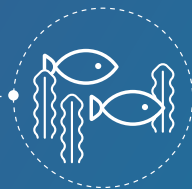


탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구

A Study on Improving Cargo Handling Equipment
Management Framework for Carbon-Neutral Port Transition

이혜령 · 조아현 · 김세원



탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구

A Study on Improving Cargo Handling Equipment
Management Framework for Carbon-Neutral Port Transition

이혜령 · 조아현 · 김세원



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	이혜령, 조아현, 김세원
내부연구진	연구책임자 이혜령 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원 공동연구원 조아현 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원 공동연구원 김세원 한국해양수산개발원 항만연구본부 연구위원

연구기간	2025. 1. 1. ~ 2025. 10. 31.
------	-----------------------------

보고서 집필내역

연구책임자	이혜령 연구총괄, 제1장, 제2장 제1절, 제2절 일부, 제3절, 제4절 일부, 제3장 제1절 일부, 제2절 일부, 제3절 일부, 제4장 제1절, 제2절 일부, 제3절, 제4절, 제5장
내부연구진	조아현 제2장 제2절 일부, 제4절 일부, 제3장 제1절 일부, 제2절 일부, 제3절 일부, 제4장 제2절 일부 김세원 제2장 제2절 일부, 제4절 일부, 제3장 제1절 일부, 제3절 일부, 제4장 제2절 일부

산·학·연·정 연구자문위원	신강원 경성대학교 교수 금동호 부산항만공사 부장 문승록 해양수산부 항만기술안전과 서기관
-------------------	--

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

우리 정부는 2020년 10월, 「2050 탄소중립 선언」과 같은해 12월, 「2050 탄소중립 비전」을 선포하였다. 아울러 2021년 12월에는 해양수산분야의 탄소중립 이행 방향과 중장기 목표를 담은 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 발표하였다. 이를 통해 '2050년 항만 탄소중립'이라는 정책 목표가 설정되었으며, 이는 항만 운영 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 구체적인 관리·감축 대상으로 명확히 규정하는 계기가 되었다.

하역장비는 항만 내 주요 온실가스 배출원이자 정책적 관리 효과가 높은 대상으로, 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」에서도 하역장비의 친환경 전환이 주요 이행수단으로 제시되었다. 그러나 현재 하역장비 온실가스 감축 정책은 친환경 장비 전환 사업에 주로 의존하고 있으며, 하역장비 부문의 감축을 지속적으로 유도하고 그 효과를 체계적으로 파악·평가·관리하기 위한 기반은 충분히 구축되어 있지 않다. 이로 인해 현재의 하역장비 온실가스 감축정책은 사업 중심 접근이 추진되는 경향이 있으며, 장비 운행 전반에서 발생하는 온실가스 배출을 지속적으로 파악하고 감축 노력을 효과적으로 유도하는데 한계가 있다. 반면, 해외 주요 국가들은 친환경 장비 전환 사업뿐 아니라 데이터 기반 마련, 운영적 감축 조치 추진, 성과 거버넌스 구축 등과 같은 관리 기반적 접근을 취하여 하역장비 온실가스 감축의 지속성을 확보하고 있다.

이러한 문제의식 속에서 본 연구는 하역장비의 온실가스 배출을 저감하기 위한 장비관리체계의 개선 방안을 검토하였다. 특히 본 연구는 하역장비 관리주기 전반에서 발생하는 온실가스 관리의 중요성을 강조한다. 이에 하역장비 관리주기 내 발생하는 온실가스를 체계적으로 파악하고 저감하기 위한 하역장비 관리체계의 정비 방안과 이를 실현하기 위한 제도 개선 방안을 제시하였다. 아무쪼록 이 연구의 성과가 하역장비의 온실가스 저감을 위한 정책을 마련하는 초석이 되기를 기대한다.

끝으로 이 연구의 책임을 맡은 이혜령 전문연구원과 연구진인 김세원 연구위원, 조아현 전문연구원의 노고에 깊은 감사를 표한다. 또한 본 연구를 위해 아낌없는 조언을

해주신 경성대학교 신강원 교수, 부산항만공사 금동호 부장, 해양수산부 문승록 서기관, 우리 연구원의 김범중 명예연구위원을 포함하여 이 보고서가 출판되기까지 도움을 주신 모든 분께 깊은 감사의 인사를 드린다.

2025년 12월
한국해양수산개발원
원장 조 정 희

목차

정책제안_i

요약_iii

Executive Summary_xv

01

서론_1

제1절 연구 배경 및 목적	1
1. 연구 배경 및 필요성	1
2. 연구 목적	6
제2절 연구 내용 및 방법	7
1. 연구 범위 및 내용	7
2. 연구 방법	9
제3절 선행연구 검토	11
1. 선행연구	11
2. 선행연구와의 차별성	18

02

하역장비 온실가스 배출관리 여건 검토_21

제1절 하역장비 온실가스 배출 관리 필요성	21
1. 하역장비 개념 및 범위	21
2. 하역장비 온실가스 배출 매커니즘	25
3. 하역장비 온실가스 배출 관리 필요성	27
제2절 국내 하역장비 현황 및 관리체계	31
1. 국내 하역장비 현황	31
2. 국내 하역장비 관리체계	37
제3절 하역장비 온실가스 배출 관리 여건	49
1. 하역장비 온실가스 감축 관련 기본계획 및 로드맵	49

2. 하역장비 온실가스 감축 관련 법령	54
3. 하역장비 온실가스 감축 이행 수단	57
4. 하역장비 온실가스 배출 관련 데이터 현황	68
제4절 하역장비 배출관리 한계점	74
1. 하역장비 배출관리 한계점 분석 개요	74
2. 하역장비 배출관리의 주요 한계	75
3. 한계점 종합	80
제5절 소결	82

03 국내외 벤치마킹 사례 분석_85

제1절 국외 하역장비 배출관리 정책수단	85
1. 정책 목표·추진전략 마련	85
2. 미국 CARB, CHE Regulation 개정 추진	91
3. 데이터·MRV 기반 구축	92
4. 감축 조치 및 성과 관리	101
5. 국외 사례 분석의 시사점	111
제2절 타 부문 정책수단	113
1. 법제도 마련	113
2. 데이터·MRV 기반 구축	117
3. 녹색기술 보급·지원사업 추진	122
4. 감축 조치 및 성과 관리	124
5. 타 분야 사례 분석의 시사점	127
제3절 소결	129

04 하역장비 관리체계 개선 방안_131

제1절 하역장비 관리체계 개선 방향	131
---------------------	-----

제2절 하역장비 관리체계 개선 방안	133
1. 장비관리기준 강화	133
2. 배출량 산정, 보고, 검증(MRV) 체계 구축	139
3. 감축이행관리체계 마련	151
제3절 정책화 로드맵	163
제4절 기대효과	165
1. 정책적 기대효과	165
2. 사회경제적 기대효과	166

05 | 결론 및 정책제언 _169

제1절 결론	169
1. 하역장비 온실가스 관리체계 정비 시급	169
2. 주요국 및 타 부문은 온실가스 관리 기반 강화 중	170
3. 효과적인 온실가스 감축을 위한 하역장비 관리체계 개선 필요	172
제2절 정책제언	173
1. 하역장비 등록대장 서식 개정	173
2. 운행 장비 배출가스 관리·노후 경유 장비 전환 촉진 근거 마련	174
3. 온실가스 배출량 산정체계 정비	177
4. 하역장비 온실가스 인벤토리 구축	179
5. 기술개발 및 보급사업 추진 확대	181
6. 에너지 전환의 과도기적 대응체계 마련	182
제3절 향후 연구	184

참고문헌 _187

부록 _203

표 목차

〈표 1-1〉 해양수산분야 2050 탄소중립 시나리오(국가 시나리오 기준)	3
〈표 1-2〉 국정과제와의 연계성	5
〈표 1-3〉 본 연구와 선행연구와의 차별성	19
〈표 2-1〉 관계 법령상 하역장비의 정의 및 범위	22
〈표 2-2〉 항만 시스템 경계 관점에서의 Scope 구분	28
〈표 2-3〉 국내 하역장비 현황(2025년 12월 기준)1)	31
〈표 2-4〉 국내 컨테이너 터미널 하역장비의 주요 에너지원	33
〈표 2-5〉 선행연구별 하역장비 내용연수 기준	35
〈표 2-6〉 컨테이너 취급 하역장비별 연식 분포(2025.12.4 등록 기준)	36
〈표 2-7〉 시설장비 검사종류 및 검사종류별 검사대상 시설장비의 범위	40
〈표 2-8〉 시설장비관리시스템(HEMS)에 등록되는 주요 데이터 항목	43
〈표 2-9〉 하역장비 대기오염물질 배출 관리 관련 조문(항만대기질법 관련)	45
〈표 2-10〉 하역장비 배출가스허용기준(항만대기질법 시행령 제9조 관련)	47
〈표 2-11〉 2030 NDC 상향안 부문별 감축 목표	50
〈표 2-12〉 항만부문 온실가스 감축정책 및 추진방안	51
〈표 2-13〉 해양수산분야 2050 탄소중립 달성을 위한 추진목표	52
〈표 2-14〉 탄소중립기본법 제44조(녹색국토의 관리)	54
〈표 2-15〉 물류정책기본법 제59조(환경친화적 물류의 촉진)	55
〈표 2-16〉 지속가능 교통물류 발전법 제26조(환경친화적 교통물류시설 개발)	55
〈표 2-17〉 항만법 제30조(온실가스 등 감축)	56
〈표 2-18〉 항만 부문 목표관리제 지정업체 현황(2025년 기준)	58
〈표 2-19〉 항만 부문 배출권거래제 할당대상업체 현황(2025년 기준)	62
〈표 2-20〉 항만 무탄소화 전환 지원 사업 성과목표 및 지표	63
〈표 2-21〉 하역장비 관련 외부사업 현황	64
〈표 2-22〉 외부사업 시행시 부산항 부두별 예상 감축량	66
〈표 2-23〉 탄소중립기본법 시행령 제39조 및 제74조	68
〈표 2-24〉 IPCC 가이드라인의 수송부문 상세 분류	69
〈표 2-25〉 하역장비 배출관리 한계점 파악을 위한 이해관계자 자문 내역	75
〈표 2-26〉 하역장비 배출관리의 주요 한계점과 본 연구 검토 범위	81

〈표 3-1〉 MSGI 프로그램 중 항만 및 하역장비 관련 프로그램	90
〈표 3-2〉 하역장비 온실가스 배출량 산정을 위한 지표	95
〈표 3-3〉 CNP 인증의 의의	103
〈표 3-4〉 CNP 인증 평가 항목 및 지표	104
〈표 3-5〉 CNP 인증제에서 하역장비의 탈탄소 전환방식 예시	106
〈표 3-6〉 녹색항만 등급평가의 주요 지표	108
〈표 3-7〉 ‘행동’ 분야에서 하역장비 관련 배점 방식 (컨테이너터미널)	110
〈표 3-8〉 제작자동차의 온실가스 배출허용기준	114
〈표 3-9〉 건설기계 정기검사 항목(배출가스 정기검사 포함)	114
〈표 3-10〉 저공해자동차·건설기계 운행 규제	116
〈표 3-11〉 사례 분석 기반 하역장비 관리체계 개선 방향	130
〈표 4-1〉 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」 구성(안)	140
〈표 4-2〉 주요 가이드라인별 하역장비 온실가스 배출량 산정식	143
〈표 4-3〉 하역장비 배출량 산정을 위한 수집 활동자료 수집 범위(안)	145
〈표 4-4〉 탄소중립기본법 제70조(기금의 용도)	155
〈표 4-5〉 일본 CNP 인증 제도 시행 연혁	157
〈표 4-6〉 탄소중립항만 전환을 위한 하역장비 관리체계 개선 과제별 이행 시기	164
〈표 5-1〉 항만대기질법 개정(안)-하역장비 배출가스 정기검사	175
〈표 5-2〉 항만법 개정(안)-하역장비 정기검사	176
〈표 5-3〉 항만대기질법 개정(안)-노후·고배출 하역장비의 운행관리 등	177
〈표 5-4〉 항만대기질법 시행규칙 개정(안)-조기폐차 대상 하역장비	177
〈표 5-5〉 항만법 개정(안)-하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련	180
〈표 5-6〉 항만법 시행령 개정(안)-하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련	181

