹²⁴⁾ 이번 병커링 작업은 중국 다롄에 위치한 코스코해운중공업 터미널에서 진행했으며, 차이나쉬핑 시노펙 서플라이어스에서 5,500마력급 예인선에 그린 암모니아 연료를 공급하였다. 해당 예인선은 엔비전 에너지에서 자체 개발한 암모니아 이중연료 엔진과 전용 연료 공급시스템 등의 기술이 적용되었다.¹²⁵⁾

2024년 4월에는 라오닝성 교통국, 해사안전국, 다롄 세관, 중국선급협회, 라오닝항 그룹 등 11개 기관이 참여하여 동북아시아 친환경 선박 연료 공급망 연합을 창립하였다.¹²⁶⁾ 이 연합은 동북아시아에 녹색 해운 발전의 촉진, 협력 강화, 녹색 해운 산업의 생태계 구축을 추진한다.¹²⁷⁾

120) Niu Yuhan(2025.10.8.)(검색일: 2025.10.13.)

121) 연합뉴스(2025.7.11.)(검색일: 2025.9.29.)

122) ISCC는 지속가능성 및 저탄소 제품에 대한 국제 인증 제도를 말한다. 제품목록(material list)의 제품 종류에 기반해 전방산업부터 후방산업까지 전체 공급망 내 제품의 지속가능성을 평가한다.

123) 연합뉴스(2025.7.11.)(검색일: 2025.9.29.)

124) 투데이에너지(2025.7.26.)(검색일:2025.8.20.)

125) 투데이에너지(2025.7.26.)(검색일:2025.8.20.)

126) CCS(2024.5.16.)(검색일: 2025.10.13.)

127) CCS(2024.5.16.)(검색일: 2025.10.13.)

3) 싱가포르

싱가포르는 2022년에 ‘해사 산업 탈탄소화 청사진’을 발표하였으며, ‘미래 해운 연료의 병커링 표준 및 인프라’를 중점 추진 분야 중 하나로 선정했다.¹²⁸⁾

싱가포르 해사청(MPA), 머스크(Maersk), Fleet Management, Keppel Offshore & Marine, Sumitomo, Yara International, K-Line 등 주요 해운 및 화학기업들은 2030년까지 싱가포르에 그린 암모니아의 병커링 인프라를 구축할 계획이다.¹²⁹⁾ 또한 MPA와 에너지시장감독청(EMA)은 주룽섬에 발전소와 병커링용 저탄소 암모니아 공급체계 구축을 추진하는 중이다. 이에 따라 연간 10만 톤 이상의 선박용 암모니아를 공급할 계획이다.¹³⁰⁾ 2024년 3월에는 호주의 철광석 생산업체인 포테스큐(Fortescue)가 MPA의 지원을 받아 싱가포르항에서 ‘Fortescue Green Pioneer’호에 암모니아 이중연료의 병커링을 시범 운영하였다.¹³¹⁾

MPA와 싱가포르 기업청(EnterpriseSG)은 2025년까지 암모니아 병커링에 대한 싱가포르의 표준을 개발할 예정이며, MPA는 2023년에 암모니아 병커링의 안전 및 운영 지침을 마련했다. 또한 MPA는 2026년까지 미래 선박 연료에 대한 교육 시설을 구축할 계획이다. 이를 위해 주요 선박 엔진 제조업체, 무역관련 협회, 고등 교육기관 등을 포함한 22개 기관과 파트너십을 맺었으며, 대체연료 교육과정에 암모니아 취급을 포함시켰다.¹³²⁾

128) MPA(2022), p. 5.

129) 한국에너지기술연구원(2021), p. 7.

130) 한국해사협력센터(2024b), p.43.

131) 양인범(2025.1.6.)(검색일: 2025.9.27.)

132) MPA(2024.4.15.)(검색일: 2025.9.27.)

4) 호주

호주는 암모니아를 탄소중립의 실현과 청정에너지 수출 확대의 핵심 전략 자원으로 간주하고, 이를 국가 산업 정책의 중심축으로서 이와 관련된 정책 및 대규모 프로젝트를 추진하고 있다. 특히 풍부한 재생에너지를 활용하여 수소·암모니아를 기반으로 한 에너지 시스템을 구축하기 위해 적극적으로 나서고 있으며 이를 통해 아시아·태평양 지역의 청정에너지 공급 허브로 도약하고자 한다.¹³³⁾

호주는 2019년 수립한 「국가 수소 전략(National Hydrogen Strategy)」을 2024년에 개정하면서 암모니아를 단순한 수소 운반체를 넘어 직접 연료로서 발전(發電) 및 해운 분야에 적용이 가능한 다기능 청정연료로 규정하였다.¹³⁴⁾ 특히 수소 및 암모니아 연료를 사용하여 철강, 비료, 발전, 해운 등 주요 산업의 탈탄소화를 장려하고, 동북아시아 국가들과의 청정에너지 외교에서 암모니아를 핵심 품목으로 육성하겠다는 전략이 포함되어 있다.

이에 따라 호주 정부는 2024년에 「Future Made in Australia」 산업 전략을 수립하고 향후 10년간 그린 수소·암모니아 산업에 220억의 호주달러(약 20조 원)를 투자하겠다고 발표하였다.¹³⁵⁾ 2027~2028년부터 그린 수소 1kg당 최대 2호주달러까지 보조하여 생산단가에 대한 경쟁력을 확보하고, 20억 호주달러 규모의 정부 보조금을 통해 초기의 상업화를 지원할 계획이다. 이를 통해 조기에 수익성을 확보하도록 유도하고 대규모 프로젝트의 금융 리스크를 분산시킬 계획이다.¹³⁶⁾¹³⁷⁾

현재 호주는 암모니아 생산의 상당 부분을 천연가스 개질을 기반으로 운

133) Australian Government(2024), p. 2.

134) 전계서, p. 6.

135) Australian Treasury(2024), pp. 15~17.

136) 전계서, p. 16

137) Australian Government(2023), pp. 3~4.

영하고 있으며, 이는 연간 약 400만 톤의 CO₂를 배출하고 있다.¹³⁸⁾ 이에 따라 호주 정부는 천연가스를 기반으로 한 그레이 암모니아에서 그린 암모니아로의 구조 전환을 가속화하고 있으며, 이를 위해 대규모의 재생에너지 인프라와 연계된 수전해 설비 확충을 병행하고 있다.

호주 전역에서는 세계 최대 규모의 그린 암모니아 프로젝트들이 구체화되고 있다. 서호주 Pilbara 지역에서 진행 중인 「Australian Renewable Energy Hub(AREH)」 프로젝트는 총 26GW 규모의 재생에너지(태양광·풍력)를 활용하여 연간 900만 톤의 그린 암모니아를 생산할 수 있을 것으로 예상된다.¹³⁹⁾ 이 프로젝트는 InterContinental Energy, CWP Global, Macquarie Capital and Macquarie's Green Investment Group 등이 참여하고 있다.

이 외에도 Fortescue Future Industries(FFI)는 퀸즐랜드 및 타스마니아에서 각각 연간 수백만 톤 규모의 그린 암모니아 생산을 목표로 프로젝트를 추진 중이며,¹⁴⁰⁾ Origin Energy와 BP는 남호주에서 수전해 수소 및 그린 암모니아 통합 프로젝트를 진행하고 있다. 이러한 프로젝트들은 대부분 일본, 한국, 유럽 국가들과의 공급 계약 또는 양해각서(MOU)를 통해 수출 기반을 강화하고 있으며, 이를 통해 호주는 2030년대 중반까지 연간 1,000만 톤 이상의 암모니아 수출국으로 도약할 계획이다.¹⁴¹⁾

또한 호주 정부는 2023년에 발표한 「National Hydrogen Infrastructure Assessment Framework」를 통해 암모니아의 생산, 저장, 항만 수출, 내륙 운송 등의 기반시설에 대한 준비를 국가계획 차원에서 추진한다. 특히 연료용 암모니아의 사용을 위한 안전기준, 저장탱크 및 선적 인프라의 설계 기준, 수

138) CSIRO and ARENA(2022), pp. 4~5.

139) George Heynes(2025.7.25.)(검색일: 2025.9.29.)

140) David Carroll(2022.11.15)(검색일: 2025.5.20.)

141) Australian Hydrogen Council(2023), p. 12.

출형 인증제도 등을 마련하고 있으며 국제해사기구(IMO) 및 ISO와의 표준 정합성 확보도 주요 과제로 추진하고 있다.¹⁴²⁾

5) 네덜란드

네덜란드는 선박 연료로서 암모니아가 잠재력이 있다고 판단하여 네덜란드 과학연구기구(Netherlands Organisation for Scientific Research; NWO)의 'AmmoniaDrive 프로젝트'를 지원하고 있다. 또한 '해운 마스터 플랜'에서 2030년까지 50척의 무배출 탄소 선박 운용을 목표로 하고 있다.¹⁴³⁾ 세부적으로는 국영해운공사(Rijksrederij) 10척, 해군 10척, 민간 선박 30척으로 구성된다. 이를 위해 국방부, 인프라·수자원 관리부, 경제부 등이 공동으로 3억 6,500만 유로의 예산을 지원할 예정이다.¹⁴⁴⁾

2025년에 4월 12일 로테르담항에서는 선박 간의 암모니아 병커링에 대한 시범 사업을 완료하였다. 병커링 작업은 약 2시간 30분 동안 진행되었으며 800m³의 액화 암모니아가 공급되었다.¹⁴⁵⁾ Trammo, OCI, James Fisher Fendercare, Victro 등이 참여했으며 안전을 위해 환경보호청, 레인몬트 안전지역, 합동 소방서도 참여하였다.¹⁴⁶⁾ 이번 시범 사업을 통해 이중 호스의 연결, 자동 누출의 감지, 적절한 화재 진압 시스템, 숙련된 인력 등 추가적인 안전 기반이 마련된다면 암모니아 연료의 병커링이 안전하게 수행될 수 있음을 입증하였다.¹⁴⁷⁾ 로테르담항은 암모니아 연료 공급을 위해 프로젝트 단위의 안전 절차를 마련한 상태이다.¹⁴⁸⁾

142) Australian Government(2023), pp. 9~11.

143) UN 홈페이지(검색일: 2025.9.30.)

144) UN 홈페이지(검색일: 2025.9.30.)

145) Port of Rotterdam(2025.4.14.)(검색일: 2025.9.30.)

146) Port of Rotterdam(2025.4.14.)(검색일: 2025.9.30.)

147) Port of Rotterdam(2025.4.14.)(검색일: 2025.9.30.)

148) Port of Rotterdam(2025.4.14.)(검색일: 2025.9.30.)

로테르담항, OCI글로벌, 벙커링 전문기업인 빅트롤(Victrol)은 2025년 10월 17일 청정 암모니아 벙커링 공급망을 구축하기 위해 협력을 맺었다.¹⁴⁹⁾ 이에 따라 OCI 자회사 OCI Ammonia Distribution은 주요 글로벌 허브에서 블루 및 그린 암모니아를 수입하여 로테르담항의 암모니아 수입터미널인 OCI터미널 유로포트(OTE)에 저장하거나 해상 연료로 유통시킬 예정이다. 또한 OTE 터미널 용량을 3만 톤에서 9만 톤으로 확장할 계획이다.¹⁵⁰⁾

주요국의 암모니아 선박 연료와 관련된 정책 및 사례를 요약하면 <표 2-16>과 같다. 이를 통해 그린 암모니아의 생산 및 선박 기술에 대한 연구 개발 및 실증사업에 대한 지원, 암모니아의 저장 및 항만시설 등의 인프라 구축, 암모니아 벙커링 안전 지침 마련, 벙커링 시범 사업 운영, 암모니아 연료 취급과 관련한 교육 및 훈련 제도의 마련, 민관 협력 등이 이뤄지고 있음을 알 수 있다.

〈표 2-16〉 암모니아 선박 연료 관련 주요국 정책 및 사례

국가	주요 정책
일본	• (기술) 그린 암모니아의 생산 기술 개발·실증 사업 지원, 암모니아 추진 선박의 기술 개발·실증 • (보조금) 생산 업체를 대상으로 보조금 지원을 검토함 • (인프라) 암모니아 저장탱크의 대형화, 항만시설의 정비, 벙커링선 개발 • (공급망) 연료 공급망 구축 • (안전) 안전 작업반을 구성하여 기술적·제도적·운영적 대응방안을 검토함, 저탄소·무탄소 선박 연료의 안전 지침을 마련함 • (인력) 선원 훈련 및 역량과 관련한 제도 개발 • (인센티브) 무탄소 배출 선박에 대한 인센티브를 마련함
중국	• (생산) 100여개의 그린 암모니아 생산 프로젝트 진행 • (인증) 뷰로베리타스에서 ICSS Plus 국제 인증 취득 • (벙커링) 다롄에서 그린 암모니아 벙커링 시범 사업 • (민관 협력) 동북아시아 친환경 선박 연료 공급망 연합 창립

149) Supply Chain(2025.10.22.)(검색일: 2025.10.23.)

150) Supply Chain(2025.10.22.)(검색일: 2025.10.23.)

국가	주요 정책
싱가포르	• (인프라) 싱가포르항에 그린 암모니아 벙커링 인프라 구축, 주룽섬에 발전소와 벙커링용 저탄소 암모니아 공급체계 구축 • (벙커링) 벙커링 표준 개발 및 안전·운영 지침 마련, 싱가포르항에서 암모니아 이중연료 벙커링 시범 사업 실시 • (교육) 선박 연료에 대한 교육시설 구축, 대체연료 교육과정에 암모니아를 포함함
호주	• (생산) 그린 수소·암모니아 산업에 220억의 호주달러(약 20조 원) 투자, 세계 최대 규모의 그린 암모니아 프로젝트 추진 • (인프라) 암모니아의 생산, 저장, 항만 수출, 내륙 운송 등의 기반시설 정비
네덜란드	• (기술) AmmoniaDive 프로젝트 지원 • (벙커링) 로테르담항에서 암모니아 벙커링 시범 사업 • (협력) 로테르담항, OCI글로벌, 빅트롤에서 청정 암모니아 벙커링 공급망 파트너십 체결

자료: 저자 정리

제3절 소결

IMO의 Net-Zero Framework, 전과정(LCA) 평가, EU의 FuelEU Maritime, EU ETS 등의 규제는 기존의 에너지 효율 중심의 규제가 전과정 상의 온실가스 감축과 탄소 가격의 부과라는 새로운 규제로 변화되었음을 보여준다.

〈표 2-17〉 국제 해운분야 환경 규제

구분	산정 원칙	시행
Net-Zero Framework	Well to Wake	2027년
전과정(LCA) 평가	Well to Wake	2027년 개정안 채택
FuelEU Maritime	Well to Wake	2025년
EU ETS	Tank to Wake	2024년

자료: 저자 정리

위와 같은 국제 해운의 환경 규제에 대한 변화는 선박 연료의 전환을 야기하고 있다. 선박의 온실가스 배출량을 생산에서부터 선박 연소까지 전과정(Well to Wake)을 고려하는 경우 그린 암모니아 연료는 탄소배출을 현저하게 줄일 수 있다. 이에 따라 각국은 그린 암모니아를 선박 연료로서 활용하기 위한 움직임을 보이고 있다. 현재는 초기단계로서 아직 그린 암모니아 연료에 대한 수요는 미미하고 벙커링 등은 시범운항에 그치고 있다. 그러나 그린 암모니아에 대한 프로젝트 발표 등 공급 계획이 확대되고 있으며 관련된 기술 또한 개발 단계에 있다. 각국에서는 그린 암모니아를 에너지 전환의 핵심 자원으로 판단하여 연료의 공급 체계 구축을 추진하고, 안전제도 및 교육 등의 정책을 추진하고 있다. 또한 중국, 싱가포르, 일본, 한국, 네덜란드 등의 주요 항만에서는 암모니아 벙커링 실증 사업 등이 경쟁적으로 추진되고 있다.

이러한 가운데 우리나라 정부는 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획’, ‘친환경 선박 연료 공급망 구축방안’ 등을 통해 해운 분야의 탈탄소화 정책을 추진하고 있다. 또한 암모니아도 미래 선박 연료 중 하나로서 이에 대한 공급망 구축 및 기술 개발 등을 포함하였다. 그러나 현 시점에서 그린 암모니아 연료를 중심으로 한 종합적인 정책은 없는 상황이다. 그린 암모니아를 미래 선박 연료로서 전략적으로 확보하기 위해서는 공급부터 선박에서의 활용까지 아우를 수 있는 종합적인 대책이 필요하다. 이를 위해 그린 암모니아 선박 연료의 전과정 차원에서 국내의 도입 여건을 검토하고 대응 방안을 마련할 필요가 있다.

03

국내 그린 암모니아 선박 연료 도입 여건

앞서 제2장을 통해 전 세계적으로 그린 암모니아 선박 연료 기반 조성이 진행 중이며, 국내에서도 안정적인 체계를 구축하기 위해 선제적인 준비가 필요하다는 것을 알 수 있다. 이를 위해 본 장에서는 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 환경을 공급 측면과 활용 측면에서 파악하고자 한다.

제1절에서는 그린 암모니아 선박 연료의 공급 여건을 파악하기 위해 관련된 정책 및 법·제도 현황, 생산 및 병커링 기술 현황, 인프라 기반, 산업 부문의 동향을 조사하였다. 그리고 제2절에서는 암모니아 선박 연료의 활용 여건을 파악하기 위해 암모니아 선박과 관련된 정책 및 법·제도, 암모니아 선박 기술 현황, 선사의 동향을 살펴보았다. 또한 문헌 자료와 전문가 자문을 통해 조사된 제1절과 제2절의 내용을 보완하기 위해 제3절에서는 국내 전문가들을 대상으로 국내의 도입 여건에 대한 인식도를 설문조사하였다. 이를 통해 선박 연료의 활용과 전망, 그린 암모니아 선박 연료의 도입을 위한 제도적·기술적 준비 정도를 정량화하고 정책적인 수요를 도출하고자 했다.

제1절 그린 암모니아 선박 연료 공급 여건

1. 공급 관련 정책 및 법·제도

1) 공급 관련 공공 부문 계획

우리나라는 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획’, ‘친환경 선박 연료 공급망 구축방안’, ‘수소기술 미래전략’, ‘수소 안전관리 로드맵 2.0’, ‘제1차 수소경제이행 기본계획’ 등에서 그린 수소, 암모니아에 관한 계획을 수립하여 추진하는 중이다. 또한 부산시와 울산시에서는 선박용 암모니아 연료의 병커링과 관련된 규제자유특구를 운영하고 있다.

본 절에서는 이러한 공공 부문의 계획 가운데 그린 암모니아의 공급과 관련된 내용을 발췌하여 설명하였다. 그린 암모니아는 생산 시 그린 수소를 사용하기 때문에 본 절에서는 그린 수소와 관련된 정책도 같이 다뤘다. 해당 정책 중 일부는 암모니아 선박의 활용 차원에서의 계획도 같이 포함하고 있다. 활용 부문에 대한 내용은 ‘제2절 암모니아 선박 연료 활용 여건’에서 다시 설명하기로 한다.

(1) 제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획(‘21~’30)

가. 개요

‘친환경 선박 개발·보급 기본계획’은 「친환경 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률」 제3조에 따라 해양수산부와 산업통상자원부가 5년마다 공동으로 수립하는 기본계획이다.¹⁵¹⁾

151) 관계부처합동(2020), p. 2.

제1차 기본계획은 2020년에 수립되었다. 동 계획의 비전은 ‘Greenship-K 기반을 구축하여 2050년에 탄소중립 산업 생태계를 구현하는 것’이며 주요 목표는 2030년까지 미래 친환경 선박 관련 세계의 선도적인 기술 확보, 선박배출 온실가스 감축, 친환경 신시장 창출이다.¹⁵²⁾ 이를 위해 ① 미래 친환경 선박 관련 세계의 선도적인 기술 확보, ② 신기술을 확산하기 위한 시험기반 구축, ③ 한국형 실증 프로젝트(그린쉽-K) 추진, ④ 연료 공급을 위한 인프라 확충, ⑤ 친환경 선박의 보급 촉진, ⑥ 친환경 선박시장을 주도할 수 있는 생태계 조성 등 6대 중점 추진과제를 마련하였다.¹⁵³⁾

나. 주요 내용

제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획에서는 중점추진 과제 중 하나인 ‘무탄소 연료 공급 인프라 구축’이 암모니아 선박 연료의 공급과 연관되어 있다. 해당 전략의 세부 내용에는 ‘수소·암모니아 연료 공급 인프라 구축 전략 수립’이 중장기 계획으로 포함되어 있으며, 암모니아 연료의 공급을 위해 기술 개발 등과 연계한 시험용 연료 공급 인프라 구축과 암모니아 선박(혼합연료) 도입에 대비한 연료 공급 전략을 제시하고 있다. 이에 따라 혼합연료(LNG와 암모니아)의 개발(‘21~’25), 병커링 기술 개발 및 표준화(‘27~’31)를 추진할 계획이다. 한편 동 계획에서는 암모니아는 기존의 육상 LPG 인프라 활용이 가능하고, 선박을 통한 운송저장 실적 등이 있기 때문에 빠른 시간 내 실용화가 가능할 것으로 예상하고 있다.¹⁵⁴⁾

또한 제1차 기본계획에는 혼합연료의 추진 등 저탄소 선박 기술 개발의 일환으로 암모니아, 수소, 메탄올, 바이오 연료 등의 안전성 평가체계에 대한 개발(‘22~’25) 및 병커링 기술 개발(‘24~’27)을 포함하고 있다.¹⁵⁵⁾

152) 전계서, p. 12.

153) 전계서, p. 12.

154) 전계서, p. 38.

155) 전계서, p. 18.

〈표 3-1〉 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획

구분	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31
혼합연료 품질·안전성평가체계 개발										
혼합연료 벙커링 기술 개발										
암모니아 벙커링 기술 개발 및 표준화										
혼합연료(LNG와 암모니아) 개발										

자료: 관계부처합동(2020), p.18~19, 38, 54, 저자 재정리

(2) 친환경 선박 연료 공급망 구축방안

가. 개요

‘친환경 선박 연료 공급망 구축방안’은 2023년 11월 15일에 발표됐으며, ‘동북아 친환경 선박 연료 공급 거점 항만 도약’을 비전으로 한다.¹⁵⁶⁾ 이 방안의 목표는 친환경 선박 연료의 공급 확대, 친환경 컨테이너 선박의 입항 확대, 벙커링용 항만의 저장 능력 확보 등이다. 추진 전략은 해운항만형 친환경 연료 산업생태계 선순환체계 구축 및 가격경쟁력 확보이며, 세부적인 추진과제로는 ① 친환경 선박 연료 시장 창출, ② 친환경 선박 연료 공급망 구축, ③ 민간투자 유도, ④ 산업기반 강화를 위한 제도개선 등이 있다.¹⁵⁷⁾

나. 주요 내용

‘친환경 선박 연료 공급망 구축방안’은 LNG, 청정메탄올, 그린 암모니아, 그린 수소, 바이오선박유 등을 대상으로 한다. 이 방안은 친환경 선박 연료 전체에 대한 공통적인 추진과제와 그린 암모니아 연료에 대한 개별 추진과제가 있다.

우선 암모니아를 포함한 친환경 선박 연료의 공급을 위한 공통 과제로 ‘공공 주도의 선제적인 수요 창출’이 있다. 국적 외항선과 관공선을 친환경

156) 관계부처합동(2023), p. 3.

157) 전계서, p. 3.

선박으로 전환하고 녹색해운항로를 개발하는 등 친환경 선박의 투입을 확대하여 선제적인 수요 창출을 계획하고 있다. 또한 글로벌 항만과의 협력을 통한 공급망·시장의 확대, 친환경 연료의 병커링 선박을 포함한 선박 건조에 대한 지원 및 인프라 펀드 신설 등이 있다. 그리고 친환경 선박 연료 공급업도 해양진흥공사의 지원을 받을 수 있도록 지원에 대한 근거를 마련하고,¹⁵⁸⁾ 병커링 선박과 실증 항만사업장에 대해서는 5년간 한시적으로 항비를 50%로 감면하는 등의 제도개선을 추진한다.¹⁵⁹⁾

그린 암모니아 선박 연료의 공급과 관련된 과제로는 ‘그린 암모니아·수소 공급망 구축’이 있다. 추진 전략은 기존의 항만 내 저장 인프라를 활용하여 연료의 공급을 추진하고, 항만의 개발 단계에서 암모니아와 수소의 저장·활용 시설을 구축하는 것이다. 또한 초기 수요에 대한 병커링은 파이프 대 선박(Pipe to Ship; PTS) 또는 내항화물선 겸업으로 추진하며, 선제적으로 병커링 전용선박을 신조 및 개조할 계획이다. 이와 함께 항만 인프라를 조성하기 위해 2030년까지 울산항에 21만 톤의 암모니아 저장탱크, 여수·광양항에 청정 암모니아 인수기지를 구축할 계획이다.¹⁶⁰⁾

〈표 3-2〉 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축방안’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획

구분	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30
친환경 선박 연료 인프라 펀드 출범								
친환경 선박 연료 병커링 맞춤형 규제 개선								
친환경 연료 병커링 선박으로 자원대상 확대								
울산 암모니아 저장탱크 구축								
여수 청정 암모니아 인수기지 구축								

자료: 관계부처합동(2023), p. 8-10, 14, 저자 재정리

158) 전계서, p. 10.

159) 전계서, p. 12.

160) 전계서, p. 8.

(3) 제1차 수소경제이행 기본계획

가. 개요

‘수소경제 이행 기본계획’은 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제5조에 따라 산업통상자원부에서 수립하는 기본계획이다.¹⁶¹⁾

제1차 기본계획은 2021년에 수립되었다. 동 계획의 비전은 ‘수소경제 전주기 생태계 구축을 통한 청정수소경제 선도’이며, 목표는 ① 청정수소 공급체계로의 전환, ② 효율적인 저장 및 운송 수단 확보, ③ 수소 활용처의 다변화, ④ 수소산업 육성을 위한 저변 강화이다. 이를 위해 ① 국내·외 청정수소 생산 주도, ② 빈틈없는 인프라 구축, ③ 모든 일상에서의 수소 활용, ④ 생태계 기반 강화 등 4대 중점 추진과제를 마련하였다.¹⁶²⁾

나. 주요 내용

‘제1차 수소경제 기본계획’에는 그린 수소의 공급 목표와 암모니아의 해외 도입 및 인프라 구축에 대한 내용을 포함하고 있다.

먼저 동 계획에서 그린 수소 공급 목표는 2030년에 25만 톤, 2050년에 3백만 톤이다. 그리고 그린 수소의 생산 단가를 2030년까지 3,500원/kg, 2050년까지 2,500원/kg 수준으로 만들기 위해 수전해 보급 및 생산 기반 구축을 위한 기술 개발을 추진할 계획이다.¹⁶³⁾ 따라서 현재 500KW급 수전해 기술 수준을 2025년에 MW급, 2030년까지 10MW급 수준으로 제고하여 그린 수소 생산의 대용량화를 추진한다.¹⁶⁴⁾

또한 국내 자본 기술을 활용한 해외 재생에너지 개발의 일환으로 ‘H₂

161) 관계부처합동(2021), p. 1.

162) 전계서, p. 11.

163) 전계서, pp. 13.

164) 전계서, pp. 12-13.

STAR 프로젝트'를 통해 청정수소의 해외 생산·운송 프로젝트 확대 및 암모니아 혼소의 상용화 시점과 연계한 해외사업 발굴을 추진할 계획이다.¹⁶⁵⁾

〈표 3-3〉 H₂ STAR 프로젝트(안)

국내 거점	후보 국가	도입 대상	수요처	도입 규모('30)
당진/태안	호주	그린·블루 암모니아	석탄발전, 승용·상용차	암모니아 300만 톤
영흥/인천	칠레, 사우디, 호주 등	그린 암모니아, 그린·블루수소	석탄발전, LNG발전	암모니아 87만 톤
삼척	호주, 러시아, 사우디, 오만 등	그린·블루 암모니아	석탄발전	암모니아 440만 톤
동해	UAE	블루 암모니아	석탄발전, LNG발전, 수소충전소, 연료전지	암모니아 100만 톤

주: STAR는 Supply Transportation Application Relationship의 약자
자료: 관계부처합동(2021), p. 20.

한편 해외의 청정수소를 도입하기 위한 인프라를 구축할 예정이다. 이에 따라 정부 주도로 암모니아 운송선 건조('25~)와 석탄 수입터미널 개·보수를 통한 인수기지의 전환 또는 중앙집중형 신규 인수기지 구축을 검토('27)할 예정이다. 또한 2030년까지 암모니아 비축기지의 구축도 검토할 예정이다.¹⁶⁶⁾

165) 전계서, p. 20.

166) 전계서, p. 21.

〈표 3-4〉 ‘제1차 수소경제이행 기본계획’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획

구분		'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'32	'50
수전해 기술	MW급 스택 실증											
	10MW급 스택 실증											
	GW급 시스템 상용화											
(도입 인프라) 석탄, 암모니아 혼소 발전을 목적으로 석탄 수입 터미널 개·보수 전환 또는 중앙집중형 신규 인수기지 구축 검토												
암모니아 인프라 구축	인프라 구축 방향 설계											
	예타 기획											
	인프라 구축											
25만 톤급 대규모 그린수소 생산 기반 구축												
그린 수소 300만 톤의 공급 목표(~'50)												
그린 수소 생산 단가 목표	3,500원/kg											
	2,500원/kg											
암모니아 비축기지 검토												
그린·블루 암모니아 927만 톤의 해외 도입 (H ₂ STAR 프로젝트)												

자료: 관계부처합동(2021), p.13, 20, 21, 56, 62 저자 재정리

(4) 청정수소 생태계 조성방안

가. 개요

‘청정수소 생태계 조성방안’은 ‘제1차 수소경제 이행 기본계획’에서 제시된 청정수소 공급망 구축과 관련한 내용을 구체화한 계획으로 2022년 발표되었다. ‘수소 생태계 고도화를 통한 청정수소 선도국가로의 도약’이 비전이며, 주

요 추진전략은 ① 대규모 수소 수요의 창출, ② 수소 유통 인프라 구축, ③ 국내·외 청정수소 공급망 구축, ④ 수소시장의 제도적인 기반 마련 등이다.¹⁶⁷⁾

나. 주요 내용

암모니아와 관련된 주요 내용 중에는 ‘수송 유통 인프라 구축’의 일환으로 ‘수소·암모니아의 발전용 인프라 구축’이 있다. 세부 내용은 석탄발전기가 밀집된 서해, 동해, 남해 3개 지역을 거점화하여 2027년까지 110만 톤, 2030년까지 400만 톤 규모의 암모니아 인수·저장설비를 구축하는 것이다.¹⁶⁸⁾ 또한 수급 비상에 대비하여 3개의 거점에 암모니아 15일 분의 비축기지를 건설하고 거점별로 6만 톤씩, 총 18만 톤의 암모니아를 비축할 것을 계획하였다.¹⁶⁹⁾

그리고 ‘국내·외 청정수소 공급망 구축’의 일환으로 해외 청정수소 생산 본격화가 있으며 이를 위해 해외 현지에 청정수소 생산시설 구축(’23~’26) 및 6만 톤급 암모니아 운반선 건조(’23~’26)를 추진할 계획이다.¹⁷⁰⁾

또한 ‘수소시장의 제도적인 기반 마련’을 위해 청정수소 인증·운영체계를 마련한다. 청정수소의 기준 및 인센티브 제도를 마련하고, 효율적인 인증제를 운영하기 위해 인증기관 지정 방안을 마련했다.¹⁷¹⁾

〈표 3-5〉 ‘청정수소 생태계 조성방안’의 암모니아 연료 공급 관련 추진 계획

구분		’23	’24	’25	’26	’27	’28	’29	’30
암모니아 인수·저장설비의 구축	110만 톤								
	400만 톤								
해외 현지에 청정수소 생산시설의 구축									
6만 톤급 암모니아 운반선의 건조									

자료: 관계부처합동(2022a), p. 1, 10, 12, 15 저자 재정리

167) 관계부처합동(2022a), p. 1.

168) 전계서, p. 10.

169) 전계서, p. 10.

170) 전계서, p. 12.

171) 전계서, p. 15.

(5) 수소 안전관리 로드맵 2.0

가. 개요

‘수소 안전관리 로드맵 2.0’은 2023년 산업통상자원부의 에너지안전과에서 발표하였다. 이 로드맵의 비전은 ‘국민은 안전하게, 기업은 자유롭게 수소를 사용하는 수소산업 선도국가’이며 목표는 ① (청정수소) 생산유통활용 등 전주기 설비 상용화 및 안전관리, ② (규제혁신) 신산업 특성을 고려한 안전관리 제도개선, ③ (안전관리) 수소시설의 안전관리 등을 통한 수소 사고 제로 도전 등이다.¹⁷²⁾ 이를 위해 ① 청정수소 생태계를 조성하기 위한 선제적인 안전기준 개발, ② 세계 제일의 수소산업 육성을 위한 규제혁신, ③ 안전 및 산업의 균형을 위한 안전관리 등 3대 전략이 수립되었다.¹⁷³⁾

나. 주요 내용

‘수소 안전관리 로드맵 2.0’의 ‘전략 1. 청정수소 생태계를 조성하기 위한 선제적인 안전기준 개발’에는 수소와 관련된 유통분야의 추진과제로 ‘암모니아 운송·저장 설비에 대한 안전기준 마련’을 포함하고 있다.¹⁷⁴⁾

세부적인 추진 내용으로 발전용 대용량 암모니아 배관 안전기준 마련(‘27), 암모니아 선박 충전 안전기준 마련(‘25), 암모니아 표준용기(ISO 탱크 컨테이너) 안전기준 개발(‘27), 암모니아 대용량 저장 탱크 이격거리의 합리화(‘24), 암모니아 배관 안전기준의 합리화(‘23) 등이 있다.¹⁷⁵⁾

172) 산업통상자원부 에너지안전과(2023), p. 4.

173) 전계서, p. 4.

174) 전계서, p. 16.

175) 전계서, p. 16-18.

〈표 3-6〉 암모니아 운송·저장 설비 안전기준 마련(수소 안전관리 로드맵 2.0)

구분	개선 내용	관련 법
발전용 대용량 암모니아 배관 안전기준 마련('27)	• 연구개발을 통해 암모니아 특성을 고려한 대용량, 장거리 암모니아 배관용 안전장치 및 안전기준 개발	• 「고압가스안전관리법」 시행규칙 별표 4 및 가스 기술기준 개정
암모니아 선박 충전 안전 기준 마련('25)	• 실증을 통한 암모니아 벙커링에 대한 안전성 검증 및 안전기준 마련 • 실증: 규제자유특구(부산, 경남)	• 「고압가스안전관리법」 시행규칙 별표 4 및 특례 고시 개정
암모니아 표준용기(ISO 탱크 컨테이너) 안전기준 개발('27)	• 암모니아 표준용기를 반도체 외 선박 충전용으로 활용하기 위해 용량 확대 및 새로운 재질로 제작하여 실증을 통해 안전성 검증 및 안전기준 마련 • 실증: 규제자유특구(부산)	• 「고압가스안전관리법」 시행규칙 별표 4 및 특례 고시 개정
암모니아 대용량 저장 탱크 이격거리 합리화('24)	• 도시가스 저장탱크와 동일하게 추가 안전장치를 설치하여 위해요소의 전이 차단 예방이 가능한 경우 저장탱크 사이 이격거리 축소 허용	• 「고압가스안전관리법」 시행규칙 별표 4 및 가스 기술기준(PF111) 개정
암모니아 배관 안전기준합리화('23)	• 연구개발을 통해 전산유체역학의 해석 및 이중 보호관 등의 추가 안전조치 시 이격거리 완화 설치 허용	• 「고압가스안전관리법」 시행규칙 별표 4 및 가스 기술기준 개정

자료: 산업통상자원부 에너지안전과(2023), pp. 16~18.

(6) 부산 암모니아 친환경 에너지 규제자유특구 및 제1차 탄소중립 녹색성장 기본계획('24~'33)

가. 개요

부산시는 「탄소중립 기본법」 제11조 및 「부산광역시 기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본조례」 제7조에 근거하여 5년마다 부산시 탄소중립 녹색성장 기본계획을 수립하고 있다. 또한 '암모니아 친환경 에너지 규제자유특구('22~'25)'를 운영 중이다.

‘제1차 부산 탄소중립녹색성장 기본계획('24~'33)’은 2024년도에 수립되었으며 비전은 ‘2050년까지 탄소중립을 목표로 하여 기후위기 없는 글로벌 허브도시 부산 실현’이다. 4대 전략으로 ① 전략적이고 과감한 저감으

로 주도적인 탄소중립, ② 에너지 및 자원순환 중점 미래산업에 의한 탄소 중립 녹색성장, ③ 부산시민과 함께하는 실천형 탄소중립, ④ 세계중심의 해양+그린 특별시 도약을 통한 지역특화형 탄소중립이 있다.¹⁷⁶⁾

‘부산 암모니아 친환경 에너지 규제자유특구’는 2022년 1월 1일부터 2025년 12월 31일까지 4년간 지정되어 있으며 사업비는 총 337.1억 원 (국비 198.6억 원, 지방비 85.1억 원, 민자 53.4억 원)이다.¹⁷⁷⁾ 암모니아 기반 연료전지, 액화 암모니아 표준 용기, 암모니아 연료의 병커링과 관련된 사업이 진행되고 있다.¹⁷⁸⁾

나. 주요 내용

‘제1차 부산 탄소중립녹색성장 기본계획’은 글로벌 수소경제의 그린 도시로 전환하기 위한 실행 전략 중 하나로 해양-내륙을 연계한 수소 클러스터 구축을 수립했으며 세부적인 추진과제로 ‘암모니아 항만 실증’ 사업을 포함하고 있다. 이 사업은 2023~2030년까지 총 8년간 진행되며 총 사업비는 650억 원(국비 310억 원, 시비 210억 원, 민자 30억 원)이다.¹⁷⁹⁾ 주요 내용은 ‘암모니아 규제자유특구’ 사업과 연계하여 암모니아 수소 공급망을 단계적으로 구축하는 것이다.¹⁸⁰⁾

또한 이 기본계획에서는 ‘암모니아 연료전지 개발’ 사업도 추진하고 있다. 이 사업은 2024년부터 2028년까지 총 5년간 추진되며 총 사업비는 325억 원(국비 195.5억 원, 시비 65억 원, 민자 64.5억 원)이다. 본 사업도 암모니아의 규제자유특구 사업과 연계되며 50KW의 암모니아 연료전지 시스템 및 기자재의 개발 및 실증을 목표로 한다. 뿐만 아니라 관련 기업의

176) 부산시(2024), p. 74.

177) 중소벤처기업부 규제자유특구(검색일: 2025. 7. 23.)

178) 중소벤처기업부 규제자유특구(검색일: 2025. 7. 23.)

179) 부산시(2024), p. 92.

180) 전계서, p. 92.

사업화를 지원하여 실용화를 촉진하고자 한다.¹⁸¹⁾

‘부산 암모니아 친환경 에너지 규제자유특구’의 세부 사업은 총 세 가지로 첫째, 암모니아 기반 연료전지 하이브리드 친환경 선박 실증, 둘째, 이동형 액화 암모니아 표준용기(ISO 탱크 컨테이너) 실증, 셋째, 이동형 기반 연료 병커링 구축 및 안전성 실증 사업이 있다. 해당 세부사업과 관련한 실증 내용, 관련 규제 등은 <표 3-7>과 같다.

<표 3-7> 부산 암모니아 친환경에너지 규제자유특구

사업	실증 내용	관련 규제
암모니아 기반 연료전지 하이브리드 친환경 선박 실증	• 암모니아 기반 연료전지 하이브리드 추진시스템을 해상환경에 적합하게 설계하고, 선박 건조 및 운항에 대한 실증을 통해 안전성 검증 및 관련 기준 마련	• 「선박안전법」 제7, 18, 26조 • 「수소법」 제36, 44조 및 「수소법 시행규칙」 제22, 26, 39조
이동형 액화암모니아 표준용기(ISO 탱크 컨테이너) 실증	• 무탄소 친환경에너지인 액화암모니아 이송·저장수단으로 활용할 표준용기(ISO탱크컨테이너) 및 IT 무선 통합관제 시스템을 제작하여 암모니아의 이송과 저장성을 높이고 안전성을 검증	• 「고압가스 및 액화석유가스 ISO 탱크 컨테이너의 제조, 충전·운반, 저장·사용에 관한 기준」 제3조 및 제7조
이동형 기반 선박용 암모니아 연료 병커링 구축 및 안전성 실증	• 암모니아를 육상(ISO탱크컨테이너)에서 실증선박으로 충전하는 이동식 병커링 시스템 구축 및 누출예방 기술 실증으로 안전성 검증 및 관련 기준 마련	• 「고압가스안전관리법 시행규칙」 제8조 및 별표4

자료: 중소벤처기업부 규제자유특구(검색일: 2025.7.23.)