그림 목차

〈그림 1-1〉 본 연구의 흐름도	9
〈그림 2-1〉 컨테이너 터미널 하역장비의 일반적인 작업 흐름	26
〈그림 2-2〉 해상물류 공급망의 주요 배출원	29
〈그림 2-3〉 동조화와 탈동조화의 개념도	30
〈그림 2-4〉 국내 항만 물동량 실적 및 예측	32
〈그림 2-5〉 시설장비 설치(철거) 신고서 양식 및 처리 절차	38
〈그림 2-6〉 항만시설장비 대장 양식	39
〈그림 2-7〉 HEMS 홈페이지	41
〈그림 2-8〉 HEMS 장비신고 등록 항목(운영사)	43
〈그림 2-9〉 탄소중립 국가비전 및 국가전략 체계도	49
〈그림 2-10〉 목표관리제 운영체계	58
〈그림 2-11〉 목표관리제 추진 절차	59
〈그림 2-12〉 배출권 거래제의 개념	61
〈그림 2-13〉 2019년 기준 에너지총조사 중 창고 및 운송관련 서비스업 조사표 양식	71
〈그림 2-14〉 에너지사용 실적 및 계획 신고 양식	73
〈그림 2-15〉 탄소배출량 관련 데이터(에너지데이터 포함) 제출 체계(예시)	79
〈그림 3-1〉 EPA Clean Ports Program	87
〈그림 3-2〉 2005년부터 2050년까지 BAU와 항만 터미널의 목표 배출량 비교	89
〈그림 3-3〉 EPA Port Emissions Inventory Guidance 주요 내용	93
〈그림 3-4〉 항만에서의 온실가스 배출량 산정 대상 배출원	94
〈그림 3-5〉 MOVES 인터페이스	96
〈그림 3-6〉 「항만 온실가스 감축량 산정 도구」 인터페이스	97
〈그림 3-7〉 「항만 온실가스 감축량 산정 도구」 산정 결과	98
〈그림 3-8〉 WPCAP에서 구축 중인 글로벌 하역장비 인벤토리 예시	100
〈그림 3-9〉 파시르 판장 터미널의 ESS	102
〈그림 3-10〉 CNP 인증 신청 절차 및 로고	107
〈그림 3-11〉 녹색항만 등급평가 가이드라인 및 인증서	107
〈그림 3-12〉 건설기계(타이어식, 무한궤도식 등, 타워크레인)제원표	118
〈그림 3-13〉 EG-TIPS 메인 화면	120

〈그림 3-14〉 KOTEMS	121
〈그림 3-15〉 ESP 운영 체계	127
〈그림 4-1〉 장비등록대장 서식 개정(안)	135
〈그림 4-2〉 비도로 이동기계(경유)의 엔진 출력, 기술 단계에 따른 배출계수 테이블(Tier 3) ..	144
〈그림 4-3〉 KOTEMS의 도로부문 배출통계 제공 예시	150
〈그림 4-4〉 회생제동 기술을 통한 전기에너지 생산 방식(전기차)	152
〈그림 4-5〉 2019년 항만크레인 회생제동장치 효율향상사업 시행 공고	154
〈그림 4-6〉 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업 지원기준	154
〈그림 4-7〉 EG-TIPS의 감축활동 DB	160
〈그림 4-8〉 CARB 보고서에 제시된 상용화된 무공해 하역장비 리스트(일부)	162
〈그림 5-1〉 국가 온실가스 배출, 흡수계수 개발-공표-활용 체계	179

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. 현행 제도·정책 기반 하역장비 관리체계 및 온실가스 관리 여건 분석
2. 문헌검토, 이해관계자 자문 기반 하역장비 온실가스 관리 한계점 분석
3. 국내외 유사사례 분석 기반 하역장비 관리체계 개선방향 도출
4. 국내외 유사사례 및 전문가 자문 기반 정책방안 및 정책제언 도출

■ 정책제안

1. 「항만시설장비 관리규칙」의 하역장비 등록대장 서식 개정
2. 「항만대기질법」, 「항만법」 개정을 통한 노후 경유 장비 관리 강화
3. 온실가스 배출량 산정체계 정비를 위한 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」 제정 및 하역장비 국가 배출계수 개발
4. 「항만법」 개정을 통한 하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련
5. 온실가스 감축 및 에너지 효율 향상 기술개발 및 보급사업 추진 확대
6. 에너지 전환의 과도기적 대응체계 마련

요 약

탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구

이혜령 · 조아현 · 김세원

1. 연구 배경 및 목적

1) 연구 배경

- 항만 탄소중립 이행의 실질적 출발점으로서 하역장비 관리가 필요함
 - 전 산업 부문에서 온실가스 감축 및 탄소중립 이행이 요구되고 있으며, 국제 물류 핵심 인프라인 항만에서도 탈탄소화가 주요 과제로 부상함
 - 항만의 탄소중립은 관리 가능성과 효과성을 동시에 확보할 수 있는 영역부터 단계적으로 접근하는 전략이 필요함
 - 하역장비는 항만 운영주체가 직접 통제 가능하고, 활동자료 확보가 비교적 용이하며, 항만 터미널 내에서 절대적으로 많은 배출 비중을 차지하고 있어 관리 우선순위가 높음
- 국내 하역장비 온실가스 감축에 대한 정책적 논의는 주로 에너지 전환을 중심으로 추진되어 감축을 효과적으로 추진하는 데 한계가 있음
 - 현재 국내 하역장비 온실가스 배출 감축 정책은 주로 장비의 전동화나 신재생에너지 활용 등의 에너지 전환을 중심으로 추진되고 있으며, 이러한

접근만으로는 감축 이행 상황을 지속적으로 점검·관리하고 감축 성과를 안정적으로 축적하는 데에는 한계가 있음

2) 연구 목적

- 본 연구는 하역장비의 온실가스 감축 활동을 효과적으로 수행할 수 있는 관리체계 개선 방안을 제시하고자 함
- 본 연구의 목적은 하역장비의 온실가스 배출을 파악하고, 증가를 억제하며, 감축 노력을 지속적으로 점검·유도할 수 있는 하역장비 관리체계 정비 방안과 이를 실현하기 위한 제도 개선 방안을 제시하는 것임
- 세부적으로는 ① 하역장비의 온실가스 배출 관리의 정책적 중요성과 시급성을 강조하고, ② 현행 하역장비 관리체계의 한계를 진단하며, ③ 하역장비 온실가스 감축정책이 상시적으로 운영·관리될 수 있는 관리체계 정비 방안을 제시하고자 함

2. 연구 방법 및 차별성

1) 연구 방법

- 문헌분석, 사례분석, 이해관계자 인터뷰, 전문가 자문 등을 활용함
- 국내외 선행연구 조사, 관련 법제도 및 정책동향 분석, 주요국 정책동향 조사, 타 부문 사례 조사, 정책 이해관계자 인터뷰 및 전문가 자문 등을 수행하였음
- 특히 이해관계자 인터뷰 및 전문가 자문을 통해 실제 현장의 정책 개선 수요를 반영하고, 실효성있는 정책방안을 도출하고자 하였음

2) 연구 차별성

- 본 연구는 크게 다음과 같은 점에서 기존 연구와 차별성을 지님
 - 첫째, 하역장비 온실가스 감축이 지속적으로 이루어질 수 있는 정책·제도적 기반을 정립하는 데 초점을 둠
 - 둘째, 하역장비의 행정적 관리체계 고도화를 통한 온실가스 관리 방안을 제시함
 - 셋째, 현장 의견과 관계기관의 정책적 관점을 기반으로 실행가능성을 갖춘 관리방안을 제시함

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- 항만 탄소중립 이행을 위해서는 하역장비 관리체계 정비가 요구됨
 - 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 통해 항만 부문 탄소중립 목표가 공식화되면서 항만의 주요 배출원인 하역장비의 온실가스 감축 노력이 주요 정책 과제로 부상함
 - 그러나 현행 하역장비 관리체계는 안전성 확보 및 대기오염물질 관리를 중심으로 설계되어 있어 온실가스 감축 활동을 지속적으로 유도·통제하기 위한 관리 기반이 미흡함
 - 따라서 항만 탄소중립 실현 차원에서 하역장비 온실가스를 효과적으로 감축할 수 있도록 하역장비 관리체계를 정비할 필요가 있음

-
- 해외 주요국과 국내 타 부문에서는 온실가스 관리 기반을 강화하고 있음
 - 해외 주요국들은 하역장비 전동화와 같은 기술적 조치와 함께 제도 정비, 데이터·MRV 기반 구축, 감축 조치 및 성과 관리 등을 통해 온실가스 배출을 파악·관리하고 감축을 지속적으로 이행할 수 있는 관리 기반을 구축·운영하고 있음
 - 국내 건물, 산업, 수송 부문 역시 관리 전반을 포괄하는 정책수단을 활용하여 온실가스 관리 기반을 강화하고 있음
 - 이러한 사례들은 하역장비 온실가스 감축이 단순한 장비 전환이 아닌, 하역장비 운영 전반에서 배출을 지속적으로 파악·관리하는 방식으로 추진될 필요가 있음을 시사함
 - 효과적인 온실가스 감축을 위한 하역장비 관리체계 개선이 필요함
 - 하역장비 온실가스 감축이 상시적·지속적으로 이행·관리되기 위해서는 하역장비 관리의 범위에 온실가스가 포함되도록 관리 범위를 확장할 필요가 있음
 - 나아가 하역장비 관리주기 전반에서 온실가스 배출 정보를 파악·관리하고 감축 노력이 지속적으로 이루어질 수 있도록 하는 관리방식으로 전환할 필요가 있음

2) 정책화 방안

- 「항만시설장비 관리규칙」의 하역장비 등록대장 서식 개정이 필요함
 - 하역장비의 온실가스 배출을 체계적으로 관리하기 위해 장비 등록 단계에서 온실가스 배출에 직접적인 영향을 미치는 원동기 관련 기초 제원정보를 정확하게 확보할 필요가 있음

- 이에 「항만시설장비 관리규칙」 [별지 제2호서식]의 하역장비 등록대장 서식을 장비유형, 원동기 특성 등을 반영하여 개정할 것을 제안함

〈그림 1〉 장비등록대장 서식 개정(안)

항만시설장비(컨테이너 크레인) 대장				항만시설장비(트랜스피 크레인) 대장			
시설장비명		관리번호		시설장비명		관리번호	
설치장소		부두		설치장소		부두	
용도(하급 화물)		소유자		용도(하급 화물)		소유자	
제조·설치업체명		관리자		제조·설치업체명		관리자	
감시촬영번호		제작자		감시촬영번호		제작자	
감시기관		가격 / 대당	백만원	감시기관		가격 / 대당	백만원
주요제원				주요제원			
장격하중(스프레더 일)	톤	장격하중	m/min	장격하중(스프레더 일)	톤	장격하중	m/min
바다측 도달거리 (바다측 제일중심 기준)	m	무부하	m/min	컨테이너 적재 단위/중수	단	무부하	m/min
육지측 도달거리 (육지측 제일중심 기준)	m	트롤리 횡행 속도	m/min	인양고도 (컨트리의 제일 상면 기준)	m	트롤리 횡행 속도	m/min
상방 인양고도 (컨트리의 제일 상면 기준)	m	컨트리의 주행속도	m/min	타이어 롤 간격	m	컨트리의 주행속도	m/min
하방 인양고도 (컨트리의 제일 상면 기준)	m	항만 작업주기 시간	초	척 로울 베이스	m	항만 작업주기 시간	초
컨트리의 제일 간격	m	자중	톤	트롤리 이동거리	m	주행방향 크레인 폭 (범퍼 끝에서 범퍼 끝까지)	m
제그간 내측 간격	m	작업시	m/sec	컨트리의 제일 간격	m	자중	톤
포달림 통과높이	m	차중	m/sec	제그간 내측 간격	m	작업시	m/sec
주행방향 크레인 폭 (범퍼 끝에서 범퍼 끝까지)	m	휴지시	m/sec	공급전 원(간)격	Ph V Hz	차중	육지측 바다측 톤/m 톤/m
자중	톤	공급전원	Ph V Hz	연전	형식(제작성/조명등)	휴지시	육지측 바다측 톤/m 톤/m
구조물 사용 등급	사이클	기타		출력 출력	kW(hp)@ rpm	기타	
				발전기	형식(제작성/조명등)		
				출력 전원	V Ph Hz		
				발전 및 출력 등급	중 IP		
				정격 용량	kVA		

자료: KOTEC 자문의견을 참고하여 저자 작성

- 「항만대기질법」, 「항만법」 개정을 통해 노후 경유 장비 관리 강화 근거를 마련해야 함
- 배출 기여도가 높은 경유 장비를 체계적으로 관리하기 위해 ① 장비 배출가스 정기검사 기준 마련 ② 노후 하역장비 조기폐차 권고 근거 마련, ③ 조기폐차 지원 근거 마련을 위한 제도 정비 방안을 제안함
- 이 때, 경유 하역장비는 노후화 시 연료 효율 악화로 온실가스와 대기오염 물질이 동시에 증가하는 경향이 있음을 고려하여 현행 대기오염물질 규제체계를 활용하는 방식으로 접근하였음

- 이미 대기오염물질 관리체계가 구축되어 있다는 점을 고려하면 기존 체계를 활용하는 것이 실행 가능성과 관리 효과 측면에서 더 유리하기 때문임
- 이를 위해 먼저 하역장비 정기검사 시 배출가스 검사를 병행하도록 하는 방안을 제안함

〈표 1〉 항만대기질법 개정(안)-하역장비 배출가스 정기검사

현행	개정(안)
제14조(하역장비의 배출가스허용기준 등) ① -② (생략) 〈신설〉	제14조(하역장비의 배출가스 허용기준 등) ① -② (현행과 같음) ③ <u>항만사업자는 「항만법」 제33조에 따라 일정 기간마다 하역장비에서 나오는 배출가스가 하역장비 배출가스허용기준에 맞는지를 검사하는 하역장비 배출가스 정기검사를 받아야 한다. 다만, 환경친화적 하역장비 중 해양수산부장관이 정하는 하역장비의 경우에는 배출가스 정기검사 대상에서 제외한다.</u>

자료: 저자 작성

〈표 2〉 항만법 개정(안)-하역장비 정기검사

현행	개정(안)
제33조(시설장비의 검사 등) ① 시설장비관리자는 사용·관리하는 시설장비에 대하여 다음 각 호의 구분에 따라 관리청이 실시하는 검사를 받아야 한다. 1-2. (생략) 3. 정기검사: 사용 중인 시설장비의 안전상태를 확인하기 위하여 제조검사일이나 설치검사일부터 해양수산부령으로 정하는 기간마다 정기적으로 하는 검사 4. (생략) ②-③ (생략)	제33조(시설장비의 검사 등) ① (현행과 같음) 1-2. (현행과 같음) 3. 정기검사: 사용 중인 시설장비의 안전상태를 확인하기 위하여 제조검사일이나 설치검사일부터 해양수산부령으로 정하는 기간마다 정기적으로 하는 <u>검사</u> 와 「 <u>항만대기질법</u> 」에 따른 <u>하역장비의 정기검사</u> 4. (현행과 같음) ②-③ (현행과 같음)

자료: 저자 작성

- 이와 함께 「항만대기질법」 및 시행령을 개정하여 노후 경유 하역장비의 조속한 친환경 전환 유도 기반을 마련해야 함

〈표 3〉 항만대기질법 개정(안)-노후·고배출 하역장비의 운행관리 등

현행	개정(안)
〈신설〉	제00조(노후·고배출 하역장비의 운행관리 등) ① 해양수산부장관은 항만의 대기질 개선 및 기후·생태계 변화유발물질 배출감소를 위하여 필요하다고 인정하면 해양수산부장관이 정하는 요건을 충족하는 하역장비의 소유자에게 조기 폐차를 권고할 수 있다. ② 국가나 지방자치단체는 환경친화적 하역장비의 보급, 전환을 촉진하기 위하여 제1항에 따른 권고에 따라 하역장비를 조기 폐차를 이행하는 항만사업자에 대하여 필요한 비용을 지원할 수 있다.

자료: 저자 작성

〈표 4〉 항만대기질법 시행규칙 개정(안)-조기폐차 대상 하역장비

현행	개정(안)
〈신설〉	제00조(조기폐차 대상 하역장비) 법 제00조제1항에 따른 "해양수산부장관이 정하는 요건을 충족하는 하역장비"는 다음 각 호의 요건을 모두 갖춘 하역장비를 말한다. 1. 조기에 폐차할 것을 권고하는 시점부터 거꾸로 계산하여 6개월 이상 연속하여 등록된 하역장비 2. 「항만법」 제33조에 따른 정기검사에서 적합판정을 받은 하역장비 3. 「항만대기질법」 제14조 및 동법 시행령 제9조에 따른 배출허용기준에 부합하는 하역장비 4. 해양수산부장관이 정하는 기준에 부합하는 노후 하역장비

자료: 저자 작성

- 온실가스 배출량 산정체계 정비를 위해 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」을 제정할 것을 제안함
- 표준화된 산정체계 마련을 위해 해양수산부 주도로 행정지침 수준의 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」을 제정하고, 시범항만 운영 등을 통해 그 적정성을 검증한 뒤 국가 산정체계로 정립할 것을 제안함

- 지침에는 산정식, 산정 시 활용될 활동자료 정의 및 범위, 데이터 품질 기준, 배출계수 등이 포함되어야 하며, 구체적인 구성(안)은 <표 5>와 같음
- 이 때, 배출계수의 경우 하역장비 특성을 고려한 국가 고유 배출계수 개발 사업을 추진할 것을 제안함

〈표 5〉 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」 구성(안)

구분	내용
목적	• 하역장비 온실가스 배출량 산정방식의 표준화 및 상호호환성 확보 • 산정주체가 쉽게 이해하고 산정할 수 있도록 하는 실무지침 제공
기본원칙	• 가능한 한 활동자료 기반의 정밀 산정(IPCC 가이드라인 Tier 3 수준)을 지향하되, 산정대상 온실가스 특성, 데이터 확보 여건 등을 고려하여 탄력적으로 적용
대상	• 하역장비 관리자 및 항만당국 • 국외 항만, 기타 항만 이해관계자도 참조 기준으로 활용 가능
주요 내용	• 산정대상 및 적용범위 • 산정대상 온실가스 • 산정기준 • 배출계수 선정 • 활동자료 선정 • 품질보증 및 데이터 관리 기준

자료: 저자 작성

- 「항만법」 개정을 통한 하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련을 제안함
- 하역장비 온실가스 배출을 체계적으로 관리하기 위해 「항만법」 제30조를 개정하여 해양수산부장관이 항만 및 하역장비 온실가스 통계를 구축할 수 있는 근거를 마련할 것을 제안함

〈표 6〉 항만법 개정(안)-하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련

현행	개정(안)
제30조(온실가스 등 감축) ①-② (생략) 〈신설〉	제30조(온실가스 등 감축) ①-② (현행과 같음) ③ <u>해양수산부장관은 항만의 온실가스 배출량 관련 시책의 효과적인 수립, 시행을 위하여 이와 관련된 통계를 구축할 수 있다.</u>
〈신설〉	④ <u>제3항에 따른 통계 작성 대상, 방법 등에 관하여는 대통령령으로 정한다.</u>

자료: 저자 작성

〈표 7〉 항만법 시행령 개정(안)-하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련

현행	개정(안)
〈신설〉	제00조(온실가스 통계 작성 단위 등) ① <u>법 제30조 제4항에 따른 통계 작성 단위는 다음 각 호와 같다.</u> 1. 항만 2. 하역장비
〈신설〉	② <u>해양수산부장관은 법 제30조 제3항에 따른 통계 작성을 위하여 필요한 경우 관계 중앙행정기관의 장 또는 항만사업자에게 자료 제출이나 협조를 요청할 수 있다.</u>

자료: 저자 작성

- 하역장비 온실가스 감축 및 에너지 효율 향상 기술개발 및 보급사업 추진을 확대해야 함
 - 온실가스 감축 및 에너지 효율 향상을 위한 기술투자는 온실가스 감축정책의 핵심 요소로, 국가 주도로 온실가스 감축 기술 확보를 위한 연구개발과 실증, 보급사업을 적극 추진할 필요가 있음
 - 핵심 기술 확보부터 실증, 보급사업까지 연계 추진이 필요하며, 기술의 현장 수용성과 민관 공동 책임성을 확보하기 위해 민관 매칭펀드로 보급사업을 추진해야 함

- **에너지 전환의 과도기적 대응체계 마련**

- LNG 장비는 최종적으로 전환 대상이라는 점에서 경유 장비와 동일한 범주에 포함되지만, 전환의 우선순위와 속도는 경유의 후순위로 설계하는 것이 합리적임
- 따라서 경유 장비 조기폐차 유도 정책을 우선 시행하고 일정 기간 동안은 LNG 장비를 저탄소 장비로 인정하고, 경유 장비 퇴출이 상당 수준 진전된 후 LNG 장비를 본격적 전환 대상으로 포함시키는 것이 바람직함
- 한편, 전기화 확산으로 LNG 장비가 전체 하역장비 비중이 일정 수준 이하로 축소되는 단계에서는 LNG 하역장비의 추가 확산을 유도하지 않는 범위 내에서, 충전 인프라의 안정적 운영을 목적으로 한시적·예외적 조치로서 연료비 보조 방안도 고려해볼 수 있음

3) 기대효과

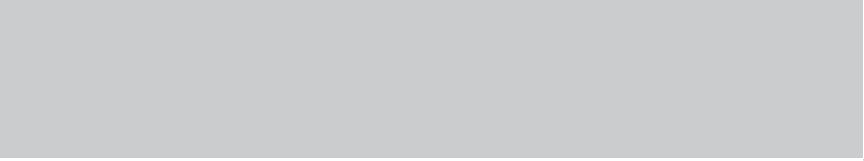
- **정책적 기대효과**

- 하역장비 감축정책이 사업 중심에서 상시 관리 중심으로 전환될 수 있음
- 항만 부문 온실가스 배출의 관리·감축 이행 기반을 강화하여 국가 감축목표 이행의 실효성을 제고할 수 있음
- 하역장비 감축정책의 예측 가능성과 정밀성이 제고될 것으로 기대됨
- 항만 부문 온실가스 정책 설계 및 계획 수립을 위한 기초 기반이 확보될 수 있음

- **사회경제적 기대효과**

- 데이터 기반 정책 수립과 성과 평가가 가능해져 정책 리스크와 사회적 비용을 완화할 수 있음

- 국내 항만의 온실가스 관리 역량 강화로 국내 항만의 친환경 경쟁력과 대외 신뢰도를 향상할 수 있음
- 감축 투자가 운영 성과로 환원될 수 있는 구조가 형성되어 하역장비 온실가스 감축의 지속가능성을 제고할 수 있음



EXECUTIVE SUMMARY

A Study on Improving Cargo Handling Equipment Management Framework for Carbon-Neutral Port Transition

Hye-Ryeong Lee · Ah-Hyun Jo · Se-Won KIM

1. Background and Purpose

1) Background

- Managing cargo handling equipment is essential as a practical starting point for achieving carbon neutrality in ports.
- Greenhouse gas (GHG) reduction and carbon neutrality implementation are now required across all industrial sectors, with decarbonization emerging as a key priority for ports as critical infrastructure for international logistics.
- Achieving carbon neutrality in ports requires a phased strategic approach that should begin with areas where both manageability and effectiveness can be simultaneously ensured.
- Cargo handling equipment should be a management priority because port operators can directly control it, activity data are

relatively accessible, and it accounts for the largest proportion of emissions within ports.