(7) 울산 암모니아 병커링 규제자유특구

가. 개요

‘울산 암모니아 병커링 규제자유특구’는 2025년 6월 1일부터 2027년 12월 31일까지 2년 7개월간 지정되어 있으며 사업비는 총 160억 원이다. 이 규제자유특구에는 이동식 탱크로리를 활용해 암모니아 선박 연료의 공

181) 전계서, p. 94.

급을 허용하는 특례를 부여한다. 이에 따라 울산테크노파크, 한국조선해양
기자재연구원, 울산대학교, HD현대중공업 등 총 23개의 기관이 참여하여
암모니아 연료 병커링 기술 개발 및 실증사업을 추진한다.¹⁸²⁾

나. 주요 내용

현행 규제에는 이동식 탱크로리에 저장된 암모니아를 이동식 펌프를 이
용해 선박으로 충전하기 위한 기준이 없다. 따라서 ‘울산 암모니아 병커링
규제자유특구’에는 특례를 적용하여 이동식 탱크로리를 이용한 병커링을
허용하였다. 이를 통해 울산 조선소에서 건조 중인 암모니아 선박에 연료
공급을 할 수 있게 되었다.¹⁸³⁾

현재는 암모니아 병커링용 선박이 없기 때문에 선박을 이용한 병커링 시
도는 어렵다. 따라서 본 특례에서는 우선 트럭을 이용하여 병커링을 시도
한 이후에 선박을 이용한 병커링까지 검토할 예정이다.¹⁸⁴⁾

울산시는 암모니아 병커링 규제자유특구를 통해 중대형 암모니아 추진선
의 연료 공급 체계에 대한 기준을 마련하고, 핵심 기자재를 국산화하여 암
모니아에 기반한 친환경 조선산업의 생태계를 구축하고자 한다. 또한 본격
적으로 암모니아 연료가 활용된다면 울산항을 병커링항만으로 육성할 계획
이다.

그런 암모니아 연료의 공급과 관련하여 공공 부문의 계획을 종합하여 나
타내면 <표 3-8>과 같다.

182) 쉬핑뉴스넷(2025.5.21.)(검색일 2025.7.23.)

183) 울산지방중소벤처기업청 보도자료(2025.5.22.), p. 1.

184) 자문회의(2025.7.4, 영상회의).

〈표 3-8〉 그린 암모니아 공급 관련 국내 공공 부문 계획(종합)

구분	~'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'40	'50
1	혼합연료 품질·안전성평 가체계 개발('22~'25)									
	혼합연료 병커링 기술 개발 ('24~'27)									
			암모니아 병커링 기술 개발 및 표준화('27~'31)							
2	제1차 친환경 선박 개발·보급기본계획 ('20.12.23)	혼합연료(LNG와 암모니 아) 개발('21~'25)								
						울산 암모니아 저장탱크 건축(21만 톤, ~'30) 여수 청정 암모니아 인수 기지(~'30)				
		친환경 선박 연료 인프라 펀드 출범('25. 1)								
	친환경 선박 연료 공급망 구축 방안 ('23.11.15)	친환경 선박 연료 병커링 맞춤형 규제 개선								
		친환경 연료 병커링 선박 건조시 건조자금 일부 보 조할 수 있도록 지원대상 확대(~'24)								

구분	~'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'40	'50
3 제1차 수소경제 이행 기본계획 (21.11.26)	(수전해 기술) MW급 스 택 실증				25만 톤급 대규모 그린 수소 생산 기반 구축(~'30) 생산단가 목표: 3,500원 /kg('30)					그린 수소 300만 톤 공급 목표(~'50) 생산단가 목표: 2,500원 /kg('50)
4 청정수소 생태계 조성 방안	110만 톤 암모니아 인수 저장설비 구축(~'27) 해외 현지 청정수소 생산시설 구축('23~'26) 6만 톤급 암모니아 운반선 건 조('23~'26)				400만 톤 암모니아 인수 저장설비 구축('30)					

	구분	~'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'40	'50
5	수소안전관리 로드맵 (23.5.9)	발전용 대용량 암모니아 배관 안전 기준 마련 (R&D) 발대용량 암모니아 운송 배관 위험성 평가·안전지단 기술/안전기준 개발('24~'27)									
			암모니아 선박출전 안전 기준마련								
			암모니아 표준용기(ISO 탱크 컨테이너) 안전기준 개발								
			암모니아 대용량 저장 탱크 이격거리 합리화								
			암모니아 배관 안전기준 합리화								
6	울산 규제자유특구	암모니아 버커링 규제자유특구 ('25.6~'27.12, 2년 7개월)									
7	제1차 부산 탄소중립녹색성장기본 계획('24~'33) ('24.4)	암모니아 항만 침출 사업('23~'30)									

구분	~'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31	'32	'40	'50
부산 규제자유특구	암모니아 친환경 에너지 규제자유특구('22~'25) -이동형기반 선박용 암 모니아 연료병커링 구 축 및 안전성 실증 -이동형 액화암모니아 표준용기(ISO탱크 컨 테이너) 실증									

주: 스택은 자국과 분리만으로 이뤄진 셀을 지칭한 것임
자료: 관계부처합동(2020), 관계부처합동(2023), 관계부처합동(2021), 관계부처합동(2022a), 산업통상자원부 에너지안전과(2023), 부산시(2024)를 종합하여 저
자 재정리

2) 관련 법·제도

국내에서 암모니아는 화학물질 및 위험물로 관리되고 있으며 선박 연료로서의 법적 지위는 불명확하다. 따라서 현행 법·제도에서는 「화학물질관리법」, 「위험물안전관리법」, 「산업안전보건법」 등을 통해 관리되고 있다. 「화학물질관리법」에서는 암모니아를 유독물질 및 사고대비물질로 지정하여 관리하며, 고압가스로 분류되는 암모니아는 「고압가스안전관리법」의 적용을 받는다. 또한 「위험물안전관리법」에서는 위험물로 취급되어 관리를 받는다. 동법은 선박에 의한 위험물의 저장, 취급 및 운반은 제외되며, 이는 위험물 선박운송 및 저장규칙에 의해 관리된다. 「산업안전보건법」에서는 암모니아를 유해·위험물질로 규정하여 안전관리를 하고 있다.

이처럼 암모니아는 선박 연료로서의 법적 기준이 부재하며 항만 내 병커링 절차, 저장설비 기준 등에 대한 명확한 규정이 없다. 또한 암모니아는 「고압가스안전관리법」에 의거하여 고정된 저장시설을 통해서만 암모니아를 이송 및 공급하는 것이 가능하다. 그러나 동법은 병커링에 대해서는 규정하고 있지 않기 때문에 항만에서 선박에 병커링을 하는 것은 불법인 상황이다. 따라서 현재는 규제자유특구 지정 등 특례를 적용하여 병커링에 대한 실증 작업을 진행 중이다. 한편 친환경 선박 연료를 공급하기 위해서는 선박 연료 공급업에 등록해야 한다. 그러나 암모니아는 선박 연료로서의 법적 지위가 불명확하기 때문에 선박 연료 공급업의 자격을 받는데 어려움이 발생한다.

우리나라는 그린 암모니아에 대한 청정성을 인증할 만한 제도 역시 부족하다. 우리나라는 전주기 배출량 관점에서 특정 임계점의 통과 여부를 통해 청정 암모니아를 정의한다. 이에 따라 수소 생산까지만 배출량을 계산하고 있으며 암모니아 생산 과정에 대한 배출량은 계산하지 않고 있다.

2. 생산 및 벙커링 기술

1) 국내 그린 암모니아 생산 기술

우리나라 정부는 해외 선진 기술의 60% 수준인 국내 수전해 기술의 향상을 위해 주요 수전해 생산기술의 국산화 전략 등을 수립하여 추진하는 중이다.¹⁸⁵⁾ 국내의 많은 기업들은 알칼라인 전기분해의 핵심 부품인 스택 개발에 집중하고 있다.¹⁸⁶⁾ 한국에너지기술연구원은 개발한 스택기술을 (주) 테크윈, GS건설(주)에 이전하여 상용화를 위한 협력연구를 진행하고 있다. 또한 아크로랩스가 음이온 교환막 수전해 스택을 출시할 계획이며, 한화솔루션도 음이온 교환막 수전해 시스템 시제품의 제작 및 상용화를 위한 연구를 수행하는 중이다.¹⁸⁷⁾

암모니아 합성기술은 상용화된 고온·고압의 암모니아 생산 공정을 저온·저압으로 생산할 수 있는 기술 개발이 진행되는 중이다. 한국에너지기술연구원은 저압 암모니아 합성 촉매를 대량으로 생산할 수 있는 방법을 개발했다.

해당 연구팀은 이 기술을 통해 기존의 하버보쉬공정에 필요한 압력의 삼분의 일 수준으로 고순도의 암모니아 생산에 성공하였다.¹⁸⁸⁾ 또한 전기·화학적인 그린 암모니아 합성기술도 개발하는 중이다. 울산과학기술원(UNIST)에서는 쇠구슬을 이용한 암모니아를 합성 방법인 볼밀링법으로 저온·저압에서 82.5% 효율의 암모니아 생산기술을 개발했다.¹⁸⁹⁾

185) 관계부처합동(2022b), p. 8.

186) 스택은 전극과 분리막으로 이뤄진 셀을 적층한 것으로 전기를 사용하여 물을 수소와 산소로 분해하는 장치를 말한다.

187) 양인범(2023.08.08.)(검색일: 2025.7.6.)

188) 한국에너지기술연구원 보도자료(2024.2.0.), p. 1.

189) 한국에너지기술연구원 기술정책플랫폼(검색일:2025.7.6.)

2) 국내 암모니아 병커링 기술

울산에서는 ‘암모니아 병커링 규제자유특구’가 지정되면서 암모니아 연료의 공급기술 실증에 착수하였다. 이를 통해 이동형을 기반으로 한 선박용 암모니아 연료 병커링 시스템을 구축하고, 암모니아의 안전성 실증 및 안전상의 종합 평가를 실시할 계획이다.

한국선급은 2025년 2월에 암모니아 병커링 시뮬레이션 시스템을 구축했다. 구축된 암모니아 병커링 시뮬레이션 시스템은 맞춤형 시운전, 최적 운영, 위험도분석 등 전문적인 기술지원을 제공한다.¹⁹⁰⁾ 또한 한국선급은 암모니아 연료 추진 선박의 병커링 안전기준 및 안전관리 기술을 개발하였다.

한국가스기술공사는 마다가스카르의 암모니아 터미널과 3만 3천㎥급 저장탱크 설계기술을 검증받고 있다.¹⁹¹⁾ 그리고 인천, 여수, 울산 등에서 운영되고 있는 암모니아 터미널이 향후 수요를 충족할 수 없을 것으로 판단하여 국내·외 주요 항만의 암모니아 터미널 설계와 암모니아 추진선 병커링 기술을 확대하여 적용할 계획이다.¹⁹²⁾

삼성중공업에서는 거제조선소의 400평 부지에 암모니아 실증 설비를 구축했으며 암모니아 추진 선박에 적용하기 위한 연료 공급 시스템 등을 개발하고 고도화를 진행하는 중이다.

KSS해운은 2025년 4월에 네덜란드 로테르담에서 암모니아 선박 대 선박(Ship to Ship; STS) 병커링 실증에 성공했다. KSS해운은 유럽연합의 MAGPIE 프로젝트 중 하나로 진행된 암모니아 병커링 시범 사업에 참여하여 로테르담 항만청, 터미널 운영사 OCI, 트레이딩 기업 Trammo 등 다양

190) 슈핑투데이(2025.02.26.)(검색일: 2025.04.28.)

191) 에너지타임즈(2021.9.10.)(검색일: 2025.3.30.)

192) 에너지타임즈(2021.9.10.)(검색일: 2025.3.30.)

한 이해관계자와의 협업을 통해 이번 STS 병커링 실증을 수행했다.¹⁹³⁾¹⁹⁴⁾

3. 인프라 기반

그린 암모니아를 선박 연료로 사용하기 위해서는 암모니아 저장 시설 및 병커링 인프라가 필수적이다. 암모니아 선박 연료는 기존의 암모니아 저장 시설 및 터미널 등의 인프라를 활용할 수 있으며, 현재 암모니아 터미널과 저장 시설을 보유한 항만이 향후 선박 연료용 암모니아의 공급 기반이 될 가능성이 높다.¹⁹⁵⁾

암모니아를 전량 수입하고 있는 우리나라는 인천, 여수, 울산 지역에 총 18만 7천 톤 규모의 암모니아 저장시설이 있다. 이는 224만 톤의 암모니아 처리가 가능하다는 것을 의미한다.¹⁹⁶⁾

〈표 3-9〉 국내 암모니아 저장시설 규모

지역	내용	비고
울산 ¹⁾	9.3만 톤	저장탱크 8기
여수·광양 ²⁾	7.9만 톤	18,000톤 저장탱크 3기 25,000톤 저장탱크 1기
인천 ³⁾	1.5만 톤	-

자료: 1) 울산신문(2021.12.7.)(검색일: 2025.6.30.)

2) 남해화학(검색일: 2025.6.30.)

3) 부산조선해양기자재공업협동조합(2023), p. 38.

우리나라의 암모니아 저장·인수 시설은 더 확대될 것으로 보인다. 한국 석유공사는 「청정수소 생태계 조성방안」을 이행하기 위해 암모니아 유통

193) 해사경제신문(2025.4.21.)(검색일: 2025.4.28.)

194) MAGPIE 프로젝트는 총 2,500만 유로 규모의 EU 프로젝트(2021~2026)이며 친환경 스마트 항만을 통한 탈탄소화에 기여하는 것을 목적으로 한다.

195) Laval et al.(2020), p. 32.

196) 암모니아 처리가능용량은 저장탱크 용량에 10~12회전을 배수한 값으로 추산한다.

인프라 구축을 추진하는 중이며 서해, 동해, 남해권역에 2026년 연간 80만 톤, 2030년 연간 400만 톤, 2036년 연간 1,000만 톤의 인수기지를 구축할 계획이다.¹⁹⁷⁾ 해양수산부는 「친환경 선박 연료 공급의 구축 방안」의 일환으로 2030년까지 울산항에 21만 톤의 암모니아 저장탱크, 여수·광양항에 청정 암모니아 인수기지를 구축할 계획이다.¹⁹⁸⁾

〈표 3-10〉 국내 암모니아 인수기지 구축 계획

시기	지역	내용	비고	주무부처
2030	동해권	• 부두: 6만 톤급 1선석 • 저장탱크: 3만 톤급 8기	배관망 통해 인근 4개 발전소에 암모니아 공급	산업부 (한국석유공사 시행)
	서해권	• 부두: 6만 톤급 2선석 • 저장탱크: 3만 톤급 10기	인근 석탄화력발전소에 암모니아 공급	
	울산항	• 저장탱크 21만 톤	-	해수부
	여수·광양	• 여수 청정 암모니아 인수기지	-	
2035	동남권	• 부두 3선석 • 저장탱크 8기	인근 LNG 발전소와 산업단지에 수소 공급	산업부 (한국석유공사 시행)

자료: 1) 관계부처 합동(2023). p. 8.
2) 산업통상자원부 보도자료(2023.2.2.), p. 6.

울산항만공사에서는 「친환경 에너지 물류 선도항만 구축계획」을 수립했으며 그린 수소 물류허브를 구축하기 위해 2030년까지 암모니아의 저장탱크 및 크래킹 설비를 건설할 계획이다. 또한 친환경 선박 연료 병커링 거점항만을 목표로 2030년까지 LNG·암모니아 병커링 합작 법인을 운영하고, LNG·메탄올·암모니아 연료의 병커링을 상용화할 계획이다.¹⁹⁹⁾

197) 산업통상자원부 보도자료(2023.02.02.), p. 2.
198) 전게서, p. 8.
199) 울산항만공사(2025), p. 12.

4. 산업 부문 동향

우리나라는 암모니아의 소비 전량을 수입하고 있다. 2024년을 기준으로 전체 수입량은 119.3만 톤이며, 수출량은 4.3만 톤이다. 주요 수입처는 인도네시아, 사우디, 오만 등이다.²⁰⁰⁾ 국내 암모니아 소비량의 약 55%는 비료에 사용되며 나일론·플라스틱 등의 제조에 16%, 반도체 제조용 가스에 10%가 사용된다.²⁰¹⁾

〈표 3-11〉 국내 암모니아 수출입 실적

(단위: 톤)

구분	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년
수입	1,220,016	1,365,995	1,285,011	1,101,966	1,192,626
수출	21,909	23,676	38,651	19,849	43,071

주: 무수(無水)암모니아와 암모니아 수를 합산함
자료: 관세청 수출입무역통계(검색일: 2025.7.5.)

롯데정밀화학이 국내 암모니아 유통량의 70%를 점유하고 있으며 최근에는 그린 암모니아 공급망의 구축을 적극적으로 추진하는 중이다.²⁰²⁾ 2021년 5월에는 롯데글로벌로지스, HMM, 포스코, 한국조선해양, 한국선급 등과 친환경 선박·해운시장을 선도하기 위한 ‘그린 암모니아 해상운송 및 벙커링 컨소시엄 업무협약(MOU)’을 체결했으며 같은 해 9월에는 트랜스암모니아(Trammo)와 그린 암모니아를 공급하기 위한 업무협약을 체결하였다.²⁰³⁾²⁰⁴⁾

고려아연은 미국의 아모지와 암모니아 분해기술 전략 제휴를 맺었으며, 호주아크에너지, 한화임팩트, SK가스와 함께 ‘한국-호주 수소 컨소시엄’을

200) 김지희(2022), p. 2.

201) 전계서, p. 2.

202) 장원수(2024.5.21.)(검색일: 2025.9.5.)

203) 박상우(2023.4.24.)(검색일:2025.9.5.)

204) 롯데정밀화학(검색일:2025.9.5.)

출범하여 그린 암모니아 공급망 구축을 추진하고 있다.

삼성물산은 연간 100만 톤 규모의 그린 암모니아 생산프로젝트인 ‘살랄라 H2 그린 암모니아 프로젝트’에 참여하고 있다. 또한 한국전력공사, 서부발전과 함께 아랍에미리트의 그린 수소·암모니아 사업에 참여하여 그린 암모니아의 생산을 계획하고 있다.

공공 부문에서는 주로 한국전력공사, 한국서부발전, 한국남부발전 등 발전회사에서 그린 암모니아 생산 계획을 추진하고 있다. 이는 석탄과 암모니아 혼소 발전을 확대하고 있기 때문이다. 한편 한국석유공사에서도 저탄소 암모니아 사업을 추진하고 있다. 사업의 세부명은 ‘청정 수소화합물 유통 인프라 및 해외 공급망 기반 구축 시범 사업’이며, 국내 유통을 위해 연 100만 톤 규모의 거점별 터미널과 연 80만 톤 규모의 해외 청정 수소화합물(암모니아)의 생산 및 도입 기반 구축을 추진한다.²⁰⁵⁾

이와 같이 국내 여러 기업에서 그린 암모니아의 생산과 관련된 계획을 추진하는 중이며 해당 내용을 정리하면 <표 3-12>와 같다. 그러나 해당 계획 가운데는 재검토를 추진하고 있는 경우도 있어서 생산 계획에 대한 달성도는 불확실하다.²⁰⁶⁾

〈표 3-12〉 국내 기업의 그린 암모니아 생산 계획

기업명	시점	암모니아 생산 계획	비고
고려아연	’30년까지	100만 톤/년 이상	• ‘한국-호주 수소 컨소시엄’ 구성 및 호주에서 수입할 예정
롯데정밀화학	미정	미정	• Trammo와 그린 암모니아 공급 업무협약 체결(’21.9)
	’22년	2만 5천 톤	• 사우디아라비아 리야드에서 계약된 블루 암모니아(비용, 산업용) 물량 수입

205) 한국석유공사(검색일: 2025.9.5.)

206) 자문회의(2025.7.8., 대한민국 서울)

기업명	시점	암모니아 생산 계획	비고
롯데케미칼	미정	미정	• 말레이시아와 협조하여 생산할 예정
삼성물산 ²⁾	'30년부터	100만 톤/년	• 오만 '살랄라 H2 그린 암모니아 프로젝트' 사업권 확보 • 전세계 시장으로 수출돼 전력생산에 활용될 예정('23.12.12)
한전, 서부발전, 삼성물산 ⁴⁾	미정	(1단계) 3만 5천 톤/년 (2단계) 16만 5천 톤/년	• UAE 키자드 그린 수소·암모니아 사업 공동개발 협력 체결('22.5.31)
한국남부발전, 동서발전, 포스코홀딩스, 삼성엔지니어링	미정	120만 톤/년	• 오만수소개발공사 Hydrom과 그린 암모니아 생산의 독점 사업개발 및 부지 임대계약 서명 • 청정 무탄소 발전용 연료로 활용할 예정(남부발전)
한국석유공사 ³⁾	'28년~	80만 톤/년	• 해외 청정 수소화합물의 생산 및 도입 기반 구축 사업
에프로티움	'27년~	25만 톤/년	• 나미비아 청정에너지 생산기업인 하이픈(Hyphen)사와 그린 암모니아 공급을 위한 업무협약 체결('23)

자료: 1) 하나은행 하나금융경영연구소(2024), pp. 9~10.

2) 한국석유공사(검색일: 2025.7.5.)

3) 에너지신문(2022.06.22.)(검색일: 2025.7.5.)

한편 업계 관계자들은 국내에서 대규모 그린 암모니아 생산이 어렵다고 판단하여 해외 도입에 무게를 두고 있다. 국내에서는 재생에너지 확보에 한계가 있고, 호주나 사우디아라비아 등에서 그린 암모니아를 수입하는 비용이 더 저렴하기 때문이다. 또한 블루 암모니아는 현재 그린 암모니아보다 저렴하지만 천연가스를 기반으로 생산하기 때문에 지속적으로 사용하기엔 부담이 있다고 판단한다. 따라서 장기적으로는 그린 암모니아의 사용이 더 확대될 것으로 보고 있다.²⁰⁷⁾

207) 자문회의(2025.7.21., 대한민국 부산).

제2절 암모니아 선박 연료 활용 여건

1. 활용 관련 정책 및 법·제도

1) 활용 관련 공공 부문 계획

국내 암모니아 선박 연료 활용 계획은 ‘제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획’에 포함되어 있으며 ‘친환경 선박 전주기 혁신기술 개발 사업(’21~’31)’에서도 추진되고 있다. 또한 경남 지역은 ‘암모니아 혼소 연료시스템 선박 규제자유특구’로 지정되어 관련된 실증사업을 추진하고 있다. 다음은 각 계획별로 암모니아 추진 선박과 관련된 내용을 서술하였다.

(1) 제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획

‘제1차 친환경 선박 개발 및 보급 기본계획’은 친환경 선박 기술의 개발과 친환경 선박 전환을 주요 내용으로 한다. 앞서 2절에서 언급한 6개의 중점추진과제는 암모니아 선박에 대한 직·간접적인 지원 내용을 담고 있다.²⁰⁸⁾

우선 직접적인 정책으로는 수소·암모니아 등 무탄소 선박 기술 확보를 위한 ‘암모니아 연료 추진 선박의 기자재 기술 개발 및 실증’ 추진이 있다. 세부과제로 연안선박용 100KW급 암모니아 연료전지 공급시스템 개발(’26~’28)과 대형 내연기관용 20MW급 암모니아 추진기술 개발 및 평가(’23~’26)를 다루고 있다.²⁰⁹⁾

208) 주요 추진과제는 ① 미래 친환경 선박 관련 세계 의선도적인 기술 확보, ② 신기술을 확산하기 위한 시험 기반 구축, ③ 한국형 실증 프로젝트(그린쉽-K) 추진, ④ 연료 공급을 위한 인프라 확충, ⑤ 친환경 선박의 보급 촉진, ⑥ 친환경 선박시장을 주도할 수 있는 생태계 조성

209) 관계부처합동(2020), p. 16.

이와 함께 혼합연료 추진 등 저탄소 선박 기술 확보도 수립되었으며 세부과제는 연안선박용 LNG-암모니아 혼합연료 연소 선박 기술 개발 및 실증선 건조('21~'25), 혼합연료 스마트 엔진·공급장치 개발('20~'26), 혼합연료 안전성 평가 및 병커링 기술 개발('22~'27) 등이 있다.²¹⁰⁾

또한 신기술을 확산하기 위한 시험기반 구축을 위해 암모니아를 포함한 친환경 연료 및 기술에 대한 육상시험설비의 신축을 추진하고, 한국형 실증 프로젝트로 LNG-암모니아 혼합연료 추진 선박 및 LNG/암모니아 운반선을 건조할 계획이다.²¹¹⁾

제1차 친환경 선박 개발 및 보급 기본계획은 선박의 기술 개발과 함께 보급을 촉진하기 위한 정책도 포함하고 있다. 특히 민간 부문의 친환경 선박 전환을 확산시키기 위해 신조선 건조자금 지원 및 조달금리 인하, 보조금 및 금융지원 등의 인센티브 마련을 계획하였다.²¹²⁾

〈표 3-13〉 '제1차 친환경 선박 개발·보급 기본계획'의 암모니아 선박 관련 추진 계획

구분	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31
중소형 선박용 엔진의 저인화점 대체연료 분사시스템 개발											
LNG-암모니아 혼합연료 연소 선박 기술개발 및 실용화											
혼합연료 연소 스마트 엔진 개발 및 연료 품질평가체계 개발											
연안선박용 100KW급 암모니아 연료전지 추진시스템 개발											

210) 전계서, p. 18.

211) 전계서, p. 28.

212) 전계서, pp. 44-45.

구분	'21	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31
20MW급 내연기관용 암모니아 연료추진기술 개발 및 평가											
혼소 연료 추진 선박 통합모듈 배치 설계 실증 및 실증											
국내 기술 및 제품의 세계시장 선도를 위한 기반 마련											
선박용 암모니아 내연기관 추진 기술 개발 및 평가											

자료: 관계부처합동(2020), 저자 재정리

(2) 친환경 선박 전주기 혁신기술 개발 사업('21~'31)

가. 개요

‘친환경 선박 전주기 혁신기술 개발 사업’은 2021년부터 2031년까지 10년 동안 국비 1,873억 원을 포함하여 총 2,540억 원의 사업비로 추진된다.²¹³⁾ 동 사업은 국제해사기구의 온실가스 배출 규제에 대응하기 위해 중·대형의 친환경 선박 및 구성시스템들의 핵심기술을 개발 및 실증하여 초기에 상용화 기반을 확보하는 것이 목적이다. 개발 분야는 산업통상자원부에서 지원하고 해양수산부가 각각 개발과 실증 분야를 지원한다. 개발 분야는 한국조선해양기자재연구원이 주관하고 실증 분야는 선박해양플래트연구소가 주관한다. 동 사업은 통합사업단을 통해 운영된다.²¹⁴⁾

전략 분야는 ① 친환경 선박의 핵심기술 및 설계기술 개발, ② 친환경 선박의 시험 및 평가에 대한 실증기술 개발, ③ 친환경 연안선박의 개발과 실증 및 보급기반 확보, ④ 친환경 선박의 국제적인 대응 및 국내·외 표준화와 제도개선 등 4개이다.²¹⁵⁾

213) 친환경 선박 전주기 혁신기술개발사업 통합사업단(검색일: 2025.7.8.)

214) 친환경 선박 전주기 혁신기술개발사업 통합사업단(검색일: 2025.7.8.)

215) 친환경 선박 전주기 혁신기술개발사업 통합사업단(검색일: 2025.7.8.)

나. 주요 내용

‘친환경 선박 전주기 혁신기술 개발 사업’에서 전략 분야 1(친환경 선박 핵심기술 및 설계기술 개발)에는 암모니아 연료 추진선용 시스템 기술 개발과 친환경 중·대형 선박 설계기술 개발을 포함하고 있다. 암모니아 연료 추진선용 시스템 기술 개발은 연료 공급시스템, 암모니아 내연기관, 암모니아 연료전지시스템을 개발하는 것이며 친환경 중·대형 선박 설계기술 개발은 기본설계 및 대형선박 설계 및 도면승인을 내용으로 한다. 또한 전략 분야 2(친환경 선박 시험 평가 실증 기술 개발)에서는 암모니아 활용 기술 개발이 포함되어 있다.

〈표 3-14〉 ‘친환경 선박 전주기 혁신기술 개발 사업’의 암모니아 선박 관련 추진 계획

구분	'22	'23	'24	'25	'26	'27	'28	'29	'30	'31
암모니아 내연기관 개발 및 실증										
친환경 연료전지-ESS하이브리드 시스템 기술 개발										
선박용 암모니아 연료 공급시스템 기술 개발										
암모니아 등 친환경 중대형 선박 설계기술 개발										
암모니아 등 친환경대형선박 설계 후 도면 승인										

자료: 친환경 선박 전주기 혁신기술개발사업 통합사업단(검색일: 2025.7.8.)

(3) 경남 암모니아 혼소 연료추진시스템 선박 규제자유특구

가. 개요

‘암모니아 혼소 연료추진시스템 선박 규제자유특구’는 2022년 9월 1일부터 2026년 8월 31일까지 4년간 지정되었으며 무탄소 연료 활용 선박을 실증을 통한 온실가스 규제 대응 및 신시장 진입을 목적으로 한다. 총 사업

비는 315.67억 원으로 국비 162.78억 원, 지방비 108.73억 원, 민간투자 44.16억 원으로 구성되어 있다.²¹⁶⁾

나. 추진 내용

‘암모니아 혼소 연료추진시스템 선박 규제자유특구’는 암모니아 연료추진시스템 기자재 및 선박의 건조 및 운항 실증특례, 선박 연료용 암모니아의 육상 충전 실증특례, 암모니아 기반 친환경 선박 연료용 ISO 탱크컨테이너 사용에 대한 실증 특례 등 총 3개의 실증특례가 있다.²¹⁷⁾

〈표 3-15〉 경남 암모니아 혼소 연료추진시스템 선박 규제자유특구

사업	실증 내용	관련 규제
암모니아 연료추진시스템 기자재 및 선박의 건조 및 운항 특례	• 암모니아-디젤 혼소 선박에 관한 검사기준, 형식승인 기준, 선박시설 기준 개발	• 「선박안전법」 제7, 8, 18, 26조
선박 연료용 암모니아 육상 충전 특례	• 선박 연료용 암모니아를 육상에서 선박으로 충전하는 기준 개발	• 「고압가스안전관리법 시행규칙」 제8조 및 별표4
암모니아 기반 친환경 선박 연료용 ISO 탱크컨테이너 사용 특례	• 선박 연료용 암모니아 ISO 탱크컨테이너의 제조 및 검사 기준 개발	• 「고압가스 및 액화석유가스 ISO 탱크 컨테이너의 제조, 충전·운반, 저장·사용에 관한 기준」 제3조 및 제7조

자료: 경남테크노파크(2025), p. 7.

2) 관련 법·제도

(1) 환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(친환경 선박법)

우리나라는 해운분야의 탄소중립을 달성하기 위해 2020년에 「환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(이하 친환경 선박법)」을 제정하였으며 ‘친환경 선박 인증제도’를 운영하고 있다. 이 제도에서 암모니아는 「환경친화적 선박의 기준 및 인증에 관한 규칙」 제3조에 따라 친환경 에너지

216) 경남테크노파크(2025), p. 5.

217) 전게서, p. 7.

지로 인정받고 있다.

이 제도는 선박의 온실가스 감축 수준을 평가하여 1~5등급의 인증등급을 부여한다²¹⁸⁾. 인증 점수는 환경친화적 연료의 사용, 대기오염물질 저감률, 선박에너지효율설계지수 초과 감축률, 적용기술의 국산화율 등으로 계산한다.²¹⁹⁾ 친환경 인증을 받은 선박은 취득세 감면, 건조자금 지원 등의 혜택을 받을 수 있다.²²⁰⁾

(2) 암모니아 연료 선박 관련 규칙

국제 항해 선박은 국제적인 합의가 필요하며 국제해사기구와 선급의 기준이 중요하다.²²¹⁾ IMO는 2024년 12월에 열린 제109차 해사안전위원회(MSC)에서 ‘암모니아 연료 사용선박에 대한 임시 안전 지침(Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Ammonia as Fuel)’을 승인하였다. 이 지침은 IGC코드²²²⁾ 적용 선박 이외에 암모니아를 연료로 사용하는 선박에 대한 기준을 제공하고 있다.²²³⁾ 그러나 이 지침은 비강제적이기 때문에 선박에 적용하기 위해서는 IGF코드와 동등한 자격으로서 기국 주관청의 승인이 필요하다.

한국선급은 2025년 7월에 위의 지침을 반영하여 저인화점 연료 선박 규칙을 개정하고 암모니아 연료 사용 선박에 대한 내용을 신설하였다.²²⁴⁾ 이에 따라 암모니아를 연료로 사용하는 이중연료 선박과 단일연료 선박에 저인화점 연료 선박 부호를 부여할 수 있다. 이번 개정을 통해 암모니아 연료

218) 환경친화적 선박 및 기자재 인증제도 운영요령 별표3

219) 환경친화적 선박 및 기자재 인증제도 운영요령 별표2

220) 대한민국 정책브리핑(2024.5.16.)(검색일: 2025.7.8.)

221) 자문회의(2025.7.8., 대한민국 서울)

222) IGC코드는 액화가스 산적운반선의 구조 및 설비에 관한 사항을 규정하고 있는 국제 기준이다.

223) 암모니아 연료 추진 기계·설비, 설계 및 배치 등에 대한 안전기준을 제시한다.

224) 한국선급(2025b), p.1

선박에 대해 위험도, 폭발 범위의 제한, 선박설계 및 배치, 설비, 재료, 병커링 장치, 연료 공급 장치 등에 대한 기준이 제시되었다.²²⁵⁾

해당 기준들은 앞으로 암모니아 추진 선박의 운항이 확대되면서 지속적으로 개정될 필요가 있다. 한 조선업계 관계자는 암모니아 연료 선박에 대한 기준이 선급마다 다르게 적용되며 명확하지 않기 때문에 선박을 설계하는 데 한계가 있다는 의견을 내놓았다. 이 때문에 현재 건조 중인 암모니아 선박의 경우 기국, 선급, 선주, 조선소의 합의를 통해 설계가 진행되고 있다. 또한 암모니아 화물의 선상 누출로 인한 응급상황 발생 시의 처리에 관한 기준은 있으나 연료로서의 암모니아에 대한 기준은 아직 없는 실정이다.²²⁶⁾

2. 암모니아 추진 선박 기술

HD현대중공업은 MAN, WinGD와 협력하여 2행정 엔진을 개발하는 중이며 자체적으로 4행정 엔진을 독자개발하는 중이다.²²⁷⁾ 또한 암모니아 운반선에 암모니아 연료를 공급 시스템을 개발하기 위해 한국선급과 업무협약을 체결했다. 이에 따라 HD현대중공업은 암모니아 연료를 적용하기 위해 선박의 주요 시스템 배치를 설계하고, 한국선급은 해당 시스템에 대한 위험성 평가를 수행하여 AIP를 수여할 계획이다.²²⁸⁾ HD한국조선해양은 암모니아 배출량을 흡수할 수 있는 일체형 암모니아 스크러버 기술을 개발하였다. HD현대미포는 엑스마르와 중형 암모니아 추진 선박 4척을 공급하는 계약을 맺었으며, 2026년부터 순차적으로 인도할 예정이다.

225) 전계서, p. 2.

226) 자문회의(2025.7.8., 대한민국 서울)

227) 자문회의(2025.7.9., 영상회의)

228) 광용신(2024.9.18.)(검색일: 2025.3.30.)

삼성중공업과 한화오션은 암모니아 추진 선박의 실증·설계를 추진하고 있다. 삼성중공업은 영국 선급으로부터 암모니아 연료전지 추진선 설계에 대한 기본 인증을 획득했고, 미국 아모지와 협력해 연료전지 기술 개발에 나섰다.²²⁹⁾ 또한 2024년 6월에는 암모니아 실증설비를 구축했다. 실증설비에는 연료 공급 시스템, 재액화 시스템, 배출저감 시스템 등의 파일럿 설비 등이 갖춰지며 암모니아의 독성문제를 해결하기 위한 기술들도 시범적으로 적용될 계획이다. 한화오션은 암모니아 연료 추진 가스터빈 기술을 개발하는 중이며, 2027년에 실증 완료를 목표로 하고 있다.

3. 선사 동향

일부 글로벌 선사들은 암모니아 추진 선박 도입을 계획 중이다. 일본 MOL은 2025년 4월에 암모니아 추진 선박 9척을 중국 조선소에 발주했다.²³⁰⁾ 동 사는 벨기에 선사인 CMB테크와 협력하여 2026~2029년에 3척의 케이프사이즈 벌크선 및 6척의 케미컬 탱크선을 운항할 계획이다.²³¹⁾ 또한 NYK는 2026년 11월 암모니아 연료 추진 가스 운반선을 인도받을 예정이다.²³²⁾

HMM은 2023년 4월, 롯데정밀화학과의 ‘탄소중립을 위한 암모니아의 해상 운송 및 암모니아-메탄올 병커링 업무협약’을 체결했다.²³³⁾ 또한 팬오션은 LNG 및 암모니아 연료로 전환이 가능한 레디 선박 2척을 발주하였다.²³⁴⁾

229) 시사저널(2025.7.31.)(검색일: 2025.8.14.)

230) 코리아쉬핑가제트(2025.4.1.)(검색일: 2025.5.26.)

231) 코리아쉬핑가제트(2025.4.1.)(검색일: 2025.5.26.)

232) 임팩트온(2024.11.1.)(검색일: 2025.5.26.)

233) 한국경제(2023.4.25.)(검색일: 2025.5.26.)

234) 팬오션(2025.6.13.)(검색일: 2025.8.14.)

제3절 전문가 인식 조사

1. 조사 개요

본 설문조사의 목적은 국내의 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건을 파악하고, 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 안정성 제고와 확산 방안을 도출하는 것이다. 조사는 2025년 7월 23일부터 8월 11일까지 이메일을 통해 실시했으며, 총 27명의 전문가가 응답하였다. 조사 대상은 그린 암모니아의 생산, 병커링 및 암모니아 추진 선박과 관련된 업무를 수행하고 있는 해운·조선업체, 항만공사, 연구기관 종사자 등이다. 현재 암모니아 추진 선박이 상용화되고 있지 않은 바 표본 수를 확보하는 데 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해 각 기관별로 암모니아를 담당하고 있는 전문가들을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 예를 들어 연료업체의 경우 국내 대부분의 암모니아를 유통하고 있으며 암모니아 병커링 부문을 구상하고 있는 담당자, 조선소의 경우 암모니아 추진 선박의 개발 담당자, 연구기관의 경우 현재 그린 암모니아 생산기술을 개발하거나 또는 암모니아 선박 엔진 기술을 개발하고 있는 연구원 등을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 또한 연료 공급, 선사, 조선사, 항만공사 등 각 분야의 종사자를 대상으로 하여 분야가 편중되지 않도록 노력하였다.

설문조사의 내용은 그린 암모니아 선박 연료의 활용 및 전망, 국내 그린 암모니아 선박 연료의 안정성 제고와 확산에 대한 제도적인 준비 정도와 기술적인 준비 정도, 정책 수요 등으로 구성하였다.

〈표 3-16〉 설문조사 개요

구분	내용
목적	• 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건 파악 및 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘 안정성 제고 및 확산 방안 도출
조사 대상	• 그린 암모니아 생산, 벙커링 및 암모니아 추진 선박 관련 해운·조선업계, 항만 공사, 연구기관 종사자
조사 방법	• 이메일을 통한 설문조사
조사 기간	• 2025.7.23. ~ 8.11.
조사 내용	• 그린 암모니아 선박 연료의 활용 및 전망 - 선박 연료의 변화 전망 - 암모니아 추진 선박 도입 계획(선사만 해당) - 그린 암모니아 추진 선박 전환 및 그린 암모니아 선박 연료의 적절한 도입 시기 • 제도적 준비 정도 - 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 안정성 제고 및 확산을 위한 국내·외의 패널리티 및 규제 강도 현황 및 전망 - 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 안정성 제고 및 확산을 위한 국내·외의 인센티브 및 보조금 지원제도 수준 현황 및 전망 - 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘 법·제도적인 준비 정도 현황 및 전망 • 기술적인 준비 정도 - 그린 암모니아 연료 생산의 국내·외 기술적 준비 정도 현황 및 전망 - 그린 암모니아 연료 벙커링의 국내 기술적 준비 정도 현황 및 전망 - 암모니아 추진 선박의 국내·외 기술적 준비 정도 현황 및 전망 • 정책 수요 - 그린 암모니아 추진 선박 도입 시 애로사항 현황 및 전망 - 대체연료 및 그린 암모니아 활용을 촉진하기 위한 정책 - 그린 암모니아 추진 선박 활성화를 위한 정책 우선순위

자료: 저자 작성

응답자의 특성은 다음과 같다. 소속별로는 산업계가 70.4%로 가장 많고 다음으로는 연구기관(18.5%), 기타(11.1%) 순이다. 관련 분야는 조선 분야 29.6%, 연료 공급·저장 분야 25.9%, 해운 분야 22.2%, 벙커링 분야 7.4%, 기타 14.8%이다. 그린 암모니아 연료의 공급분야(연료 공급·저장 및 벙커링)와 활용(해운·조선)이 각각 33.3%, 51.8%로 고르게 분포하였다. 기타 분야(14.8%)는 항만공사, 연구기관 등이 포함되어 있다.

응답자의 근무 경력은 10년 이상 20년 미만이 44.4%로 가장 많은 비중을 차지했으며 그 뒤를 이어 5년 이상 10년 미만(25.9%), 20년 이상(22.2%), 5년 미만(7.4%)의 순이다.

〈표 3-17〉 설문조사 응답자 특성

구분	내용	사례 수	비중(%)
소속	산업계	19	70.4
	연구기관	5	18.5
	기타	3	11.1
직책	대리	3	11.1
	과장	6	22.2
	부장	7	25.9
	기타	11	40.7
관련 분야	연료 공급·저장	7	25.9
	병커링	2	7.4
	해운	6	22.2
	조선	8	29.6
	기타	4	14.8
근무 경력	5년 미만	2	7.4
	5~10년 미만	7	25.9
	10~20년 미만	12	44.4
	20년 이상	6	22.2

자료: 저자 작성

2. 조사 결과

1) 그린 암모니아 선박 연료 활용 및 전망

(1) 선박 연료 변화 전망

현재 선박 연료의 사용 순위에 대해 전문가들의 의견을 조사한 결과 1순

위 응답이 가장 많은 연료는 ‘디젤연료’(85.2%)로 나타났다. 또한 1~3순위에 가중치를 부여해 산출한 결과 역시 ‘디젤연료’(48.1%)가 가장 높았으며, 그 다음으로 ‘LNG’(34%)와 ‘바이오 연료’(12.3%)의 순으로 나타났다.

〈표 3-18〉 현재 선박 연료 사용(1순위, 2순위, 3순위)

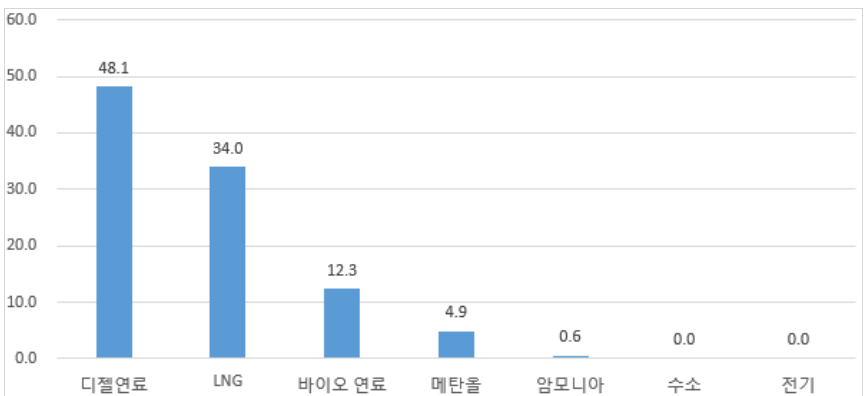
(n=27, %)

항목	1순위	2순위	3순위
디젤연료	85.2	14.8	3.7
LNG	14.8	70.4	18.5
바이오연료	0	14.8	44.4
메탄올	0	0	29.6
암모니아	0	0	3.7
수소	0	0	0
전기	0	0	0
전체	100	100	100

자료: 저자 작성

〈그림 3-1〉 현재 선박 연료 사용(1+2+3순위 종합)

(n=27, %)



주: 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
 자료: 저자 작성

2030년 선박 연료의 사용 비중 전망에서 1순위 응답이 가장 많은 연료 역시 ‘디젤연료’(48.1%)로 나타났으며 그 다음으로 ‘LNG’(40.7%), ‘암모니아’(7.4%) 순으로 나타났다. 1~3순위를 고려한 종합 순위는 ‘LNG’(35.1%)가 가장 높았으며 그 다음으로 ‘디젤연료’(26.5%), ‘바이오연료’(16.8%) 순으로 나타났다.

〈표 3-19〉 2030년 선박 연료 사용 전망(1순위, 2순위, 3순위)

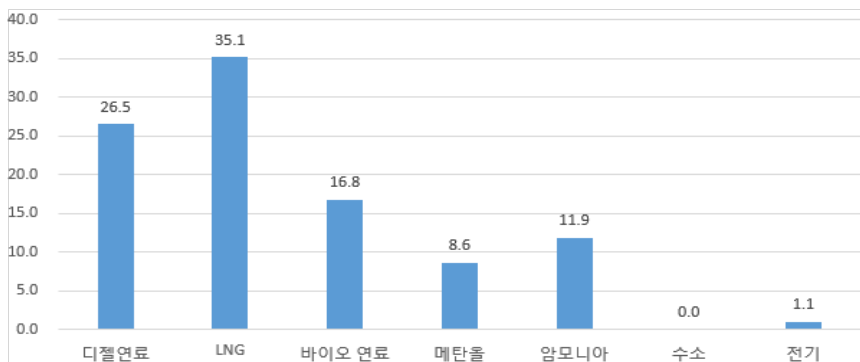
(n=27, %)

항목	1순위	2순위	3순위
디젤연료	48.1	11.1	14.8
LNG	40.7	44.4	14.8
바이오연료	3.7	25.9	25.9
메탄올	0.0	7.4	22.2
암모니아	7.4	11.1	18.5
수소	0.0	0.0	0.0
전기	0.0	0.0	3.7
전체	100	100	100

자료: 저자 작성

〈그림 3-2〉 2030년 선박 연료 사용 전망(1+2+3순위 종합)

(n=27, %)



주: 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
 자료: 저자 작성

2040년 선박 연료의 사용 비중 전망에서 1순위 응답이 가장 많은 연료는 ‘LNG’(37.0%)로 나타났으며 그 다음으로 ‘암모니아’(33.3%), ‘바이오 연료’(11.1%) 순으로 나타났다. 1~3순위를 고려한 종합 순위는 ‘암모니아’(31.5%)가 가장 높았으며 그 다음으로 ‘LNG’(29.6%), ‘바이오 연료’(15.4%) 순으로 나타났다.

〈표 3-20〉 2040년 선박 연료 사용 전망(1순위, 2순위, 3순위)

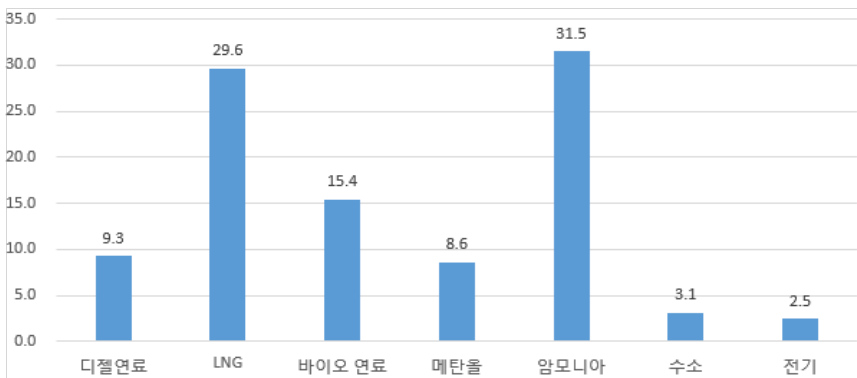
(n=27, %)

항목	1순위	2순위	3순위
디젤연료	7.4	14.8	3.7
LNG	37.0	18.5	29.6
바이오연료	11.1	22.2	14.8
메탄올	7.4	11.1	7.4
암모니아	33.3	33.3	22.2
수소	0	0	18.5
전기	3.7	0	3.7
전체	100	100	100

자료: 저자 작성

〈그림 3-3〉 2040년 선박 연료 사용 전망(1+2+3순위 종합)

(n=27, %)



주: 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
자료: 저자 작성

2050년 선박 연료의 사용 비중 전망에서 1순위 응답이 가장 많은 연료는 ‘암모니아’(66.7%)로 나타났으며 그 다음으로 ‘LNG’(14.8%), ‘전기’(7.4%) 순으로 나타났다. 1~3순위를 고려한 종합 순위는 ‘암모니아’(40.7%)가 가장 높았으며 그 다음으로 ‘LNG’(15.4%), ‘수소’(12.3%) 순으로 나타났다.

〈표 3-21〉 2050년 선박 연료 사용 전망(1순위, 2순위, 3순위)

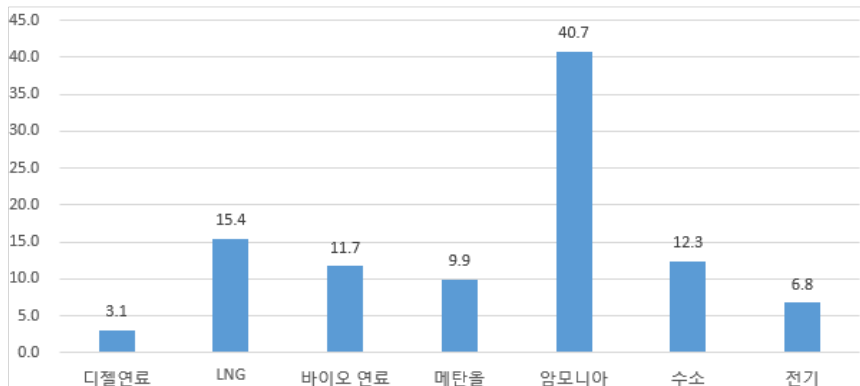
(n=27, %)

항목	1순위	2순위	3순위
디젤연료	3.7	0	7.4
LNG	14.8	18.5	11.1
바이오연료	3.7	14.8	29.6
메탄올	3.7	18.5	11.1
암모니아	66.7	18.5	7.4
수소	0	25.9	22.2
전기	7.4	3.7	11.1
전체	100	100	100

자료: 저자 작성

〈그림 3-4〉 2050년 선박 연료 사용 전망(1+2+3순위 종합)

(n=27, %)

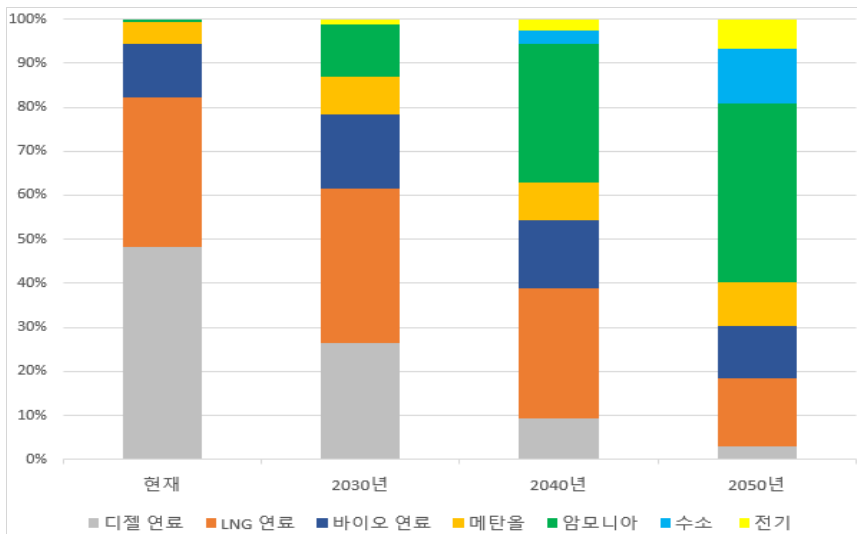


주: 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
자료: 저자 작성

전문가들의 응답을 바탕으로 선박 연료의 사용 변화를 살펴보면, 2030년까지는 디젤연료와 LNG 등 화석연료의 사용 비중이 여전히 높을 것으로 전망된다. 그러나 2030년부터 암모니아 연료의 사용 비중이 발생하고, 2040년부터는 1순위의 선박 연료가 될 것으로 전망된다.

〈그림 3-5〉 선박 연료 사용 비중 변화 전망(1+2+3순위 종합)

(n=27, %)



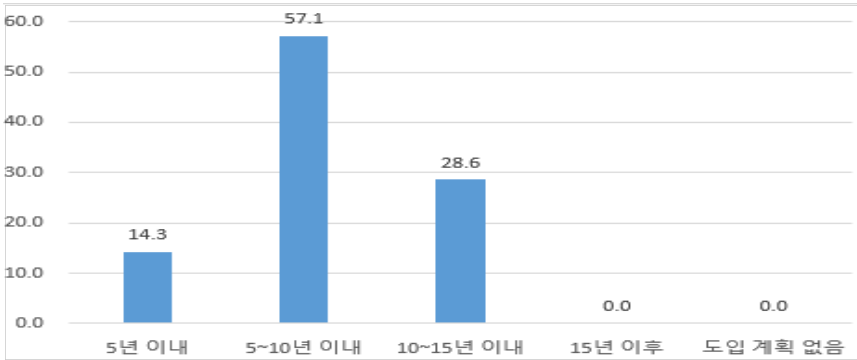
주: 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
자료: 저자 작성

(2) 국내 선사들의 암모니아 추진 선박 도입 계획

응답자 가운데 해운업계 전문가들을 대상으로 암모니아 추진 선박 도입 계획을 조사한 결과 ‘5~10년 이내’(57.1%)가 가장 많은 비중을 차지하였으며 그 다음으로 ‘10~15년 이내’(28.6%), ‘5년 이내’(14.3%) 순으로 나타났다. 국내 선사의 경우 암모니아 추진 선박 도입을 계획하지 않은 선사는 없는 것으로 나타났다.

〈그림 3-6〉 국내 선사의 암모니아 추진 선박 도입 계획

(n=7, %)



자료: 저자 작성

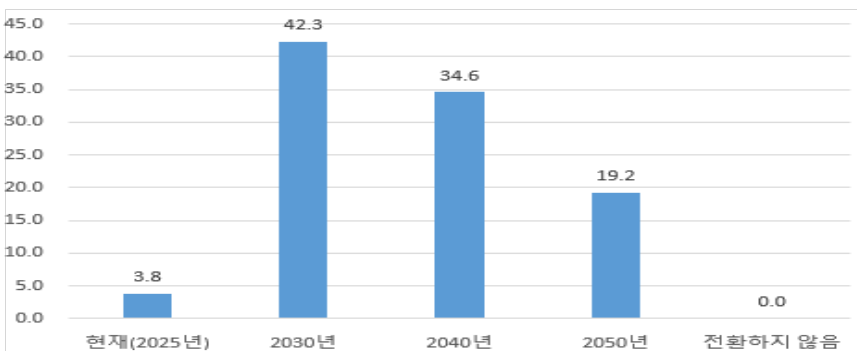
(3) 그린 암모니아 추진 선박 전환 및 그린 암모니아 연료 활용 시기 전망

가. 그린 암모니아 추진 선박 전환 시기 전망

기존 선박의 그린 암모니아 추진 선박으로의 전환 시기 전망에 대한 응답 결과는 ‘2030년’(42.3%)이 가장 높게 나타났다. 그 다음으로는 ‘2040년’(34.6%), ‘2050년’(19.2%), ‘현재(3.8%)’ 순으로 나타났다.

〈그림 3-7〉 그린 암모니아 추진 선박 전환 시기 전망

(n=26, %)



자료: 저자 작성

각 시기를 전망 한 이유는 <표 3-22>과 같다. ‘2040년’이라고 응답한 전문가들은 암모니아 엔진 기술의 개발 및 상용화, 공급망 확대 시기를 근거로 들었다. ‘2050년’이라고 응답한 이유는 충분한 수소의 생산 및 그린 암모니아의 생산량 확보, 그린 암모니아의 가격 경쟁력 확보 등을 이유로 들었다. 또한 ‘현재’라고 응답한 이유는 일부 암모니아 추진 선박이 건조되는 중이기 때문이며, ‘2030년’이라고 응답한 이유는 IMO 선박온실가스 규제, 청정 암모니아의 생산 확대에 따른 가격 경쟁력 확보, 병커링 인프라 구축 시기 등을 근거로 판단하였다.

이를 통해 기술 개발 및 상용화, 암모니아의 공급 및 병커링 인프라, 암모니아의 가격 경쟁력, 이와 관련된 규제 등이 전환 시기를 판단하는 중요한 기준이라는 것을 알 수 있다.

〈표 3-22〉 그린 암모니아 추진 선박 전환 시기 판단 이유(서술형)

구분	내용	
현재	기술 완료	일부 암모니아 추진 선박의 발주 및 건조 중, 다만 트랙레코드의 부족 문제로 연료 전환을 주저할 가능성 존재
2030년	기술 개발 및 상용화	- 글로벌 기업은 이미 도입을 시작 - 암모니아 이중연료 선박의 상용화 - 다수의 운항 실적에 따른 안정화
	국제 규제	- IMO 중기조치의 본격 시행 - 국제 규정 요구 조건
	암모니아 연료 가격 경쟁력	- 청정암모니아의 생산 확대에 따른 가격 경쟁력 상승 - 연료 비용의 안정화
	병커링 인프라 구축	- 병커 인프라의 구축 시기 고려 - 병커링 트랙레코드의 확보
	기업 및 시장 상황	- 선대 교체 시기에 대한 고려 - 글로벌 기업은 이미 도입을 시작
2040년	기술 개발 및 상용화	- 암모니아 엔진의 상용화 완료 - 연료탱크 기술 확보 - 관련 기술 R&D 실증

구분	내용	
	암모니아 연료 가격 경쟁력	• 암모니아 연료의 경제성 확보
	암모니아 공급 안정성	• 암모니아 공급망 확대 시기 • 호주 등 연료 공급 및 상용화 • 그린 암모니아 연료 공급 인프라 구축
	안전 확보	• 암모니아 연료 활용에 대한 안전 확보
	제도 정비	• 제도 정비 시간이 필요
	기업 및 시장 상황	• 선박 교체주기를 고려
2050년	암모니아 공급 안정성	• 충분한 수소생산 및 이를 활용한 그린 암모니아 생산을 고려
	가격 경쟁력	• 불확실한 경제성, 다수의 연료 대체제로 인해 선택을 최대한 늦출 것으로 판단됨 • 가격 경쟁력 확보

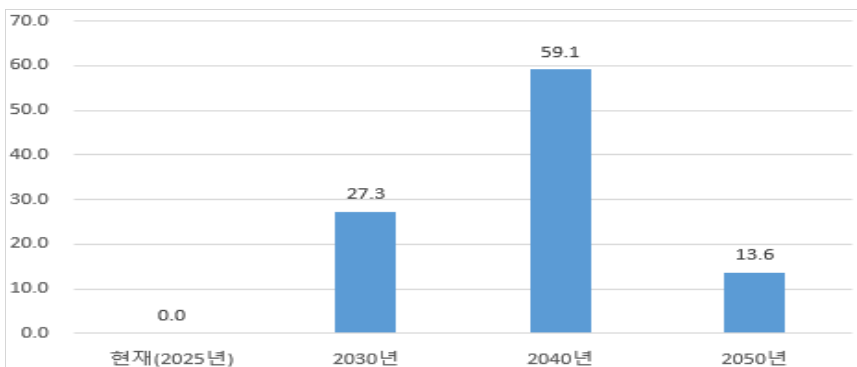
자료: 저자 작성

나. 그린 암모니아 선박 연료 적정 도입 시기

국내·외의 규제들을 고려하여 ‘그린 암모니아’를 선박 연료로 도입해야 하는 적정 시기를 조사한 결과 ‘2040년’(59.1%)이 가장 높게 나타났다. 그 다음으로 ‘2030년’(27.3%), ‘2050년’(13.6%) 순으로 나타났다.

〈그림 3-8〉 그린 암모니아 선박 연료 적정 도입 시기

(n=22, %)



자료: 저자 작성

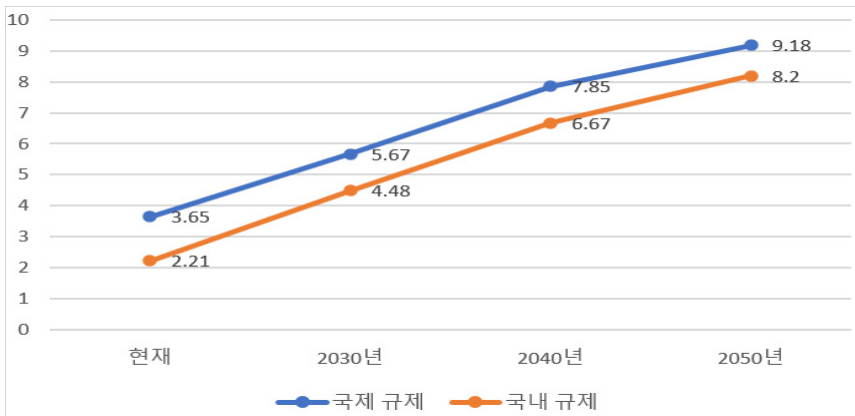
2) 제도적 준비 정도

(1) 국내·외 패널티 및 규제 강도 현황 및 전망

국내의 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 안정성 제고와 확산을 위한 국내·외 패널티 및 규제강도의 현황과 전망을 조사한 결과 국내는 현재 2.21점으로 평가됐으며 2030년 4.48점, 2040년 6.67점, 2050년 8.2점으로 점진적인 강화를 보였다. IMO 등 국제 규제는 현재 3.65점, 2030년 5.67점, 2040년 7.85점, 2050년 9.18점으로 평가되어 국내와 대비하여 높은 수준으로 인식되었다.

〈그림 3-9〉 국내·외 패널티 및 규제 강도 현황 및 전망

(n=25, 10점 만점 척도)



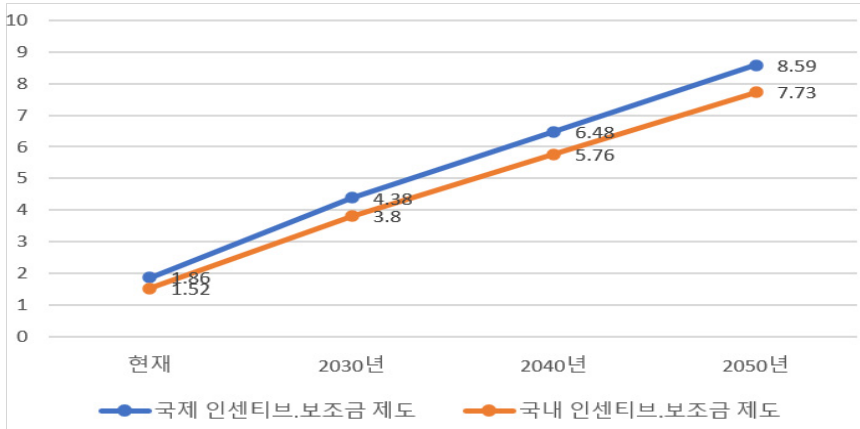
주: 0점 없음, 1~2점 매우 약함, 3~4점 약함, 5점 보통, 6~7점 강함, 8~9점 매우 강함, 10점 극강
자료: 저자 작성

(2) 국내·외 인센티브 및 보조금 지원제도 수준 현황 및 전망

국내의 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘 안정성 제고와 확산을 위한 국내·외 인센티브 및 보조금 지원제도 수준의 현황 및 전망을 조사한 결과 국내는 현재 1.52점으로 평가됐으며, 2030년 3.8점, 2040년 5.76점, 2050년 7.73점으로, 점진적으로 확대되었다. 국외는 현재 1.86점, 2030

년 4.38점, 2040년 6.48점, 2050년 8.59점으로 평가되어 국내의 지원제도 수준보다 더 빠르게 확대될 것으로 인식되었다.

〈그림 3-10〉 국내·외 인센티브 및 보조금 지원제도 수준 현황 및 전망
(10점 만점 척도)



주: 1) 국내 제도 n=24, 국제 제도 n=23

2) 주: 0점 전무, 1~2점 매우 미비, 3~4점 미비, 5점 보통, 6~7점 어느정도 준비, 8~9점 고도 준비, 10점 완전한 준비

자료: 저자 작성

(3) 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 법·제도적 준비 정도 현황 및 전망

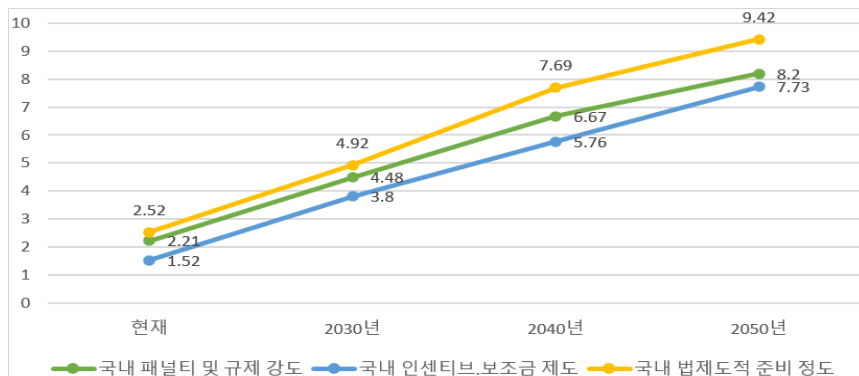
국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 법·제도적인 준비 정도의 현황 및 전망을 조사한 결과 현재는 2.52점 수준으로 준비가 미비한 것으로 평가됐다. 2030년에도 4.92점으로 법·제도적인 준비 정도가 보통 수준에 못 미치는 것으로 나타났으며, 2040년(7.69점)부터 어느 정도 준비가 될 것으로 전망되었다. 또한 2050년에는 9.42점으로 전반적인 법·제도적 체계를 마련할 것으로 전망되었다.

법·제도적인 준비 정도 및 현황과 함께 앞서 제시한 국내 인센티브·보조금 제도의 준비 정도와 국내의 패널티 및 규제의 강도를 비교해보면 서로

다른 준비 정도를 보이고 있다(〈그림 3-11〉참고). 우선 법·제도적인 준비 정도는 인센티브·보조금 제도와 패널티 및 규제의 강도보다 빠르게 갖춰질 것으로 보인다.

인센티브·보조금 지원제도는 현재 1.52점으로 다른 제도들보다 낮은 수준이며 2050년에도 7.73점으로 가장 낮다. 이는 해운 분야에서의 환경 규제는 강화되지만 재정적 유인책이 이를 뒷받침하지 못할 가능성이 있다는 것을 나타낸다.

〈그림 3-11〉 국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 법·제도적 준비 정도 현황 및 전망
(10점 만점 척도)



주: 1) 법·제도적 준비 정도 n=26, 국내 인센티브/보조금 제도 n=24, 국내 패널티/규제 강도 n=25
 2) 주: 0점 전무, 1~2점 매우 미비, 3~4점 미비, 5점 보통, 6~7점 어느정도 준비, 8~9점 고도 준비, 10점 완전한 준비
 자료: 저자 작성

3) 기술적 준비 정도

(1) 그린 암모니아 연료 생산 부문 국내·외 기술적 준비 정도 현황 및 전망

가. 국내·외 수전해 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 수전해 기술의 준비 정도를 파악하기 위해 주요 수전해 기술인 알칼리 전기분해, 고분자 전해질막(PEM) 전기분해, 고체산화물(SOEC) 전

기분해의 기술적인 준비 정도를 조사하였다.

국내·외 알칼리 전기분해 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 5.4점으로 평가됐으며 2030년 6.62점, 2040년 8.05점, 2050년 9.18점으로 나타났다. 국외는 현재 6.76점, 2030년 7.95점, 2040년 8.97점, 2050년 9.85점으로 평가되었다.

〈표 3-23〉 국내·외 알칼리 전기분해 기술 준비 정도 현황 및 전망

(n=17, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	5.4	6.62	8.05	9.18
국외	6.76	7.95	8.97	9.85

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시²³⁵⁾

자료: 저자 작성

국내·외 고분자 전해질막(PEM) 전기분해 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.2점으로 평가됐으며 2030년 5.59점, 2040년 7.38점, 2050년 8.88점으로 나타났다. 국외는 현재 5.49점, 2030년 6.69점, 2040년 8.28점, 2050년 9.29점으로 평가되었다.

〈표 3-24〉 국내·외 고분자 전해질막(PEM) 전기분해 기술 준비 정도 현황 및 전망

(n=17, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.2	5.59	7.38	8.88
국외	5.49	6.69	8.28	9.29

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시

자료: 저자 작성

235) TRL1 기본원리 관찰, TRL2 실제 응용을 위한 개발·연구, TRL3 핵심 원리 검증을 위한 분석 및 시험, 개념 증명, TRL4 실험을 통한 개발·검증, TRL5 시뮬레이션 환경에서 구성요소 파일럿 규모 테스트, TRL6 시뮬레이션 환경 구축 및 테스트된 프로토타입 시스템, TRL7 운영 환경에서 구축 및 검증된 프로토타입 시연, TRL8 예상되는 운영환경에서 실제 시스템의 최종 형태로 작동을 입증하여 적격성 확인, TRL9 실제 운영환경(상업적 기반)에서 운영을 적용하여 기술적으로 준비되어 있으나 적용이 제한적임, TRL10 상업적 적용이 가능하나 완전한 기술 달성을 위해 추가적인 노력이 필요함, 낮은 시장 점유율, CRL11 예측가능한 성장으로 안정성 입증, CRL12 지속적인 효율 개선 및 가격 경제성 확보

국내·외 고체산화물(SOEC) 전기분해 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 2.69점으로 평가됐으며 2030년 4.24점, 2040년 6.18점, 2050년 7.86점으로 나타났다. 국외는 현재 3.05점, 2030년 4.78점, 2040년 7.03점, 2050년 8.3점으로 평가되었다.

〈표 3-25〉 국내·외 고체산화물(SOEC) 전기분해 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=17, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	2.69	4.24	6.18	7.86
국외	3.05	4.78	7.03	8.3

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

나. 국내·외 합성기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 합성기술의 준비 정도를 파악하기 위해 저온·저압의 하버보쉬 기술의 준비 정도를 조사하였다. 고온고압의 하버보쉬 기술은 이미 상용화되었기 때문에 이번 설문조사에서 제외하였다.

저온·저압의 하버보쉬 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 3.76점으로 평가됐으며 2030년 5.21점, 2040년 6.55점, 2050년 8.28점으로 나타났다. 국외는 현재 4.73점, 2030년 6.34점, 2040년 7.52점, 2050년 8.88점으로 평가되었다.

〈표 3-26〉 국내·외 저온·저압 암모니아 합성 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=17, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	3.76	5.21	6.55	8.28
국외	4.73	6.34	7.52	8.88

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

다. 국내·외 그린 암모니아 생산의 기술적 준비 정도(종합)

그린 암모니아 생산 부문의 기술적인 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 3.94점으로 평가됐으며 2030년 5.37점, 2040년 6.97점, 2050년 8.63점으로 나타났다. 국외는 현재 5.29점, 2030년 6.96점, 2040년 8.32점, 2050년 9.38점으로 평가되었다.

〈표 3-27〉 국내·외 그린 암모니아 생산의 기술적 준비 정도(종합) 현황 및 전망
(n=17, 10점 만점 척도)

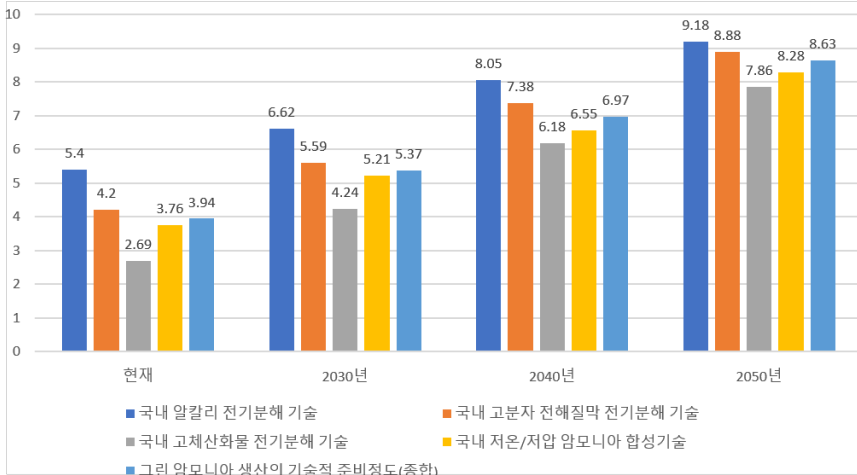
구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	3.94	5.37	6.97	8.63
국외	5.29	6.96	8.32	9.38

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

한편 국내의 그린 암모니아 수전해 기술과 합성기술, 그린 암모니아 생산의 종합적인 기술의 준비 정도를 비교하면 〈그림 3-12〉와 같다. 현재 국내 수전해 기술 중에는 알칼리 전기분해 기술이 5.4점으로 가장 높으나 아직 개발 및 실증 단계이다. 또한 국내 저온·저압의 그린 암모니아 합성기술의 준비 정도는 3.76점으로 실험 단계이며 수전해 기술보다 낮게 나타났다.

〈그림 3-12〉 국내 그린 암모니아 생산의 기술적 준비 정도 현황 및 전망

(n=17, 10점 만점 척도)



주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시

자료: 저자 작성

(2) 그린 암모니아 연료 벙커링 부문 국내 기술적 준비 정도 현황 및 전망

가. 국내 저장 관련 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내 그린 암모니아 벙커링 부문의 저장과 관련된 기술의 준비 정도를 조사한 결과 현재 7.65점으로 평가됐으며 2030년 8.62점, 2040년 9.46점, 2050년 9.89점으로 나타났다.

〈표 3-28〉 암모니아 벙커링 관련 국내 저장 기술 준비 정도 현황 및 전망

(n=21, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
저장 기술 준비 정도	7.65	8.62	9.46	9.89

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시

자료: 저자 작성

나. 국내 암모니아 연료 주입 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내 그린 암모니아 벙커링 부문의 연료 주입 기술의 준비 정도를 조사한 결과 현재 6.51점으로 평가됐으며 2030년 8.28점, 2040년 9.36점, 2050년 9.89점으로 나타났다

〈표 3-29〉 암모니아 벙커링 관련 국내 연료 주입 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=21, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
연료 주입 기술 준비 정도	6.51	8.28	9.36	9.89

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

다. 국내 암모니아 누출 방지·예방·대응 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내 그린 암모니아 벙커링 부문의 누출 방지·예방·대응에 대한 기술의 준비 정도를 조사한 결과 현재 5.15점으로 평가됐으며 2030년 6.97점, 2040년 8.98점, 2050년 9.56점으로 나타났다.

〈표 3-30〉 암모니아 벙커링 관련 국내 누출 방지·예방·대응 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=21, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
누출 방지·예방·대응기술 준비 정도	5.15	6.97	8.98	9.56

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

라. 국내 암모니아 벙커링 기술적 준비 정도(종합) 현황 및 전망

국내 그린 암모니아 벙커링 부문의 종합적인 기술의 준비 정도를 조사한 결과 현재 6.23점으로 평가됐으며 2030년 7.67점, 2040년 9.3점, 2050년 9.79점으로 나타났다

〈표 3-31〉 국내 암모니아 병커링 기술적 준비 정도(종합) 현황 및 전망

(n=21, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
병커링 기술 준비 정도(종합)	6.23	7.67	9.3	9.79

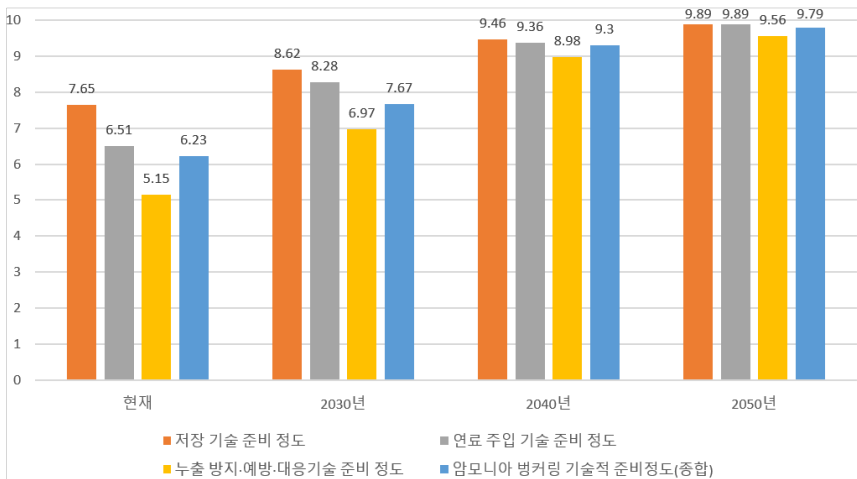
주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시

자료: 저자 작성

국내 암모니아 병커링과 관련한 개별적인 기술의 준비 정도와 종합적인 기술의 준비 정도를 비교하면 〈그림 3-13〉과 같다. 병커링과 관련된 저장 기술과 연료 주입 기술의 준비 정도는 현재 각각 7.65점, 6.51점으로 현실에서 적용이 가능한 수준이다. 반면에 누출 방지·예방·대응에 대한 기술의 준비 정도는 현재 5.15점으로 실증 단계에 머무르고 있다. 한편 국내 암모니아 병커링의 기술적인 준비 정도는 2030년에 모두 6점대 이상을 보이며 빠르게 준비될 것으로 전망된다.

〈그림 3-13〉 국내 암모니아 병커링의 기술적 준비 정도 현황 및 전망

(n=21, 10점 만점 척도)



주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시

자료: 저자 작성

(3) 암모니아 추진 선박 부문 국내·외 기술적 준비 정도 현황 및 전망

가. 암모니아 추진 선박의 메인 엔진 기술 현황 및 전망

암모니아 추진 선박의 메인 엔진 기술의 현황 및 전망을 조사한 결과 현재 메인 기술로는 ‘내연기관’(95.2%)이 압도적으로 높게 나타났다, 2030년에는 ‘내연기관’(90.9%), ‘가스터빈’(9.1%) 순으로 나타났으며 2040년에는 ‘내연기관’(59.1%), ‘연료전지’(22.7%), ‘가스터빈’(18.2%) 순으로 나타났다. 또한 2050년에는 ‘내연기관’(45.5%), ‘연료전지’(40.9%), ‘가스터빈’(13.6%) 순으로 나타났다. 이와 같이 내연기관 기술이 지속적으로 메인 기술이 될 것으로 전망되는 가운데 연료전지 기술의 개발 역시 확대될 것으로 나타났다.

나. 국내·외 암모니아 추진 선박 내연기관 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 암모니아 추진 선박의 내연기관 기술의 준비 정도는 4행정 엔진과 2행정 엔진으로 구분하여 조사하였다.

4행정 엔진 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 5.55점으로 평가됐으며 2030년 6.95점, 2040년 8.58점, 2050년 9.52점으로 나타났다. 국외는 현재 5.92점, 2030년 7.96점, 2040년 9.32점, 2050년 9.84점으로 평가되었다.

〈표 3-32〉 국내·외 암모니아 추진 선박 4행정 엔진 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	5.55	6.95	8.58	9.52
국외	5.92	7.96	9.32	9.84

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

2행정 엔진 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 5.07점으로 평

가됐으며 2030년 7.03점, 2040년 8.54점, 2050년 9.25점으로 나타났다. 국외는 현재 5.97점, 2030년 7.88점, 2040년 9.37점, 2050년 9.89점으로 평가되었다.

〈표 3-33〉 국내·외 암모니아 추진 선박 2행정 엔진 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	5.07	7.03	8.54	9.25
국외	5.97	7.88	9.37	9.89

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

다. 국내·외 암모니아 추진 선박 가스터빈 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 암모니아 추진 선박의 가스터빈 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.16점으로 평가됐으며 2030년 5.87점, 2040년 7.5점, 2050년 8.73점으로 나타났다. 국외는 현재 4.18점, 2030년 5.77점, 2040년 7.87점, 2050년 8.79점으로 평가되었다.

〈표 3-34〉 국내·외 암모니아 추진 선박 가스터빈 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.16	5.87	7.5	8.73
국외	4.18	5.77	7.87	8.79

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

라. 국내·외 암모니아 추진 선박 연료전지 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 암모니아 추진 선박의 연료전지 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.15점으로 평가됐으며 2030년 5.74점, 2040년 7.93점, 2050년 8.89점으로 나타났다. 국외는 현재 4.86점, 2030년 6.44점,

2040년 8.16점, 2050년 9.18점으로 평가되었다.

〈표 3-35〉 국내·외 암모니아 추진 선박 연료전지 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.15	5.74	7.93	8.89
국외	4.86	6.44	8.16	9.18

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

마. 국내·외 암모니아 추진 선박 그린 파일럿 연료 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 암모니아 추진 선박의 그린 파일럿 연료 사용 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.34점으로 평가됐으며 2030년 6.14점, 2040년 8.01점, 2050년 8.78점으로 나타났다. 국외는 현재 4.81점, 2030년 6.73점, 2040년 8.29점, 2050년 8.97점으로 평가되었다.