- Korea's policy discussions on reducing GHG emissions from cargo handling equipment have focused primarily on energy transition, limiting the effectiveness of emission reduction efforts.
- Current domestic policies for reducing GHG emissions from cargo handling equipment focus primarily on energy transition measures such as equipment electrification and renewable energy adoption. However, this approach alone is insufficient for continuously monitoring and managing reduction progress and ensuring the stable accumulation of emission reduction achievements.

2) Purpose

- This study aims to propose improvements to the management framework for cargo handling equipment to ensure the effective implementation of GHG reduction activities.
- The purpose of this study is to propose measures for improving the cargo handling equipment management framework to better address GHG emissions, along with institutional reforms to support these objectives.
- Specifically, this study (1) establishes the policy importance and urgency of managing GHG emissions from cargo handling equipment, (2) diagnoses limitations in the current management

framework, and (3) proposes improvement measures to ensure systematic and sustained implementation of emission reduction policies.

2. Methodology and Distinctive Features

1) Methodology

- This study employed literature analysis, case studies, stakeholder interviews, and expert consultations.
- The research methods included literature review of domestic and international studies, analysis of relevant legal systems and policy trends, examination of policy approaches in leading countries, case studies from other sectors, and stakeholder interviews with expert consultations.
- In particular, stakeholder interviews and expert consultations were conducted to reflect practical policy needs from the field and to develop effective and feasible policy recommendations.

2) Distinctive Features

- This study distinguishes itself from existing research in the following key aspects:
- First, it focuses on establishing the policy and institutional foundation necessary for sustained GHG reduction from cargo handling equipment.

-
- Second, it adopts a novel approach to GHG management through advancing the administrative management framework for cargo handling equipment.
 - Third, it proposes implementable management measures grounded in field insights and policy perspectives of relevant stakeholders.

3. Result

1) Summary

- Improving the management framework for cargo handling equipment is required to achieve carbon-neutral ports.
- The “*2050 Carbon Neutrality Roadmap for the Maritime and Fisheries Sector*” officially established carbon neutrality targets for the port sector, making GHG reduction from cargo handling equipment, a major emission source in ports, a critical policy imperative.
- However, the current management framework for cargo handling equipment is designed primarily to ensure safety and reduce air pollutants, which limits its capacity to continuously induce and govern GHG reduction activities.
- Therefore, to achieve port carbon neutrality, it is necessary to improve the management framework to enable effective reduction of GHG emissions from cargo handling equipment.

- Major countries and other sectors in Korea have been strengthening their GHG management foundations.
 - Leading countries have strengthened GHG management foundations for cargo handling equipment. Beyond technological measures such as electrification, they are implementing complementary policy instruments including institutional arrangements, data and MRV frameworks, and mechanisms for sustaining emission reduction efforts.
 - Korea's building, industrial, and transport sectors have enhanced their GHG management foundations through policy instruments that comprehensively address emission management across operational processes.
 - These cases indicate that GHG reduction from cargo handling equipment should be pursued through approaches that enable the continuous identification and management of emissions across overall equipment operations.
- Improving the cargo handling equipment management framework is necessary to achieve effective and sustained GHG reduction.
 - To ensure that GHG reduction from cargo handling equipment is implemented and managed in a sustained manner, it is necessary to expand the scope of equipment management so that GHG considerations are explicitly incorporated into existing management practices.

-
- Furthermore, the management framework should be reoriented to enable emissions to be identified and managed throughout the entire equipment management lifecycle, thereby enabling continuous and sustained emission reduction efforts by relevant stakeholders.

2) Policy Formulation Methods

- The cargo handling equipment registration format in the *Regulations on the Management of Port Facility Equipment* requires revision.
- To enable systematic management of GHG emissions from cargo handling equipment, it is necessary to secure basic specification data on prime movers that directly affect GHG emissions at the equipment registration stage.
- Accordingly, this study proposes revising the cargo handling equipment registration format in *Annex Form No. 2* of the ‘*Regulations on the Management of Port Facility Equipment*’ to reflect equipment types and prime mover characteristics.

〈Figure 1〉 Revision to the Equipment Registration Format

항만시설장비(컨테이너 크레인) 대장				항만시설장비(트랜스퍼 크레인) 대장					
시설장비명		관리번호		시설장비명		관리번호			
설치장소		부두		설치장소		부두			
용도(취급 화물)		소유자		용도(취급 화물)		소유자			
제조·설치감사일		관리자		제조·설치감사일		관리자			
검사감각번호		제작자		검사감각번호		제작자			
검사기관		가격 / 대당	백만원	검사기관		가격 / 대당	백만원		
주요 제 형				주요 제 형					
장격하중(스트레드 일)	톤	전 상 속도	장격하중	m/min	컨테이너 적재 단위/물수	단	일	m/min	
바다측 도달거리	m	무부하	바다측 도달거리	m/min	인양고도	m	트롤리 횡행 속도	m/min	
(바다측 제일중심 기준)	m		(바다측 제일중심 기준)	m	타이어 롤 간격	m	컨트롤러 주행 속도	m/min	
육지측 도달거리	m	트롤리 횡행 속도	육지측 도달거리	m/min	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
(육지측 제일중심 기준)	m		(육지측 제일중심 기준)	m	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
상방 인양고도	m	컨트롤러 주행 속도	상방 인양고도	m/min	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
(컨트롤러 제일 상면 기준)	m		(컨트롤러 제일 상면 기준)	m	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
하방 인양고도	m	불 관상, 관하 소요시간	하방 인양고도	분	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
(컨트롤러 제일 상면 기준)	m		(컨트롤러 제일 상면 기준)	m	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
컨트롤러 제일 간격	m	평균 작업 주기 시간	컨트롤러 제일 간격	초	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
컨트롤러 제일 규격	m	작업시	컨트롤러 제일 규격	m/sec	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
최고간 내측 간격	m	종속	최고간 내측 간격	m/sec	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
물밀방 통과높이	m	작업시	물밀방 통과높이	톤/m	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
주말방장 크레인 폭	m	바다측	주말방장 크레인 폭	톤/m	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
(별의 끝에서 별의 끝까지)	m	바다측	(별의 끝에서 별의 끝까지)	톤/m	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
자중	톤	급급전함	자중	Ph V Hz	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초
구조물 사용 등급	사이클	기타	구조물 사용 등급	사이클	트랜스퍼 크레인	트롤리 이동거리	m	주말 작업 주기 시간	초

Source: Prepared by the author based on KOTEC advisory consultation

- Legal grounds for strengthening management of aging diesel-powered equipment must be established through amendments to the *Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas* and the *Harbor Act*.
- To enable systematic management of diesel-powered equipment with high emission contributions, this study proposes institutional reforms including: (1) establishing regular emission inspection standards for equipment, (2) providing legal grounds for recommending early scrapping of aged cargo handling equipment, and (3) creating legal grounds for supporting early scrapping programs.

-
- This approach builds on the existing air pollutant regulatory framework, considering that aged diesel cargo handling equipment tends to experience simultaneous increases in both GHG and air pollutants due to deteriorating fuel efficiency over time.
 - Leveraging the existing system is more advantageous in terms of feasibility and management effectiveness, given that an air pollutant management system is already established.
 - To achieve this, the study proposes including emission inspections in the periodic inspection of cargo handling equipment.

〈Table 1〉 Revision to the Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas (draft)—Periodic Emission Inspections for Cargo Handling Equipment

Current Provision	Revision (draft)
Article 14 (Emission Standards for Cargo Handling Equipment, etc.) ①-② (Omitted) 〈New Provision〉	Article 14 (Emission Standards for Cargo Handling Equipment, etc.) ① -② (Same as current provision) ③ Pursuant to Article 33 of the Harbor Act, port-based business operators shall undergo periodic emission inspections of cargo handling equipment at regular intervals to verify compliance with emission standards. However, environmentally friendly cargo handling equipment designated by the Minister of Oceans and Fisheries may be exempt from periodic emission inspection requirement.

Source: Prepared by the author

〈Table 2〉 Revision to the Harbor Act (draft)—Periodic Inspections for Cargo Handling Equipment

Current Provision	Revision (draft)
Article 33 (Inspection of Port Facilities and Equipment, etc.) ① Port facility and equipment managers shall undergo inspections conducted by management authority for port facilities and equipment under their use and management according to the following classifications: 1–2. (Omitted) 3. Periodic inspection: An inspection conducted periodically at intervals prescribed by Ordinance of the Ministry of Oceans and Fisheries from the date of manufacturing inspection or installation inspection to verify the safety status of port facilities and equipment in use 4. (Omitted)	Article 33 (Inspection of Port Facilities and Equipment, etc.) ① (Same as current provision) 1–2. (Same as current provision) 3. Periodic inspection: An inspection conducted periodically at intervals prescribed by Ordinance of the Ministry of Oceans and Fisheries from the date of manufacturing inspection or installation inspection to verify the safety status of port facilities and equipment in use, and periodic emission inspections of cargo handling equipment pursuant to the <i>Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas</i> 4. (Same as current provision)
②–③ (Omitted)	②–③ (Same as current provision)

Source: Prepared by the author

- In conjunction with these measures, the *Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas* and its Enforcement Decree must be amended to establish a foundation for encouraging the transition of aged diesel-powered cargo handling equipment to environmentally friendly alternatives.