〈표 3-36〉 국내·외 암모니아 추진 선박 그린 파일럿 연료 사용 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.34	6.14	8.01	8.78
국외	4.81	6.73	8.29	8.97

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

바. 국내·외 암모니아 추진 선박의 독성 처리 기술 준비 정도 현황 및 전망

국내·외 암모니아 추진 선박의 독성 처리에 대한 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.81점으로 평가됐으며 2030년 6.87점, 2040년 8.41점, 2050년 8.99점으로 나타났다. 국외는 현재 4.94점, 2030년 7.02점, 2040년 8.5점, 2050년 9.13점으로 평가되었다.

〈표 3-37〉 국내·외 암모니아 추진 선박 독성 처리 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.81	6.87	8.41	8.99
국외	4.94	7.02	8.5	9.13

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

사. 국내·외 암모니아 추진 선박의 아산화질소 배출관리 기술 준비 정도

국내·외 암모니아 추진 선박의 아산화질소 배출관리에 대한 기술의 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.94점으로 평가됐으며 2030년 7.27점, 2040년 8.79점, 2050년 9.33점으로 나타났다. 국외는 현재 5.1점, 2030년 7.58점, 2040년 8.97점, 2050년 9.61점으로 평가되었다.

〈표 3-38〉 국내·외 암모니아 추진 선박 아산화질소 배출관리 기술 준비 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.94	7.27	8.79	9.33
국외	5.1	7.58	8.97	9.61

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

아. 국내·외 암모니아 추진 선박의 기술적 준비 정도(종합) 현황 및 전망

국내·외 암모니아 추진 선박의 기술적인 준비 정도를 조사한 결과 국내는 현재 4.55점으로 평가됐으며 2030년 6.4점, 2040년 8.25점, 2050년 9.32점으로 나타났다. 국외는 현재 5.5점, 2030년 7.48점, 2040년 8.85점, 2050년 9.64점으로 평가되었다.

〈표 3-39〉 국내·외 암모니아 추진 선박 기술적 준비(종합) 정도 현황 및 전망
(n=20, 10점 만점 척도)

구분	현재	2030년	2040년	2050년
국내	4.55	6.4	8.25	9.32
국외	5.5	7.48	8.85	9.64

주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시
자료: 저자 작성

자. 국내 암모니아 추진 선박의 기술적 준비 정도 현황 및 전망

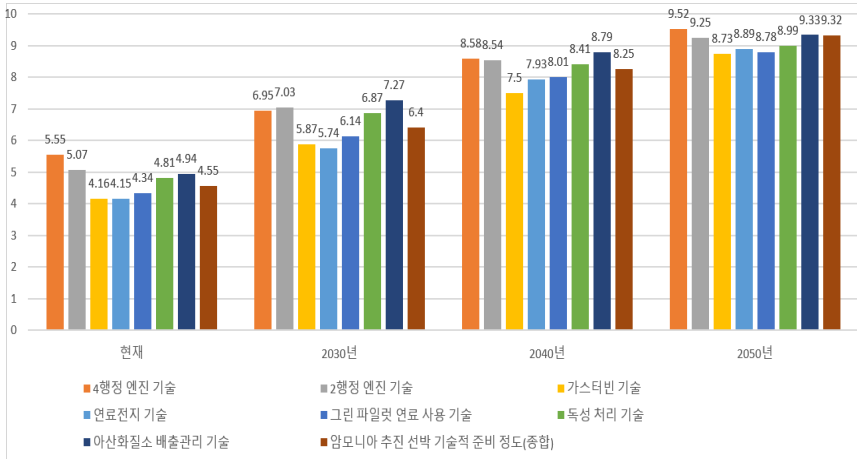
국내 암모니아 추진 선박과 관련한 개별적인 기술의 준비 정도와 종합적인 기술의 준비 정도를 비교하면 〈그림 3-14〉와 같다. 내연기관 기술의 준비 정도는 현재 5.55점(4행정 엔진), 5.07점(2행정 엔진)으로 개발 및 실증 단계이며 2040년에는 8.58점(4행정 엔진), 8.54점(2행정 엔진)으로 상업적 성숙도를 달성할 것으로 전망했다. 반면에 가스터빈(4.16점)과 연료전지(4.15점)의 기술적인 준비 정도는 연구 단계로서 내연기관보다 낮은 수준이다.

그린 파일럿 연료 기술의 준비 정도는 현재 4.34점으로 개발 단계이나 2040년에는 6.34점으로 실증 단계에 이를 것으로 전망되며, 2040년에는 8.01점으로 상업적 적용이 가능할 것으로 전망된다. 마찬가지로 독성처리와 관련된 기술의 준비 정도는 현재 4.81점으로 개발 단계이나 2030년에는 6.87점으로 실증 단계에 이를 것으로 전망되며, 2040년에는 8.01점으로 상업적 적용이 가능할 것으로 보인다.

한편 아산화질소 배출관리와 관련한 기술의 준비 정도는 현재 4.94점으로 개발 단계이나 빠르게 성장하여 2030년(7.27점)에는 기술적인 준비 정도가 마련될 수 있을 것으로 보인다.

〈그림 3-14〉 국내 암모니아 추진 선박 기술적 준비 정도 현황 및 전망

(n=20, 10점 만점 척도)



주: TRL3 → 2.5점, TRL6 → 5점, TRL9 → 7.5점, CRL12 → 10점으로 가이드라인 제시

자료: 저자 작성

4) 정책 수요

(1) 그린 암모니아 추진 선박 도입 시 애로사항 현황 및 전망

현재의 그린 암모니아 추진 선박 도입에 따른 애로사항을 조사한 결과 1순위 응답은 ‘기술적 불확실성’(51.9%)로 나타났다. 그 다음으로 ‘연료 비용 부담’(37.0%), ‘연료 공급망 부족’(11.1%) 순으로 나타났다. 또한 1~3순위에 가중치를 부여해 산출한 결과 ‘기술적 불확실성’(36.4%), ‘연료 비용 부담’(29.0%), ‘연료 공급망 부족’(20.4%) 순으로 나타났다.

〈표 3-40〉 현재 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항(1순위, 2순위, 3순위)

(n=27, %)

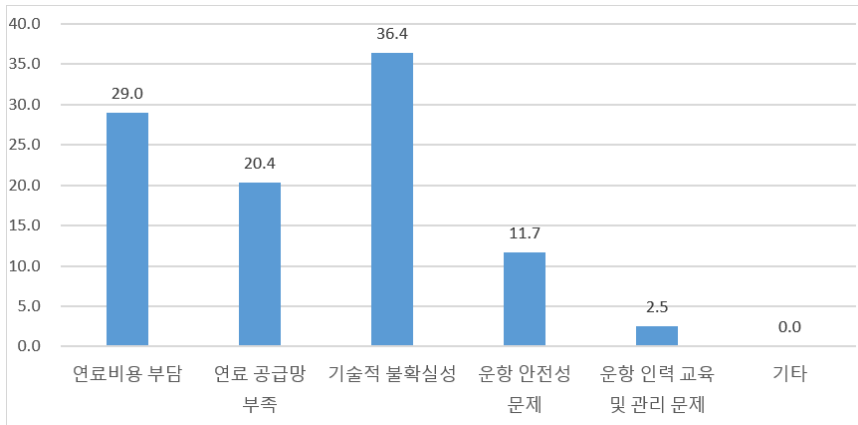
항목	1순위	2순위	3순위
연료 비용 부담	37.0	22.2	18.5
연료 공급망 부족	11.1	33.3	22.2
기술적 불확실성	51.9	25.9	11.1

항목	1순위	2순위	3순위
운항 안전성 문제	0	0	33.3
운항 인력 교육 및 관리 문제	0	0	14.8
기타	0	0	0
전체	100	100	100

자료: 저자 작성

〈그림 3-15〉 현재 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항(1+2+3순위 종합)

(n=27, %)



자료: 저자 작성

2030년에 예상되는 그린 암모니아 추진 선박 도입에 따른 애로사항을 조사한 결과 1순위 응답은 ‘연료 비용 부담’(44.4%)로 나타났다. 그 다음으로 ‘연료 공급망 부족’(29.6%), ‘기술적 불확실성’(22.2%) 순으로 나타났다. 또한 1~3순위를 종합한 결과 ‘연료 비용 부담’(32.3%), ‘연료 공급망 부족’(28.6%), ‘기술적 불확실성’(20.5%) 순으로 나타났다.

〈표 3-41〉 2030년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1순위, 2순위, 3순위)

(단위: %)

항목	1순위	2순위	3순위
연료 비용 부담	44.4	22.2	15.4

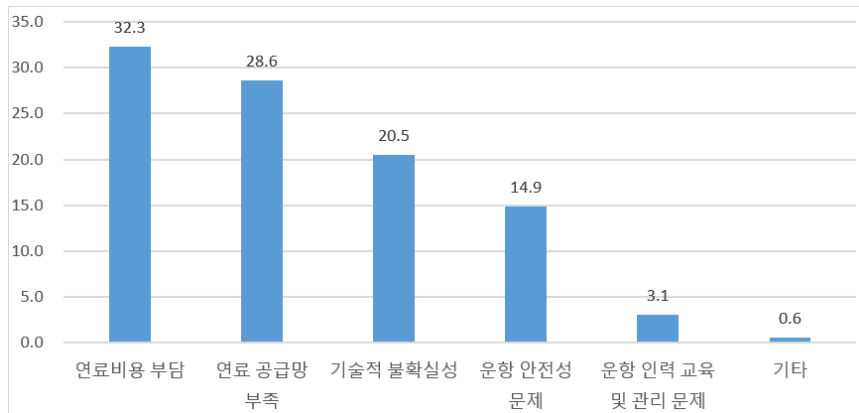
항목	1순위	2순위	3순위
연료 공급망 부족	29.6	37.0	7.7
기술적 불확실성	22.2	14.8	26.9
운행 안전성 문제	3.7	22.2	34.6
운행 인력 교육 및 관리 문제	0	3.7	11.5
기타	0	0	3.8
전체	100	100	100

주: 1순위, 2순위 n=27, 3순위 n=26

자료: 저자 작성

〈그림 3-16〉 2030년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1+2+3순위 종합)

(단위: %)



주: 1) 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임

2) 1순위, 2순위 n=27, 3순위 n=26

자료: 저자 작성

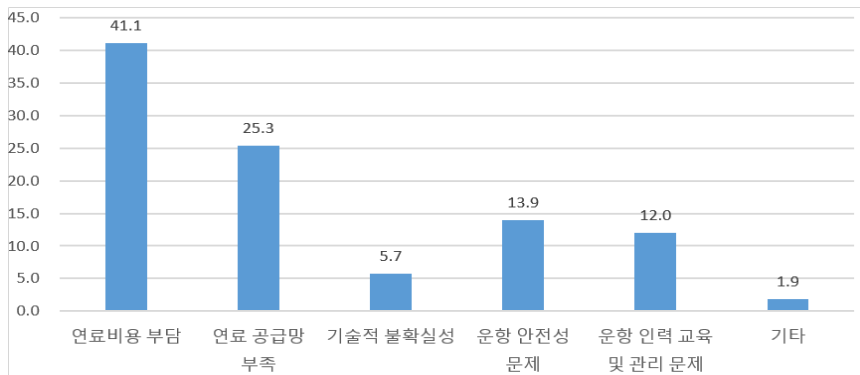
2040년에 예상되는 그린 암모니아 추진 선박 도입에 따른 애로사항을 조사한 결과 1순위 응답은 ‘연료 비용 부담’(66.7%)로 나타났다. 그 다음으로 ‘연료 공급망 부족’(18.5%), ‘운행 안전성 문제’(11.1%) 순으로 나타났다. 또한 1~3순위를 종합한 결과 ‘연료 비용 부담’(41.1%)로 나타났다. 그 다음으로 ‘연료 공급망 부족’(25.3%), ‘운행 안전성 문제’(13.9%) 순으로 나타났다.

〈표 3-42〉 2040년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1순위, 2순위, 3순위)
(단위: %)

항목	1순위	2순위	3순위
연료 비용 부담	66.7	19.2	4.0
연료 공급망 부족	18.5	57.2	12.0
기술적 불확실성	0	3.5	20.0
운항 안전성 문제	11.1	57.2	36.0
운항 인력 교육 및 관리 문제	3.7	10.5	16.2
기타	0	0	12.0
전체	100	100	100

주: 1순위 n=27, 2순위 n=26, 3순위 n=25
자료: 저자 작성

〈그림 3-17〉 2040년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1+2+3순위 종합)
(단위: %)



주: 1) 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
2) 1순위 n=27, 2순위 n=26, 3순위 n=25
자료: 저자 작성

2050년에 예상되는 그린 암모니아 추진 선박 도입에 따른 애로사항을 조사한 결과 1순위 응답은 ‘연료 비용 부담’(59.3%)으로 나타났다. 그 다음으로 ‘연료 공급망 부족’(22.2%), ‘운항 인력 교육 및 관리 문제’(14.8%) 순으로 나타났다. 또한 1~3순위를 종합한 결과 ‘연료 비용 부담’(38.9%),

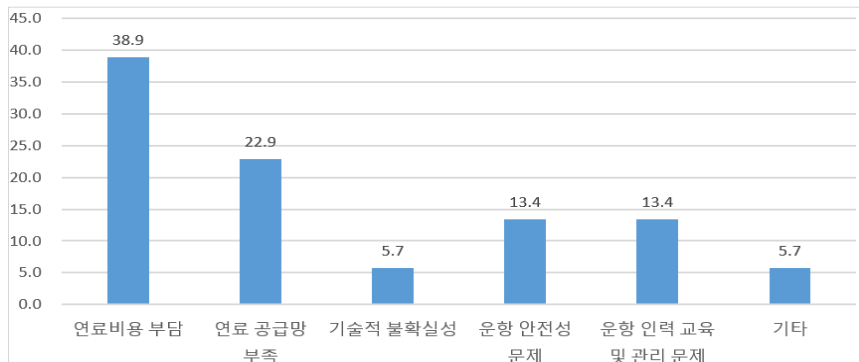
‘연료 공급망 부족’(22.9%), ‘운항 안전성 문제’(13.4%), ‘운항 인력 교육 및 관리 문제’(13.4%) 순으로 나타났다.

〈표 3-43〉 2050년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1순위, 2순위, 3순위)
(단위: %)

항목	1순위	2순위	3순위
연료 비용 부담	59.3	23.1	4.2
연료 공급망 부족	22.2	23.1	25.0
기술적 불확실성	0	7.7	20.8
운항 안전성 문제	3.7	19.2	33.3
운항 인력 교육 및 관리 문제	14.8	11.5	12.5
기타	0	15.4	4.2
전체	100	100	100

주: 1순위 n=27, 2순위 n=26, 3순위 n=24
자료: 저자 작성

〈그림 3-18〉 2050년 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 전망(1+2+3순위 종합)
(단위: %)

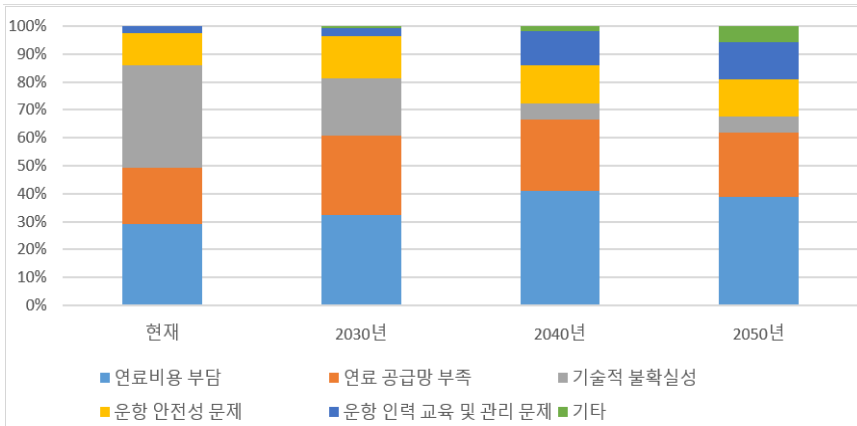


주: 1) 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
2) 1순위 n=27, 2순위 n=26, 3순위 n=24
자료: 저자 작성

전문가들의 응답을 바탕으로 그린 암모니아 추진 선박 도입에 따른 애로사항에서의 변화를 살펴보면, 현재는 ‘기술적 불확실성’이 1순위의 애로사

항으로 나타나지만 시간이 지날수록 ‘연료 비용 부담’과 ‘연료 공급망 문제’가 애로사항으로 대두되는 것으로 나타났다. 또한 2040년부터는 운항 안전성 문제도 애로사항으로 예상되고 있다.

〈그림 3-19〉 그린 암모니아 추진 선박 도입 애로사항 변화 전망(1+2+3순위 종합)
(단위: %)



주: 1순위 응답 3점, 2순위 응답 2점, 3순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
자료: 저자 작성

(2) 대체연료 및 그린 암모니아 활용 촉진을 위한 정책

가. 대체연료 활용을 촉진하기 위한 정책

대체연료 활용의 촉진을 위한 유인책에 대해 서술형 문항으로 조사한 결과는 〈표 3-44〉와 같다. 제시된 유인책을 분류하면 ‘대체연료 사용에 대한 혜택 제공’, ‘대체연료 병커링 인프라 조성’, ‘제도적 정비’, ‘개설 개발 지원’, ‘대체연료 사용 규제의 도입’, ‘대체연료 활성화 정책 추진’ 등으로 나눌 수 있다.

〈표 3-44〉 대체연료 활용을 촉진하기 위한 유인책(서술형)

구분	내용
대체연료에 대한 인센티브, 보조금, 세제 감면 등 혜택 제공	• 대체연료 사용 시 보조금 및 혜택 제공 • 친환경 선박 건조 시 보조금 지원 및 세제 혜택 제공 • 친환경 선박 신조 및 개조에 대한 투자 및 용자 지원 • 고가의 대체연료 사용을 위한 정부의 인센티브 도입 • 항만 이용료, 시설 사용료 감면 제공 등 우대 정책 부여 • 대체연료 사용으로 인한 탄소 저장에 대해 인센티브 제공 • 친환경 선박 건조 보조금 및 친환경 연료 사용 지원금 확대 • 대체연료 엔진의 구매 비용 지원 • 대체연료 선박에 대한 우대 금리 등 금융 지원 • 친환경 대체연료 생산 및 저장에 대한 지원금
대체연료 벙커링 인프라 조성	• 항만 인프라 조성 • 대체연료의 공급망 확대(다양한 연료 보급) • 육상 발전 연료 인프라와 해상 연료 공급망 연계 • 친환경 벙커링 시장을 조성하기 위한 제도적 지원 • 암모니아 등 독성유의 연료사용을 위한 벙커링 및 종전 부지 확보 • 벙커링 설비의 확충 • 친환경 선박용 대체연료 공급 선박(벙커링 선박)과 설비 투자 보조금 지원 • 연료 공급망, 벙커링 등 인프라 구축을 위한 공공·민간의 공동투자 유도
제도적 정비	• 제도적인 정비 필요 • 친환경 선박 연료의 수입에 대한 대량 화물 규제 완화 • 대체연료에 관한 법규 및 규정 정비 • 무탄소 연료 선박 기자재 사용을 위한 안전 인증의 규정화 및 간소화 • IMO 및 선급의 적극적인 제도 및 가이드라인 정립 • 대체연료 엔진의 안전 기준 마련 • 벙커링 규제 제도 개선(특구 제도, 법·제도 개선)
기술 개발 지원	• 기술 개발 지원 및 실증사업 지원 • 실증 규모의 그린 암모니아 가격을 낮추기 위한 기술 개발 과제 필요 • 대체연료 기술 개발에 대한 지원 확대 • 대체연료를 안정적으로 사용할 수 있는 엔진과 기자재 개발 • 대체연료 활용을 위한 기자재 업체 제품 개발 • 대체연료 사용 기자재 개발 지원
대체연료 사용 의무화, 탄소세 등 규제 도입	• 대체연료 의무사용(일정 비율) 규정 도입 • 탄소세 부과

구분	내용
	• 탄소배출 저감을 위한 연료 사용 규제 또는 법규 정비 • 오염 물질, 탄소 배출 관점에서의 규제 및 세금 부과
대체연료 활성화 정책 추진 및 행정 일원화	• 정부 주도 그린 암모니아 도입 • 지자체 관공선의 친환경화 • 대체연료 안전에 대한 지식 확산 정책 • 친환경 장비 도입 시 보조금 지급 등 사용 촉진 방안 수립 • 친환경 선박 전환 지원센터 설립 등을 통한 정보화, 행정의 일원화 및 전문성 확보
기타	• 벙커링 전용 선박에 대한 내항 및 외항 운송업 검임 허용 • 대체연료 사용 시 공공부문 및 민간기업 ESG 운송 계약 지원

자료: 저자 작성

나. 그린 암모니아 추진 선박의 도입과 확산을 위한 정책

그린 암모니아 추진 선박의 도입과 확산을 위한 유인책에 대해 서술형 문항으로 조사한 결과는 <표 3-45>와 같다. 제시된 유인책을 분류하면 ‘그린 암모니아 선박 연료에 대한 혜택 제공’, ‘그린 암모니아 연료 공급 인프라 구축’, ‘안전성 확보’, ‘탄소배출에 대한 규제 강화’, ‘안정적인 공급 및 활용을 위한 법·제도 정비’, ‘R&D 지원’ 등으로 나눌 수 있다. 특히 그린 암모니아 연료의 안전성에 대한 다수의 의견이 나타났다. 또한 그린 수소 및 그린 암모니아의 생산을 위한 재생에너지 확보 등의 의견도 존재했다.

<표 3-45> 그린 암모니아 추진 선박의 도입과 확산을 위한 유인책(서술형)

구분	내용
그린 암모니아 선박 연료 혜택 제공	• 세금 감면 혜택 • 선박 건조비 지원 • 연료 비용 보전을 위한 인센티브 제공 • 친환경 선박 보조금에 대한 지원 확대 • 그린 암모니아 연료 구매를 보조 • 해운기업 탈탄소화 또는 탄소 감축에 대한 인센티브 제공(감축 실적 인정 및 거래 허용 등) • 암모니아 추진 선박을 보유한 선사에 대한 우대 정책 추진

구분	내용
	• 암모니아 DF 선대 운영에 대한 인센티브 제공 • 암모니아 연료유 사용에 대한 인센티브 제공 • 항만 사용료 할인 • 선박 연료의 전환 투자에 대한 금융지원의 확대 • 중견 기업 이하규모의 사업자에 대해 그린 암모니아 선박의 도입을 지원
그린 암모니아 연료 공급 인프라의 구축	• 항만 인프라의 조성 • 안정적인 그린 암모니아 연료의 공급 • 국가 지역 사업으로 암모니아 연료 공급의 인프라 구축 • 암모니아 저장 및 공급 인프라의 구축 • 암모니아 벙커링 설비에 대한 지원금 및 국가에서 구축한 후 임대하는 방안 필요 • 벙커링 선박의 운영 지원금 • 공급망 확보 및 설비 구축 • 그린 암모니아 벙커링 작업을 실시하는 항만을 대상으로 세제 혜택 지원 • 항만 내 그린 암모니아 벙커링 인프라(저장, 이송 등) 구축 지원
그린 암모니아 선박 연료의 안전성 확보	• 독성 연료에 대한 안전관리 지침 제공 • 안전 인증 지원 • 안전설비 지원 • 국가적인 차원에서 그린 암모니아의 안전성 홍보 • 선박안전법 등 관련 법안 마련 • 암모니아 추진 선박을 충분한 시간 동안 운전하여 경험적으로도 안전상에 문제가 없다는 것을 증명 • 그린 암모니아 연료 엔진의 안전기준 마련
탄소배출에 대한 규제 강화	• 기존 화석연료의 경쟁력을 약화시키는 페널티 규정을 지속적으로 도입 • 친환경 연료의 의무 사용 규정 도입 • 선박의 탄소배출 규제의 강화
안정적인 공급 및 활용을 위한 법·제도의 정비	• 그린 암모니아 벙커링 인프라와 관련한 지원 제도 마련 • 원활한 보급을 위한 규제 개선 • 연료의 안정적 공급을 위한 각종 법규와 규정 정비 • 연료 사용에 대한 법체계 구축
R&D 지원	• 연구개발 지원 • 연료 사용을 위한 엔진 및 기술 개발
기타	• 수전해 수소, 그린 암모니아 생산을 위한 재생에너지 확보 • 배출권 감축 유예 • 사업자 (장기)면허 보장

자료: 저자 작성

(3) 그린 암모니아 추진 선박 활성화를 위한 정책 우선순위

그린 암모니아 추진 선박의 활성화를 위한 정책 우선순위를 조사한 결과 1순위 응답은 ‘선박의 탄소배출 규제 강화’(53.8%)로 나타났다. 그 다음으로 ‘선박 전환 투자 보조금/인센티브 지원’과 ‘연료 공급·병커링 인프라 구축 및 지원’이 각각 19.2%로 동일하게 그 뒤를 이었다. 또한 1~6순위에 가중치를 부여해 산출한 결과 ‘선박의 탄소배출 규제 강화’(22.2%), ‘연료 공급·병커링 인프라 구축 및 지원’(20.9%), ‘그린 암모니아의 가격 경쟁력 확보를 위한 보조금/인센티브 지원’(19.0%), ‘선박의 전환 투자 보조금/인센티브 지원’(18.7%) 순으로 나타났다.

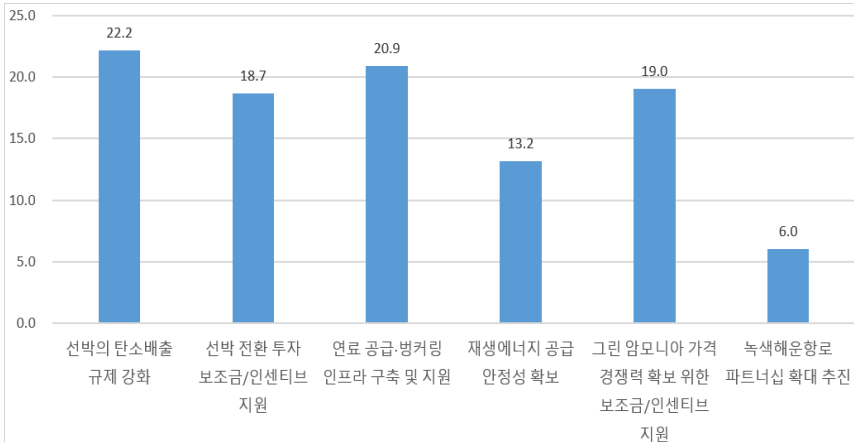
〈표 3-46〉 그린 암모니아 추진 선박 활성화를 위한 정책 우선순위(1~6순위)

(n=26, %)

항목	1순위	2순위	3순위	4순위	5순위	6순위
선박의 탄소배출 규제 강화	53.8	7.7	11.5	7.7	15.4	3.8
선박 전환 투자 보조금/인센티브 지원	19.2	15.4	19.2	30.8	15.4	0
연료 공급 병커링 인프라 구축 및 지원	19.2	26.9	30.8	19.2	3.8	0
안정적 그린 암모니아 확보를 위한 재생에너지 공급 안정성 확보	0	19.2	7.7	15.4	46.2	11.5
그린 암모니아 가격 경쟁력 확보 위한 보조금/인센티브 지원	7.7	30.8	30.8	19.2	7.7	3.8
녹색해운항로 파트너십 확대 추진	0	0	0	7.7	11.5	80.8
전체	100	100	100	100	100	100

자료: 저자 작성

〈그림 3-20〉 그린 암모니아 추진 선박 활성화를 위한 정책 우선순위(1~6순위 종합)
(n=26, %)



주: 1순위 응답 6점, 2순위 응답 5점, 3순위 응답 4점, 4순위 응답 3점, 5순위 응답 2점, 6순위 응답 1점의 가중치 부여, 전체 대비 해당 응답의 비중을 산출한 결과임
자료: 저자 작성

제4절 소결

우리나라는 국내에서 암모니아를 생산하지 않고 전량 수입하고 있으며 그린 암모니아 역시 국내에는 생산 계획이 없다. 이는 정부 계획이 암모니아를 주로 해외 수소 도입의 운반체로 고려하고 있기 때문이다. 또한 그린 암모니아의 국내 생산 동인이 약한 또 다른 이유는 생산 시에 대규모 투자 비용이 필요한 반면에 정확한 수요처가 없다는 것이다. 뿐만 아니라 정책적으로도 발전 연료 부문에서는 그린 암모니아의 활용 계획이 수립되고 확정적인 수요가 설정된 것에 비해 선박 연료 부문에서의 그린 암모니아의 활용 계획은 구체적이지 않다.

국내의 법·제도에서도 친환경 선박의 건조를 지원하기 위한 친환경 인증 선박에 대한 보급지원 사업이 있으며, 저인화점 연료 선박 규칙을 개정하는 등 암모니아 연료를 사용하는 선박에 대한 내용이 점차 마련되고 있다. 그러나 선박 연료로서 그린 암모니아를 공급하는 것에 대한 법·제도는 부족한 실정이다. 현행법상의 암모니아는 선박 연료가 아닌 산업용으로서 「화학물질관리법」, 「위험물안전관리법」, 「산업안전보건법」 등에서 관리되고 있기 때문에 암모니아 병커링 시범 사업은 규제 특례를 통해서 진행되고 있다. 또한 그린 암모니아의 청정성을 확인할 수 있는 기준도 미비하다.

인프라의 경우에도 「청정수소 생태계 조성방안」을 이행하기 위해 암모니아 유통 인프라 구축을 추진함에 따라 저장·인수 시설은 더 확대될 것으로 보인다. 또한 정부는 기존의 항만에 있는 저장 인프라를 활용하여 선박 연료용 암모니아의 공급을 추진하는 동시에 항만 개발 단계에서 암모니아·수소의 저장 및 활용 시설을 마련할 계획이다. 또한 2030년까지 울산항에 21만 톤의 암모니아 저장탱크, 여수·광양항에 청정 암모니아 인수기지를 구축할 계획이다.

본 연구에서 실시한 전문가 대상 설문조사 결과에 따르면 암모니아는 2040년부터 주요 선박 연료로서 사용될 가능성이 높은 것으로 나타났다. 선사 관계자들은 모두 향후 15년 이내에 암모니아 추진 선박을 도입할 계획이라고 응답하였다. 또한 그린 암모니아 추진 선박 전환 시기에 대한 응답 비율은 2030년(42.3%)이 가장 높았다. 그리고 그린 암모니아 선박 연료의 적정 도입 시기는 2040년이 가장 높은 응답률(59.1%)을 보였으며, 2030~2040년 도입이 전체 응답자의 86.4%를 차지했다. 이를 통해 그린 암모니아 선박 연료의 활용은 2030년부터 시작하여 2040년에는 활성화될 것으로 판단된다.

현재 국내의 법·제도적인 준비 정도에 대한 전문가들의 평균 점수는

2.52점으로 미비한 것으로 나타났다. 2030년에는 4.92점으로 보통 수준이며, 2040년에는 7.69점으로 어느 정도 준비되어 있으나 제도 정비가 진행될 것으로 전망됐다. 또한 현재 국내의 패널티 및 규제 강도는 2.21점에서 2040년에 6.67점으로 강화될 것으로 판단했다. 그러나 인센티브 및 보조금 제도는 현재 1.52점으로 매우 낮으며, 2040년에도 5.76점으로 보통 수준으로 전망하였다. 이는 해운 분야에서 환경 규제가 강화되는 것에 대비해 재정적 유인책이 뒷받침되지 못할 가능성이 있다는 것을 나타낸다.

전문가들은 국내의 그린 암모니아 생산 기술의 준비 정도를 현재 3.94점으로 실험 개발 단계로 판단했으며, 2030년에는 5.37점으로 개발 단계, 2040년에는 6.97점으로 실증 도입 전 단계로 전망했다. 국내 암모니아 병커링 기술의 준비 정도는 현재 6.23점으로 예상된 환경 하에서 기술 실증이 가능하다고 판단했다. 또한 2030년은 7.67점으로, 기술적인 준비가 완료되고 제한적 적용이 가능한 상태이며, 2040년은 9.3점으로 상업화가 가능할 것으로 전망하였다. 또한 암모니아 추진 선박의 기술 준비 정도는 현재 4.55점으로 평가했으며 2030년에 6.4점으로 판단했다. 2040년에는 8.25점으로 상업적 적용이 가능하다고 판단하였다. 이와 같이 전문가들은 기술적 준비 정도와 관련하여 병커링 기술의 준비 정도 수준을 가장 높게 평가했으며, 생산 기술 준비 정도를 가장 낮게 평가하였다.

한편 전문가들은 현재 그린 암모니아 추진 선박의 도입에 따른 애로사항의 1순위를 ‘기술적 불확실성’(51.9%), ‘연료 비용 부담’(37.0%), ‘연료 공급망 부족’(11.1%) 순으로 응답하였다. 반면 2030년 애로사항의 1순위는 ‘연료 비용 부담’(44.4%), ‘연료 공급망 부족’(29.6%), ‘기술적 불확실성’(22.2%) 순으로 응답하였다. 이는 시기별로 정책의 중점 분야가 달라져야 한다는 것을 보여준다.

또한 그린 암모니아 추진 선박의 도입과 확산을 위해서는 그린 암모니아

선박 연료에 대한 혜택 제공, 연료 공급 인프라 구축, 그린 암모니아 선박 연료의 안정성 확보, 탄소배출 규제 강화, 법·제도의 정비, R&D 지원 등이 필요하다고 응답하였다. 그리고 그린 암모니아 추진 선박의 활성화를 위한 정책 우선 순위는 선박의 탄소배출 규제 강화(22.2%), ‘연료 공급·병커링 인프라 구축 및 지원’(20.9%), ‘그린 암모니아의 가격 경쟁력 확보를 위한 보조금·인센티브 지원’(19.0%), ‘선박 전환 투자 보조금·인센티브 지원’(18.7%) 순으로 나타났다.²³⁶⁾

236) 정책 우선순위는 1~6순위에 가중치를 부여해 산출한 결과이다.

04

국내 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 영향 요인 분석

암모니아는 전통적으로 대부분 비료의 원료로 소비되어 왔으나 근래에 들어 2050 탄소중립을 달성하기 위한 대체에너지 측면에서 전력 생산을 위한 대안으로서 활용 영역을 확대하고 있다. 최근에는 해운 분야에서도 선박의 대체연료 중 유력한 후보로 인식되고 있다. 이러한 인식이 친환경 선박 및 벙커링과 관련한 제도 등에서 선연적으로 반영되고 있으나, 암모니아를 위시한 이른바 대체연료의 본격적인 도입 및 확대 시점이 얼마 남지 않은 지금에도 이에 대한 준비는 구체화되지 못하고 있다.

2050 탄소중립을 달성하기 위한 온실가스 감축경로에서 혁신적인 미래 기술, 즉 배출제로 기술 또는 NEZ 기술로 평가되는 수소, 암모니아, 메탄올, 바이오 연료 및 이들을 적용한 기술에 의한 획기적인 감축은 필수적이다. 이들 미래기술의 도입 및 확산이 본격화될 것으로 예측되는 2030년 전후 시점을 앞두고 이 중 ‘그린 암모니아’는 선박의 연료로서의 사용 가능성이 가장 앞선 후보군으로 평가되고 있다.

본 장에서는 미래 정책 메커니즘의 안정성 평가를 위해 분석도구를 선정하고 이에 따른 평가모형을 구성한다. 이어서 미래의 해당 메커니즘을 현

실에 가깝게 모사한 시스템을 시뮬레이션하여 그린 암모니아를 선박 연료로 사용하기 위한 생산-공급 및 저장-활용 등을 포함하는 전체 메커니즘을 설정하였다. 또한 이 메커니즘의 안정성 제고 및 확산 가능성과 연관된 주요 영향 요인들을 도출하고 이들의 중요성을 평가하였다.

제1절 미래 정책 메커니즘의 안정성 평가를 위한 분석도구 —

1. 시스템 다이내믹스의 개요

시스템 다이내믹스는 1950년대 말 Jay W. Forrester가 제안한 동태적 거시모형 기법으로 시스템의 사고(Systems Thinking) 및 피드백(Feedback) 구조를 기반으로 한다. Forrester(1961)는 시스템 다이내믹스의 초기 형태인 'Industrial Dynamics'를 산업 활동에서 정보 피드백의 특성과 조직구조, 정책의 증폭, 시간의 지연 등이 상호작용하여 기업의 성과에 어떻게 영향을 미치는지 연구하는 것이라고 밝힌 바 있다. Sterman(2000)은 시스템 다이내믹스를 '복잡한 시스템의 구조와 동태를 이해하기 위한 관점이자 개념적 도구의 집합'으로 정의하고, 기업·사회·환경 등 다양한 복합 시스템을 모델링하는 데 매우 유용하다고 지적하였다. 특히 Sterman(1994)은 현실에서 관찰되는 복잡한 거동(Complex Behavior)이 단순히 시스템의 외부로부터 비롯된다기보다 내부적으로 존재하는 피드백의 루프와 시간 지연(Time Delay), 비선형성(Nonlinearity) 등의 상호작용에서 기인하는 것으로 설명하고 있으며, 이는 시스템 다이내믹스가 내재적인 구조 및 이들 구성 요소 간의 환류에 집중한다는 이론적 특성을 잘 보여준다.

회귀분석 등 전통적인 분석도구들은 주로 종속변수와 독립변수 간의 일방적 관계 구도에 기반하고 있는 데에 반해, 시스템 다이내믹스는 양방향 피드백(Feedback loop)의 루프구조를 바탕으로 시간적 지연(Delay) 등의 동태적 메커니즘을 동시에 고려함으로써 실제 현실에서 반복적으로 발생하는 순환적인 인과 구조를 모사할 수 있다. 특히 단순한 정적(Static) 모형이 아니라 시간의 흐름에 따라 상태변수(저량; Stock)와 흐름(유량; Flow)이 변화하는 과정을 모사함으로써 초기 조건에서 시작된 시스템이 어떻게 비선형적 혹은 지연효과에 의해 발전해가는지를 추적·분석할 수 있다. 이러한 과정을 통해 다양한 시나리오(정책적인 대안, 외부 충격, 제도 및 환경의 변화 등)를 가정하고 이를 반영하는 시뮬레이션을 수행하여 결과의 민감도를 분석할 수 있다.

이러한 도구적 특성으로 복잡한 현실 세계를 모형화함에 있어서 기존의 단순한 일대일 인과관계가 아닌 다중 인과관계와 순환적 루프 관계를 포착·반영한다. 이를 통해 다양한 가정 및 시나리오에 제시된 동태적 변화를 시뮬레이션하여 정책의 도입·변화 또는 환경조건의 변화 등에 따른 영향을 사전적으로 평가함으로써 잠재적인 위험과 기회요인을 식별·진단할 수 있다.

2. 인과지도 및 모형의 구성

인과지도(Causal Loop Diagram; CLD)는 분석하고자 하는 시스템을 구성하는 핵심 변수들과 이들 간 인과관계의 방향(+/-)을 화살표로 연결해 도식화한 결과물이다. 양(+)의 인과관계는 원인 변수의 변화에 결과변수가 같은 방향성의 변화를 보이는 경우, 음(-)의 인과관계는 반대 방향의 변화를 보이는 경우를 의미하며 변수들 간의 원인과 결과를 순환적으로 연결함으로써 피드백 루프 구조를 시각화할 수 있다.

이를 설계하기 위해서는 우선 분석하고자 하는 문제를 명확히 설정하고 이를 설명하는 주요 변수들을 식별·선정하여 이른바 ‘시스템’을 구성한다. 이어서 식별된 변수들 사이의 인과관계, 즉 영향의 유무, 방향성을 파악하고 이를 시각화함으로써 인과지도를 구성할 수 있다.

시스템을 구성함에 있어서 현실의 구조를 전체적으로 반영하기에는 구조가 매우 복잡할 수 있다. 따라서 모듈화(Modularization) 또는 하위 시스템으로 분할하여 상위 레벨(전략 수준)과 하위 레벨(구체적 운영 수준)로 나누어 보다 실제적인 구조를 설계할 수 있다. 이어서 이를 구성하는 변수의 시스템 내부 축적(Accumulate) 특성과 지연(Delay) 특성을 반영하여 저장(Stock) 및 유량(Flow) 모형을 구성한다. 그리고 정책적인 대안 및 외부요인 등에 의한 시나리오의 시뮬레이션을 통해 저장과 유량, 그리고 전체 지표가 어떻게 변화하는지 확인할 수 있다. 또한 이 과정에서 민감도 분석(Sensitivity Analysis)을 통해 어느 변수에 정책이 가장 민감하게 반응하는지 식별할 수 있다.

제2절 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘 분석 —————

1. 시뮬레이션 모델의 구조 설계

가까운 미래에 구체화될 ‘선박 연료 용도의 대체에너지, 그린 암모니아의 생태계’는 정책-제도-시장-기술-인프라가 동시에 준비되고 빠른 시간 안에 성숙되어야 작동하는, 일종의 다변수의 복합 메커니즘이다. 정책은 주요 신호를, 기술은 비용과 안전성을, 인프라는 접근성과 신뢰성을, 제도는

규정 준수의 경계를, 시장은 실제 확산의 속도와 규모를 규정한다. 이러한 요소들은 상호독립적으로 움직이지 않고 피드백(Feedback)·지연(Delay)·비선형성(Nonlinearity)을 수반하는 내생적인 상호작용을 통해 ‘강화’ 또는 ‘균형’의 순환고리를 형성한다. 미성숙한 메커니즘을 사전에 설계·진단·보정하려면 거동을 외생 충격이 아니라 구조로 설명하는 체계적인 방법론이 필요하다.

앞서 살펴본 바와 같이 시스템 다이내믹스는 인과지도를 활용하여 이해관계자들과 시스템 구성 인자들의 인과관계를 시각화함으로써 복잡한 현실 세계의 현상 및 문제를 모형화하는 데에 매우 유용하다. 또한 주요 인자 및 외부 충격요인에 의한 다양한 경우의 수를 가정한 시나리오를 가정·반영한 시뮬레이션을 통해 주로 사전적인 평가 및 검토에 매우 적합한 도구적 특성을 가지고 있다. 따라서 앞서 동향 및 현황에서 살펴본 바와 같이 암모니아의 경우 현재 선박 연료의 활용을 확정적으로 기대하고 있을 뿐 이를 위한 구체적인 계획이나 물리적인 준비가 마련되지 않은 상황이다. 따라서 가까운 미래에 등장할 것으로 예상되는 ‘선박 연료로서의 그린 암모니아’의 생산-저장-활용 등의 전방위적인 접근은 이러한 메커니즘의 안정적인 도입 및 운용, 그리고 확산의 가능성 등을 논하기에 매우 적절한 분석도구라 할 수 있다.

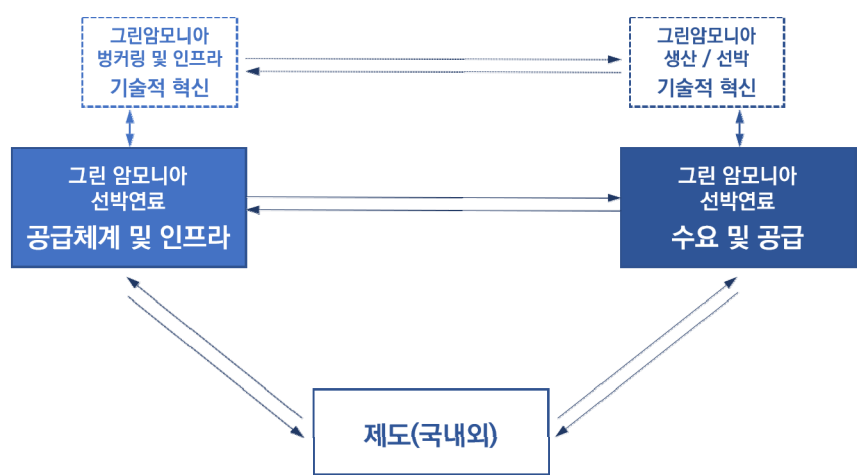
1) 그린 암모니아 선박 연료의 수요-공급-활용 메커니즘의 식별

본 연구는 2050 탄소중립을 구현하기 위한 배출제로 개념의 대안 에너지와 이를 위한 혁신적 기술의 역할이 요구되고 있는 상황에서, 이에 따른 ‘선박 연료로서의 그린 암모니아’의 수요 증가에 대응하기 위한 공급 및 충전, 인프라의 준비, 제도적인 준비, 그리고 기술적인 준비 및 혁신 등 주요 인자의 동학적인 상호작용을 분석한다. 이로써 해당 시스템의 안정적인 도

입 및 운용, 확산 등에 영향을 미치는 요인 및 영향의 정도 등을 식별하기 위한 작업으로 이해할 수 있다.

이를 위해 본 연구의 시뮬레이션 모형은 그린 암모니아 선박 연료의 사용을 위한 생태계 구축과 안정적 운용에 대한 제도적인 준비 정도와 기술적인 준비 정도를 고려하여 공급 및 수요량을 전망하였다. 시간적인 범위는 현재, 즉 2025년부터 탄소중립의 목표 연한인 2050년까지로 설정하고, 정량적인 분석을 위한 상태변수(저량; Stock)와 흐름(유량; Flow)에 대한 데이터는 선행연구 및 주요 보고서 등의 문헌 조사, 그리고 선별된 분야별 전문가로 구성된 자문회의 및 심층 인터뷰, 그리고 이들에 대한 설문조사 결과를 활용하였다. 이를 통해 향후 선박 연료 용도의 그린 암모니아 시장 수요 전망, 정부 주도의 공급 가능 규모 전망을 토대로 공급과 수요의 격차를 최소화할 수 있는 영향 변수들을 선별하여 배치하였다.

〈그림 4-1〉 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 개념모형



자료: 저자 작성

2) 핵심 영향요인의 구성

(1) 수요 전망

에너지 시장의 메커니즘에서 수요 및 공급은 메커니즘의 동태를 결정하는 기본 요인이다. 특히 탄소중립을 위한 재생에너지 생태계의 구성 또는 대체에너지로의 전환이라는 메커니즘에 대한 주요 문헌에서 ‘수요의 창출 및 확대’, 그리고 ‘공급 및 인프라의 준비’, 나아가 이들의 동시 충족을 가장 핵심적인 영향 요인으로 제시하고 있다.

H2Global(2023), IRENA(2024), Lambert et al.(2024)은 미래의 대체연료인 수소, 암모니아, 메탄올 등에 대한 시장 메커니즘의 형성과 본격적인 운용을 위한 가장 중요한 전제로 시장 초창기의 수요 형성, 나아가 수요에 대한 확정적인 신호가 필수라는 것을 지적하고 있다. IEA(2023a; 2023b), IPCC(2022), REN21(2024)은 정책 신호가 에너지 수요를 유인·유발하고, 이로 인해 연계적인 투자·공급사슬이 본격적으로 작동한다는 것을 시나리오로 제시하고 있다. 특히 전동화가 확대되면서 전력 수요가 급증하는데 이에 따른 전력 그리드 및 인프라의 확충이 동반되지 않으면 저탄소의 전력 공급이 수요에 대응할 수 없다고 보았으며, 나아가 그리드의 구축 및 확장이 에너지의 전환 속도와 비용을 좌우한다고 지적하고 있다.²³⁷⁾

선박 연료로서 그린 암모니아의 수요(Shipping Fuel Demand)는 해운사 또는 선주가 기존의 선박을 교체하기 위한 대체에너지 방식으로 암모니아를 선택할 가능성을 고려한 잠재적 수요와 미래의 전망 정도로 규정할 수 있다. 이는 기존의 연료 및 여타 대체에너지(수소, 메탄올, LNG 등)의 가격 및 기술적 우위 정도, 국내·외 관련된 규제의 강화 정도의 요인에 의

237) IEA(2023b) p. 4.

해 결정될 수 있다. 또한 가격(Price of NH₃ Fuel)은 수요와 공급의 상호 작용으로 결정되는 ‘시장 가격’이므로 재생에너지와 관련된 투자의 확대, 생산 및 사용 등에 대한 정부의 보조금과 더불어 ‘생산 비용(LCOA)’ 정도의 요인들이 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 생산비용은 생산에 소요되는 전력 비용, 수소 생산 비용(전해조 CAPEX), 그리고 질소 분리 등 전체 공정에서의 단위 비용으로, 시간의 경과에 따라서 변화하는 유량(Flow)적인 특성으로 이해할 수 있다.

(2) 공급 예측

앞서 살펴본 바와 같이 수요 신호가 확정되면 가장 핵심적인 영향 요인인 ‘공급’ 영역의 메커니즘은 선박 연료로 사용할 수 있는 그린 암모니아의 생산 또는 국내의 수입 규모, 이를 저장·처리·배분하기 위한 항만의 벙커링 시설(Bunkering Facility), 항만 내·외 운송·배관 인프라(Transportation Infrastructure) 등의 물리적 준비 등에 의해 결정될 수 있다. 생산 및 수입 등의 방법으로 확보되는 공급량 또는 잠재적인 최대 용량, 그리고 선박 연료로 사용하기 위한 그린 암모니아의 물리적인 공급체계 및 인프라의 구축·준비 정도로 구성하였다.

우선 선박 연료의 용도로 사용할 그린 암모니아의 생산 능력(Production Capacity), 수입 규모는 저량(Stock)적인 특성으로, 태양광·풍력 등의 재생 에너지를 이용해 수소를 생성하고 이를 질소와 결합해 암모니아를 합성하는 공정의 특정한 시점에 대한 총 생산 설비의 용량, 그리고 재생에너지를 기반으로 한 그린 암모니아의 국내 수입 규모 정도로 규정할 수 있다. 이는 다시 암모니아의 생산 능력에서 비료 및 전력 생산 등의 특정 수요를 제외한 선박 연료로 사용 가능한 잠재적 생산-공급 규모 등의 영향 요인으로 구체화할 수 있다.

(3) 제도적 준비

국내·외와 관련한 규범 및 제도 측면의 메커니즘을 구성하는 주요 하위 변수들은 크게 국제해사기구(IMO) 및 국제규제의 수준, 국내의 관련된 법·제도의 준비 정도, 표준화 및 안전 규정의 준비 정도로 구분할 수 있다. 우선 국제해사기구(IMO) 및 국제규제의 수준은 선박에 대한 온실가스 및 NO_x, SO_x 등의 배출에 대한 규제, 안전 기준 등의 배출에 대한 직·간접적인 규제의 수준, 화석연료(LNG, 디젤 등)와 대비하여 저탄소 또는 무탄소 연료(그린 암모니아 등)의 가격 경쟁력을 높이는 정책 수단인 탄소세·환경세(Carbon Tax, Environmental Levy)의 도입 등으로 파악할 수 있다.

국내의 관련된 법·제도(National Legislation)의 준비 정도는 국제 규제와 궤를 같이 하는 규제적인 조치, 그리고 이와 반대 방향인 재생에너지의 의무공급제도(RPS), 신재생에너지에 대한 투자 보조금, 항만의 안전 기준, 산업계의 인증(ISO 등) 등 선박의 연료로 암모니아 선택을 촉진하거나, 운용 시 비용을 절감할 수 있는 제도적인 지원 정도로 요약할 수 있다. 특히 후자에 해당하는 국내의 법제를 확충하는 경우에는 국가별 차이로 인해 글로벌 선사의 도입 및 운용 확대 속도에 영향을 미칠 수 있다. 표준화 및 안전 관리 규정(Standardization & Safety) 등의 준비 정도는 암모니아를 선박의 대체연료로 사용하기 위해 선행적으로 필히 마련되어야 하는 부분, 즉 암모니아의 독성, 누출·폭발의 위험 등에 대한 관리 규정 및 설계·운영 표준(탱크 내장재, 센서 기술, 비상대응 지침 등), 이를 위한 상위 법제의 마련 정도로 정의할 수 있다. 이는 필히 선행하여 마련해야 하는 사항들로, 도입하기 전 또는 초기 단계에서 지연된다면 시장으로의 보급 자체가 정체될 가능성이 있다.

(4) 기술적 준비

기술적 준비 영역은 유력 대체연료로서 그린 암모니아를 선박 연료 용도로 사용하기 위해 요구되는 ‘기술적인 혁신’ 및 이를 통한 ‘기술적 역량의 성숙’ 정도로 규정할 수 있으며, 이 역시 가까운 미래에 형성될 수요-공급이라는 메커니즘의 동태를 결정하는 주요 요인으로 작동한다.

EMSA(2024), IRENA/AEA(2022)는 암모니아 생태계의 본격적인 운용을 위한 기술적인 역량 및 준비가 성숙되지 않은 상태에서는 시장 초기의 수요 형성을 저해할 수 있으며, 이는 장기적인 구매계약과 같은 수요의 확정 신호를 지연시키고, 나아가 생산 및 공급 프로젝트 역시 지연시킬 수 있음을 지적하고 있다. 이러한 우려는 해운 분야의 탈탄소 과정에서 그린 암모니아 연료의 시장 진입 속도를 저감하는 동시에 암모니아 선박의 선택에 장애요인으로 작동할 수 있다. DOE(2023) 역시 수소 생태계에서 기존의 에너지를 전환하려는 시나리오에 부응하기 위해서는 선행적으로 생산, 공급 및 저장·충전, 산업적 활용 등 전과정에서 기술적인 성숙이 요구된다고 하였다. 이러한 전제에서 생산 및 공급단가의 하락, 저장 및 충전 인프라의 구축, 산업 및 운송 등 실제 수요부문에서의 실사용 전환과 같은 연계적인 실행을 기대할 수 있음을 지적하고 있다.

이러한 기술적인 측면의 준비 정도를 반영하기 위한 영향 요인은 크게 두 가지 경로에서 파악할 수 있다. 우선 생산 및 공급, 그리고 이와 연계한 가격에 영향을 미칠 수 있는 생산 및 공급체계 및 방식, 저장 및 처리 등을 위한 기술의 혁신 및 발전, 그리고 이와 별개로 암모니아 추진 선박의 수요를 결정할 수 있는 선박 기술 자체의 혁신적인 발전 및 성숙도 정도로 구분하여 파악할 수 있다.²³⁸⁾

238) 현재 암모니아 추진 선박의 유력한 추진 방식은 혼소 및 전소방식의 엔진 기술의 성숙도로 파악할 수 있으나, 전소방식에서도 아직은 점화를 위해 일부 화석연료의 블렌딩이 요구되어 배출제도가 아닌 NEZ로 구분해야 하며, 추후 기술적인 혁신을 통해 배출제로에 수렴해야 할 것으로 보인다.

2. 인과지도의 도출

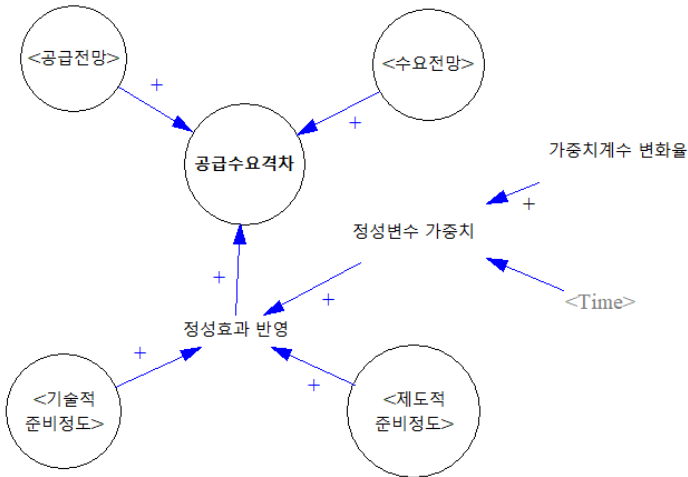
앞서 제시한 바와 같이 선박 연료에 사용하기 위한 그린 암모니아 생태계의 구축 및 안정적 운용에 영향을 미치는 요인들을 바탕으로 인과지도를 구축하였다. 다음과 같은 인과지도를 구축하여 수요 및 공급, 기술적인 준비, 제도적인 준비 영역에서 주요한 피드백 루프를 발견하였다.

1) 상위 인과지도

상위 메커니즘(상위 레벨의 요인)을 시뮬레이션하기 위한 상위 지도는 ‘공급-수요 격차(공급-수요)’를 종속 변수로 삼아 이를 결정하는 ① 수요 및 ② 공급, ③ 제도(국내·외), ④ 기술 영역에 대한 개별 하위지도의 결과값을 고려하였으며, 수요의 전망, 공급의 예측과 같은 정량적인 수치와 기술적·제도적 준비 정도 등을 반영하는 정성적인 수치를 종합하여 인과지도를 구축하였다. 제시한 모형에서 향후에 작동하게 될 전체 시스템(시장)의 불균형 정도를 나타내는 ‘공급-수요의 격차’는 루프를 작동시키는 결과적인 종속 지표로서, 이를 결정하는 핵심 변수들은 수요 전망, 공급 예측, 기술적인 준비 정도, 제도적인 준비 정도의 영역, 그리고 이들을 시스템에 반영하기 위한 정성 변수의 가중치, 정성 효과를 반영한 변수의 정도로 구성된다.

이 과정에서 ‘정성 효과의 반영’에 대한 변수는 계량이 어려운 ‘기술적 준비 정도’와 ‘제도적 준비 정도’와 같은 정성적인 평가 결과가 실제로 시스템에 미치는 영향의 크기를 종합하여 산출한 변수로, ‘정성 변수의 가중치’는 시간에 따라 두 가지의 준비 정도 중 어느 것을 더 중요하게 고려할지를 결정하는 동적인 가중치 역할을 수행한다. 이는 시장의 발달 단계에 따라 정책의 우선순위가 변화하는 현실을 반영하기 위함이다.

〈그림 4-2〉 상위 인과지도



자료: 저자 작성

‘수요 전망’은 선박 연료로서 활용될 그린 암모니아의 미래 예상 수요량을 보여주는 저량(Level)적인 변수로, INTEG 함수를 통해 시간에 따른 순 수요 증가량이 누적되어 계산된다. 수요의 확산은 가격에 대한 반응, 친환경/암모니아 선박의 도입 등 다양한 요인의 영향을 받으며, 이는 시장의 성장과 관련하여 직접적 요인으로 작동한다.

‘공급 예측’은 생산 및 수입 등에 의한 그린 암모니아 공급의 가능량, 특히 선박에 사용가능한 총량을 예측하는 내생 변수로, 수입의 목표 및 저장 용량 등 현실적인 제약이라는 조건 하에서 시장이 성장하는 패턴을 반영하기 위해 로지스틱 함수(Logistic Function)를 기반으로 한 S자형 성장 곡선으로 구현하였다. 이는 시장의 잠재적 한계에 수렴해가는 공급의 동태적 특성을 나타낸다.

‘제도적인 준비 정도’는 선박 연료로 사용할 수 있는 그린 암모니아의 도입 및 확산을 지원하는 규제 및 보조금, 인센티브 등 제도적인 기반의 준비

수준을 나타내는 지표로, 국내·외의 규제 및 재정적인 지원 제도 등 여러 하위 정책 변수들을 가중합하여 산출되며, 시장의 불확실성을 감소시키는 동시에 시장의 주요 동력인 수요 및 공급의 성장을 촉진하는 핵심적인 외부 요인으로 작동한다.

‘기술적인 준비 정도’는 그린 암모니아를 선박 연료로 사용하기 위한 전 과정에서 이를 혁신하고 구현하기 위해 이와 관련된 기술이 상용화에 도달한 수준을 나타내는 종합적인 지표로, 문헌 조사를 통해 수집된 개별적인 영역의 기술성숙도와 이를 바탕으로 전문가들이 평가한 기술적인 준비 정도로 누적·종합한 저장(Level) 변수로 처리되었다. 이 역시 공급망의 효율성, 나아가 시스템 전체의 형성 및 운용의 안정성을 결정하는 핵심적인 외부 요인으로 작동한다.

2) 수요 및 공급

선박 연료 용도인 그린 암모니아의 수요를 결정하는 주요 하위 변수들은 암모니아 선박의 수요, 가격적인 요인, 이와 관련한 제도적인 요인, 유력한 대체연료와 대비한 그린 암모니아의 경쟁력 등으로 이들의 상호 영향 관계를 구성하였다. 그린 암모니아 연료의 가격은 생산 단가, 정부의 보조율, 그리고 국내·외 장려제도의 수준을 종합적으로 반영하여 산정하였으며, SMOOTH 함수를 적용하여 급격한 가격 변동성이 완화되도록 구성하였다.

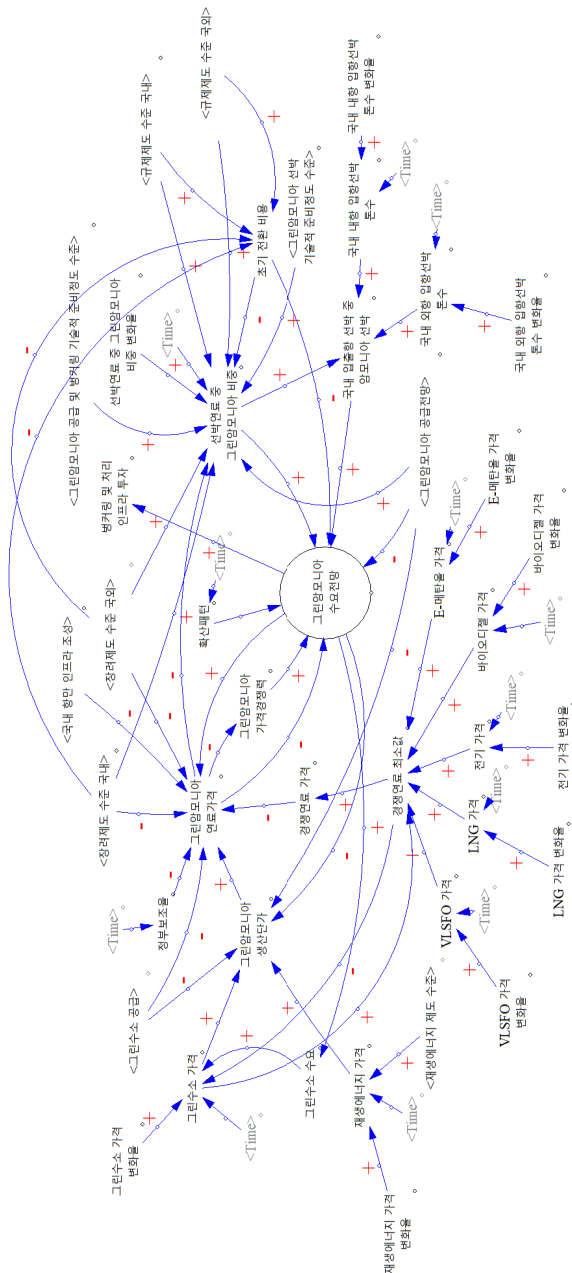
경쟁 연료 가격의 경우에는 유력한 대체연료 후보군인 디젤, LNG, VLSFO, 바이오 디젤, 그린 수소, 전기 중 단가가 가장 낮은 값을 산출하는 방식(MIN 함수)을 적용하였고, 역시 SMOOTH 함수를 활용하여 시장의 변동성을 완충하여 예측의 신뢰성을 높였다. 또한 개별적인 경쟁 연료별로 가격 변화율 및 시장의 전망치는 WITHLOOKUP(Time) 함수를 활용하여 연도별로 반영하였으며, 이로써 민감도 분석 및 장기적인 예측에서 외생

변수의 영향을 시계열적으로 평가할 수 있도록 하였다.

확산패턴 변수는 신기술의 시장 내 확산 속도를 동적으로 반영하며, WITHLOOKUP(Time) 함수를 이용하여 시간에 따라 변화하는 확산률을 체계적으로 구현하였다. 이로써 기술을 도입했을 때 나타나는 비선형적인 확산 과정을 시뮬레이션할 수 있도록 하였다. 입항 선박의 총 톤수 및 그 변화율은 매년 Time(연도)에 따라 동적으로 결정되는 수식 구조를 적용하였으며, 이러한 설정은 전체 수요를 전망하는 동태적 양상에 직접적이고 실질적인 영향을 미치도록 설계하였다.

정부 보조율이라는 변수는 IF THEN ELSE 함수 구조를 도입하여 국내·외 그린 암모니아와 관련한 제도의 주요 분기점 및 기준점인 2030년 전후부터 정책의 본격 시행에 따른 변화가 반영되도록 설정하였으며, 이에 따라 정책의 변화에 따른 시장의 영향력에 대한 변동성을 정량적인 형태로 반영하였다.

〈그림 4-3〉 수요 전망 영역 인과지도



자료: 저자 작성

이를 통해 확인한 인과관계는 규모의 경제에 의한 피드백 루프로, 우선 수요가 증가하게 되면 증가한 전체 시장에서의 경쟁과 규모의 경제에 의한 그린 암모니아의 생산 단가가 하락한다. 이에 따른 가격의 하락을 기대할 수 있으며, 이는 다시 암모니아를 이용한 선박의 증가, 궁극적으로는 다시 수요의 증가로 이어지는 강화 루프(Rainforcing loof)를 구성한다. 반면 제한적인 공급을 가정하면 수요의 증가에 따른 시장 가격의 상승 역시 가능하다. 이러한 경우 이에 따른 가격 경쟁력의 약화, 이는 다시 수요의 억제를 유발하는 균형루프로 나타날 가능성 또한 있다.

공급에 대한 예측 변수는 외부에서 주어지는 단순한 입력 값이 아닌 모형 내의 다양한 요인들에 의해 동적으로 결정되는 내생 변수(Endogenous Variable)로 설계되었다. 공급 시스템의 성장이 물리적, 정책적인 한계 등으로 인해 비선형적인 패턴을 보이는 현실을 반영하기 위해 로지스틱 함수(Logistic Function)를 기반으로 한 S자형 성장(S-shaped Growth) 패턴을 따르도록 구조화하였다. 이는 시장에 도입한 초기에는 성장이 더디다가 가속화된 후에는 특정한 잠재량에 수렴하며 성장이 둔화되는 과정을 모사한다.

아래의 인과지도에 나타난 바와 같이 공급에 대한 예측은 크게 공급의 잠재량(Potential), 성장 동력(Growth Engine), 그리고 하위의 공급망(Sub-chains)이라는 세 가지 범주의 요인들에 의해 복합적으로 결정된다. 공급에 대한 예측의 S자형 성장을 제한하는 상한선은 다음과 같은 현실적인 제약 조건들에 의해 결정된다. 본 모형은 MIN 함수를 사용하여 이들 중 가장 제한적인 요인을 공급의 최대 잠재량으로하여 동적으로 인식하도록 하였다.

공급 잠재량은 정책적인 목표, 물리적인 인프라를 고려한다. 정책적인 목표인 ‘그린 암모니아 수입의 목표 전망치’는 국가 정책에 의해 설정된 연

도별 수입의 목표값으로, 공급이 도달할 수 있는 정책적인 한계를 설정한다. 물리적 인프라를 나타내는 ‘국내 암모니아 병커링 저장 용량’과 ‘국내 암모니아 병커링 처리 용량’은 수입된 암모니아를 저장할 수 있는 물리적인 총 용량과 선박 연료에 사용할 수 있는 최대한의 처리 용량으로, 이는 공급망의 처리 능력을 제한하는 핵심적인 제약 요인으로 작용할 수 있다.

성장 동력은 모형 내에서 시장 매력도와 성장 변곡점에 의해 조절된다. 시장 매력도(가격 반응계수)에서 그린 암모니아 연료의 시장 가격은 공급자의 수익성에 영향을 미쳐 공급 투자를 촉진하거나 위축시키는 동인으로 작용하며, 이는 공급의 성장률을 가속시키거나 또는 감속시킨다. 성장 변곡점(Time)을 볼 때 본 모델에서는 2030년을 공급 성장이 가장 가속화되는 변곡점으로 설정하여 특정 시점을 기준으로 시장이 본격적으로 확대되는 동태성을 구현하였다.

하위 공급망은 간접적으로 영향을 줄 수 있는 제약 요인으로 작용한다. 그린 수소의 공급망에 의한 총 공급량은 그린 암모니아 생산의 핵심 원료인 그린 수소의 국내 생산 또는 수입량으로 규정하는 전체 암모니아 공급량의 근원적인 제약 조건으로 작용한다. 그린 수소 공급망의 성장은 자체적인 성장 루프를 통해 결정되며, 이는 상위 암모니아의 공급 시스템과 강력한 피드백 관계를 형성한다. 병커링 인프라(병커링 저장 및 처리 용량) 측면에서 최종 수요처 중 하나인 선박 연료 시장으로의 공급은 병커링 인프라의 용량에 의해 제한된다. 이는 전체 공급망의 말단에서 발생할 수 있는 특정 부문의 병목 현상을 나타낸다.

이 과정에서 수요의 증가로 인한 병커링 및 처리인프라의 투자 확대, 이에 따른 공급 능력의 향상을 기대할 수 있으며, 이는 다시 이용 선박의 증가로 이어지고 이에 따른 수요의 증가로 이어지는 등의 강화 루프(Rainforcing loof)가 발견된다. 또한 공급체계 및 인프라라는 메커니즘의

일반적인 인과관계는 병커링 및 이와 관련된 인프라의 구축 및 확충이 증가할수록 유통 비용이 감소하는 규모의 경제라는 효과를 기대할 수 있으며, 이는 다시 친환경 선박에 대한 암모니아의 공급에 대한 안전성을 제고할 수 있다. 또한 이는 다시 친환경 선박 교체에 대한 수요, 그리고 암모니아에 대한 연료 전환의 의사를 강화하는 강화 루프로 이어질 수 있다.

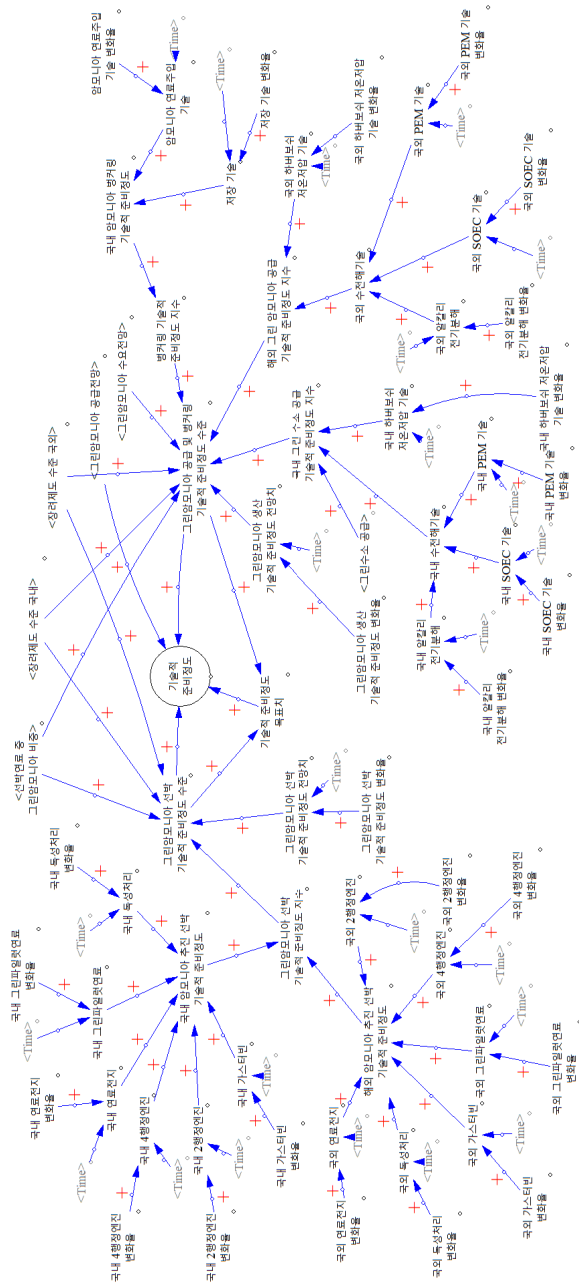
결론적으로 공급 예측 변수는 정책 및 시장, 저장·처리 인프라, 그리고 원료의 공급망 등 다차원적인 요인들의 상호작용에 의한 결과로 나타나는 동태적 변수이다. 따라서 이러한 인과적인 영향 관계는 성공적인 그린 암모니아 공급망 구축 및 운용을 도모하기 위해서 필요한 것이 무엇인지 설명해준다. 즉 그린 암모니아의 공급 또는 수입만을 일차원적으로 고려하는 정책보다는 원재료의 시장의 양상 및 수요 전망에 따른 수입 및 처리의 목표 설정, 인프라에 대한 투자, 이로 인한 가격의 동태 등을 다각적으로 반영하는 정책 포트폴리오가 상호 균형을 이루며 추진되어야 함을 시사한다. 특히 인과관계의 구조 내에서 나타난 제약적인 요인 중 가장 더디게 성장하는 부분이 전체 시스템의 성장을 저해하는 병목 요인으로 작용할 수 있음을 명확하게 보여준다.

3) 기술적 준비

기술적인 준비 영역은 수요 영역과 연계된 암모니아의 선박 기술, 그리고 공급 영역에 연계된 그린 수소·암모니아의 생산 및 공급 체계, 병커링 및 처리 기술의 성숙도 및 이를 바탕으로 평가한 기술적인 준비 정도의 정량값으로, 이는 복합적인 국내·외의 기술 요인들이 상호적 인과 구조에서 정의된다. 해당 구조 내에서 기술의 변화율/성장률은 개별적인 세부 기술의 연도별 준비 정도 수준의 증가율(성장 속도)을 의미하며, 현재의 개발 수준에서 목표치까지 도달하는데 필요한 시간과 노력을 추정하는 변수이다. 변화율이 높으면 시장의 확산 속도, 조기 상용화의 가능성, 이로 인한 협력의 기회 확대 등의 효과를 낼 수 있는 성장 촉진의 기제로 작동할 수 있으나, 저조한 변화율은 공급망 제약 및 시스템의 병목 등을 지속하는 결과를 초래한다(〈그림 4-5 참고〉).

이러한 구조에서 기술적인 수준의 결과값은 전체 시스템의 공급에 대한 안정성, 성장성에 대한 예측의 기반적인 변수로 활용되며, 각 하위 기술과 관련된 요소의 준비 수준을 통합적으로 반영하여 시나리오 별로 공급능력과 한계점에 영향을 미친다. 또한 공급 네트워크의 안정성과 확대로의 가능성, 그리고 이에 따른 대규모 실증 운영의 기반을 조성하는 측면에서 중요한 의미를 가진다. 따라서 전체 인과지도에서 나타나는 수요 및 공급이라는 메커니즘의 일반적인 인과관계는 기술 혁신을 위한 R&D 투자 규모의 확대, 이를 통한 기술 혁신의 과정을 통한 생산 효율의 증대, 이에 따른 생산 설비용량의 증가에 따른 규모의 경제로 이어지는 효과로 단위당 생산 비용이 감소하는 순환적 형태로 형성될 수 있다. 또한 이러한 과정에서 수요가 증가하면 암모니아 가격의 상승으로 이어질 수 있으나, 이는 동시에 설비 투자의 유인을 강화하여 장기적으로 공급의 확대에 기여하는 강화 루프(Reinforcing Loop)를 형성할 수 있다.

(그림 4-5) 기술적 준비 영역 인과지도



자료: 저자 작성

수요와 연계된 루프 역시 발견된다. 그린 암모니아 추진 선박에 실제로 사용되는 엔진, 추진시스템, 연료 공급·저장, 방벽 등 필수 설비의 기술적인 준비 수준이 향상하는 것은 제도적인 영역에서의 R&D 투자 규모의 확대, 암모니아 선박으로의 전환을 확대하기 위한 보조금 및 인센티브의 확대 등에 의한 결과로 나타난다. 이는 다시 암모니아 선박으로 전환하려는 수요의 확대, 이로 인한 운영의 최적화, 성능 및 안전 수준을 향상하기 위한 기술 수요의 확대를 기대할 수 있으며, 이는 다시 기술적인 준비 수준의 향상으로 이어지는 순환적 강화 루프로 나타난다.

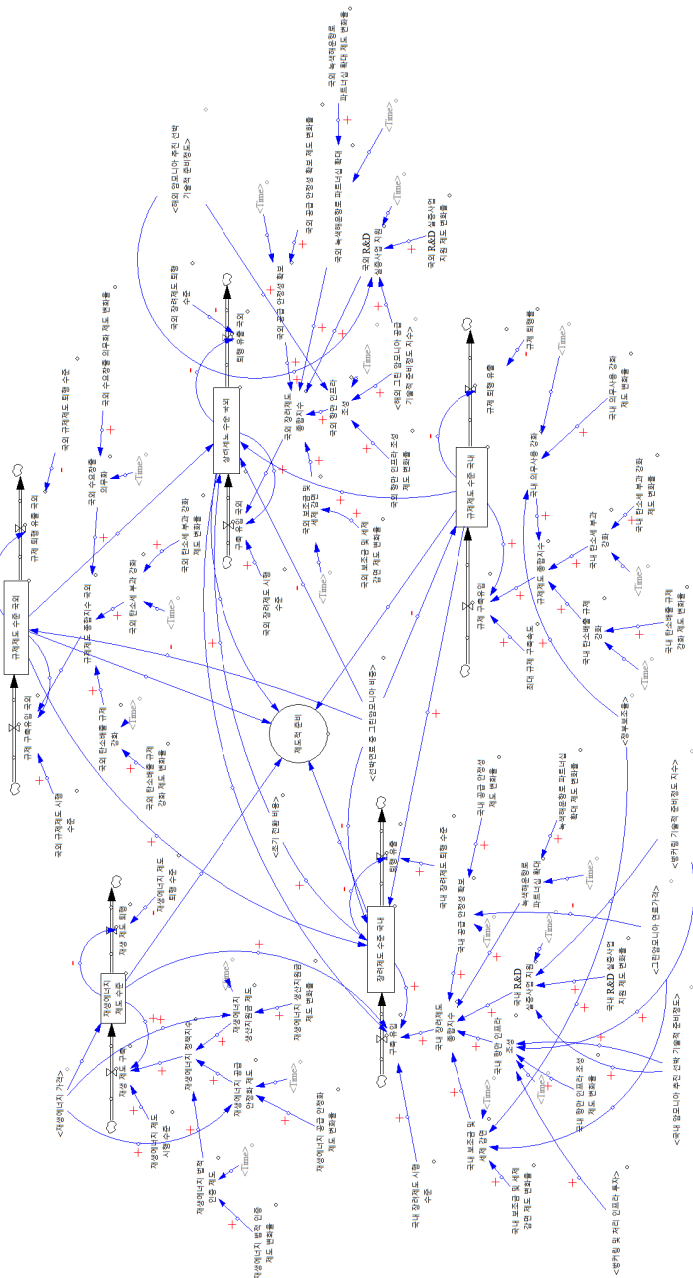
4) 제도적 준비

제도 영역의 인과지도는 선박 연료의 용도로 사용할 그린 암모니아 생태계의 기술·경제 환경의 변화에 의한 동태에 미치는 영향의 핵심적인 제도적 요인을 식별하고 시스템 전반에 대한 이들의 인과적인 영향구조를 시각적으로 나타낸 도식이다. 장려 제도는 정부의 보조금 지급, 세제 감면, 항만 인프라 지원 등 직접적인 경제적 유인책을 의미하며, 규제 제도는 의무적인 비율 설정, 벌칙 조항, 탄소세와 같은 강제적인 수단을 포괄한다. 이러한 제도는 각각 도입률(시행률), 적용률(현장 반영 수준) 및 이에 따른 개선 정도 등을 통해 실질적인 제도의 준비 수준으로 연결된다.

우선 제도 수준의 향상은 기술 영역에 대한 수준을 향상하기 위한 촉진의 기제로 작용한다. 암모니아 추진 선박의 기술, 병커링의 저장 및 연료 주입·처리 기술, 수소 생산기술(예: SOEC, PEM) 등에 대한 제도적인 지원, 즉 R&D 투자의 확대, 실증 사업으로의 참여 유도, 규제 완화 등은 수요-공급 구조의 전반에 대한 기술 수준의 향상을 유발하며, 이를 통해 수요와 공급의 확대를 기대할 수 있다. 이는 다시 새로운 규모 및 환경에 대응하는 새로운 제도에 대한 수요의 발생으로 이어지는 강화 루프가 발견된다.

또한 국제해사기구(IMO) 및 국제 수준의 규제, 그리고 규제와 관련되어 선행하였던 주요 국가 및 우리나라의 탄소세·환경세의 도입 및 강화 움직임은 규제 본연의 목적에 따라서 화석연료의 사용을 억제하는 동시에 상대적으로 무탄소 연료의 선택에 경제적인 유인을 제공하는 강화 루프를 형성할 수 있다. 또한 이러한 규제의 강화가 국내·외의 선사에게 초기 부담으로 작용하여 단기적으로는 비용 상승의 요인으로 작용할 수 있으나, 장기적으로 이를 타개하기 위한 혁신적인 기술의 개발-도입을 위한 투자와 제도적 지원의 확대를 유도하여 궁극적으로는 이른바 배출제로 또는 NEZ 개념의 선박 수요를 촉진하는 강화 루프를 형성할 수 있다.

〈그림 4-6〉 제도적 준비 영역 인과지도



자료: 저자 작성

3. 목표 지표에 따른 민감도 분석

1) 수요 대비 준비 정도

다음에서는 수요와 대비한 공급의 준비 정도에 대한 의의를 분석하기 위해 다음과 같이 두 가지 측면에서 이를 규명하였다.