〈Table 3〉 Revision to the Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas (draft)—Operation Management of Aged and High-Emission Cargo Handling Equipment

Current Provision	Revision (draft)
〈New Provision〉	<u>Article XX (Operation Management of Aged and High-Emission Cargo Handling Equipment, etc.) ① Where the Minister of Oceans and Fisheries deems it necessary to improve air quality in ports and reduce emissions of climate and ecosystem-disrupting substances, the Minister may recommend early scrapping to owners of cargo handling equipment that meets the requirements prescribed by the Minister of Oceans and Fisheries.</u> <u>② The State or local governments may provide necessary financial support to port business operators who implement early scrapping of cargo handling equipment pursuant to the recommendation under paragraph (1), in order to promote the adoption and transition of environmentally friendly cargo handling equipment.</u>

Source: Prepared by the author

〈Table 4〉 Revision to the Enforcement Decree of the Special Act on the Improvement of Air Quality in Port Areas (draft)—Cargo Handling Equipment Subject to Early Scrapping

Current Provision	Revision (draft)
〈New Provision〉	<u>Article XX (Cargo Handling Equipment Subject to Early Scrapping) “Cargo handling equipment that meets the requirements prescribed by the Minister of Oceans and Fisheries” under Article XX, paragraph (1) of the Act refers to cargo handling equipment that satisfies all of the following requirements:</u> <u>1. Cargo handling equipment that has been continuously registered for at least six months, calculated retroactively from the time the recommendation for early scrapping is made</u> <u>2. Cargo handling equipment that has passed the periodic inspection pursuant to Article 33 of the <i>Harbor Act</i></u> <u>3. Cargo handling equipment that complies with the emission standards under Article 14 of the <i>Special Act on the</i></u>

Current Provision	Revision (draft)
	<u><i>Improvement of Air Quality in Port Areas</i> and Article 9 of its Enforcement Decree</u>
	<u>4. Aged cargo handling equipment that meets the standards prescribed by the Minister of Oceans and Fisheries</u>

Source: Prepared by the author

- To establish a systematic framework for calculating GHG emissions, the *Guidelines for Calculating GHG Emissions from Cargo Handling Equipment* should be enacted, and national emission factors for cargo handling equipment should be developed.
- To establish a standardized calculation framework, this study proposes that the Ministry of Oceans and Fisheries lead the development of administrative *Guidelines for Calculating GHG Emissions from Cargo Handling Equipment*, verify their adequacy through pilot port applications, and subsequently adopt them as the national calculation framework.
- The guidelines should incorporate calculation formulas, clear definitions and scope of activity data for calculations, data quality standards, and emission factors. A detailed proposed structure is presented in Table 5.
- To this end, this study proposes undertaking a project to develop Korea-specific emission factors that reflect the characteristics of cargo handling equipment.

〈Table 5〉 Structure of the Guidelines for Calculating GHG Emissions from Cargo Handling Equipment (Draft)

Category	Content
Purpose	• Standardization of GHG emission calculation methods for cargo handling equipment and ensuring interoperability • Provision of practical guidance to enable calculation entities to easily understand and calculate emissions
Basic Principles	• Aim for precise activity data-based calculations (IPCC Guidelines Tier 3 level) where feasible, while maintaining flexibility based on the characteristics of target GHG and data availability
Intended Users	• Cargo handling equipment managers and port authorities • Foreign ports and other port stakeholders may also utilize as a reference standard
Main Content	• Scope of calculation and applicability • GHG subject to calculation • Calculation standards • Emission factor selection • Activity data selection • Quality assurance and data management standards

Source: Prepared by the author

- This study proposes establishing a legal basis for developing a GHG inventory for cargo handling equipment through the amendment of the *Harbor Act*.
- Specifically, the study proposes the amendment of Article 30 of the *Harbor Act* to provide the Minister of Oceans and Fisheries with authority to compile port GHG statistics disaggregated at the port level and the equipment level.

〈Table 6〉 Revision to the Harbor Act (draft) – Legal Basis for Developing a GHG Inventory for Cargo Handling Equipment

Current Provision	Revision (draft)
Article 30 (Reduction of GHG, etc.) ①–② (Omitted)	Article 30 (Reduction of GHG, etc.) ①–② (Same as current provision)
〈New Provision〉	<u>③ The Minister of Oceans and Fisheries may establish statistics related to GHG emissions from ports for the effective formulation and implementation of relevant policies.</u>
〈New Provision〉	<u>④ Matters concerning the scope and methods for compiling statistics under paragraph (3) shall be prescribed by Presidential Decree.</u>

Source: Prepared by the author

〈Table 7〉 Revision to the Enforcement Decree of the Harbor Act (draft)—Legal Basis for Developing a GHG Inventory for Cargo Handling Equipment

Current Provision	Revision (draft)
〈New Provision〉	<u>Article XX (Units for Compiling GHG Statistics, etc.)</u> <u>① The units for compiling statistics pursuant to Article 30, paragraph (4) of the Act shall be as follows:</u> <u>1. Ports</u> <u>2. Cargo handling equipment</u>
〈New Provision〉	<u>② Where necessary for compiling statistics under Article 30, paragraph (3) of the Act, the Minister of Oceans and Fisheries may request data submission or cooperation from the heads of relevant central administrative agencies or port business operators.</u>

Source: Prepared by the author

-
- Technology development and dissemination programs for GHG reduction and energy efficiency improvement in cargo handling equipment must be expanded.
 - Technology investment for GHG reduction and energy efficiency improvement is a core element of GHG mitigation policy. Therefore, government-led research and development, demonstration, and dissemination programs should be actively promoted to secure GHG reduction technologies.
 - An integrated approach linking core technology development, demonstration, and dissemination is essential. Dissemination programs should be implemented through public-private matching funds to ensure practical applicability of technologies and establish shared responsibility between the public and private sectors.
 - A transitional response framework for energy transition must be established.
 - LNG equipment belongs to the same category as diesel equipment in terms of being ultimately subject to conversion. However, it is rational to prioritize diesel conversion and assign LNG equipment a lower priority with a slower conversion timeline.
 - Therefore, policies promoting early scrapping of diesel equipment should be implemented first, with LNG equipment recognized as low-carbon equipment for a certain period. Only after substantial progress in phasing out diesel equipment should LNG equipment be incorporated as a primary conversion target.

- Furthermore, when electrification expansion reduces LNG equipment to below a certain proportion of total cargo handling equipment, temporary fuel cost subsidies may be considered as an exceptional measure to support stable operation of refueling infrastructure. However, such subsidies should be structured to avoid incentivizing the further adoption of LNG equipment.

3) Expected Outcomes

- Policy effects
 - Cargo handling equipment reduction policies can shift from a project-based approach to ongoing management.
 - The management and implementation framework for reducing GHG emissions in the port sector will be strengthened, enhancing the effectiveness of achieving national reduction targets.
 - The predictability and precision of cargo handling equipment reduction policies are expected to improve.
 - A foundation for designing GHG policies and developing plans for the port sector will be established.
- Social and economic effects
 - Data-driven policy formulation and performance evaluation will become feasible, mitigating policy risks and social costs.
 - Korean ports can strengthen their environmental competitiveness and enhance their international credibility.

-
- A structure enabling reduction investments to be converted into operational performance will be established, enhancing the sustainability of reduction efforts.

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경 및 필요성

지구온난화 방지 목적으로 2016년 체결된 파리협정(Paris Agreement)은 기후변화 대응에 있어 국제사회의 패러다임을 변화시켰다. 파리협정을 통해 ‘지구 평균 온도 상승을 산업화 이전 대비 2℃보다 훨씬 낮은 수준으로 유지하고, 1.5℃로 제한하기 위해 노력한다’는 구체적인 전 지구적 목표가 설정되었으며, 또한 각국이 자발적으로 온실가스¹⁾ 감축 목표(NDC; Nationally Determined Contribution)를 설정·이행하는 상향식(Bottom-up) 접근법을 채택하여 글로벌 기후 거버넌스 체계를 구축하였다. 이러한 전 지구적 목표 달성을 위해 세계 각국은 온실가스 감축 및 탄소중립²⁾ 실현을 위한 노력을 확산하고 있다.

1) 온실가스에는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 등이 포함됨

2) 본 연구에서 탄소중립이란 「기후위기 대응을 위한 탄소중립 녹색성장 기본법(이하 탄소중립 기본법)」에 의거, 대기 중에 배출·방출 또는 누출되는 온실가스의 양에서 온실가스 흡수의 양을 상쇄한 순배출량이 영(零)이 되는 상태를 말함

이와 같은 국제사회의 기후변화 대응 노력 강화는 전 산업 부문에 영향을 미치고 있으며, 국제 물류의 핵심 인프라인 항만에서도 탄소중립 실현이 핵심 과제로 부상하고 있다. 항만은 해상운송의 핵심 허브로서 선박 입출항, 화물 하역, 육상 운송 연계 활동이 이루어지며, 이 과정에서 상당한 양의 온실가스를 배출하고 있다(Shen et al., 2025). 특히, 향후 해상운송 수요가 증가할 것으로 전망되어 항만의 온실가스 배출 역시 증가할 것으로 예상(Alamoush, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F., 2022)됨에 따라, 글로벌 기후 목표 달성을 위해 항만의 책임 있는 배출 관리 요구는 더욱 커질 것으로 판단된다. 아울러 강화되는 글로벌 탄소 규제는 공급망 전 과정의 탄소배출량 산정 및 감축을 요구하고 있어 항만의 탈탄소화는 단순한 정책적 요구를 넘어 시장 요구에 대응하기 위한 필수 과제로 자리 잡고 있다.

우리나라의 경우 해양수산부를 중심으로 해양수산부를 중심으로 항만의 탄소중립 달성을 위한 정책 대응이 본격화되고 있다. 해양수산부는 2021년 12월 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 통해 2050년 항만 내 탄소배출³⁾ 제로화를 정책 목표로 설정하였으며, 이어 「탄소중립항만 구축 기본계획」을 통해 항만 내 온실가스 감축을 위한 중장기 추진 방향과 정책 프레임워크를 제시하였다. 또한 2025년 현재, 온실가스 목표관리제, 배출권거래제 등 국가 탄소배출 규제에 7개 컨테이너 터미널 운영사가 포함되는 등 항만의 탄소배출을 관리하기 위한 제도 기반 감축 노력도 점차 확대되고 있다.

다만, 국내 항만의 탄소중립 전환은 여러 제약에 직면해 있다. 가장 대표적인 문제는 항만 부문의 온실가스 배출량을 파악하고 감축 이행을 관리할 수 있는 데이터 기반이 부재하다는 점이다. 이러한 한계는 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」에서도 드러난다. 해당 로드맵에서 항만 부문은 국

3) 본 연구에서는 정책 및 산업 현장에서 '온실가스 저감', '온실가스 배출' 등이 '탄소 저감', '탄소 배출' 등으로 통용되는 점을 고려하여 '탄소'를 '온실가스'를 지칭하는 일반적 표현으로 사용함

가 온실가스 통계 체계상 별도 산정이 불가능하여 현황값에 포함되지 못하였으며⁴⁾ 2050년 목표배출량 0이라는 목표 설정만 이루어졌다. 이에 로드맵에서는 항만 부문의 탄소배출 산정, 관리 방안 마련과 모니터링을 추진 과제로 제시하기도 했다.

〈표 1-1〉 해양수산분야 2050 탄소중립 시나리오(국가 시나리오 기준)

(단위: 만톤CO₂eq.)

부문	'18년 배출량	'50년 목표배출량
해운	101.9	30.7(△69.9%)
수산·어촌	304.2	11.5(△96.2%)
해양에너지	-	-229.7(순감)
블루카본	-	-136.2(순감)
항만	-	0
합계	406.1	-323.7

주: 온실가스 해양 지중저장(CCS) 6,000만톤 별도
 자료: 해양수산부(2021), 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵, p. 9.

또한 항만은 다양한 이해관계자가 복잡하게 얽혀 있어 이들의 이해관계를 조율하고 참여를 유도하는 것 역시 현실적으로 큰 과제이다. 아울러 에너지 전환 측면에서 대규모 전력 수요를 안정적으로 공급하기 위한 인프라를 확보하는 데에도 제약이 있다. 이러한 점을 고려하면 항만의 탄소중립은 관리 가능성과 효과성을 동시에 확보할 수 있는 영역부터 단계적으로 접근하는 전략이 필요하다.

이러한 관점에서 하역장비는 항만 온실가스 감축을 위한 최우선 관리대상으로 볼 수 있다. 우선, 2020년 기준, 전 세계 약 10만-12만대의 하역장비가 배출한 탄소배출량은 약 10-15MtCO₂eq이며, 이는 슬로베니아 국가 연간 배출량에 맞먹는 수준에 달한다.⁵⁾ 그리고 하역장비는 항만·터미널 운

4) 대신, 항만 분야 배출량은 국가 온실가스 통계 체계상의 제약으로 항만 운영사를 대상으로 실시한 '19년 유류·전력사용량 조사를 기반으로 자체 추산하였으며, 그로 인해 전체 합계에서 제외되었음

5) APM Terminals, & DP World(2023), p. 3.

영주체(이하 항만 운영주체)가 직접 통제할 수 있는 자원으로 관리 실효성이 높고 활동자료 확보도 상대적으로 용이하다. 또한 하역장비는 항만·터미널이 운영 통제권을 갖는 배출원 중 배출 규모가 가장 크다. 선행연구에 따르면, 부산항의 경우 외부 배출원 배출을 제외한 항만 내 배출 중 하역장비 배출 비중이 약 83%(2023년 기준)⁶⁾, 스페인 발렌시아항의 경우 약 81%(2011년 기준)⁷⁾를 차지하는 것으로 나타나 하역장비가 항만 내 배출에서 차지하는 비중이 절대적으로 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 항만 탄소중립을 추진하기 위해서는 우선적으로 하역장비 온실가스 배출 감축 기반을 강화할 필요가 있다.

한편, 지금까지 국내에서 하역장비의 온실가스 감축에 대한 정책 논의는 주로 장비 전동화나 신재생에너지 활용 등의 에너지 전환을 중심으로 추진되고 있다. 물론 에너지 전환은 중장기적으로 중요한 감축 수단이지만, 초기 투자 부담, 운영 인프라 제약, 기술 성숙도 부족 등을 고려하면 이러한 접근만으로는 감축 이행 상황을 지속적으로 점검·관리하고 감축 음성과를 안정적으로 축적하는 데에는 한계가 있다. 반면 해외 주요국들은 하역장비 에너지 전환과 더불어 데이터 기반 마련, 장비 및 항만 운영 효율화, 이해관계자 참여 유인 설계 등 다양한 정책을 조합하여 감축 활동이 지속적으로 관리·이행될 수 있도록 접근하고 있다. 구체적으로 미국 EPA(2022), 일본 국토교통성(2019), WPCI⁸⁾(2010) 등은 항만 온실가스 인벤토리나 탄소발자국 산정 가이드라인을 마련하여 하역장비 배출량 산정 절차를 구체

6) 항만의 운영통제권 외부 배출원인 선박, 외부트럭 등은 제외하고, 항만의 운영통제권 내 배출원 중 하역장비의 배출 비중을 의미함(자료: 부산항만공사(2023))

7) Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G. (2019), p. 316. 자료를 바탕으로 저자 산정(STS 크레인(컨테이너 크레인), RTGs(트랜스퍼 크레인), 야드 트래커, 리치 스택커, 엠티 포크 리프트 합산)

8) World Ports Climate Initiative, 2008년 IAPH 산하 환경위원회 주도로 출범한 항만의 기후변화 대응 이니셔티브로, 2015년 유엔 지속가능발전목표(SDGs)와 파리협정 이후 WPSP(World Port Sustainability Program)으로 확대·발전함

화하여 하역장비 온실가스 배출을 관리하기 위한 데이터 기반을 구축하는 것을 지원하고 있다. 또한 싱가포르항은 ICT 기술을 활용하여 분산전원 기반의 스마트그리드를 구축하고 항만의 운영을 최적화하거나, 장비 운행 효율화 기술개발을 추진하여 배출을 감축하는 방안을 도모하고 있다. 그 외에도 일본 국토교통성, 중국 교통운수부는 각 탄소중립항만 인증제도, 녹색항만 등급 평가제도 등을 운영하며 이해 관계자 참여를 촉진하고 있다. 이러한 사례들은 하역장비 관리가 전동화에 그쳐서는 충분하지 않으며 다양한 정책들과 연계한 관리 기반적 접근이 필요함을 보여준다.

한편, 하역장비의 온실가스 감축 이행을 위한 관리체계 개선 방안 연구의 필요성은 정부 국정과제를 통해서도 확인할 수 있다. ‘40. 지속가능한 미래를 위한 탄소중립 실현’과 ‘56. 북극항로 시대를 주도하는 K-해양강국 건설’에서는 각각 수송부문 탈탄소 전환을 위한 이행전략 수립과 항만의 친환경 전환을 주요 과제로 제시하고 있다. 이러한 국정과제의 방향을 고려할 때, 하역장비의 감축 이행을 체계적으로 관리할 수 있는 기반을 마련하는 것은 정책 목표를 구현하기 위한 핵심 과제라 할 수 있다.

〈표 1-2〉 국정과제와의 연계성

국정과제	주관부처	주요 내용	본 연구와의 연계성
40. 지속가능한 미래를 위한 탄소중립 실현	환경부, 국조실	• 산업, 건물, 수송, 전환 분야 2030년 온실가스 감축목표 달성을 위한 이행전략 수립 • 온실가스 다배출 산업의 탈탄소 전환 지원 • 탄소중립산업 및 기후 신산업 육성	• 하역장비 온실가스 배출관리 기반 구축은 수송부문 감축이행전략과 직결 • 항만은 에너지 다소비 산업으로서 다배출 산업 탈탄소 전환 지원 방향과도 부합
56. 북극항로 시대를 주도하는 K-해양강국 건설	해수부	• 부산항 등을 친환경·스마트항만으로 조성	• 하역장비 온실가스 관리체계는 친환경 항만 조성의 핵심 수단으로 국정과제 목표 달성에 직접 기여

자료: 저자 작성

2. 연구 목적

본 연구는 항만 탄소중립 실현을 위해 하역장비의 온실가스 감축 활동을 효과적으로 수행할 수 있도록 하는 관리체계 개선 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 여기서 관리체계란 ‘하역장비를 전 관리주기에 걸쳐 체계적으로 관리하기 위한 행적적 틀’로서, 본 연구는 이러한 관리체계를 하역장비 온실가스 배출을 파악하고, 증가를 억제하며, 감축 노력을 지속적으로 점진·유도할 수 있는 방향으로 고도화하기 위한 방안을 제시한다. 이러한 접근은 개별 하역장비의 감축 이행을 체계적으로 관리하기 어려운 현행 정책의 한계를 보완하고, 장비 관리주기를 고려한 감축 이행 기반을 설계함으로써 항만 탄소중립 정책의 실효성을 제고하는 데 기여할 것으로 기대된다. 이를 달성하기 위한 본 연구의 세부 목적은 다음과 같다.

첫째, 하역장비 온실가스 배출 관리의 정책적 중요성과 시급성을 강조한다. 하역장비는 항만의 주요 배출원일 뿐 아니라, 물동량 변화에 민감하게 반응하는 수요 탄력적 배출원으로, 중장기적으로 국내 컨테이너 물동량 증가가 예상되는 상황에서 온실가스 배출 관리 필요성은 더욱 커질 것으로 보인다. 특히, 최근 탈탄소 대응으로 하역장비 전기화가 추진되고 있지만, 현재 국가 전력믹스상 전력 생산 과정에서 온실가스가 배출되므로 전기화 이후에도 배출관리 필요성은 여전히 존재한다. 그럼에도 불구하고 국내에서는 하역장비를 독립적 관리 대상으로 다룬 연구나 정책적 논의는 충분히 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구는 하역장비 온실가스 배출 특성과 관리 필요성을 분석하여 항만 탄소중립 추진 과정에서 하역장비 관리가 갖는 전략적 의미를 명확히 하고자 한다.

둘째, 현행 하역장비 관리체계가 온실가스 대응 측면에서 갖는 한계를 진단한다. 현재 국내 하역장비 관리체계는 하역장비 운행 안전 확보와 대

기오염물질 배출 관리를 중심으로 구성되어 있으며, 온실가스 배출을 관리하기 위한 기반은 상대적으로 미흡하다. 이에 본 연구는 온실가스 관리 관점에서 기존 하역장비 관리체계의 미흡한 요소를 점검한다.

셋째, 하역장비 온실가스 감축정책이 상시적으로 운영·관리될 수 있는 관리체계 정비 방안을 제시한다. 하역장비 온실가스 배출을 효과적으로 줄이기 위해서는 하역장비의 배출을 파악하고, 감축이 필요한 대상을 관리하며, 감축 활동이 지속, 확산될 수 있도록 하는 관리 기반이 필요하다. 이에 본 연구는 하역장비 관리주기 동안 온실가스 감축 활동이 효과적으로 이루어질 수 있도록 하역장비 관리체계 개선을 위한 핵심 과제를 도출한다.

제2절 연구 내용 및 방법

1. 연구 범위 및 내용

본 연구의 범위는 국내 항만에서 운용되는 하역장비 중 컨테이너 터미널 하역장비로 한정하였다. 그 이유는 우선 컨테이너 터미널의 하역장비 구성과 작업 공정은 비교적 표준화되어 있어 온실가스 배출 특성을 파악하고 관리방안을 도출하는 것이 용이하기 때문이다. 또한 운영사가 직접 장비를 소유 및 사용하는 경우가 많아 관리체계를 적용하기에도 유리하다. 더불어 국내 전체 항만 물동량 중 컨테이너가 차지하는 비중이 약 35%(2024년 실적 기준)⁹⁾로 정책적 관리 우선순위가 높으며, 일부 컨테이너 터미널 운영사는 배출권거래제·목표관리제 등 온실가스 규제를 적용받고 있어 현장 수

9) Port-MIS(검색일: 2025.10.3.)

요 측면에서도 관리 필요성도 높다.

한편, 본 연구의 목적 달성을 위한 연구의 주요 내용은 다음과 같다. 제1장에서는 연구의 배경과 목적, 연구 내용과 방법을 제시하고 관련 선행연구를 검토한다. 특히, 하역장비의 온실가스 배출량 산정, 하역장비 배출 감축 기술 및 정책, 타 부문의 배출 관리방안에 관한 기존 연구를 검토하여 본 연구의 필요성과 차별성을 강조한다.

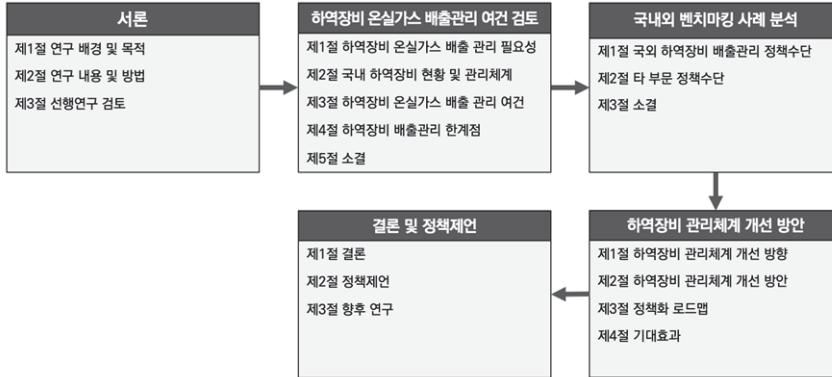
제2장에서는 하역장비 온실가스 배출을 관리하기 위한 제도적, 정책적 여건과 현 관리체계의 한계점을 검토한다. 이를 위해 하역장비 관리를 위한 제도적 기반을 검토하고, 하역장비 온실가스 배출 관리와 관련한 정책 추진 여건을 파악한다. 그리고 이러한 검토 및 이해관계자 자문을 바탕으로 하역장비 배출을 관리하기 위한 장비 관리체계 차원의 한계를 확인한다.

제3장에서는 국내외 유사 사례를 참고하여 하역장비 관리체계 개선 방향을 검토한다. 이를 위해 미국, 일본, 싱가포르 등 주요국의 항만 부문 선진 사례와 건물, 산업, 수송 등 국내 타 분야의 배출 관리 사례를 분석하여 하역장비 관리체계를 개선하기 위해 참고할 수 있는 시사점을 도출한다.