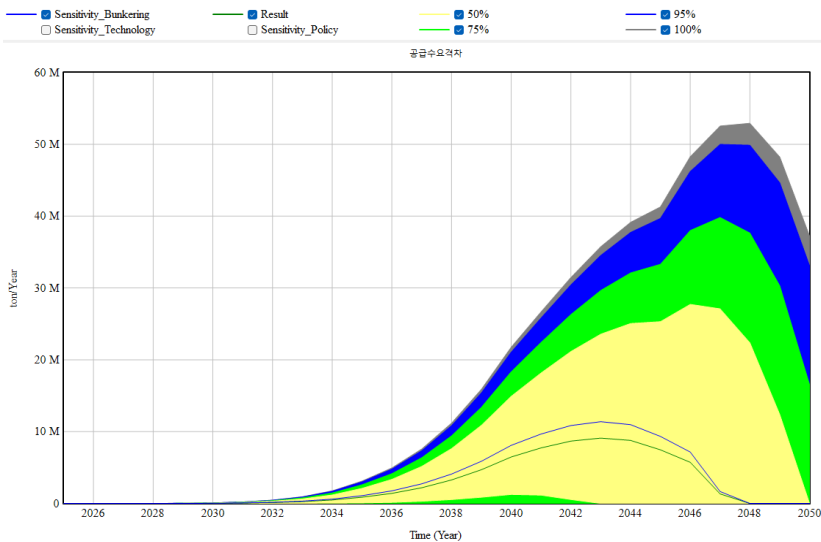
(1) 물리적 공급-인프라 체계

우선 그린 암모니아 공급망의 최종 확산 단계에서 발생할 수 있는 병목 현상에 대해서 선박 연료의 공급에 있어 핵심 인프라인 ‘병커링 인프라의 구축 수준’을 주요 변수로 설정하여 민감도 분석을 수행하였다. <그림 4-7>은 병커링 인프라 구축 수준이 공급-수요 격차에 어떤 영향을 미치는지를 나타낸 민감도 분석의 결과이다. 그래프의 밴드는 인프라 구축에 대한 수준별로 다양한 시나리오에서 공급-수요 격차의 양상이 어떻게 달라질 수 있는지를 보여주는 것이며, 밴드가 넓다는 것은 병커링 인프라 구축 정도에 따라 공급-수요 격차의 변동성이 크다는 것을 의미한다.

분석 결과 초기(2025~2035년)에서는 공급-수요의 격차(실선)가 0에 수렴하고 그래프 밴드의 차이가 없으므로 영향의 크기가 미미하다는 것을 나타낸다. 중기적인 시간 범위(2036~2044년)에서는 공급-수요의 격차(실선)가 증가하는 동시에 변동성을 나타내는 그래프의 밴드가 점차 넓어지고 있음을 확인할 수 있다. 이는 이 기간 동안 병커링 인프라 구축 수준의 변화가 공급-수요 격차의 변동성에 매우 크게 작용하는 것으로 이해할 수 있으며, 해당 기간 동안 병커링 인프라를 얼마나 빠르게, 얼마나 충분하게 구축하느냐에 따라 공급-수요의 격차를 줄일 수 있다. 그러므로 최소한 해당 시점 이전까지 병커링 인프라에 대한 본격적인 투자 및 확충이 필요하며, 이를 위한 기술의 지원 등은 이보다 더 선행적으로 이루어져야 한다는 것

을 시사한다. 장기적인 시간 범위(2045~2050년)에서는 공급-수요의 격차(실선)가 감소하고 있으나 그래프 밴드가 넓어지는 것으로 나타난다. 이는 공급-수요의 격차가 전반적으로 줄어들고 있음에도 병커링 인프라의 구축 수준의 변화에 따른 격차의 변동성이 더 커지고 있음을 의미한다. 즉 2045년 이후부터는 병커링 인프라의 구축 정도에 따른 격차의 영향이 공급과 수요의 격차에 매우 크게 작용할 수 있음을 시사한다.

〈그림 4-7〉 공급-수요 격차에 대한 인프라 구축 수준 민감도 분석



자료: 저자 작성

(2) 제도적 준비

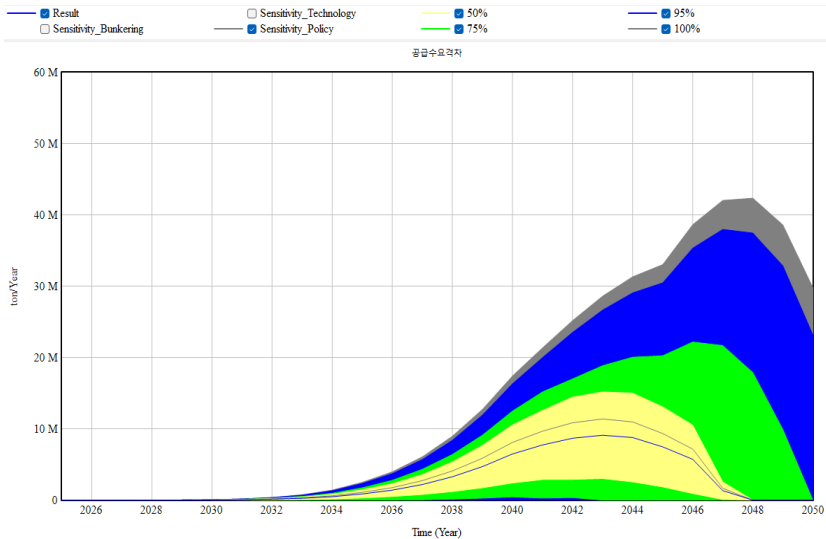
제도적인 준비 수준의 영향을 규명하기 위한 민감도 분석을 수행한 결과 초기(2025~2035년)에서는 공급-수요의 격차(실선)이 0에 수렴하고 있어 공급과 수요가 거의 균형을 이루고 있음을 확인할 수 있다. 또한 그래프의 밴드가 없으므로 제도적인 준비 정도의 변화에 따른 예측의 불확실성도 미미할 것으로 예측된다. 즉 정책 도구 등의 제도적인 요인보다는 시장의 기

본 여건에 의해 시스템이 안정적으로 유지되는 기간으로 이해할 수 있다. 2036~2044년 사이에서는 공급-수요의 격차가 서서히 증가하고 밴드의 넓이 역시 점차 넓어진다. 이는 제도적인 준비 수준이 공급-수요의 격차라는 동태에 상대적으로 매우 큰 변동성을 유발함을 의미한다. 즉 규제, 인센티브와 같은 정책 도구의 도입·강화 여부와 그 수준, 속도에 따라 격차의 증폭이 크게 달라질 수 있으며, 제도적 개입이 늦어지거나 그 수준, 즉 정책 성숙도가 향상하는 속도가 늦어질수록 격차가 더 크게 나타날 수 있음을 나타낸다.

2042~2045년은 밴드의 넓이가 가장 커지는 구간으로 공급-수요 격차의 변동성이 정점에 도달한다. 즉 해당 기간에는 제도적인 준비 수준의 차이에 따라 격차의 예측치가 큰 편차를 보인다. 이는 조기에 적극적인 정책 도구를 투입한다면 격차를 최소화할 수 있으나, 유효한 정책도구의 미비·지연 시에는 심각한 공급 부족의 문제가 발생할 수 있다는 것을 나타낸다. 시스템 내·외부의 충격·불확실성·정책적인 리스크가 최대로 반영될 수 있는 구간이라고 볼 수 있다.

2046~2050년 사이에서는 공급-수요의 격차가 급격히 축소되며 그래프의 밴드 또한 감소하여 변동성이 낮아진다. 이는 제도적인 준비 수준이 이미 일정한 수준 이상으로 달성되어 있고, 시장과 기술적인 측면의 요인 역시 이미 충분히 성숙되어 공급망이 빠르게 안정화된 결과로 해석할 수 있다.

〈그림 4-8〉 공급-수요 격차에 대한 제도적 준비 정도 민감도 분석



자료: 저자 작성

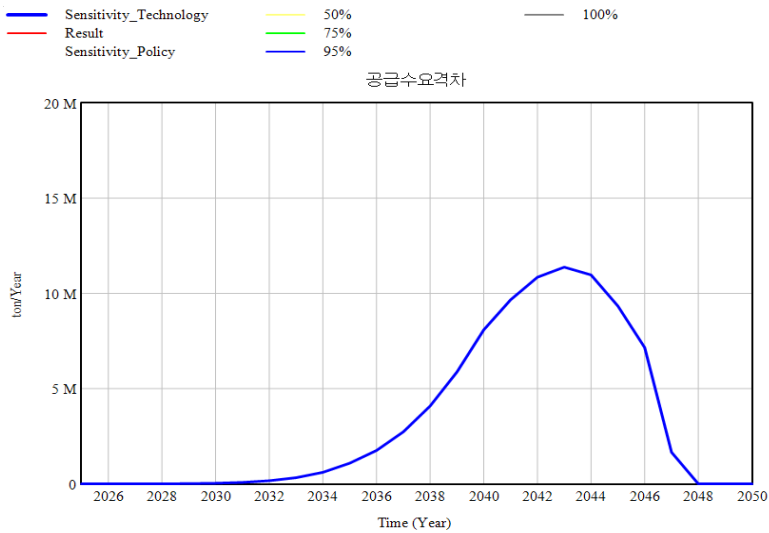
2) 기술 혁신의 시스템 반응 속도

가까운 미래에 빠르게 시작될 것으로 보이는 그린 암모니아의 선박 연료 시장 메커니즘에 있어서 기술적 발전의 정도, 이를 위한 기술적 혁신의 중요성을 평가하기 위해 본 모형의 기술적인 준비 정도가 공급-수요의 격차에 미치는 영향을 평가하는 민감도 분석을 수행하였다.

분석 결과 2026년부터 2030년대 초반까지 공급-수요의 격차는 매우 미미한 수준에서 안정적으로 유지된다. 이는 기술적인 준비 수준의 변화가 초기 단계에서는 격차의 양상에 큰 영향을 미치지 못함을 의미한다. 그러나 2035년을 기점으로 공급-수요의 격차가 점진적으로 확대되어 2042~2044년 사이에는 약 11~12백만(ton/Year)까지 벌어져 정점에 도달한다. 이는 기술적인 준비 수준의 향상이 일정한 시점까지 공급-수요의

격차 문제를 완화하는데 기여하지만 단독 변수로서는 완전한 해결책으로 작동하지 못함을 시사한다.

〈그림 4-9〉 공급-수요 격차에 대한 기술적 준비 정도 민감도 분석



자료: 저자 작성

4. 정책적 시사점

1) 공급 및 인프라 체계 준비

공급-수요의 격차에 대한 물리적인 공급 및 인프라 체계의 준비 정도의 민감도를 분석한 결과에서 해당 요인이 중기적 시점(2036~2044년) 이후 공급-수요 격차의 변동성을 급격히 키우는 지렛대 변수(Leverage variable)임을 확인할 수 있다. 특히 2045년 이후에는 동일한 수요 조건에서도 인프라 구축의 수준 차이가 격차를 크게 벌일 수 있다는 것이 확인되었다. 따라서 병목을 제거하기 위한 선제적·병렬적인 인프라의 구축 및 이

에 대한 투자가 정책의 최우선 순위가 되어야 함을 시사한다. 또한 이 결과는 선박 연료로 사용하기 위한 그린 암모니아의 수요-공급 및 활용에 대한 전반을 포괄하는 시스템이 정책·기술·인프라·시장·안전 등 동시에 성숙이 필요한 다변수의 복합 메커니즘으로 작동하며 외생 충격보다는 구조가 거동을 좌우한다는 본 연구의 문제 인식과도 일치한다.

따라서 우선 선제적인 투자를 통해 공급 및 저장·처리를 위한 항만 내·외의 인프라에 대한 구축을 추진해야 할 것으로 보인다. 또한 이를 계획하면서 STS(ship-to-ship) 및 부두형(shore-based) 병커링의 구축을 병행하여 추진함으로써 시장 형성 초기에 TTS(Truck-to ship)까지 포함한 선택 옵션을 확대한다면 병커링의 유연성 및 처리 능력을 극대화할 수 있다.

항만 내에 암모니아 병커링의 형태를 부두형으로 추진할 때는 기본적으로 항만 내의 토지·배관·격리구역 등 고정적인 부지의 확보 등이 필요하며, 이러한 과정에서 입지·도시계획 등의 제약이 장애 요인으로 작용할 수 있다. 반면 STS는 정박지·대체 해역을 활용하여 안전에 대한 완충거리를 더 유연하게 설계할 수 있으며, 수요에 따른 가동이 확정적이지 않은 초기의 특성 상 이러한 변동성에 대한 유연한 대응이 가능하다. 초기에는 STS 방식으로 조기·가변적인 수요에 최대한 대응하고, 이와 별도로 부두형 방식의 추진은 추후에 안정적인 대량 공급을 보장할 수 있어 장기구매계약을 위한 신뢰도를 제고할 수 있다.

또한 암모니아는 독성·자극성의 특성상 누출·확산에 대한 보수적인 관리가 필수적이다. 따라서 두 가지 방식을 병행하면 인천, 부산 북항, 여수 등 도심에 인접한 국내 주요 항만에서의 사회적인 수용성에 대한 문제를 완화할 수 있으며, 추후 중·장기 확장(shore-based)을 위한 권역의 거점화를 추진할 때에도 용이하다.

2) 제도적 준비

공급-수요의 격차에 대한 제도적인 준비 정도의 민감도를 분석한 결과는 2036~2045년 구간에서 변동성이 정점에 이르며, 이를 통해 이 기간이 유효한 정책도구를 투입할 때의 속도·강도 차이가 공급-수요의 격차를 크게 벌리거나 줄이는 분기점임을 확인할 수 있다. 또한 인과지도 역시 규제 강화→무탄소 연료로의 선택 유인→혁신 투자로 이어지는 강화 루프를 제시하고 있다. 따라서 해당 기간 전부터 각종 연료 전환에 대한 규제, 투자 및 보조금 등 금융적인 위험의 완화 등을 동시에 설계·시행함으로써 예측되는 변동성을 통제할 수 있다.

이는 IMO의 국제 지침 및 EU의 ‘FuelEU Maritime’ 등에 따른 가격-규제 패키지 등의 정책도구를 대상 선박의 국내 운임·연료와 관련된 전략에 반영하도록 유도하는 한편, 국내의 지침 및 인증체계에 연계하여 내재화하는 방법으로 추진할 수 있다. 또한 그린 암모니아의 높은 생산 비용과 상대적으로 비용이 낮은 화석연료는 환경 규제와 관련된 비용으로 현재, 그리고 일정 기간 동안 그린 암모니아의 LCOA(Levelized Cost of Ammonia; 암모니아 균등비용)와 화석연료의 TCO(Total Cost of Ownership; 총소유비용) 간 격차가 클 수밖에 없으므로 초기 구간대에서 (2030~2040년) 이를 한시적으로 보전해줌으로써 초기의 수요를 확정적인 신호로 전환해야 한다.

제3절 소결

본 장의 시스템 다이내믹스 연구 결과를 통해 국내 그린 암모니아 선박

연료의 메커니즘이 수요, 공급, 기술, 제도, 인프라와 상호작용하며 특정 시기에 민감하게 반응한다는 점을 확인하였다. 그린 암모니아의 공급과 수요 간의 격차는 제도적·기술적인 준비 정도의 영향을 받으며, 이는 관련 정책이 병행되어 마련되어야 함을 의미한다. 즉 그린 암모니아 선박 연료의 메커니즘을 형성하기 위해서는 단일한 정책이 아니라 기술, 제도, 인프라 등과 관련된 정책이 결합되어야 하는 것이다.

우선적으로 인프라 구축이 이뤄져야 한다. 민감도 분석 결과 병커링에 대한 인프라의 수준은 2036~2045년의 구간이 공급과 수요 격차의 변동성을 급격히 높이는 지렛대 변수라는 것이 확인되었다. 또한 2045년 이후에도 인프라를 구축하는 수준의 차이가 공급과 수요의 격차를 크게 벌일 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 그린 암모니아의 병커링 향만에 대한 인프라를 구축하고 항만 지역의 사회적인 수용성을 높일 필요가 있다.

제도적인 준비 정도의 민감도를 분석한 결과 2036~2045년 구간에서 공급과 수요 격차의 변동성이 정점에 이르며, 이 기간 동안 유효한 정책도구를 투입하는 속도 및 강도의 차이가 공급과 수요의 격차에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 또한 인과지도 역시 규제 강화→무탄소 연료로의 선택 유인→혁신 투자로 이어지는 강화 루프를 제시하고 있다. 따라서 해당 기간 전부터 대체연료로의 전환을 유인하기 위한 규제를 도입하여 그린 암모니아 선박 연료의 선택을 촉진할 수 있다.

기술적인 준비 정도는 단독 변수로서는 한계를 지니고 있지만 그린 암모니아 선박 연료의 공급 안정성과 확산을 촉진한다. 따라서 정책적으로 그린 암모니아 추진 선박, 병커링 및 처리 기술의 R&D 및 실증을 지원할 필요가 있다.

따라서 국내에서 그린 암모니아 선박 연료의 전환은 인프라의 구축, 제도적인 뒷받침, 기술 안전성이 맞물릴 수 있도록 하는 정책이 추진되어야 한다.

05

그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안

제1절 기본 방향

지금까지 그린 암모니아 선박 연료의 특성과 동향을 살펴보고, 국내의 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건과 그린 암모니아 선박 연료 매커니즘의 영향 요인을 분석하였다. 본 절에서는 이를 토대로 그린 암모니아 선박 연료 전환에 대응하기 위한 기본 방향을 제시하고, 이를 바탕으로 제2절에서 세부적인 정책 과제를 제시하고자 한다.

먼저 제2장의 주요국의 정책 사례를 통해 그린 암모니아의 생산 및 암모니아 추진 선박의 기술 개발·실증 지원, 암모니아 저장 및 병커링 항만 인프라 구축, 그린 암모니아 공급망 구축, 이와 관련한 전문인력 양성, 연료 생산업체에 대한 보조금 지원 및 무탄소 배출 선박에 대한 인센티브 제공, 암모니아 병커링의 안전 지침 개발, 민관 협력 지원 등이 이뤄지고 있음을 알 수 있었다.

제3장에서는 국내 그린 암모니아 선박 연료의 도입 여건에 대해 조사하였다. 이를 통해 그린 암모니아 선박 연료에 대한 법적 지위의 불명확성, 안전 및 기술에 대한 불확실성, 연료비용 부담, 연료 공급망 부족 등이 애

로사항으로 파악되었다. 또한 전문가를 대상으로 한 설문조사에 따르면 그린 암모니아 선박 연료의 활용이 2030년부터 시작되어 2040년에 활성화될 전망이지만 현재 국내 법·제도적인 준비는 미비한 상황이다. 그리고 그린 암모니아 추진 선박의 활성화를 위한 우선순위의 정책으로는 선박의 탄소배출에 대한 규제강화, 그린 암모니아 선박 연료의 공급 및 병커링 인프라 구축 등이 도출되었다.

제4장의 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 영향요인을 분석한 결과로는 그린 암모니아 선박 연료의 공급 및 인프라 체계의 준비 정도가 공급과 수요간의 격차를 확대하는 요인으로 확인되며 인프라 구축 정책이 우선되어야 함을 보여줬다. 또한 2036~2045년 기간 동안 유효한 정책도구를 투입하는 속도 및 강도 차이가 공급과 수요의 격차에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 따라서 해당 기간 전부터 연료 전환 제도를 도입하여 그린 암모니아 선박 연료로 유인할 수 있다는 결과가 도출되었다.

이러한 결과들을 토대로 그린 암모니아 선박 연료 전환에 대응하기 위한 기본 방향을 법·제도 정비, 인프라 구축 및 지원, 그린 암모니아 선박 연료 활용 지원 등 크게 세 가지 분야로 도출하였다.

제2절 정책 대응 방안

1. 법·제도 정비

1) 선박 연료 병커링에 대한 법적 지위 명확화

(1) 필요성

암모니아는 「환경친화적 선박의 기준 및 인증에 관한 규칙」 제3조에 따라 환경친화적 에너지로 인정된다. 또한 한국선급에서는 ‘저인화점 연료 선박 규칙’을 개정하여 암모니아를 연료로 사용하는 선박에 대한 지침을 마련하였다.

그러나 암모니아 병커링에 대한 기준은 없으며 암모니아는 「고압가스안전관리법」에 따라 제조·저장·판매·운반·사용 및 안전기준 등이 관리되고 있다. 동 법에 따라 암모니아를 제조하거나 용기 또는 차량에 고정된 탱크에 충전하기 위해서는 시장, 군수 또는 구청장의 허가를 받아야 한다.²³⁹⁾ 이 조문은 육상에서 암모니아를 용기 또는 탱크로리에 충전하는 것을 규정하고 있으나 선박에 충전, 즉 병커링에 대한 사항은 해당되지 않는다.

또한 「항만운송사업법 시행령」 제2조에는 선박 연료 공급업을 “선박용 연료로 공급하는 사업”으로 명시하고 있으며, 사업 등록을 위한 자본금과 장비 기준을 제시하고 있다. 그러나 선박용 연료에 대한 기준은 명시하지 않아 암모니아가 포함되는지는 불분명하다. 한편 「위험물 하역 자체안전관리계획서 승인 업무처리 지침」에는 LNG와 메탄올에 대한 선박 연료 공급선의 안전한 작업 절차 등의 기준이 마련되어 해당 연료에 대한 병커링의 기준이 존재한다. 반면 동 지침에 암모니아는 포함되어 있지 않아 실질적

239) 고압가스안전관리법 제4조

인 연료 공급을 할 수 없다.

(2) 추진 내용

먼저 현행 「항만운송사업법 시행령」 별표 6 「항만운송관련사업의 등록 및 신고의 기준」 5.2에서 천연가스 연료 공급선이 명시된 바와 같이 ‘저인 화점 연료(암모니아 등) 공급선’을 별도 유형으로 추가하도록 한다. 또한 선박용 연료의 다양화를 반영하기 위한 2018년 항만운송사업법 시행령의 개정 취지를 근거로 하여 「항만운송사업법 시행령」 제2조 선박용 연료의 개념이 암모니아 등 친환경 연료를 포함한다는 정부의 공식적인 해석을 제시할 필요가 있다.

한편 선박 연료를 공급하기 위해서는 「선박의 입항 및 출항 등에 관한 법률」에 따라 자체적으로 안전관리 계획을 수립해 관할 지역 지방해양수산청의 승인을 받아야 한다. 그러나 암모니아의 경우 안전 관리 지침이 마련되지 않아 선박 연료로서 공급하기 어려운 실정이다. 따라서 「위험물 하역 자체안전관리계획서 승인 업무처리 지침」에 암모니아를 포함하여 ‘암모니아 하역 선박 연료 공급선의 안전한 작업 절차 등’을 마련해야 한다. 이를 통해 암모니아 병커링 사업자는 지방해양수산청의 승인을 받고 실질적인 병커링을 수행할 수 있다.

2023년 11월 30일에 신설된 ‘메탄올 하역 선박 연료 공급선의 안전 작업 절차 등’은 일반 사항과 반영 사항으로 구성되어 있다.²⁴⁰⁾ 일반 사항에는 목적 등을 다루고 있으며 반영 사항에는 사전 적합성 검토, 안전관리 시스템 구축·운영, 작업 안전관리, 동시작업, 항만당국 등의 통보 및 협력 등이 포함되어 있다.²⁴¹⁾ 이를 기준으로 ‘암모니아 하역 선박 연료 공급선

240) 해양수산부 항만운영과(2023.11.30), p. 42, 44.

241) 전게서, pp. 42-49.

의 안전 작업 절차 등' 역시 내용을 구성할 수 있다.

2) 청정 암모니아 인증 제도 마련

(1) 필요성

선박 연료에 대한 전과정 평가는 연료의 생산부터 선박에서의 연소까지 전과정에서 배출되는 온실가스를 고려한다. 그러나 화석연료를 기반으로 한 그레이 암모니아는 생산과정에서 대량의 탄소를 배출한다. 따라서 선박 연료로서 암모니아를 사용할 때 전과정 온실가스 배출량을 기준으로 한 그린 암모니아 인증이 필요하다. IMO는 선박 연료의 온실가스 집약도를 산정할 때 연료의 생애주기 라벨(Fuel Lifecycle Label; FLL)에 명시된 지속가능성과 관련한 모든 지표와 수치를 고려해야 한다고 밝혔다. 이때 FLL은 IMO에서 승인된 지속가능 연료 인증제도(Sustainable Fuel Certification Scheme; SFCS)에 따른 인증을 받아야 한다. 즉 향후 연료의 배출계수가 IMO에 부합하다는 것을 입증하기 위해서는 SFCS 절차에 따라 인증을 받아야 하는 것이다.

현재 우리나라에서 암모니아의 청정성을 평가하는 가장 일반적인 방법은 암모니아 생산에 투입되는 수소 생산과정에서의 온실가스 배출량을 기준으로 평가하는 것이다.²⁴²⁾ 이에 따라 우리나라는 수소 생산까지만 배출량을 계산하고 있으며 암모니아 생산 과정에 대한 배출량은 계산하지 않고 있다. 한편 수소의 경우 「수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법률」 제25조의 2에 근거하여 '청정수소 인증제'가 운영되고 있으며, 생산과 수입 과정에서 온실가스 배출량이 일정 수준 이하인 경우 청정수소로 인정된다.

242) 안지영·이태의(2023), p. 17.

〈표 5-1〉 청정수소 인증 등급

(단위: kgCO₂e/kgH)

구분	1등급	2등급	3등급	4등급
배출량	0~0.1	0.1~1	1~2	2~4

자료: 에너지경제연구원(검색일: 2025.7.23.)

(2) 추진 내용

청정 암모니아 인증제도를 전과정 평가를 기준으로 수립하여 IMO 규제에 부합하도록 하며, 국내 청정수소 인증제도와 연계하여 기준의 일관성을 유지할 수 있도록 한다. 먼저 현행의 ‘청정수소 인증제’에 선박 연료용 암모니아를 추가하여 WtW 기준과 에너지 단위(gCO₂e/MJ) 측정을 포함하는 방안을 검토한다. 이와 함께 2027년부터 「선박에서의 오염방지에 관한 규칙」의 별표 22 ‘연료유공급서의 양식’을 개정하여 연료 생애주기 라벨(FLL), 발급기관, WTW gCO₂e/MJ, 지속가능한 연료 인증제도(SFCS) 등을 기재할 수 있도록 한다.

또한 청정수소와 마찬가지로 등급화를 통해 인증을 부여하도록 한다. 이때 최하위 등급은 기존의 그레이 암모니아와 대비하여 최소 50%의 탄소배출을 감축한 경우로 설정하여 암모니아 연료의 친환경성을 확보할 수 있도록 한다. 정부는 인증 등급에 근거하여 차등적인 지원 정책을 추진할 수 있다.

청정 암모니아 인증제는 해양수산부와 산업통상자원부에서 총괄 관리하고 인증 운영 기관과 인증시험평가 기관을 지정하도록 한다. 인증 운영 기관의 역할은 그린 암모니아 인증 신청 및 접수, 인증계획 수립, 인증서 발급 및 전과정 평가 등이다. 그리고 인증시험평가 기관은 인증 기준의 준수 여부에 대한 확인을 담당한다.

2. 인프라 구축 및 운영

1) 그린 암모니아 항만 인프라 구축

(1) 필요성

우리나라는 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축 방안’에서 ‘그린 암모니아·수소 공급망 구축’ 전략을 수립하였다. 암모니아 연료의 경우 우선 기존의 항만 인프라를 활용하며 상용화 기술의 개발 추이를 고려하여 항만에 생산·저장 시설 구축을 지원한다. 또한 2030년까지 울산항에 21만 톤의 암모니아 저장탱크, 여수·광양항에 청정 암모니아 인수기지를 건설할 계획이다. ‘청정수소 생태계 조성방안’에서는 2030년까지 총 400만 톤의 암모니아 저장탱크 설치를 계획하였다.

국내에는 인천, 여수, 울산 지역에 총 18만 7천톤 규모의 저장시설이 있으며 연간 224만 톤의 암모니아를 처리할 수 있다. 현재 수입하고 있는 기존의 암모니아 119만 톤을 제외한 처리가능 용량은 5만 톤이며, 제3장에서 확인한 ‘친환경 선박 연료 공급망 구축 방안’과 ‘청정수소 생태계 조성방안’에 포함된 구축 계획까지 고려한다면 4,800만 톤을 추가로 처리할 수 있다. 이 가운데 국내의 전력용 연료 및 수소 캐리어용 청정 암모니아 수요는 2,113만 톤으로 전망된다.²⁴³⁾

한편 제4장에서는 그린 암모니아 선박 연료의 공급 및 인프라 체계의 준비 정도가 공급과 수요 간의 격차를 확대하는 요인으로 확인되었다. 이는 인프라 구축 및 이에 대한 투자 정책이 우선되어야 한다는 것을 의미한다.

243) 윤형철(2025), p. 7.

(2) 추진 내용

정부는 항만의 특성과 그린 암모니아의 기술성숙도를 고려하여 그린 암모니아 항만 구축 전략을 수립한다. 이를 통해 그린 암모니아의 생산 및 병커링 등 공급 인프라 체계를 갖춘 항만을 조성할 수 있다. 또한 항만 내 지원 시설도 확충한다. 우선 기존 항만 인프라를 활용하되 암모니아 추진 선박, 병커링 기술 등의 발전 속도를 고려하여 암모니아 저장기지 구축과 암모니아 병커링 선박 도입에 대한 지원을 검토한다.

앞서 실시했던 전문가 조사에 따르면 암모니아 추진 선박은 2040년부터 상용화되고 병커링 기술은 그보다 앞선 2030년 정도에 상용화 단계에 이를 것으로 판단되었다. 따라서 2040년 내에는 그린 암모니아 항만을 조성할 수 있도록 인프라 구축을 추진해야 한다. 그리고 녹색해운항로와의 연계를 추진한다. 이를 통해 그린 암모니아 항만 인프라 공급, 선박 연료의 전환, 안정적인 운항 등 선순환구조를 형성하고 수요와 공급을 동시에 창출할 수 있다.

이와 함께 정부는 그린 암모니아 선박 연료용 인프라 펀드를 확대할 수 있다. 해양수산부는 2025년 1월에 친환경 선박 연료 인프라 펀드를 출시하였다. 이 펀드는 국내 항만의 친환경 연료 저장시설 구축과 선박의 병커링 전용 선박 신조를 지원한다. 이 인프라 펀드에서는 탄소배출 감축량을 기준으로 연료별로 지원 규모를 설정하는 방안을 검토한다. 이를 통해 그린 암모니아 선박 연료에 대한 지원 범위를 확대할 수 있다.

2) 그린 암모니아의 연료 공급 안전성 확보

(1) 필요성

그린 암모니아 선박 연료는 독성으로 인해 누출·확산 시 인명 피해와 해

양·대기 환경 피해를 야기한다. 신일섭 외(2023)는 암모니아 병커링 사고를 예측한 결과 암모니아가 1분간 누설했을 때 반경 7.5km에서 5ppm의 영향이 있을 수 있으며 10분간 누설하면 인체에 치명적인 300ppm의 이상의 독성이 병커링 인근의 인구밀집 지역에 영향을 미칠 수 있다고 확인하였다.²⁴⁴⁾ 암모니아는 이러한 특성 때문에 일반 대중과 선사에게 위험한 연료로 인식되어 사회적인 수용성이 낮을 수 있다.

한편 IMO는 암모니아 연료 사용 선박에 대해 임시적인 안전 지침을 수립한 바 있으며, 한국선급에서도 암모니아 연료 사용 선박에 대한 안전기준을 마련하였다. 암모니아는 육상의 암모니아 취급 시설 등에 대한 관리기준이 이미 수립되어 있어 허용노출의 한계값과 방출의 상한 농도 값을 설정하여 관리할 수 있다는 것이 관련 전문가들의 의견이다.

이처럼 암모니아 선박 연료에 대한 안전기준이 지속적으로 개발되고 있으나 일반 대중과 선사 등은 여전히 위험성에 대한 우려를 갖고 있어 간극이 존재한다. 따라서 암모니아 선박 연료의 누출 및 확산에 대한 보수적인 관리를 통해 안전성을 확보하고 위험에 대한 철저한 대응 체계를 구축하는 것이 필수적이다.

(2) 추진 내용

먼저 암모니아 병커링의 안전 사고 예방 대책 개발이 필요하다. 이를 위해 암모니아의 저장·이송·병커링과 관련된 과정별 위험성 분석에 대한 연구를 수행한다. 사고 원인은 암모니아 탱크 파열, 파이프라인 파열, 병커링 시 암모니아 누출 등이 있다. 또한 병커링 공급 조건에 따라 다양한 누출 시나리오가 도출될 수 있다. 이에 대한 위험성을 평가하고 각각의 시나리오에 대한 사고 예방 대책을 수립하여 안전 지침을 마련한다.

244) 신일섭 외(2023), p. 964.

이와 함께 암모니아 병커링 누출 사고에 대한 대응 체계를 구축한다. 우선 실시간으로 모니터링을 할 수 있는 안전 검증 프로그램을 운영한다. 암모니아 병커링 누출 사고는 소규모 배출과 대규모 배출 상황으로 구분할 수 있다. 소규모 배출 상황의 경우 사고 원인에 대해 특정한 조치를 시행하고, 대규모 배출 상황에는 비상대응계획 및 봉쇄 조치 등 보다 포괄적이고 강력한 대응방안이 필요하다. 또한 항만의 관할 지자체, 소방서 등 유관기관과의 협력 체계를 구축하여 대응방안을 마련하고 이와 함께 비상 대응 훈련을 실시하는 등의 방안도 검토할 수 있다.

3) 그린 암모니아 연료 관련 전문인력 확보

(1) 필요성

현재 국내의 법정 해기 교육에는 액화가스에 대한 기초교육이 특별 훈련 요건으로 추가되어 있으나 주로 LNG 연료 중심의 교육으로 이뤄져 있다. 한편 2025년 9월에 IMO는 대체연료 및 신기술 사용 선박의 선원 훈련을 위한 포괄적 잠정 지침을 채택하였다. 또한 이와 함께 친환경 선박 등의 기술 발전을 반영하여 선원 훈련, 자격증명 및 당직근무에 관한 국제협약(STCW)을 검토 및 개정 작업을 추진하는 중이다. 이에 우리나라도 암모니아 등 친환경 연료에 대한 해기 교육이 추가로 필요하다.

암모니아는 독성 등 기존 연료와는 다른 위험성을 가지고 있는 연료이기 때문에 병커링 등 육상에서의 취급에도 주의가 필요하다. 따라서 암모니아 병커링과 관련된 교육 역시 필요하다.

(2) 추진 내용

우선 국가 차원에서 그린 암모니아 선박 연료와 관련한 커리큘럼을 개발

및 운영할 필요가 있다. 정부는 조선사, 선사, 관련 협회 및 고등 교육기관 등과 협력하여 그린 암모니아 선박 연료의 해기 교육 및 병커링 교육 프로그램 개발을 추진한다. 이를 통해 항만 근로자, 육·해상직 선원 등을 대상으로 특화 교육 프로그램을 운영하며, 그린 암모니아의 안전관리 및 안전 조치에 대한 교육을 실시한다. 또한 IMO의 대체연료 및 신기술 사용 선박을 위한 포괄적 잠정 지침을 고려하여 법정 해기 교육을 개편하고 커리큘럼을 지정 및 운영해야 한다.

이와 함께 교육 인프라 구축에 대한 지원 방안도 검토해야 한다. 그린 암모니아 선박 연료 병커링을 위한 전문교원을 양성하고 실습교육을 위한 인프라를 구축하는 등의 지원이 필요하다. 기존의 교원들에게 암모니아 추진 선박과 관련한 역량을 강화시키기 위해 국내·외의 교육 및 연수 등의 비용을 보조할 수 있다. 또한 정부와 산업계가 협력하여 그린 암모니아 선박 연료 병커링 등 가상체험이 가능한 VR/AR 등을 기반으로 한 시뮬레이터 및 실습장비 구축을 지원할 수 있다.

3. 그린 암모니아 선박 연료 활용 지원

1) 그린 암모니아 선박 연료 협력 체계 구축

(1) 필요성

그린 암모니아 선박 연료를 도입할 시 우려되는 요인 중 하나는 연료 공급의 불확실성으로 나타난다. 제3장의 전문가 대상 설문조사에서도 ‘연료 공급망 부족’은 주요 애로사항 중 하나로 나타났다. 그린 암모니아는 수요자와 공급자 간 일대일 계약을 통해 정해진 물량이 계획된 사용처로 공급된다. 따라서 그린 암모니아 선박 연료에 대한 수요가 확보되지 않을 경우

그린 암모니아 생산 업체는 선사에 대한 공급을 최소화할 가능성이 높다.

국내에서는 HMM과 롯데정밀화학이 ‘탄소중립을 위한 암모니아의 해상 운송 및 암모니아·메탄올 벙커링 업무협약’을 맺은 바 있다. 이는 롯데정밀화학이 해외에서 확보한 암모니아를 HMM에서 운송한다는 내용이다. 한편 국내 발전사의 경우 에너지기업과 협력하여 해외의 그린 암모니아 생산 사업 개발에 참여하고 있다.

세계 그린 암모니아 생산은 초기 단계로서 현재 연간 80만 톤에 불과하며 향후 선박 연료 전용 암모니아 공급량은 최소 500만 톤에서 최대 3,220만 톤으로 추정된다.²⁴⁵⁾²⁴⁶⁾ 반면 그린 암모니아 선박 연료의 예상 수요는 2030년 기준 230만 톤, 2040년 기준 6,200만 톤으로 전망되어 2040년에는 계획된 생산량을 초과할 수 있다.²⁴⁷⁾²⁴⁸⁾ 따라서 선사와 연료 공급사 간의 협력을 통한 그린 암모니아 공급망 확보가 필요하다.

(2) 추진 내용

그린 암모니아 선박 연료 공급망을 확보하기 위한 연료업체·선사의 협력 방안을 검토할 수 있다. 즉 해외에서 생산되는 선박 연료용 그린 암모니아를 확보하여 도입하는 것이다. 이를 위해 관계 기업들은 공동으로 그린 암모니아 생산 프로젝트에 참여할 수 있다. 그린 암모니아를 생산하는 기업은 해외의 생산 투자와 관련한 지분을 확보하고, 선사는 해당 물량에 대한 장기 운송 계약을 맺는 동시에 생산량 일부에 대해 지분을 확보할 수 있다. 정부는 정책금융 등의 지원을 통해 해당 사업을 지원할 수 있다.

245) DNV(2024), p. 14.

246) 그린 및 블루 암모니아 프로젝트를 기반으로 추정되었다.

247) DNV는 선박 연료로서의 암모니아는 그린 암모니아와 블루 암모니아만 사용될 것으로 판단하고 선박 연료용 암모니아 수요를 추정하였다.

248) DNV(2024), p. 21.

그리고 그린 암모니아 선박 연료 공급 로드맵을 수립하여 체계적인 지원 방안을 마련할 수 있다. 이를 위해 국내 그린 암모니아 병커링 수요를 추정하고 연료의 도입과 공급 인프라 구축, 해외 프로젝트 개발 및 항만 인프라 개발 등을 발굴하여 추진할 수 있다.

2) 기술 개발·실증 지원 확대

(1) 필요성

전문가 대상 설문조사 결과 현재 그린 암모니아 추진 선박을 도입했을 시의 애로사항 중 1순위는 ‘기술적인 불확실성’으로 나타났다. 이를 통해 그린 암모니아 선박 연료를 도입하기 위해서는 기술 개발이 우선되어야 함을 알 수 있다. 또한 전문가들은 기술 개발 지원 및 실증사업 등을 유인책으로 제시하였으며 그린 암모니아 연료 엔진 개발 등 연구개발 지원이 필요하다고 응답하였다. 국내에서는 ‘친환경 선박 전주기 혁신기술 개발사업(’21~’31)’이 추진되어 암모니아 선박 엔진과 선박 설계 기술 개발을 추진하는 중이다.

그린 암모니아 생산 기술이 발전할수록 생산 단가가 낮아져 가격 경쟁력을 확보할 수 있으며, 이는 곧 선사의 연료 비용에 대한 부담을 완화시킬 수 있다. 반면 전문가들은 우리나라의 그린 암모니아 생산기술 준비 정도를 10점 만점에 3.94점으로 아직은 개발 단계인 것으로 판단하였다. 따라서 그린 암모니아 생산기술의 상용화를 위한 기술 개발 지원이 필요하다.

(2) 추진 내용

그린 암모니아를 선박 연료로 활용하기 위해 생산부터 저장·병커링 및 선박 운항까지 전과정에 걸친 기술 개발과 실증 지원을 추진한다. 이를 위

해 민관이 협력하여 중점 기술을 선정하고 집중적으로 지원하는 방안을 검토한다. 중점 분야로는 대량의 그린 암모니아 생산 기술, 병커링 기술, 암모니아 추진 선박 기술, 기술 표준 수립 등이 포함될 수 있다. 또한 실증 프로젝트 추진 기업 또는 기관에 보조금을 지원하여 상용화를 위한 초기 시장 기반을 마련한다.