제4장에서는 하역장비의 온실가스 대응이 실제로 작동할 수 있도록 장비의 전 수명주기를 아우르는 관리체계 구축 방안을 제시한다. 또한 단계별 이행 로드맵과 정책 추진에 따른 기대효과를 함께 제시하여 정책 추진의 방향성과 추진 당위성을 강화하고자 한다.

제5장에서는 본 연구의 내용을 종합적으로 요약·정리하고 연구의 시사점을 도출한다. 또한 하역장비 배출 관리 실효성 제고를 위해 정부 차원에서 추진이 필요한 정책을 제언한다.

〈그림 1-1〉 본 연구의 흐름도



자료: 저자 작성

2. 연구 방법

본 연구는 온실가스 배출 관리를 위한 하역장비 관리체계 개선방안을 도출하기 위해 국내외 선행연구 조사, 관련 법제도 및 정책동향 분석, 주요국의 하역장비 관련 정책동향 조사, 타 부문 사례 조사, 정책 이해관계자 대상 서면·인터뷰 조사 및 전문가 자문 등을 수행하였다. 연구 방법을 연구 주요 내용과 연계하여 설명하면 다음과 같다.

먼저 선행연구를 검토하여 기존 연구 동향을 파악하였다. 구체적으로 하역장비의 온실가스 배출량 산정 방법론, 하역장비 온실가스 감축을 위한 기술 및 정책 방안, 온실가스 배출저감을 위한 하역장비 및 타 분야의 관리체계 관련 연구를 중심으로 살펴보았으며, 본 연구의 정책 방향을 설정할 때 참고하였다.

또한 문헌조사를 통해 국내 하역장비 온실가스 관리 현황을 파악하기 위

해 관련 법령, 정책, 통계체계 등을 종합적으로 검토하였다. 이를 통해 현행 하역장비 관리체계의 한계점을 도출하고 개선 필요사항을 체계적으로 파악하였다.

아울러 하역장비 배출관리의 현황과 한계점, 정책 수요를 파악하기 위해 이해관계자 의견을 수렴하였다. 먼저 항만 관련 제도를 관장·지원·관리하는 해양수산부, 해양환경공단, 항만공사 등 하역장비 배출관리와 직·간접적으로 연계된 기관을 대상으로 자문을 실시하였다. 또한 부산항 컨테이너 터미널 운영사 간담회를 실시하여 의견을 수렴하였다. 이를 통해 현장의 실태와 정책적 개선 수요를 연구에 반영하고자 하였다.

그리고 정책수단과 설계를 위해 미국, 싱가포르, 일본 등에서 추진 중인 하역장비 배출관리 정책 사례와 실제 배출 감축 노력 사례를 조사하였다. 관련 보고서, 공식 웹사이트, 전자문서 등을 활용해 자료를 수집하였으며, 이는 하역장비 배출관리를 위한 실행전략 마련에 참고하였다. 또한 수송, 산업, 건물 등 타 부문의 배출관리체계 및 정책수단을 검토하였고, 특히 플랫폼 기반의 관리체계 운영 현황과 관련 지원제도를 중점적으로 분석하여 하역장비 분야에 적용 가능한 수단 및 이행체계 구성에 반영하였다.

그 외에도 본 연구는 정책 실효성을 높이기 위해 연구 전반에서 다양한 전문가와 이해관계자 의견을 수렴하였다. 정책 및 제도를 담당하는 정부 부처 및 공공기관뿐 아니라, 에너지·교통·정보통신·해양 등 관련 분야의 전문 연구기관과 학계 전문가, 기술기관 등의 의견을 반영하여 벤치마킹 가능한 사례와 시사점을 도출하였다. 이를 통해 제도 설계뿐 아니라 실제 적용 가능성과 기술적 실행력을 검토하였다.

제3절 선행연구 검토

1. 선행연구

1) 하역장비 온실가스 배출량 산정 관련 연구

항만 운영 과정에서 발생하는 온실가스 배출은 지속적으로 연구된 주제이며, 특히 하역장비는 항만의 주요 배출원으로 지적되어 왔다. 이에 따라 하역장비의 온실가스 배출량을 추정하기 위한 연구들이 다수 수행되었으며, 이러한 연구들은 크게 배출량 산정 방법론을 검토·제안하는 연구와 특정 항만·터미널을 사례로 배출량을 산정하는 연구로 구분할 수 있다.

먼저 산정 방법론과 관련해서는 연료기반 접근법과 활동기반 접근법이 대표적으로 활용되며, 여러 선행연구들이 하역장비 배출량 추정에는 활동기반 접근법을 활용하는 것이 보다 적합함을 주장하였다(Geerlings, H., & Van Duin, R., 2011; Zhang, Y. et al., 2017; Mamatok et al., 2019). 이러한 주장에 부합하게, 실제 많은 연구들이 활동기반 접근법을 적용하여 하역장비 배출량 추정을 시도하였으며(Shin, K., & Cheong, J., 2011; Geerlings, H., & Van Duin, R., 2011; 노영훈·장영태, 2015; Okşas, O.; 2023, Mao, X. & Meng, Z., 2023; Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T., 2024), 이들 연구는 활동자료 기반 산정방식이 하역장비 배출량 산정의 표준적 접근법으로 자리잡고 있음을 보여준다. 이러한 흐름은 국가 온실가스 인벤토리 산정시 따르는 표준 지침인 IPCC 가이드라인의 권고와도 일치하는데, IPCC 가이드라인에서도 하역장비와 같은 비도로 수송장비의 경우 가능하다면 활동기반 방식을 우선적으로 적용하고, 자료가 부족한 경우 연료기반 방식을 활용할 것을 제시하고 있다.

그러나 활동기반 접근법 활용을 위해서는 방대한 측정 데이터가 필요한데(Zhang, Y. et al., 2017), 이러한 데이터를 확보하는 것이 어렵다는 점도 여러 연구에서 지적되고 있다. Buttigieg, A.(2023)는 하역장비의 운영 데이터가 체계적으로 수집, 관리되지 않는 현실을 한계로 지적하였으며, Wang, L., & Li, Y.(2023)는 항만 배출량 산정 관련 연구 상당수가 실제 측정자료가 아닌 추정값에 의존하고 있음을 지적하였다. 또한 Huang, Y., Mamatok, Y., & Jin, C.(2021)은 항만 탄소배출 저감을 위해서는 운영관리 차원에서 장비 운영, 기술적 매개변수 등을 포함하는 데이터 베이스 구축이 필요함을 강조하기도 했다. 이러한 논의는 활동기반 접근법을 활용한 하역장비 배출량 산정을 위해서는 데이터 확보 기반 마련이 선행되어야 함을 보여준다.

다만, 활동기반 접근법을 활용하더라도 어떤 활동자료를 변수로 설정하는가에 따라 산정방식이 다양하게 존재한다. 이와 관련하여 Sorte, S. et al.(2021)은 열화 요인, 장비 기술수준, 엔진 출력 등을 고려하는 EMEP/EEA 방식과 연료, 누적 사용시간 등을 고려하는 US/SCG 방식을 활용하여 하역장비 배출량을 산정, 비교하고 EMEP/EEA 방식이 보다 적절한 방법론이라 주장하였다. 이러한 논의는 활동기반 접근법이라는 동일한 틀을 적용하더라도, 변수 구성이 표준화되지 않을 경우 배출량 산정의 일관성을 확보하기 어렵다는 점을 시사한다.

또한 일부 연구들은 항만의 배출량 산정 방법론이 여전히 표준화되지 않은 점을 지적하며 표준화된 산정 도구의 필요성을 제기하기도 했다(Azarkamand, S., Ferré, G., & Darbra, R. M., 2020; Azarkamand, S., Wooldridge, C., & Darbra, R. M., 2020). 이들 연구는 표준화 수준 미흡이 결과의 일관성과 비교 가능성을 제한하며, 표준화된 산정 도구가 마련될 경우 산정 결과의 활용성을 높일 수 있음을 강조하고 있다.

이와 별개로 특정 항만, 터미널을 대상으로 하역장비 배출량을 산정하고 배출 특성을 검토한 사례 연구들도 다수 수행되었다. 관련 연구들은 부산항, 인천항 등 주요 국내 항만과 로테르담항, Ambarli 컨테이너 터미널, 양푸항, 발렌시아항, Belawan 컨테이너 터미널, 차토그램항, 난징 룡탄 컨테이너 터미널 등 다양한 항만 및 터미널을 대상으로 하역장비 배출 구조를 분석하였다(Shi&Cheong, 2011; Shim, 2018; 노영훈·장영태, 2015, 안승현 외, 2022; Geeling&Van Duin, 2011; Okşaş, O., 2023; Mao, X. & Meng, Z., 2023; Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G. , 2019; Budiyanto, M. A., Huzaifi, M. H., & Sirait, S. J., 2019; Islam, M. R., Aziz, M. G., & Khan, M. B., 2022). 이러한 사례 연구들을 종합해보면 항만, 터미널마다 장비별 배출 비중에 편차가 있음을 확인할 수 있는데, 예를 들어 Okşaş, O.(2023)의 연구에서는 야드 트랙터(51%), 리치 스택커(9%), 컨테이너 크레인(7%) 등의 순으로 배출이 많은 반면, Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T.(2024)의 연구에서는 컨테이너 크레인(56%), 트랜스퍼 크레인(27%) 등 순으로 배출이 많은 것으로 나타났다.

이와 같은 차이는 항만, 터미널마다 운영 규모, 사용 장비, 장비별 연료, 작업 특성 등이 상이하기 때문에 배출원 구성과 수준에 상당한 차이가 있다는 기존 지적과도 부합한다(Wang, L., & Li, Y., 2023; Wei, D. & Giuliano, G., 2025; 최형림 외, 2010). 이는 특정 항만, 터미널의 대푯값을 타 항만, 터미널에 적용하는 방식으로는 실제 배출량과 상당한 괴리가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 하역장비 배출량 산정의 정확성을 확보하기 위해서는 상향식(bottom-up) 방식으로 개별 터미널 수준에서 장비 단위의 활동자료를 가능한 폭넓게 수집하기 위한 체계가 필요함을 보여준다.

2) 하역장비 온실가스 배출 감축 방안 관련 연구

하역장비 배출 감축 수단과 관련한 연구는 기술적 조치, 운영적 조치, 제도·정책적 조치 등 다양한 관점에서 수행되었다. 우선 기술적 조치와 관련한 연구로는 하역장비 전기화, 하이브리드화, 장비개조 등을 통한 온실가스 감축 효과와 경제적 파급효과를 검토한 연구들이 다수 확인된다(Yang, Y. & Lin, C., 2013; Wei, D. & Giuliano, G., 2025; Yang, Y. & Chang, W., 2013; Schmidt, J. et al., 2015; 안용성·이향숙·이지원, 2024; Sugimura, Y., 2023; Kim, J., Rahimi, M., & Newell, J., 2012; 김선구·최용석, 2012; Okşas, O., 2023; Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.; 2019). 이 연구들은 기술적 조치가 상당한 배출 저감 잠재력을 가진다는 점을 확인했는데, 일례로 Sugimura, Y. (2023)는 하카타항 사례를 통해 전기 트랜스퍼 크레인과 하이브리드 스트레들 캐리어 도입을 통해 76%, 29%의 CO₂ 배출 감축 효과가 있음을 확인하였다. 다만, 전기화의 이산화탄소 감축 효과는 전력의 탄소집약도 수준에 따라 크게 달라지므로, 하역장비 전기화의 효과는 CO₂ 감축량보다 에너지 절감 효과를 기준으로 평가하는 것이 보다 공정하다고 주장하였다.