또한 ‘그린 암모니아 선박 연료 연구 혁신 프로그램’을 운영할 수 있다. 그린 암모니아 선박 연료에 대한 R&D를 체계적으로 관리하여 과제 선정, 평가, 관리, 정산 시스템을 운영하는 것이다. 이를 위해 그린 암모니아 선박 연료의 전과정에 걸친 기술 로드맵을 수립하고 대학 및 연구소의 기초 연구와 기업의 실증 연구를 연계할 수 있는 체계를 만든다. 그리고 실증 과정에서 발생하는 데이터를 수집 및 공유하여 트랙 레코드를 확보하도록 한다. 연구개발 지원은 정부의 R&D 예산과 민간투자를 고려할 수 있다.

3) 연료 전환 규제·인센티브 확대

(1) 필요성

한국은 「해양환경관리법」을 통해 선박의 질소산화물 배출과 연료유 황함유량을 규제하고 있다. 이에 따라 질소산화물의 배출허용기준을 초과한 디젤기관은 작동이 금지되며, 황함유량 기준이 초과된 연료유는 사용이 금지되어 있다. 황함유량의 경우 국내 모든 해역은 0.5% 이하여야 하며 배출 규제 해역에서는 0.1%를 준수해야 한다.²⁴⁹⁾ IMO 중기 조치와 EU의 FuelEU Maritime 등 해운 분야의 국제 규제는 선사들의 연료 전환을 유도하고 있다. 국적 선사의 규제 준수와 관련된 비용을 낮추기 위해서는 국제 규제의 흐름에 맞게 국내 규제를 보완할 필요가 있다.

249) 해양환경관리법 시행령 제42조.

한편 그린 암모니아 연료 가격은 타 연료와 대비하여 1.3~5배 높은 수준으로 전환 시 선사 부담이 커진다. 이는 제3장에서 실시한 설문조사 결과에서도 잘 나타난다. 그린 암모니아 추진 선박 도입 시 애로사항 중 하나로 ‘연료비용 부담’이 나타났다. 그러나 국내의 인센티브 및 지원제도의 준비 정도는 10점 만점에 1.52점으로 나타나 매우 미비하다는 것이 전문가들의 판단이다. 따라서 연료비 프리미엄, 안전설비 등으로 인한 선사들의 운영 부담을 줄일 수 있는 정부의 재정지원이 필요하다. 우리나라는 친환경 선박 도입을 장려하기 위해 건조비의 최대 30%까지 지원하고 있다. 또한 친환경 선박의 소유자와 친환경 선박을 건조 및 개조하려는 조선업자는 친환경 선박 인증을 통해 취득세 감면 혜택을 받을 수 있다. 현행 제도를 그린 암모니아 선박 연료에 확대 적용하여 저탄소·무탄소 연료로의 전환을 촉진시킬 수 있다.

(2) 추진 내용

화석연료 사용에 대한 패널티를 지속해야 한다. 기존의 질소산화물 배출 및 연료유의 황함유량 규제는 유지하되 항만요율에 대해 GHG 집약도를 연동시켜 가산요율을 부과하는 방법이 있다. 예를 들어 기준 집약도를 초과한 선박에 대해 일정 금액을 가산하여 반영하는 것이다. 반대로 기준 이 내면 요율을 감면한다. 다음으로 친환경 연료의 의무 사용 규정을 도입하는 방안이 있다. 현재 IMO는 GFI를 미준수하는 선박에 대해 부과금을 요구하는 중기조치를 시행할 예정이며, EU는 해운분야의 ETS 편입과 함께 FuelEU Maritime을 통해 선박의 총 사용 에너지량과 대비하여 비 생물계 재생에너지 연료(RFNBO)의 사용량을 규제하였다. 이에 우리나라도 친환경 연료 의무제를 시행하여 국제 규제에 대응할 수 있다. 2030년을 기준으로 우리나라의 항만을 기항하는 총 톤수 5,000GT 이상의 선박에 대해 연간 RFNBO 사용량이 1%인 사용 의무화를 추진할 수 있다. 한편 EU와 같

이 시행 초기에는 RFNBO 사용에 대해 가중치를 인정하여 사용 비중을 산정할 수 있도록 한다. 또한 이 규제로 인해 외국적 선박이 한국 기항을 기피하는 것을 방지하기 위해서 국제 규제 시기에 맞춰 진행하며, 해당 연료를 사용한 선박은 입항료와 예선료를 감면하는 등의 항만 인센티브도 병행해서 추진한다.

규제 강화와 병행하여 정부는 그린 암모니아 추진 선박에 대한 인센티브 지원을 검토할 수 있다. 친환경 선박·기자재 인증제도에서 그린 암모니아 선박 연료를 적용하여 혜택을 확대하는 방안을 추진하는 것이다. 친환경 기자재의 범위에 암모니아 연료 선박 보급에 필수적인 안전 및 환경설비 등을 명시하는 것이다. 특히 누출 탐지, 환기시스템, 안전밸브 등 암모니아 추진 선박에 필수적인 기자재에 대해서는 인증제에 포함시킬 수 있다. 이는 암모니아 추진 선박에 대한 국내의 조선·기자재 사업을 지원할 수 있으며 초기 도입에 대한 선사들의 부담 역시 줄일 수 있다.

4. 추진 로드맵

앞서 말한 정책 대응방안과 세부 추진과제 로드맵은 다음 <표 5-2>과 같다.

<표 5-2> 정책 과제별 추진 로드맵

추진과제	추진시기					추진주체
	2026	2027	2028	2029	2030	
Ⅰ 법·제도 정비						
1. 선박 연료 bunker링에 대한 법적 지위 명확화						
1-1) 항만운송사업법 시행령 별표6 항만 운송관련사업의 등록 및 신고 기준 추가(저인화점 연료 공급선)						해수부
1-2) 암모니아 하역 선박 연료 공급선의 안전 작업 절차 등을 마련						해수부

추진과제	추진시기					추진주체
	2026	2027	2028	2029	2030	
2. 청정 암모니아 인증제도 마련						
2-1) 청정수소 인증제에 연계하여 선박 연료용 암모니아 청정성 추가						해수부 산업부
2-2) 선박에서의 오염방지에 관한 규칙 별표 22 연료유공급서의 양식 개정						해수부

② 인프라 구축 및 운영

1. 그린 암모니아 항만 인프라 구축						
1-1) 그린 암모니아 항만 구축 전략 수립						해수부 지자체 항만공사
1-2) 암모니아 저장기지 구축과 암모니아 벙커링 선박 등 인프라 도입 지원						해수부 산업부 지자체 항만공사
2. 그린 암모니아 연료의 공급 안전성 확보						
2-1) 암모니아 벙커링 안전 사고 예방 대책 개발						해수부
2-2) 암모니아 벙커링 누출 사고 대응체계 구축						해수부 항만공사
3. 그린 암모니아 연료 관련 전문인력 확보						
3-1) 암모니아 선박 연료 관련 커리큘럼 개발 및 운영						해수부 산학연
3-2) 교육 인프라 구축 지원(전문교원 양성 등)						해수부 교육기관

③ 그린 암모니아 선박 연료 활용 지원

1. 그린 암모니아 선박 연료 협력 체계 구축						
1-1) 연료 생산업체-선사 협력 프로젝트 지원						해수부 산업부
1-2) 그린 암모니아 선박 연료 공급 로드맵 수립						해수부 산업부
2. 기술 개발 및 실증 지원 확대						
2-1) 민관 협력 중점 기술 선정 및 지원						해수부

추진과제	추진시기					추진주체
	2026	2027	2028	2029	2030	
2-2) 그린 암모니아 선박 연료 연구 혁신 프로그램 운영						해수부
3. 연료 전환 규제 및 인센티브 확대						
3-1) 화석연료 사용 패널티 지속 및 RFNBO 사용량 의무화						해수부
3-2) 친환경 선박, 기자재 인증제도에 그린 암모니아 추진 선박 적용 및 지원						해수부

자료: 저자 작성

제3절 기대효과

1. 정책적 기대효과

첫째, 암모니아 선박 연료 병커링의 법적 지위를 명확히 하고 병커링에 대한 안전 지침을 마련함으로써 그린 암모니아 선박 연료와 관련된 법·제도적인 공백을 해소하고 활용성을 높일 수 있다. 가령 항만운송사업법 시행령에 그린 암모니아를 친환경 연료로 포함한다는 정부의 공식적인 의견을 제시한다면 암모니아 선박 연료 공급 사업자의 등록 및 심사 기준이 명확해져 해당 사업의 등록 및 운영이 지연되지 않고 진행될 수 있다.

둘째, 그린 암모니아 선박 연료의 공급 준비 정도를 향상시킬 수 있다. 기존 인프라 활용, 암모니아 저장 기지 구축, 병커링선 도입 등 항만 인프라 구축 및 지원 정책은 그린 암모니아 선박 연료의 안정적인 병커링을 지원할 수 있다. 또한 연료 업체와 선사 간의 협력 체계를 구축한다면 그린 암모니아 선박 연료의 공급망 리스크를 선제적으로 대응할 수 있는 효과를 지닌다.

셋째, 그린 암모니아 선박 연료 관련 기술 및 실증사업을 지원하여 기술의 불확실성을 줄일 수 있다. 해당 기술에 대해 민관이 협력하여 집중적으로 투자하고 실증 데이터를 공유하여 이를 통해 트랙 레코드를 축적한다면 기술의 안전성을 확보할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

2. 사회·경제적 기대효과

첫째, 그린 암모니아의 병커링 및 해기 교육훈련 등을 통해서 고숙련 일자리를 창출할 수 있다. 또한 IMO의 대체연료 잠정지침 및 STCW의 개정변화를 반영하여 해기 교육 및 병커링 교육 과정을 개발·운영함으로써 전문인력을 통해 암모니아 선박 연료를 안전하게 다룰 수 있다.

둘째, 그린 암모니아 병커링에 대한 안전 지침 마련 및 안전 사고 대응체계를 구축하여 사회적인 수용성을 확보할 수 있다. 그린 암모니아 선박 연료 사고에 대한 예방지침을 마련하고 비상대응 체제 및 유관기관의 합동 훈련 체계를 구축한다면 암모니아 선박 연료에 대한 위험도를 줄일 수 있다. 또한 지자체, 항만공사 등과 협력 체계를 구축하여 선제적인 대응이 가능하다. 이는 선사와 화주 및 항만 지역 주민들의 수용성을 높여줄 것이다.

06

결론 및 정책제언

제1절 요약 및 결론

해운 분야의 탈탄소화를 달성하는 과정에서 그린 암모니아가 유일한 연료 선택지는 아니지만 청정성, 운송의 용이성 등의 특징으로 인해 미래의 선박 연료로서 장기적인 잠재력을 갖고 있다. 이에 국내에서도 그린 암모니아 선박 연료에 대한 수요가 점차 발생할 것으로 전망된다. 따라서 본 연구는 그린 암모니아를 선박 연료로서 도입하기 위한 국내의 준비 수준을 체계적으로 진단하고 공급, 수요, 제도, 기술 영역의 상호작용을 시스템적인 관점에서 분석하여 실행가능한 정책 및 로드맵을 제시하고자 했다. 이를 위해 문헌검토, 전문가 자문 및 설문조사, 시스템 다이내믹스 분석을 수행하였다. 이러한 접근을 통해 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 안정성과 확산 가능성에 영향을 주는 핵심 요인을 도출하고 앞선 결과를 토대로 정책 방안을 도출하였다.

제2장에서는 국제적인 규제와 그린 암모니아의 특성 및 시장 동향을 통해 선박 연료로서 그린 암모니아의 의의를 정리했다. IMO는 중기조치인 Net-Zero Framework를 채택하고 연료의 전과정(LCA) 지침을 마련하였

으며, EU는 FuelEU Maritime과 해운분야의 ETS를 통해 온실가스 집약도에 대한 기준을 강화하고 있다. 이러한 규제는 무탄소 연료로의 전환을 촉진한다. 그린 암모니아는 전과정 평가를 적용했을 때 이산화탄소 배출량이 현저히 줄어들며 운송·저장 인프라 경험도 축적되어 있다. 다만 독성과 아산화질소, 암모니아의 슬립 관리라는 해결해야 할 과제가 존재한다. 현재 그린 암모니아 연료 가격은 타 연료와 대비하여 높은 편이나 재생전력과 수전해 비용의 하락, 탄소규제 비용의 확대로 점차 낮아져 2050년에는 그린 메탄올·바이오디젤과 대비해도 보다 낮거나 유사할 것으로 전망된다. 이러한 여건은 중장기적으로 전체 선박 연료의 사용량 가운데 그린 암모니아의 비중이 확대될 수 있음을 보여준다.

제3장은 국내의 도입 여건을 공급과 활용 측면으로 구분하여 검토했다. 현재 우리나라는 암모니아를 전량 수입하고 있으며, 그린 암모니아의 국내 생산 계획도 부재하다. 정부의 계획은 그린 암모니아를 ‘해외수소 도입의 운반체’로 우선 고려하고 있으며, 발전용으로서의 활용 계획은 구체화된 반면 선박 연료용에 대한 활용 계획은 미흡하다. 법·제도적인 측면에서 친환경 선박을 대상으로 한 인센티브 제공, 저인화점 연료 선박 규칙 개정 등 활용 측면에서 일부 진전이 있으나 ‘선박 연료로서의 암모니아’라는 법적 지위와 병커링 기준은 없는 실정이다. 또한 전문가 설문조사 결과에서는 탄소 배출 규제의 강화, 연료 공급 병커링 인프라 구축 및 지원, 그린 암모니아의 가격 경쟁력 확보를 위한 보조금·인센티브 지원, R&D 지원 등의 정책 우선 순위가 도출되었다.

제4장은 그린 암모니아 선박 연료의 ‘공급-수요 격차’를 결과 지표로 설정하고 수요, 공급, 기술, 제도 영역에서의 피드백 루프를 통해 확산경로를 시뮬레이션했다. 민감도 분석에서 병커링 인프라 구축 수준이 2045년 이후 공급-수요 격차의 변동성에 유의미한 영향을 미치고, 제도적인 준비가 지연되었을 때 공급이 부족하게 되는 등의 리스크가 발생할 가능성이 있음

을 확인하였다. 반면 기술적인 준비는 2040년대 초반까지 공급-수요의 격차에 미치는 영향이 제한적이지만 2040년대부터는 인프라와 제도 등과 결합해 파급력이 확대되는 경향을 보였다. 이러한 결과는 그린 암모니아 선박 연료를 도입하기 위해 제도적인 준비가 우선적으로 정비되고 인프라 구축 및 기술적인 준비를 장기적으로 추진해야 한다는 것을 의미한다.

제5장에서는 대응방안을 ‘법·제도 정비’, ‘인프라 구축 및 지원’, ‘그린 암모니아 선박 연료 활용 지원’으로 제시하였다. ‘법·제도 정비’로는 ① 선박 연료 병커링에 대한 법적 지위 명확화, ② 청정 암모니아 인증제도 마련을 제안하였다. ‘인프라 구축 및 지원’ 측면에서는 ① 그린 암모니아 항만 인프라 구축, ② 그린 암모니아 연료의 공급 안정성 확보, ③ 그린 암모니아 연료 관련 전문인력 확보를 제시하였다. ‘그린 암모니아 선박 연료 활용’ 측면에서는 ① 그린 암모니아 선박 연료 협력 체계 구축, ② 기술 개발 및 실증 지원 확대, ③ 연료 전환 규제 및 인센티브 확대를 제안하였다.

본 연구는 선박 연료의 전환에 대한 장기 전망에서 그린 암모니아 선박 연료 시장이 형성되지 않았기 때문에 전문가 설문조사 및 기존의 문헌자료를 통해서 도출할 수밖에 없었다. 이러한 한계는 있으나 그린 암모니아 선박 연료로의 전환을 준비하기 위한 국내 여건을 종합적으로 분석하고, 시스템 다이내믹스라는 정량적 분석으로 보완을 시도하여 정책적인 대응 방안을 제시했다는 점에서 의의를 지닌다.

제2절 정책제언

1. 그린 암모니아 선박 연료 민관 협력 거버넌스 구축

국내의 연료 공급 업계에서는 선박 연료로서 그린 암모니아에 대한 수요를 예측하기가 어렵다. 또한 선사는 그린 암모니아의 공급 및 활용 기술에 대한 확신을 갖기 어렵다. 한편 정부는 이러한 상황을 고려하여 그린 암모니아 선박 연료 확보를 고려해야 한다. 그러나 정부 및 산업계 간의 협력 네트워크는 미흡한 실정이다. 그린 암모니아 선박 연료를 도입하기 위해서는 정부와 민간의 긴밀한 관계 형성을 통해 해당 정책을 추진해나가야 한다. 정책 이슈의 형성 및 개발을 민관 협력 거버넌스를 구축함으로써 실효성 있는 정책을 운영할 수 있다.

민관 협력 거버넌스는 정부, 공공기관, 연구기관, 산업계, 기업 등이 주체가 되어 운영된다. 정부는 그린 암모니아 선박 연료를 중심으로 해양수산부와 산업부가 범부처 차원에서 업무를 추진하고 민관 협력 거버넌스의 운영을 지원한다. 연구기관, 공공기관, 산업계 등은 전문위원회 또는 워킹그룹을 구성하여 그린 암모니아 선박 연료와 관련된 기술적, 정책적인 세부 사업에 대한 논의를 지속할 수 있도록 제안한다.

2. 그린 암모니아 선박 연료 병커링 통계 관리

그린 암모니아 선박 연료의 수요에 선제적으로 대응하기 위해 병커링에 대한 통계 관리가 필요하다. 병커링 통계는 에너지 안보, 인프라 확충 등의 기초 자료로 활용될 수 있다. 이를 통해 항만별 그린 암모니아 연료의 공급량, 선박 유형별 사용 현황, 인증 등급별 분포를 파악할 수 있다면 정부는

이에 맞는 정책을 수립하고, 민간 부문에서도 수요에 대응하여 투자를 판단할 수 있다. 이와 더불어 그린 암모니아 선박 연료의 공급자 간 시장 점유율을 파악할 수 있어 독과점을 예방하는 데에도 효과적이다.

병커링 통계는 해양수산부에서 관리하며, 전담기관을 지정하여 운영할 수 있다. 사업자는 병커링 실적을 의무적으로 신고해야 하며, 주요 항목은 항만·공급자별 병커링의 횟수 및 공급량, 병커링의 방식, 선박 유형별 사용 현황, 안전과 관련한 사고·이상 징후의 발생 건수 등이다. 수집된 데이터는 정부 주도의 항만 인프라 건설과 인센티브 지원 정책의 근거로 활용할 수 있다.

3. 그린 암모니아 선박 연료에 대한 인식 개선

그린 암모니아 선박 연료는 국제적인 환경 규제에 대응하고 해운 분야의 탈탄소 목표를 달성하기 위한 선택지로 각광받고 있음에도 불구하고 독성 등으로 인해 여전히 위험 연료로 인식되어 일반 대중 및 선사의 불안감을 높이기도 한다. 실제로 DNV, IEA 등 다양한 기관에서는 2050년까지 선박 연료로서 그린 암모니아의 비중을 30~40%대로 예측하고 있으며, 본 연구의 설문조사를 통해서도 암모니아는 2040년부터 미래 선박 연료의 대세가 될 것으로 전망되었다. 그러나 선사에서는 선상에서의 암모니아 누출 등에 대해 우려하고 있으며, 일각에서는 항만 내에 암모니아 기지를 설치하는 것은 인근 주민의 반발 등이 예상된다고 우려를 표한다. 또한 법적인 절차를 충족하여 시설을 구축하려고 해도 지자체에서 인허가를 거부하여 사업이 지연될 가능성도 있다.²⁵⁰⁾

따라서 정부는 그린 암모니아 선박 연료에 대한 국민의 인식을 개선할

250) 변전소 설치와 관련하여 유사 사례가 존재한다.

필요가 있다. 이를 위해서 우선 암모니아 선박 연료의 취급과 관련해 실시간으로 환경 및 안전에 대한 데이터를 공개하는 방법이 있다. 항만 배후지 등에 암모니아 센서 등을 설치하여 실시간으로 수치를 측정하고 수치가 높아질 경우에는 경보 발령을 내릴 수 있도록 관리하여 심리적인 불안감을 낮춘다.

일반 대중을 대상으로 암모니아의 안전에 대한 체험을 경험할 수 있도록 하는 방법도 고려할 수 있다. 구체적으로는 일반인을 대상으로 항만 방문 체험을 진행할 때 암모니아를 소개하는 방안이 있다. 이 때 암모니아가 기존에 취급해온 화물이며 세계의 각 터미널에서 안전하게 운영 중이라는 사실을 시각자료와 함께 제공한다.

참고문헌

국내 문헌

- 경남테크노파크(2025), 제7차 경남 암모니아 혼소 연료추진시스템 선박 규제자유특구.
관계부처합동(2020), 2030 한국형 친환경선박(Greenship-K)추진 전략: 제1차 친환경
선박 개발·보급 기본계획(‘21~’30).
- 관계부처합동(2021), 제1차 수소경제 이행 기본계획.
- 관계부처합동(2022a), 청정수소 생태계 조성방안.
- 관계부처합동(2022b), 수소기술 미래전략.
- 관계부처합동(2023), 친환경 선박 연료 공급망 구축방안.
- 김기두(2023.11.8.), 4행정 암모니아 엔진 개발 동향, 2023 MacNet 전략세미나Ⅱ, (사)
해양산업통합클러스터.
- 김지희(2022), 글로벌 암모니아 시장 동향 및 암모니아 발전 관련 이슈, KEMRI 전력경
제 Review, 4, 한전경영연구원.
- 김진형·최재혁(2024), FuelEU Maritime 규제 적용에 따른 해양 연료의 영향분석 및
대응방안 연구, 대한조선학회 논문집, 61(2), pp.88-97.
- 대한민국정부(2025), 이재명정부 123대 국정과제.
- 대한석유협회(2024), EU 재생에너지 지침 개정 현황.
- 백종민, 김수현(2024), 국내·외 수전해 기술 및 대규모 실증 프로젝트 진행 현황, 한국
수소 및 신에너지학회 논문집, 35(1), 한국수소 및 신에너지학회, pp.14-26.
- 부산시(2024), 제1차 부산광역시 탄소중립·녹색성장 기본계획.

부산조선해양기자재공업협동조합(2023), 친환경 선박 대체연료 추진시스템 기자재 기술 및 시장조사.

산업통상자원부 보도자료(2023.02.02.), 에너지 공공기관이 한데 뭉쳐 청정수소 발전 전주기 생태계 조성에 박차.

산업통상자원부 에너지안전과(2023), 수소 안전관리 로드맵 2.0.

안지영·이태의(2023), 청정 암모니아 전주기 밸류체인 체계 구축 연구, 에너지경제연구원.

양종서(2023), 해상탄소중립을 위한 선박 대안 연료 현황과 시사점: LNG, 메탄올, 암모니아를 중심으로, 이슈보고서, 한국수출입은행 해외경제연구소.

울산지방중소벤처기업청 보도자료(2025.05.22.), 중기부, ‘울산 암모니아 병커링 특구’ 규제자유특구 신규 지정.

울산항만공사(2025), 울산항 친환경 에너지 물류허브 구축계획.

이종윤·이복직(2022), 탄소중립연료(E-Fuel) 연구개발 현황, 한국연소학회지, 27(1), pp.37-57.

이후경 외(2021), 탄소중립을 위한 암모니아 연소기술의 연구개발 필요성: Part I 연료 암모니아의 보급확대 배경과 경제성, 한국연소학회지, 26(1), 한국연소학회, pp.59-83.

임지영·김창훈(2021), 일본의 수소·암모니아 공급이용 확대 전략과 관련 기업 동향, 세계 에너지시장 인사이트, 제21-24호, 에너지경제연구원.

지재훈(2023), What-if 기법을 이용한 암모니아 연료 추진 선박에 대한 위험성 평가 연구, 수산해양교육연구, 35(5), pp. 783-795.

최우석(2023), 선박 연료로서 암모니아의 독성을 극복할 수 있는가?, KR Decarbonization Magazine, pp.12-15.

한국선급(2021), 암모니아 연료추진선박 보고서.

한국선급(2023), 무탄소 선박연료로서 암모니아의 전망.

한국선급(2024a), 수소 추진선박 병커링 작업 안전 지침서.

한국선급(2024b), 암모니아엔진 전문가 인터뷰, KR Decarbonization Magazine, pp.30-35.

한국선급(2024c), Fuel EU Maritime 지침서.

한국선급(2024d), 해운분야 EU ETS 도입에 따른 초기 이행 지침, Technical Informaion.

- 한국선급(2025a), 연료전지 선박 설계를 위한 기술 안내서.
- 한국선급(2025b), 선급 및 강선규칙 적용지침 개정사항: 저인화점 연료 선박.
- 한국에너지기술연구원(2021), 탄소중립연료: 암모니아 정책 및 산업 동향.
- 한국에너지기술연구원 보도자료(2024.02.07.), 탄소중립 앞당기는 친환경 암모니아 대량 생산 기술 개발.
- 한국해사협력센터(2024a), 선박 대체연료 도입 및 전망에 대한 연구.
- 한국해사협력센터(2024b), 2024 해사안전소식, p.43.
- 한국해사협력센터(2025), IMO 온실가스 중기조치 「Net-Zero Framework」 Marpol 협약 신설 규칙 해설서.
- 해양수산부 항만운영과(2023.11.30.), 위험물 하역 자체안전관리계획서 승인 업무처리 지침.

국외 문헌

- ABS(2025), News Brief MEPC 83.
- Bicer & Dincer(2018), Environmental impact catogiores of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation, International Journal of Hydrogen Energy, 43(9), pp.4583-4596.
- BloombergNEF(2020), Hydrogen Economy Outlook.
- BloombergNEF(2024), Scailing Up Hydrogen: The Case for Low-Cargon Ammonia.
- ClassNK(2024), FAQs on the FuelEU Maritime(3rd edition).
- ClassNK(2025), Alternative Fuels Insights.
- DNV·RICARDO(2023), Study on the readiness and availability of low and zero carbon ship technology and marine fuels.
- DNV(2023), Energy Transition Outlook 2023.
- DNV(2024), Availability of Green and Blue Ammonia 2030 to 2050.
- DNV(2025), Safe Introduction of Alternative Fuels: Focus on Ammonia and Hydrogen as Ship Fuels.

European Commission(2024), The EU ETS and MRV Maritime General guidance for shipping companies, Guidance document No.1.

Forrester, Jay W. (1961). Industrial Dynamics. Cambridge, MA: MIT Press.

Gerlitz et al.(2020), Ammonia as a clean shipping fuel for the Baltic Sea region, Transport and Telecommunication, 23(1), pp.102-112.

Guerra et al.(2020), Technical-economic analysis for a green ammonia production plant in Chile and its subsequent transport to Japan, Renewable Energy, 157, pp.404-414.

IEA(2021), Ammonia Technology Roadmap.

IEA(2024), World Energy Outlook.

IMO(2023), 2023 IMO Strategy on reduction of GHG emissions from ships, Resolution MEPC.377(80).

IMO(2024a), Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Cases In Bulk(IGC CODE), Resolution MSC.566(109).

IMO(2024b), 2024 Guidelines on life cycle GHG intensity of Marine fuels(2024 LCA Guidelines), Resolution MEPC.391(81).

IMO(2025a), Amendments to the 2022 Guidelines on survey and certification of the Energy Efficiency Design Index(EEDI), Resoultion MEPC.403(83).

IMO(2025b), Draft revised MARPOL Annex VI. Circular Letter No.5005.

IMO(2025c), Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Ammonia As Fuel. MS C.1/Circ.1687.

IRENA(2022), Innovation Outlook: Renewable Ammonia.

IRENA(2024), World Energy Transition Outlook.

K.Machaj et al.(2022), Ammonia as a potential marine fuel: A review, Energy Strategy Reviews, 44, 100926.

EMSA.(2022), Pontential of Ammonia as Fuel in Shipping.

Laval et al.(2020), Ammonfuel: An industrial view of ammonia as a marine fuel.

Lloyd's Register(2024), Fuel for thought: Ammonia.

- Mærsk Mc-Kinney Møller Center(2023), Managing Emissions from Ammonia-Fueled Vessels.
- Mallouppas et al(2022), A review of the latest trends in the use of green ammonia as an energy carrier in maritime industry, *Energies* 15(4), 1453.
- MPA(2022), Decarbonisation blueprint working towards 2050.
- MPP(2022), Making Net-Zero Ammonia Possible.
- Olli&Voovere(2021), The Future of Ammonia is Green, Stargate Hydrogen
- Oxford Research(2021), Innovation needs for decarbonization of Shipping; Technical annex report, Mission Innovation.
- S&P Global(2024), The Ammonia Marke Today and a Bridge to the Future, 2024 Annual Conference, Ammonia Energy.
- Sterman, John D. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Boston: McGraw-Hill.
- Sterman, John D. (1994). "Learning in and about complex systems." *System Dynamics Review*, 10(2-3), 291-330.
- Wang et al.(2023), Ammonia-based green corridors for sustainable maritime transportation, *Digital Chemical Engineering*, 6, 100082.
- Wu et al.(2023), Emission reduction and cost-benefit analysis of the use of ammonia and green hydrogen as fuel for marine applications, *Green Energy and Resources*, 4(1), 100046.
- Zhao(2024), Green ammonia supply chain and associated market structure, *Fuel*, 366, 131216.
- Zincir(2022). Ammonia for decarbonized maritime transportation, *Clean Fuels for Mobility*, pp.171-199.
- 일본 경제산업성(2021), 「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」プロジェクトの研究開発・社会実装の方向性.
- 일본 경제산업성(2023), Overview of Basic Hydrogen Strategy.
- 일본 국토교통성·JSTRA·일본재단(2020). Roadmap to Zero Emission from International Shipping.

인터넷 자료

강미주(2025.7.14.), IHI-보파, 일본 암모니아 터미널 공동개발 협력, 해양한국, <https://www.monthlymaritimekorea.com/news/articleView.html?idxno=54556>
(검색일: 2025.8.20.)

박용신(2024.9.18.), KR-HD현대重, 암모니아 연료 공급 시스템 개발 협력, 한국해운
신문, <http://www.maritimepress.co.kr/news/articleView.html?idxno=322425>(검색일: 2025.3.30.)

관세청 수출입무역통계, <https://tradedata.go.kr/cts/index.do>(검색일: 2025.7.05.)

남궁윤(2021.5.12.), ‘저렴한 그린수소’ 생산, 해법은 무엇일까?, 에너지신문, <https://www.energy-news.co.kr/news/articleView.html?idxno=76539>(검색일:
2025.3.26.)

남해화학, 국내 최대 규모 2만 5000t 암모니아 탱크 준공, <https://www.nhchem.co.kr/sub/promotion/news/view.html?idx=68>(검색일: 2025.6.30.)

대한민국 정책브리핑(2024.5.16.), 친환경선박 건조비용 최대 30% 지원…지원대상
자 모집, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148929223>(검색일: 2025.7.8.)

롯데정밀화학, 녹색성장의 새로운 동력 ‘그린 암모니아’, https://www.lottefinechem.com/LFC_2021SR_MS/story/story_e_1.html(검색일:2025.9.5.)

박상우(2024.10.10.), 친환경 연료 필요한 해운·발전, 암모니아 기술 확보에 총력,
월간수소경제, <https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=12983>(검색일: 2025.3.30.)

박상우(2023.4.24.), HMM, 롯데정밀화학과 암모니아 해상운송 사업 협력, 월간수소
경제, <https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=10913>(검색
일:2025.9.5.)

취핑뉴스넷(2024.1.17.), 탱커의 중심 대체연료는 암모니아가 될 것, 암모니아 Ready
선 300척 넘어, [https://www.shippingnewsnet.com/news/articleView.htm
l?idxno=57765](https://www.shippingnewsnet.com/news/articleView.html?idxno=57765)(검색일:2025.5.28.)

취핑뉴스넷(2025.5.21.), 울산시, 암모니아 병커링 규제자유특구 지정 “울산 조선업에
날개 달았다”, <https://www.shippingnewsnet.com/news/articleView.html?>

- idxno=64760(검색일 2025.7.23.)
- 쉬핑투데이(2025.02.26.), KR, 암모니아 병커링 시뮬레이션 시스템 신규 구축, <https://www.shippingtoday.com/news/articleView.html?idxno=62983>(검색일: 2025.04.28.)
- 시사저널(2025.7.31.), 기술 선점한 HD현대...‘암모니아 추진선’ 조용한 승부 시작, <https://www.sisajournal-e.com/news/articleView.html?idxno=413928> (검색일: 2025.8.14.)
- 에너지경제연구원, 청정수소인증제 개요, <https://www.keei.re.kr/menu.es?mid=a10211010300>(검색일: 2025.7.23.)
- 에너지정보문화재단(2024.11.18.), 그린 수소를 생산하는 수전해 기술의 작동원리와 종류, <https://blog.naver.com/energyinfoplaza/223664807410>(검색일: 2025.3.26.)
- 에너지타임즈(2021.9.10.), <http://www.energytimes.kr/news/articleView.html?idxno=60369>(검색일: 2025.3.30.)
- 양범수(2025.6.23.), HD현대, 세계 최초 중형 암모니아 추진선 상용화 눈앞, 조선비즈, <https://biz.chosun.com/industry/company/2025/06/23/6AUNIXOOUNBI5N2YIXJAMC5WQU/>(검색일: 2025.7.23.)
- 양인범(2024.4.9.), 암모니아 생산 및 분해기술 현황 및 전망: 생산 시 고온·고압 극복과 수소 추출 플랜트 건설이 관건, 가스신문, <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=109091>(검색일: 2025.4.9.)
- 양인범(2023.8.8.), 수전해 기술별 장단점과 국내외 연구 현황: 수전해 기술은 고밀도 수소생산과 스택기술이 관건, 가스신문, <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=111399>(검색일: 2025.7.6.)
- 양인범(2025.1.6.), 포테스큐의 선박, 세계 최초로 암모니아 연료 사용 성공, 가스신문, <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=114664>(검색일: 2025.9.27.)
- 연합뉴스(2025.7.11.) 엔비전, 세계 최대 그린 수소·암모니아 플랜트 공급, <https://www.yna.co.kr/view/RPR20250711007500353>(검색일: 2025.9.29.)
- 울산신문(2021.12.7.), 롯데정밀화학, 암모니아 발전 실증 작업 참여, <https://www.ulsanpress.net/news/articleView.html?idxno=389467>(검색일: 2025.6.30.)

윤재현(2025.3.12.), 친환경 수소 경제 핵심, 저온·저압 암모니아 합성 촉매 개발, 전기신문, <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=351718> (검색일: 2025.3.26.)

임팩트온(2024.11.1.), 해운업계, 무배출 연료 암모니아 선박 프로젝트에 박차... 비용과 안전성 확보 문제는 '숙제', <https://www.impacton.net/news/articleView.html?idxno=12947>(검색일: 2025.5.26.)

장원수(2024.5.21.), 롯데정밀화학, 국내 암모니아 유통의 70% 차지하고 있다, 인사이트코리아, <https://www.insightkorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=200104>(검색일: 2025.9.5.)

중소벤처기업부 규제자유특구, <https://rfz.go.kr/?menuno=258>(검색일: 2025.7.23.)

친환경선박 전주기 혁신기술개발사업 통합사업단, <https://kories.org/kor/contents/38>(검색일: 2025.7.8.)

친환경선박 전주기 혁신기술개발사업 통합사업단, <https://kories.org/kor/contents/39>(검색일: 2025.7.8.)

코리아쉬핑가제트(2025.4.1.), 일본 MOL, 中 조선에 암모니아 추진선박 9척 발주, https://www.ksg.co.kr/news/main_newsView.jsp?pNum=144186(검색일: 2025.5.26.)

투데이에너지(2025.7.26.), 엔비전 에너지, 세계 최초 친환경 해양 암모니아 병커링 성공, <https://www.todayenergy.kr/news/articleView.html?idxno=286596> (검색일:2025.8.20.)

팬오션(2025.6.13.), 팬오션, 친환경 VLCC 신조발주, <https://www.panocean.com/kor/NewsView?i=89&p=1>(검색일: 2025.8.14.)

한국경제(2023.4.25.), HMM·롯데정밀화학, 그린 암모니아 운송 협약, <https://www.hankyung.com/article/2023042494591>(검색일: 2025.5.26.)

한국석유공사, 저탄소 수소·암모니아 사업, https://www.knoc.co.kr/sub03/sub03_9_7.jsp(검색일: 2025.9.5.)

한국선급 홈페이지, https://decarbonization.krs.co.kr/kor/Knowledge/KN_CategoryList.aspx?MRID=943&F_MENU=943?MRID=943&EMR=943&ECATE= (검색일: 2025.8.7.)

한국에너지기술연구원 기술정책플랫폼, <https://www.kier.re.kr/tpp/energy/A/>

- view/60?contentsName=below3_6&menuId=MENU00963(검색일: 2025.7.6.)
- 한국해운신문(2025.7.17.), 이토추, 세계 첫 암모니아 병커링선 신조, <http://www.maritimepress.co.kr/news/articleView.html?idxno=326815>(검색일: 2025.8.20.)
- 해사경제신문(2025.4.21.), KSS해운, 네덜란드 로테르담서 암모니아 STS 병커링 실증 성공… 친환경 해운 전환 견인, <http://www.ihesa.com/news/article.html?no=85714>(검색일: 2025.4.28.)
- 홍영표(2025.9.11.), 인도 ACME-일본 IHI, 40만 톤급 그린암모니아 생산 착수…청정 수소 허브 시험대, <https://www.impacton.net/news/articleView.html?idxno=16488>(검색일: 2025.10.1.)
- Ammonia Energy Association(2025.3.21.), Setting the scene for ammonia maritime fuel: regulatory needs and timelines to decarbonize shipping, <https://ammoniaenergy.org/articles/setting-the-scene-for-ammonia-maritime-fuel-regulatory-needs-and-timelines-to-decarbonize-shipping/>(검색일: 2025.5.26.)
- CCS(2024.5.16.), China Classification Society (CCS) Participated in the Founding Congress of the Northeast Asia Green Ship Fuel Supply Chain Alliance, <https://www.ccs.org.cn/ccswzen/articleDetail?id=202405160473873922>(검색일: 2025.10.13.)
- David Carroll(2022.11.15.), FFI plans 10 GW renewables ‘super hub’ to power green hydrogen, PV Magazine, <https://www.pv-magazine-australia.com/2022/11/15/ffi-plans-10-gw-renewables-super-hub-to-power-green-hydrogen/>(검색일: 2025.5.20.)
- George Heynes(2025.7.25.), BP exits 26GW wind, solar and green hydrogen project in Western Australia, PV Tech, <https://www.pv-tech.org/bp-exits-26gw-wind-solar-and-green-hydrogen-project-in-western-australia/>(검색일: 2025.9.29.)
- IEA, <https://www.iea.org/reports/state-of-energy-policy-2024/key-findings> (검색일: 2025.3.26.)
- IEA, <https://www.iea.org/reports/aviation-and-shipping>(검색일: 2025.5.26.)
- IMO(2025.4.11.), IMO approves net-zero regulations for global shipping, <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/imo-approves-net>

-
- zero-regulations.aspx(검색일: 2025.8.5.).
- Matjaž Matošec(2024.1.25.), Green ammonia, right where you need it, Hydrogen Tech World, <https://hydrogentechworld.com/green-ammonia-right-where-you-need-it>(검색일: 2025.8.7.)
- MPA(2024.4.15.), Maritime Energy Training Facility to Deliver Competencies for Maritime Workforce to Handle New Fuels, <https://www.mpa.gov.sg/media-centre/details/maritime-energy-training-facility-to-deliver-competencies-for-maritime-workforce-to-handle-new-fuels>(검색일: 2025.9.27.)
- Niu Yuhan(2025.10.8.), Can China's green ammonia cope with the green hydrogen slowdown?, Dialogue Earth, <https://dialogue.earth/en/energy/can-china-s-green-ammonia-cope-with-the-green-hydrogen-slowdown/>(검색일: 2025.10.13.)
- Port of Rotterdam(2025.4.14.), Port of Rotterdam takes important step in making shipping more sustainable: pilot prepares port for safe bunkering of ammonia, <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-rotterdam-takes-important-step-making-shipping-more-sustainable-pilot>(검색일: 2025.9.30.)
- Supply Chain(2025.10.22.), OCI and Victrol: Developing Clean Ammonia Supply Chains, <https://supplychaindigital.com/news/oci-victrol-clean-ammonia>(검색일: 2025.10.23.)
- UN 홈페이지, The Netherlands to work towards climate-neutral shipping in 2050, <https://sdgs.un.org/partnerships/netherlands-work-towards-climate-neutral-shipping-2050>(검색일: 2025.9.30.)

기타 자료

- 고압가스안전관리법(법률 제21065호, 2025.10.1.)
- 선박안전법(법률 제19134호, 2022.12.27.)
- 수소경제 육성 및 수소 안전관리에 관한 법(법률 제21065호, 2025.10.1.)

해양환경관리법시행령(대통령령 제35811호, 2025.10.1.)

환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률(법률 제21065호, 2025.10.1.)

환경친화적 선박 및 기자재 인증제도 운영요령(해양수산부고시 제2025-27호, 2025. 2.20.)

자문회의(2025.7.4., 영상회의).

자문회의(2025.7.8., 대한민국 서울).

자문회의(2025.7.9., 영상회의).

자문회의(2025.7.18., 대한민국 부산).

자문회의(2025.7.21., 대한민국 서울).

부 록

1. 변수 리스트

다음의 표는 '제4장 국내의 그린 암모니아 선박 연료 메커니즘의 영향 요인 분석'에서 시스템 다이내믹스 분석에 사용한 변수 리스트를 나타낸 것이다. 변수 리스트는 공급 예측 영역, 수요 전망 영역, 기술적인 준비 영역, 제도적인 준비 영역 등 4개의 영역으로 구분된다.

〈부록 표 1-1〉 수요 전망 영역 변수 리스트

변수명	정의	수식	단위	변수타입
그린암모니아 연료가격	그린암모니아의 연료가격 전망치	SMOOTH(생산단가*(1-정부보조율+징려제도 수준 국내+징려제도 수준 국외), 3)+0.5*(경쟁연료 가격-생산단가)	ton/year	Auxiliary
가격반응계수	연료가격 변화에 따른 민감도	WITHLOOKUP(그린암모니아 연료가격, ((0, 1.5), (300, 1.2), (500, 1), (700, 0.7), (900, 0.4), (1000, 0.3))	unit	Auxiliary
확산패턴	신기술이 시장에 보급되어 확산되는 속도	WITHLOOKUP(Time, ((2025, 0), (2025, 0.05), (2030, 0.1), (2035, 0.3), (2040, 0.6), (2045, 0.85), (2050, 1)))	Dmnl	Auxiliary
경쟁연료가격	그린암모니아 대체연료의 가격 수준	SMOOTH(경쟁연료 최소값, 1)	ton/year	Auxiliary
경쟁연료 최소값	대체 선박 연료 중 가장 낮은 단위가격	MIN(("E-메탄올 가격"+LNG 가격+VLSFO 가격+바이오디젤 가격+그린 수소 가격+전기 가격)/6, 바이오디젤 가격)	USD/ton	Auxiliary
VLSFO 가격	VLSFO 연료의 단위비용	VLSFO 가격 변화율(Time)	USD/ton	Auxiliary
VLSFO 가격 변화율	VLSFO 비용의 시간에 따른 변화정도	[(2025, 400)-(2050, 600)], (2025, 440), (2026, 460), (2027, 480), (2028, 500), (2029, 520), (2030, 560), (2035, 520), (2040, 480), (2045, 460), (2050, 440)	USD/ton	Lookup
LNG 가격	LNG 연료의 단위비용	LNG 가격 변화율(Time)	USD/ton	Auxiliary
LNG 가격 변화율	LNG 비용의 시간에 따른 변화정도	[(2025, 0)-(2050, 3000)], (2025, 2080), (2026, 1820), (2027, 1300), (2028, 780), (2029, 624), (2030, 520), (2031, 520), (2035, 520), (2040, 494), (2045, 482), (2050, 468)	USD/ton	Lookup
전기 가격	전기 연료의 단위비용	전기 가격 변화율(Time)	USD/ton	Auxiliary
전기 가격 변화율	전기 비용의 시간에 따른 변화정도	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 9,561.4), (2028, 25,8,02632), (2032, 11,6,35965), (2035, 35,5,26316), (2038, 33,4,38596), (2040, 79,3,72807), (2044, 56,2,54396), (2050, 0,657896)	USD/ton	Lookup
바이오디젤 가격	바이오디젤 연료의 단위비용	바이오디젤 가격 변화율(Time)	USD/ton	Auxiliary
바이오디젤 가격 변화율	바이오 디젤 비용의 시간에 따른 변화정도	[(2025, 900)-(2050, 2000)], (2025, 1073), (2026, 1050), (2027, 1025), (2028, 1000), (2030, 980.5), (2035, 960), (2040, 950), (2045, 945), (2050, 943.5)	USD/ton	Lookup
E-메탄올 가격	E-메탄올로 연료의 단위비용	"E-메탄올 가격 변화율"(Time)	USD/ton	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
E-메탄을 가격 변화율	E-메탄을 비용의 시간에 따른 변화정도	$[(2025,600)-(2050,2000)] / [(2025,1078.25)-(2026,1060)] / (2028,1030) / (2030,998.8) / (2035,850) / (2040,750) / (2045,700) / (2050,658)$	USD/ton	Lookup
정부보조율	정부의 비용 보조율	IF THEN ELSE(Time >= 2030, 0.8, 0.1)	Dmnl	Auxiliary
생산단가	그린메타니아 소비에 사용되는 총비용	INTEG(그린수소 가격*재생에너지 가격, 0)	USD/ton	Level
그린수소 가격	그린수소의 톤당 시장 가격	그린수소 가격 변화율 (Time)	USD/ton	Auxiliary
그린수소 가격 변화율	그린수소 비용의 시간에 따른 변화정도	$[(0,0)-(10,10)] / (2025,2700) / (2026,2364) / (2027,2040) / (2028,1716) / (2029,1380) / (2030,996) / (2031,978) / (2032,960) / (2033,954) / (2034,948) / (2035,942) / (2036,936) / (2037,930) / (2038,924) / (2039,918) / (2040,912) / (2041,906) / (2042,902.4) / (2043,900) / (2044,897.6) / (2045,895.2) / (2046,892.8) / (2047,890.4) / (2048,888) / (2049,885.6) / (2050,882)$	USD/ton	Lookup
재생에너지 가격	재생에너지로 생산된 전기의 단위비용	재생에너지 가격 변화율 (Time)*재생에너지 제도 수준	USD/ton	Auxiliary
재생에너지 가격 변화율	재생에너지 비용의 시간에 따른 변화정도	$[(2025,100)-(2050,300)] / (2025,250.5) / (2026,242.2) / (2027,234) / (2028,225.7) / (2029,217.5) / (2030,209.2) / (2031,204) / (2032,198.7) / (2033,193.5) / (2034,188.2) / (2035,183) / (2036,180) / (2037,177) / (2038,174) / (2039,171) / (2040,168) / (2041,165) / (2042,162) / (2043,159) / (2044,156) / (2045,153) / (2046,150) / (2047,148) / (2048,146) / (2049,144) / (2050,142)$	USD/ton	Lookup
국내 입출항 선박 중 암모니아 선박	입출항 항만 중 암모니아 추진 선박의 비중	(국내 내항 입항선박 톤수+국내 외항 입항선박 톤수)*선박연료 중 그린암모니아 비중	ton/year	Auxiliary
국내 외항 입항선박 톤수	국내 항만에 입항만 선박의 화물 톤수	국내 외항 입항선박 톤수 변화율 (Time)*1,879,503	ton/year	Auxiliary
국내 외항 입항선박 톤수 변화율	국내 외항 입항선박 톤수의 연도별 변화율	$[(2025,0.9)-(2050,2)] / (2025,1) / (2026,1.005) / (2027,1.01) / (2028,1.015) / (2029,1.02) / (2030,1.025) / (2031,1.03) / (2032,1.035) / (2033,1.04) / (2034,1.045) / (2035,1.05) / (2036,1.055) / (2037,1.06) / (2038,1.065) / (2039,1.07) / (2040,1.075) / (2041,1.08) / (2042,1.085) / (2043,1.09) / (2044,1.095) / (2045,1.1) / (2046,1.105) / (2047,1.11) / (2048,1.115) / (2049,1.12) / (2050,1.125)$	Dmnl	Lookup
국내 내항 입항선박 톤수	국내 항만에 입항만 선박의 화물 톤수	국내 내항 입항선박 톤수 변화율 (Time)*264,946	ton/year	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
국내 내항 입항선박 톤수 변화율	국내 내항 입항 선박 톤수의 연도별 변화율	(2025, 1) \ (2026, 1.005) \ (2027, 1.01) \ (2028, 1.015) \ (2029, 1.02) \ (2030, 1.025) \ (2031, 1.03) \ (2032, 1.035) \ (2033, 1.04) \ (2034, 1.045) \ (2035, 1.05) \ (2036, 1.055) \ (2037, 1.06) \ (2038, 1.065) \ (2039, 1.07) \ (2040, 1.075) \ (2041, 1.08) \ (2042, 1.085) \ (2043, 1.09) \ (2044, 1.095) \ (2045, 1.1) \ (2046, 1.105) \ (2047, 1.11) \ (2048, 1.115) \ (2049, 1.12) \ (2050, 1.125)	Dmnl	Lookup
선박연료 중 그린암모니아 비중	선박 연료 중 그린암모니아가 차지하는 비율	선박연료 중 그린암모니아 비중 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
선박연료 중 그린암모니아 비중 변화율	시간에 따른 그린암모니아 연료 비중 변화율	[(2025, 0) \ (2050, 0.5)] \ (2025, 0) \ (2030, 0.035) \ (2040, 0.14) \ (2050, 0.4)	Dmnl	Auxiliary

자료: 저자 작성

〈부록 표 1-2〉 공급 예측 영역 변수 리스트

변수명	정의	수식	단위	변수타입
그린암모니아 수입 목표 전망치	한국으로 수입하고자하는 그린암모니아의 목표값	그린암모니아 수입 목표량 변화율(Time)	ton/year	Auxiliary
그린암모니아 수입 목표량 변화율	시간에 따른 수입하는 목표값의 변화정도	[(2025, 0) \ (2050, 500)] \ (2025, 0) \ (2027, 300000) \ (2030, 1e+06) \ (2033, 1.4e+06) \ (2037, 2e+06) \ (2040, 2.8e+06) \ (2045, 3.7e+06) \ (2050, 4.6e+06)	ton/year	Lookup
그린암모니아 연료 가격 전망치	그린암모니아의 가격 전망값	그린 암모니아 연료 가격 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
그린암모니아 연료 가격 변화율	시간에 따른 그린암모니아 가격의 변화정도	[(2025, 0) \ (2050, 10)] \ (2025, 9.51754) \ (2026, 8.55263) \ (2027, 7.19298) \ (2030, 5.39474) \ (2035, 3.77193) \ (2040, 2.41228) \ (2045, 1.40351) \ (2050, 0.921053)	Dmnl	Lookup
그린암모니아 수입 잠정치	한국으로 수입하고자하는 그린암모니아의 잠정값	(그린수소 총 공급량*5.63)+한국 수입할당량*그린암모니아 수입 성장률	ton/year	Auxiliary
그린수소 총 공급량	그린수소 공급량	그린 수소 생산+그린 수소 수입	ton/year	Auxiliary
그린 수소 수입	한국으로 수입하는 그린수소 수입량	INTEG(그린수소 성장률*그린수소 성장률 기간 설정*그린 수소 수입, 660000)	ton/year	level
그린수소 성장률	그린수소	그린수소 성장률 기간 설정(Time)	ton/year	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
그린 수소 생산	그린수소 생산량 전임치	INTEG(그린수소 성장률*그린수소 성장률 기간 설정*그린 수소 생산, 250000)	ton/year	level
그린수소 성장률 기간 설정	그린수소 생산의 시작 시간적 범위	STEP(1, 2030)	Dmnl	Auxiliary
한국 수입합당량	국외 그린암모니아 생산 목표에 따른 한국 수입할 당량	한국 수입합당계수*국외 그린암모니아 생산목표 전임치	ton/year	Auxiliary
그린암모니아 수입 기간 변화율	그린암모니아 수입 시간적 범위 변화율	그린암모니아 수입 기간 설정(Time)	ton/year	Auxiliary
그린암모니아 수입 기간 설정	그린암모니아 수입의 시작 시간적 범위	STEP(1, 2030)	Dmnl	Auxiliary
한국 수입합당계수	한국이 수입하는 그린암모니아의 비중	0.2+ STEP(0.05, 2035)+ STEP(0.05, 2040)+ STEP(0.05, 2045)+ STEP(0.05, 2050)	ton/year	level
국외 그린암모니아 생산목표전임치	국외에서 생산하는 그린암모니아 목표치	국외 그린암모니아 생산목표치 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 그린암모니아 생산목표치 변화율	국외 그린암모니아 생산 목표치의 변화정도	[(2025, 0)-(2050, 500)] (2025, 0.8), (2027, 10), (2030, 28), (2035, 100), (2040, 206), (2045, 310), (2050, 420)	Dmnl	Auxiliary

자료: 저자 작성

〈부록 표 1-3〉 기술적 준비 영역 변수 리스트

변수명	정의	수식	단위	변수타입
그린암모니아 선택 운항 기술적 준비정도	실제 운항 가능한 수준까지 기술적으로 얼마나 준비되었는지를 나타내는 지표	INTEG(그린암모니아 선택 운항 기술적 준비정도)(그린암모니아 추진 선박 기술적 준비정도/9), 그린암모니아 선택 기술적 준비정도 전임치)	Dmnl	Level
기술적 준비정도 목표치	목표 시점까지 도달해야 할 기술 준비정도	IF THEN ELSE(그린암모니아 공급 및 병커링 기술적 준비정도)=9):AND: (그린암모니아 선택 운항 기술적 준비정도)=9), 1. 그린암모니아 공급 및 병커링 기술적 준비정도/9+그린암모니아 선택 운항 기술적 준비정도/9)	Dmnl	Auxiliary
그린암모니아 공급 및 병커링 기술적 준비정도	항만에서의 그린암모니아 연료 공급 및 병커링 관련 기술의 준비수준	INTEG((국내 그린 수소 공급 기술적 준비정도 종합+해외 그린 암모니아 공급 기술적 준비정도 종합)*병커링 기술적 준비정도 종합, 그린암모니아 생산 기술적 준비정도 전임치)	Dmnl	Level
그린암모니아 선택 기술적 준비 정도 전임치	시간에 따른 선택 기술적 준비정도의 전임치	그린암모니아 선택 기술적 준비정도 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
그린암모니아 선박 기술적 준비 정도 변화율	시간에 따른 선박 기술적 준비정도의 변화율	(2030, 1), (2035, 2), (2040, 3), (2045, 4), (2050, 5)	Dmnl	Lookup
그린암모니아 추진 선박 기술적 준비정도	선박 자체의 기술적 준비정도	(국내 암모니아 추진 선박 기술적 준비정도+해외 암모니아 추진 선박 기술적 준비정도)/2	Dmnl	Auxiliary
국내 암모니아 추진 선박 기술적 준비정도	국내에서 개발된 암모니아 추진 선박 관련 기술의 준비정도	(국내 2행정엔진+국내 4행정엔진+국내 가스 터빈+국내 그린파일럿엔진+ 국내 독성처리+국내 연료전지)/6	Dmnl	Auxiliary
국내 독성처리	암모니아 연료의 독성으로 인한 위험을 제어하기 위한 국내 기술의 준비정도	국내 독성처리 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 그린파일럿엔진	정화 유지를 위한 파일럿 연료(친환경 연료)의 국 내 기술 준비정도	국내 그린파일럿엔진 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 연료전지	선박용 연료전지 시스템의 국내 기술 준비정도	국내 연료전지(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 4행정엔진	해당 선박 엔진 유형에 대한 암모니아 연료 적용 기술의 국내 준비정도	국내 4행정엔진(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 2행정엔진	해당 선박 엔진 유형에 대한 암모니아 연료 적용 기술의 국내 준비정도	국내 2행정엔진(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 가스터빈	암모니아 기반 가스터빈 시스템의 국내 기술 준비 정도	국내 가스터빈(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 독성처리 변화율	독성처리 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 4, 81), (2030, 6, 87), (2040, 8, 41), (2050 , 8, 99)	Dmnl	Lookup
국내 그린파일럿엔진 변화율	그린파일럿 연료 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 4, 34), (2030, 6, 14), (2040, 8, 01), (2050 , 8, 78)	Dmnl	Lookup
국내 연료전지 변화율	연료전지 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 4, 15), (2030, 5, 74), (2040, 7, 93), (2050 , 8, 89)	Dmnl	Lookup
국내 4행정엔진 변화율	4행정엔진 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 5, 55), (2030, 6, 95), (2040, 8, 58), (2050 , 9, 52)	Dmnl	Lookup
국내 2행정엔진 변화율	2행정엔진 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 5, 07), (2030, 7, 03), (2040, 8, 54), (2050 , 9, 25)	Dmnl	Lookup
국내 가스터빈 변화율	가스터빈 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 4, 16), (2030, 5, 87), (2040, 7, 50), (2050 , 8, 73)	Dmnl	Lookup

변수명	정의	수식	단위	변수타입
해외 암모니아 추진 선박 기술적 준비정도	글로벌 선박 업계의 암모니아 추진 관련 기술 수준	(국외 2행정엔진+국외 4행정엔진+국외 가스터빈+국외 그리파일렛엔로+국외 독성처리+국외 연료전지)/6	Dmnl	Auxiliary
국외 연료전지	선박용 연료전지 시스템의 국외 기술 준비정도	국외 연료전지(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 독성처리	암모니아 연료의 독성으로 인한 위험을 제어하기 위한 국외 기술의 준비정도	국외 독성처리(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 4행정엔진	4행정엔진 유형에 대한 암모니아 연료 적용 기술의 국외 준비정도	국외 4행정엔진(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 가스터빈	암모니아 기반 가스터빈 시스템의 국외 기술 준비정도	국외 가스터빈(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 그리파일렛엔로	점화 유지를 위한 파일렛 연료(친환경 연료)의 국외 기술 준비정도	국외 그리파일렛엔로(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 2행정엔진	2행정엔진 유형에 대한 암모니아 연료 적용 기술의 국외 준비정도	국외 2행정엔진(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 2행정엔진 변화율	2행정엔진 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025,0)-(2050,10)],(2025,5.97),(2030,7.88),(2040,9.37),(2050,9.89)	Dmnl	Lookup
국외 4행정엔진 변화율	4행정엔진 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025,0)-(2050,10)],(2025,5.92),(2030,7.96),(2040,9.32),(2050,9.84)	Dmnl	Lookup
국외 그리파일렛엔로 변화율	그리파일렛 연료 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025,0)-(2050,10)],(2025,4.81),(2030,6.73),(2040,8.29),(2050,8.97)	Dmnl	Lookup
국외 가스터빈 변화율	가스터빈 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025,0)-(2050,10)],(2025,4.18),(2030,5.77),(2040,7.87),(2050,8.79)	Dmnl	Lookup
국외 독성처리 변화율	독성처리 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025,0)-(2050,10)],(2025,4.94),(2030,7.02),(2040,8.50),(2050,9.13)	Dmnl	Lookup
국외 연료전지 변화율	연료전지 기술의 연도별 준비 증가율	[(2025,0)-(2050,10)],(2025,4.86),(2030,6.44),(2040,8.16),(2050,9.18)	Dmnl	Lookup
국내 그린 수소 공급 기술적 준비 정도 종합	내 전반적인 그린수소 생산 관련 기술의 통합 성숙도 수준을 나타내는 지표	INTEG(국내 그린 수소 공급 기술적 준비정도 종합+해외 그린 암모니아 공급 기술적 준비정도 종합)*벡커링 기술적 준비정도 종합,그린암모니아 생산 기술적 준비정도 전망치)	Dmnl	Level
국내 하버보쉬 저온저압 기술	하버보쉬 공정을 친환경적으로 개선한 국내 기술 준비 정도	국내 하버보쉬 저온저압 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary

번호명	정의	수식	단위	변수타입
국내 수전해기술	물을 전기분해하여 수소를 생성하는 국내 수전해 기술 전반기의 기술 준비 정도	국내 수전해기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 알칼리 전기분해	염기성 전해질을 사용하는 국내 알칼리 전기분해 기술 준비 정도	국내 알칼리 전기분해(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 SOEC 기술	고체산화물 전기분해를 활용한 고온 수전해 방식의 국내 기술 준비 정도	국내 SOEC 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 PEM 기술	고분자 전해질막을 사용하는 수전해 방식의 국내 기술 준비 정도	국내 PEM 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 알칼리 전기분해 변화율	연도별 알칼리 수전해 기술 준비 정도 변화율	$[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 5, 40), (2030, 6, 62), (2040, 8, 05), (2050, 9, 18)$	Dmnl	Lookup
국내 SOEC 기술 변화율	고체산화물 전기분해 기술 준비 정도 변화율	$[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 2, 69), (2030, 4, 24), (2040, 6, 18), (2050, 7, 86)$	Dmnl	Lookup
국내 하버보쉬 저온저압 기술 변화율	저온저압 하버보쉬 기술의 기술 준비 정도 변화율	$[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 3, 76), (2030, 5, 21), (2040, 6, 55), (2050, 8, 28)$	Dmnl	Lookup
국내 PEM 기술 변화율	PEM 수전해 기술의 연간 기술 준비 정도 변화율	$[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 4, 20), (2030, 5, 59), (2040, 7, 38), (2050, 8, 88)$	Dmnl	Lookup
국외 하버보쉬 저온저압 기술	하버보쉬 공정을 친환경적으로 개선한 국외 기술 준비 정도	국외 하버보쉬 저온저압 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 수전해기술	물을 전기분해하여 수소를 생성하는 국외 수전해 기술 전반기의 기술 준비 정도	국외 수전해기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 알칼리 전기분해	염기성 전해질을 사용하는 국외 알칼리 전기분해 기술 준비 정도	국외 알칼리 전기분해(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 SOEC 기술	고체산화물 전기분해를 활용한 고온 수전해 방식의 국외 기술 준비 정도	국외 SOEC 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 PEM 기술	고분자 전해질막을 사용하는 수전해 방식의 국외 기술 준비 정도	국외 PEM 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
국외 알칼리 전기분해 변화율	연도별 알칼리 수전해 기술 준비 정도 변화율	$[(2025, 0)-(2050, 10)], (2025, 6, 76), (2030, 7, 95), (2040, 8, 97), (2050, 9, 85)$	Dmnl	Lookup

변수명	정의	수식	단위	변수타입
국외 SOEC 기술 변화율	고체산화물 전기분해 기술 준비 정도 변화율	$[(2025,0)-(2050,10)], (2025,3.05), (2030,4.78), (2040,7.03), (2050,8.30)$	Dmnl	Lookup
국외 하버보쉬 저온저압 기술 변화율	저온저압 하버보쉬 기술의 기술 준비 정도 변화율	$[(2025,0)-(2050,10)], (2025,4.73), (2030,6.34), (2040,7.52), (2050,8.88)$	Dmnl	Lookup
국외 PEM 기술 변화율	PEM 수전해 기술의 연간 기술 준비 정도 변화율	$[(2025,0)-(2050,10)], (2025,5.49), (2030,6.69), (2040,8.28), (2050,9.29)$	Dmnl	Lookup
범커림 기술적 준비정도 종합	암모니아 연료를 선박에 안전하고 효율적으로 공급하기 위한 전체 범커림 기술 체계의 준비정도	국내 암모니아 범커림 기술적 준비정도	Dmnl	Auxiliary
국내 암모니아 범커림 기술적 준비정도	국내에서 개발 및 도입 중인 암모니아 범커림 기술의 준비정도	암모니아 연료주입 기술+저장 기술/2	Dmnl	Auxiliary
저장 기술	선박 연료로 사용할 암모니아를 고체/액체 상태로 안전하게 저장하는 기술 준비정도	저장 기술(Time)	Dmnl	Auxiliary
저장 기술 변화율	저장 기술의 연도별 준비정도 변화율	$[(2025,0)-(2050,10)], (2025,7.65), (2030,8.62), (2040,9.46), (2050,9.89)$	Dmnl	Lookup
암모니아 연료주입 기술	암모니아를 선박에 공급하는 주입 공정 기술(호스, 밸브, 계측 등)의 준비정도	암모니아 연료주입 기술 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
암모니아 연료주입 기술 변화율	연료주입 기술의 기술 준비정도가 연도별로 향상되는 비율	$[(2025,0)-(2050,10)], (2025,6.51), (2030,8.28), (2040,9.36), (2050,9.89)$	Dmnl	Lookup

자료: 저자 작성

〈부록 표 1-4〉 제도적 준비 영역 변수 리스트

변수명	정의	수식	단위	변수타입
재생에너지 제도 수준	재생에너지 관련 법·제도 정책의 종합적 구축 정도를 나타내는 지표	INTEG(재생 제도 구축-재생 제도 퇴행, 0.05)	Dmnl	Level
재생 제도 구축	재생에너지 관련 제도의 신규 도입 또는 강화 속도	재생에너지 제도 시행 수준*재생에너지 정책지수*(1-재생에너지 제도 수준)	Dmnl	Auxiliary
재생 제도 퇴행	기존 재생에너지 제도의 폐지, 약화, 비활성화 속도	재생에너지 제도 퇴행 수준*재생에너지 제도 수준	Dmnl	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
재생에너지 제도 시행 수준	실제로 운영 중인 재생에너지 제도의 실효성 수준	0.9	Dmnl	Constant
재생에너지 제도 퇴행 수준	제도적으로 후퇴하거나 무력화된 제도의 누적 수준	0.1	Dmnl	Constant
재생에너지 정책지수	재생에너지 관련 정책의 일관성, 체계성, 실행력 수준을 종합한 지표	(재생에너지 법적 인증 제도+재생에너지 공급 안정화 제도+재생에너지 생산지원금 제도)/3	Dmnl	Auxiliary
재생에너지 법적 인증 제도	재생에너지 기술 또는 제품의 법적 인증 체계 구축 현황	재생에너지 법적 인증 제도 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
재생에너지 공급 안정화 제도	재생에너지의 공급 변동성을 완화하기 위한 지원 제도	재생에너지 공급 안정화 제도 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
재생에너지 생산지원금 제도	재생에너지 생산자에게 지급되는 보조금 관련 정책 제도	재생에너지 생산지원금 제도(Time)	Dmnl	Auxiliary
재생에너지 법적 인증 제도 변화율	법적 인증 제도의 강화 또는 완화 속도	(2030, 0.2),(2035, 0.4), (2040, 0.6),(2045, 0.8),(2050, 1)	Dmnl	Lookup
재생에너지 공급 안정화 제도 변화율	공급 안정화 제도의 도입 확대·축소 변화 속도	(2030, 0.2),(2035, 0.4), (2040, 0.6),(2045, 0.8),(2050, 1)	Dmnl	Lookup
재생에너지 생산지원금 제도 변화율	생산 보조금 지급 제도의 예산 변화 또는 적용 범위 변화 속도	(2030, 0.2),(2035, 0.4), (2040, 0.6),(2045, 0.8),(2050, 1)	Dmnl	Lookup
장려제도 수준 국내	국내에서 그린암모니아 도입을 촉진하기 위한 정책·제도의 종합적 구축 정도	INTEG(구축 유입-퇴행 유출,0)	Dmnl	Level
구축 유입	새로운 장려제도의 도입 또는 기존 제도의 확장 속도	국내 장려제도 시행 수준*국내 장려제도 종합지수*(1-장려제도 수준 국내)*(1+0.2*장려제도 수준 국외)*(1+0.2*재생에너지 제도 수준)	Dmnl	Auxiliary
퇴행 유출	장려제도의 약화, 폐지 등 후퇴 현상의 속도	국내 장려제도 퇴행 수준*장려제도 수준 국내	Dmnl	Auxiliary
국내 장려제도 시행 수준	현재 운영되고 있는 국내 장려제도의 실효성 수준	0.9	Dmnl	Constant
국내 장려제도 퇴행 수준	제도적 후퇴가 진행된 장려정책의 누적 수준	0.1	Dmnl	Constant
국내 장려제도 종합지수	국내 장려제도 전반의 실행력, 일관성, 지속성 등을 반영한 복합 지표	(0.4*국내 보조금 및 세제 감면+0.35*국내 향만 인프라 조성+0.25*국내 R&D 실증사업 지원*+0.2*국내 공급 안정성 확보+0.3*녹색해운항로 파트너십 확대)/5	Dmnl	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
국내 보조금 및 세제 감면	그린임모니아 연료 또는 선박 도입을 위한 정부 보조금 및 세제 지원 제도	국내 보조금 및 세제 감면 제도 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 항만 인프라 조성	그린임모니아 병커링 및 저장시설 구축 등 항만 기반시설 확충 정책	국내 항만 인프라 조성 제도 변화율(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 R&D 실증사업 지원	선박 기술 연료 관련 실증 및 연구개발을 지원하는 국가 사업	국내 R&D 실증사업 지원(Time)	Dmnl	Auxiliary
녹색해운항로 파트너십 확대	탄소중립 해운으로 실현을 위한 공공-민간 협력 네트워크 확대 정책	녹색해운항로 파트너십 확대(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 공공 안정성 확보	국내 연료 수입 및 공급망의 안정성을 높이기 위한 제도적 노력	국내 공공 안정성 확보(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 보조금 및 세제 감면 제도 변화율	보조금, 세제감면 제도의 도입, 확대 또는 축소 속도	$[(2025, 0) - (2050, 1)], (2025, 0.3), (2030, 0.6), (2040, 0.85), (2050, 1)]$	Dmnl	Lookup
국내 항만 인프라 조성제도 변화율	항만 인프라 정책의 실행 또는 보강 변화 속도	$[(2025, 0) - (2050, 1)], (2025, 0.2), (2030, 0.55), (2040, 0.75), (2050, 1)]$	Dmnl	Lookup
국내 R&D 실증사업 지원제도 변화율	R&D 관련 제도의 예산, 범위, 추진 강도 등의 변화율	$[(2025, 0) - (2050, 1)], (2025, 0.25), (2030, 0.45), (2040, 0.85), (2050, 1)]$	Dmnl	Lookup
녹색해운항로 파트너십 확대 제도 변화율	파트너십 구축 및 활동 확대에 따른 정책 변화 속도	$[(2025, 0) - (2050, 1)], (2025, 0.15), (2030, 0.40), (2040, 0.70), (2050, 1)]$	Dmnl	Lookup
국내 공공 안정성 제도 변화율	공급망 안정화 정책의 변동성, 강화 정도를 나타내는 지표	$[(2025, 0) - (2050, 1)], (2025, 0.3), (2030, 0.45), (2040, 0.85), (2050, 1)]$	Dmnl	Lookup
규제제도 수준 국내	국내에서 그린임모니아 사용을 유도하기 위한 법적 행정적 규제 수준의 종합적 정도	INTEG(규제 구축유입-규제 퇴행 유출, 0)	Dmnl	Level
규제 구축유입	새로운 규제의 도입 또는 기존 규제의 강화 속도	최대 규제 구축속도*규제제도 종합지수*(1-규제제도 수준 국내)*(1+0.2*규제제도 수준 국외)	Dmnl	Auxiliary
규제 퇴행 유출	기존 규제가 완화되거나 폐지되는 속도	규제 퇴행률*규제제도 수준 국내	Dmnl	Auxiliary
최대 규제 구축속도	규제제도 도입이 가능할 최대 속도 또는 상한치	0.9	Dmnl	Constant
규제 퇴행률	전체 규제 중에서 제도적 후퇴가 발생하는 비율	0.1	Dmnl	Constant
규제제도 종합지수	규제제도의 강도, 지속성, 범위를 통합적으로 반영한 복합 지표	(국내 의무사용 강화+국내 탄소배출 규제 강화+국내 탄소세 부과 강화)/3	Dmnl	Auxiliary

변수명	정의	수식	단위	변수타입
국내 탄소배출 규제 강화	선박 등 탄소배출원의 배출 기준을 강화하는 제도	국내 탄소배출 규제 강화(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 탄소세 부과 강화	화석연료 사용에 따른 탄소세율 인상 또는 적용 범위 확대 정책	국내 탄소세 부과 강화(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 의무사용 강화	저탄소 연료(예: 그린암모니아) 사용 비율을 의무화하는 제도	국내 의무사용 강화(Time)	Dmnl	Auxiliary
국내 탄소배출 규제 강화 제도 변화	탄소배출 규제 정책의 도입, 강화, 변화의 속도	$[(2025, 0)-(2050, 1)], (2025, 0.2), (2030, 0.6), (2040, 0.8), (2050, 1)$	Dmnl	Lookup
국내 탄소세 부과 강화 제도 변화	탄소세 제도의 변경, 확대, 강화 흐름을 반영하는 변화율 지표	$[(2025, 0)-(2050, 1)], (2025, 0.15), (2030, 0.65), (2040, 0.75), (2050, 1)$	Dmnl	Lookup
국내 의무사용 강화 제도 변화율	친환경 연료 사용 의무화 제도의 실행 및 강화 속도	$[(2025, 0)-(2050, 1)], (2025, 0.1), (2030, 0.5), (2040, 0.90), (2050, 1)$	Dmnl	Lookup

자료: 저자 작성

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2025년

01	청색경제 이행지표 개발 및 투자효과 분석	김주현
02	해양문화산업의 지역 경쟁력 진단과 발전전략 연구	이슬기
03	유해교란 해양생물 지정 제도 개선방안 연구	정여진
04	해양보호구역의 효과적 관리 방안 연구	김미주
05	해양 복합위험의 실효적 대응 방안 연구	민영훈
06	해양 위성정보 활용 방안 연구	조성진
07	수산업 정책 전주기 연계성 강화 방안 연구	안지은
08	소비자 맞춤형 식품시장 성장에 따른 수산식품산업 대응 방안 연구	임경희
09	외국인 어선원 확보를 위한 제도 개선 연구	정명화
10	수산식품 물가 안정화 방안 연구	박혜진
11	수산물 업사이클링 생태계 조성 방안 연구	이남수
12	어촌과 연안의 통합적 발전을 위한 바다생활권 도입방안 연구	박상우
13	해운 얼라이언스 재편에 따른 영향분석과 대응방안 연구	김병주
14	연안대중교통의 운영 효율성 제고를 위한 정책 연구	류희영
15	그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구	전서연
16	스마트항만 기술 수용성 제고를 위한 법·제도 개선 방안 연구	이다예
17	탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구	이혜령
18	부산항 중장기 발전전략 연구	김근섭
19	재난·재해 대비 항만 위험물 컨테이너 물류공급망 대응 방안 연구	최나영환
20	국제물류시장 공정경쟁질서 확립 방안 연구	김동환

| 2024년

01	섬·바다·강 연계 관광 네트워크 구축방안 연구	최일선
02	해양 스타트업 실패 자산화 방안 연구	좌미라
03	시민친화적 바닷가 공간 조성에 관한 연구	정지호
04	연안이용 관리 법적 정비방안 연구	최석문
05	특별관리해역 관리제도 재편 방안 연구	최수빈
06	해양관할구역 과세권한의 체계적 배분방안 연구	이혜영
07	어업인의 디지털 전환 수용성 제고방안 연구	오서연
08	수산물 무역(수출입) 단기 전망모형 구축 연구	한기욱
09	어촌소멸에 따른 사회경제적 영향분석과 대응전략 연구	이상규
10	어촌다움에 기반한 어촌공간관리 방안 연구	이승혜
11	파생상품을 이용한 해운선사의 위험관리에 관한 연구 - 운임선도거래(FFA)를 중심으로 -	김한나
12	내항상선 해양사고 경감방안 연구	허성례
13	항만재개발사업 공공성 강화 방안 연구	김세원
14	해외 항만터미널 확보 전략 연구	김근섭
15	항만 하역능력의 서비스 수준 개선 연구	이화섭
16	국내 무역항 거버넌스 체계 개편방안 연구	김근섭
17	선박의 원격운항을 위한 제도 개선방안 연구	박혜리
18	국제물류기업 육성을 위한 법적 개선방안 연구	최나영환
19	글로벌 공급망 리스크 대응 정책효과 분석 모형 개발 연구	강무홍
20	한-북미 무역구조 분석 및 물류공급망 변화 대응방안 연구	이성우

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2025년

01	해양치유시설 조성·운영 제도 개선 연구	이정아
02	국제 해양질서 전환 대응 해양대외전략 기반 연구	박수진
03	유기수산물품 국제 동등성 확보 방안	오서연
04	선원 복지 개선방안 연구 - 선내 급식을 중심으로	허성례
05	항만재개발사업 추진 체계 재정립 연구 - 항만재개발사업 업무 매뉴얼 개선을 중심으로	김세원
06	군소도서국 해양수산 국제협력 방안 수립	전혜은
07	어촌발전특구 도입을 위한 법·제도 연구	박상우
08	해양생태계서비스 활용 방안 연구	정세미
09	해양에너지 산업 활성화 방안 연구	육근형
10	비관리청항만개발사업 정보화 정책 방향 연구	이종필
11	해양안보 위협지수 개발 및 활용방안 연구 - 선박 이상 행위를 중심으로	민영훈
12	지방관리무역항 보안관리체계 재정립 연구	김가현
13	부산항 터미널 위험물 컨테이너 장치 효율 개선 방안 연구 - 법·제도 측면 -	김우선
14	새만금호 수질관리 강화 방안 연구	장원근
15	미 상호주의 대응 수산분야 비관세장벽 영향 연구	이정미
16	수중레저 안전관리 체계 정비를 위한 제도개선 연구	이정아

2024년

01	해양정보산업 진흥을 위한 제도 개선 방안 연구	김찬웅
02	한-아프리카 국제수산물협력 체계 개선 연구	이채령
03	해양안보 MDA 체계 구축·활용 방안 연구	민영훈
04	인천항 자유무역지역의 효과적 운영을 위한 전략 방안	한장협
05	해양문화자원을 활용한 연안도시활력 증진 방안 연구	이슬기
06	부산항 물동량 유치방안 연구	김은우
07	국제사회의 대북제재 동향과 우리의 대응:해양수산업분야를 중심으로	채수란
08	국내 연안여객선 관광·이용 활성화 방안 연구	이정아
09	내수면어업 허가·신고 제도 개선방안 연구	최순
10	어업선진화를 위한 어업관리체계 개편방안	심성현
11	글로벌 공급망 변동에 따른 해운물류 지원방안	황수진
12	연안 중소기업의 탄소중립 달성을 위한 친환경정책 지원방안	류희영
13	항만기술산업 활성화를 위한 법제도 정비 방안 연구	김보경
14	해양모태펀드 투자활성화 방안 연구	한기원
15	특별관리해역 내 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 강화방안	장원근
16	중대재해처벌법 대응 양식장 안전성 개선 방안 연구	윤미경
17	국가관리연안항 발전전략 수립체계 연구	신정훈
18	글로벌 공급망 대응 해운항만물류 전문인력 양성 발전방안 연구	권보배
19	해양수산물 국제개발협력 중장기 전략 연구	전혜은

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2025년

01	해양수산 공공데이터 플랫폼 활용 제고 방안 연구	김성은
02	동아시아 해양플라스틱 오염 대응 자원 조성 방안	이윤정
03	한-아세안 해양협력 전략적 강화방안 연구	최지연
04	수산업 강제노동 규범화 대응체계 구축연구	박찬엽
05	해조류 활용 신산업 생태계 조성 방안 연구	조현주
06	미국 무역환경 변화와 해운-조선산업의 영향 분석 연구	김한나
07	해상운임에 대한 지정학적 리스크의 전이효과 분석	최영재
08	스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구	안승현
09	항만 수급분석 체계화 및 지침 마련 연구	신정훈
10	비컨테이너 부두 하역능력 산정을 위한 적정 점유율 기준 연구	이화섭
11	국가 스마트 콜드체인 물류거점센터 구축연구	조지성
12	해운항만물류 전문인력 중개 플랫폼 모델 개발	권보배
13	미국 이력 추적 의무화에 따른 수산물 수출기업 대응실태 분석 연구	박해진
14	AI 활용 글로벌 수산이슈 및 무역전망체계 고도화 연구	한기욱
15	섬어촌 디지털 정보격차 해소를 위한 정책연구	이상규

Ⅰ 2024년

01	한-북극권 청색경제 협력사업 추진 방안	김영지
02	전환기 글로벌 해양환경규범의 대응력 강화 연구	박수진
03	해양 지속가능성 시범 평가 연구	최희정
04	Scope 3 기준 원양산업 탄소배출추정 및 대응방안 연구 - 원양저연승어업중심으로	조현주
05	수산물 공급망 관리 개선방안 연구(한태 무역을 중심으로)	한기욱
06	신통상규범 확대에 따른 수산분야 영향 및 대응방안	박해진
07	탄소배출 규제 대응을 위한 컨테이너 선대 교체 수요 추정 연구	최건우
08	연안항개발사업의 경제적 편익에 관한 연구	김성아
09	한국과 미동부 항만 간 녹색해운항로 구축방안 연구	김가현
10	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅲ) - 철광석, 화학공업생산물, 기타광석, 잡화를중심으로	이나영
11	접안 대기시간 감소에 따른 탄소집약도지수(CII) 변화 분석	김보람

기본연구 2025-15

그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구

인쇄 2025년 12월 29일

발행 2025년 12월 31일

발행인 조 정 희

발행처 한국해양수산개발원

주소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 더크리P&B (주) (02-737-5377)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원

그린 암모니아 선박 연료 전환 대응 방안 연구

A Study on Response Strategies for the Transition
to Green Ammonia as Marine Fuel



49111 부산광역시 영도구 해양로301번길 26 (동삼동)

TEL. 051-797-4800

FAX. 051-797-4810