한편, 많은 연구들은 하역장비의 친환경 전환으로 인해 단기적인 비용 증가와 경제적 손실이 발생할 수 있음을 지적하며 전환 속도의 조절과 협력 워킹그룹 구성, 규제 및 인센티브 조치 마련, 시범사업 확대, 기술개발 및 에너지 공급 인프라 투자 확대 등이 병행되어야 한다는 점을 제기하였다(Wei, D. & Giuliano, G., 2025; Densberger, N. L., & Bachkar, K., 2022; Okşas, O., 2023; Kim, J., Rahimi, M., & Newell, J., 2012, Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.; 2019). 이는 친환경 하역장비로의 전환은 온실가스 배출 저감을 위한 매우 효과적인 수단이나, 이행력을 높이기 위해서는 운영적, 제도적 조치가

병행되어야 함을 의미한다.

운영적 조치를 통한 감축 방안에 관한 연구들은 장비 스케줄링 최적화, 레이아웃 구성 개선, 장비 운영 효율화 등 운영방식 개선을 통한 에너지 소비 절감 및 배출 저감을 추진하는 방안을 검토하였다(Sha, M. et al., 2017; He, J. et al., 2015; 김우선·최상희·하태영, 2007; Kang, Z. et al., 2024; Yu, H. et al., 2017). 주요 연구로는 터미널 내 운행되는 주요 장비 전체의 스케줄링 조정 방안을 검토한 He, J. et al.(2015)의 연구와 야드 트랙터의 운영 최적화를 통한 배출 저감 방안을 검토한 Yu, H. et al.(2017)의 연구가 있다. 구체적으로, He, J. et al.(2015)는 하역장비 공동 스케줄링 모델을 활용하면 에너지 소비 관점에서 성능을 3% 향상할 수 있음을 확인하였고, Yu, H. et al.(2017)은 대규모 터미널에서는 정체 관련 배출을, 소규모 터미널에서는 이동 관련 배출을 저감하는 것이 적절함을 주장하였다. 이들 연구는 하역장비의 운영방식 개선이 배출 저감에 기여할 수 있음을 보여준다. 한편, 온실가스 문제를 직접적으로 다루지는 않지만, 항만 및 하역장비의 에너지 절약을 위한 주요 정책방안을 검토한 연구도 일부 수행되었다(김근섭 외, 2021; 김우선·최상희·하태영, 2007). 이러한 연구들은 에너지 사용량을 줄이는 접근이 궁극적으로 온실가스 감축 전략과 연계될 수 있다는 점에서 운영적 조치와 유사한 방향성을 가진다.

하역장비 배출 저감을 위한 제도·정책적 논의는 주로 항만 탈탄소화 전략의 하나의 구성요소로서 함께 다루어져 왔다. 이러한 연구들은 공통적으로 항만의 탈탄소화 달성을 위해서는 단일한 조치만으로는 충분하지 않으며, 여러 가지 정책도구의 조합과 정부의 적극적 개입이 필수적임을 강조한다(한철환, 2024; Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G., 2019; Okşaş, O., 2023; Lam, J. S. L., & Notteboom, T., 2014; Alamoush, 2024; Alamoush, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F.,

2022; Song, D., 2024; Alamoush, A. S., Ballini, F., & Ölçer, A. I., 2024). 구체적으로 Lam, J. S. L., & Notteboom, T.(2014)은 주요 글로벌 항만의 정책 프레임워크 비교를 통해 가격정책, 규제, 모니터링, 인프라 확충 등 다양한 수단을 조합하는 것이 정책효과를 극대화하는 핵심이라고 보았다. 더불어 Alamoush(2024), Alamoush, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F.(2022), Alamoush, A. S., Ballini, F., & Ölçer, A. I.(2024) 등은 항만 탈탄소화를 추진하는 과정에서 정책입안자의 역할을 특히 강조하기도 했다. 또한 항만운영자는 단기적 이익 극대화를 우선해 감축투자를 기피하는 경향이 있으므로, 인센티브·규제·협약을 조합한 정책도구를 통해 투자행동을 유도해야 한다는 점도 제기되었다(Alamoush, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F., 2022).

한편, 하역장비 배출 저감을 위해 정부가 추진해야 하는 조치에 대해 구체적으로 제안하고 있는 연구도 일부 존재한다. 김환성 외(2013)는 하역장비 에너지등급제 도입, 도입기준안 마련, 원단위 관리, 정기검사제도, 기술개발 추진 등 제도적 관리장치의 필요성을 제시하였으며, Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.(2019)은 터미널의 친환경 투자를 유도하기 위해 인센티브, 규제 등 다양한 정책과 전략이 필요하다고 보았다. 이러한 연구들은 공통적으로 항만·터미널의 감축 성과는 기술·운영상 조치만으로는 확보되기 어렵고, 정책적 지원과 제도적 장치가 결합될 때 실효성이 높아진다는 점을 시사한다.

3) 하역장비 및 타 분야 온실가스 관리체계 관련 연구

하역장비 관리체계와 관련한 연구는 장비 현황, 장비 제원, 장비 가동현황, 최신 기술정보, 유지관리체계 등과 관련된 장비 정보를 체계적으로 수집·관리하기 위한 정보시스템 또는 데이터베이스 구축의 필요성을 강조하는 연구들이 다수 수행되었다(양창호 외, 1999; 홍동희 외, 2000). 이들 연구는 항만별·운영사별로 분산되어 있는 장비 정보를 통합하여 의사결정자료로 활용하기 위해서는 일관된 데이터 체계가 필요하며, 장비 보유현황·제원·가동현황·유지관리정보·신기술 동향 등을 포함하는 통합 정보체계의 구축이 필요함을 지적하였다. 반면, 하역장비 관리체계를 온실가스 관리와 연계한 연구는 매우 제한적이다. 김환성 외(2013)가 장비 관리 측면의 온실가스 감축정책 과제들을 제안하였으나, 등록-운행-폐기 등 관리주기별로 적용 가능한 구체적 정책 수단을 제시하지는 못하였다.

한편, 국내 교통 및 환경 분야에서는 온실가스 감축정책의 실효성을 높이기 위해 배출통계 체계, 배출계수 개발, 노후차 관리 강화, 대기오염물질 및 온실가스 동시 관리체계 구축 등 감축 대상의 관리 기반을 조성하고 관리체계를 강화하기 위한 연구들이 활발히 추진되고 있다(최기철 외, 2025; 석주현 외, 2017; 한진석 외, 2019; 김규승 외, 2023; 김대진 외, 2024; 조준행·신승식·정경화, 2008; 한진석 외, 2019). 특히 화물자동차 분야에서는 화물자동차의 제작-운행-폐차-전환에 이르는 전 생애주기 관점의 관리체계가 구축될 필요가 있으며, 특히 규제와 인센티브의 적절한 조합이 필요하다는 논의가 제기되기도 했다(김규승 외, 2023; 석주현 외, 2017). 또한 일부 연구들은 온실가스 및 미세먼지를 효과적으로 감축하기 위해서는 정부가 명확하고 일관된 정책 시그널을 제공해야 한다고 주장한 점도 참고할만한 요소이다(한진석 외, 2019).

이러한 논의들은 교통·환경 분야에서는 이미 온실가스 관리체계의 핵심 요소로 배출량 데이터 수집 및 관리, 생애주기 기반 관리체계, 노후차 관리 강화, 정책 수단 조합 운영 등이 중요하게 논의되고 있음을 보여준다. 이는 하역장비 분야에서도 단순한 장비 정보관리 수준을 넘어, 데이터 기반의 배출 관리, 장비 전환 및 유지관리체계 등 정책·기술적 수단을 아우르는 포괄적 관리체계 구축이 필요함을 보여준다.

2. 선행연구와의 차별성

본 연구는 다음과 같은 점에서 기존 연구와 차별성이 있다. 첫째, 본 연구는 하역장비 온실가스 감축이 지속적으로 이루어질 수 있는 관리 기반을 정립하는 데 초점을 둔다. 지금까지 기존 연구들은 배출량을 산정하는 방법론을 정립하거나, 특정 감축수단의 효과를 분석하거나, 어떤 정책수단을 활용하는 것이 좋은지에 집중하는 경우가 많았다. 반면 본 연구는 이러한 다양한 수단들이 효과적으로 작동하기 위한 관리 기반을 구축하는 데 초점을 둔다는 점에서 차별성을 지닌다.

둘째, 본 연구는 하역장비의 행정적 관리체계를 온실가스 감축과 연계하는 접근을 시도한다는 점에서 차이가 있다. 하역장비는 현행 법령상 안전, 환경(대기오염) 관점에서 행정적 관리 대상이나, 이러한 관리체계 관점에서 온실가스 감축 방안을 검토한 연구는 미흡하다. 이에 본 연구는 하역장비 관리체계의 고도화를 통해 온실가스 배출을 효과적으로 관리하기 위한 정책 방안을 도출함으로써 기존의 접근을 보완하고자 하였다.

셋째, 본 연구는 현장 및 관계기관 의견을 기반으로 실행가능성을 갖춘 관리방안을 제시하였다는 점에서 기존 연구와 차이가 있다. 기존 연구가 기술적, 이론적 분석에 주로 의존한 반면, 본 연구는 하역장비 운행, 관리와 관련된 이해관계자 의견을 폭넓게 수렴하여 국내 정책 여건을 반영한 관리체계 고도화 방안을 도출하였다. 이러한 접근은 국내 정책 여건을 반영함으로써 정책의 실행 가능성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

〈표 1-3〉 본 연구와 선행연구와의 차별성

구분	선행연구		본 연구
	요약	참고문헌	
연구 목표	• 하역장비 배출량 산정 • 하역장비별, 공정별 배출구조 파악 • 개별 감축수단의 효과 분석을 통한 배출저감 잠재력 평가 • 항만 차원의 감축목표, 정책 우선순위, 정책도구 제시	• Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T.(2024), Martinez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.(2019), Okşas, O.(2023), 안용성·이향숙·이지원(2024), Sim, J.(2018), Song, D.(2024) 등	• 하역장비의 효과적인 온실가스 배출 관리를 위한 장비관리체계 개선 방안 제시 • 감축수단, 정책수단들이 지속적으로 실행될 수 있는 기반 설계가 초점
연구 대상	• 하역장비 배출량 • 하역장비 배출량 산정방법론 • 하역장비 배출관리방안 • 하역장비 정보 관리체계	• Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T.(2024), 노영훈·장영태(2015), 최민애 외(2010), 양창호 외(1999), Sorte, S. et al.(2021), Shin, K., & Cheong, J.(2011) 등	• 컨테이너 터미널 하역장비 관리체계

구분	선행연구		본 연구
	요약	참고문헌	
연구 범위	• 하역장비 배출량 산정방법론 정립 • 산정 도구 설계 및 기능 검토 • 하역장비 배출 저감을 위한 기술적, 운영적, 정책적 조치 전략 및 시행효과 • 항만 탈탄소화를 위한 정책 프레임워크 • 하역장비 정보시스템 구축	• Sorte et al.(2021), Geerlings, H., & Van Duin, R.(2011), Lam, J. S. L., & Notteboom, T.(2014), 양창호 외 (1999), Mao, X. & Meng, Z.(2023), Azarkamand, S., Ferré, G., & Darbra, R, M.(2020) 등	• 하역장비 관리체계의 구성요소 전반을 포괄 • 등록-운행-폐기(전환)에 이르는 행정적 관리 흐름 전체를 연구 범위로 설정
연구 방법	• 문헌분석, 정책프레임워크 비교·분석 • 활동자료·연료소비 기반 배출량 산정, 배출계수 적용, 시나리오 분석 • 최적화 모형(MIP), 시뮬레이션, 스케줄링 모형, 비용·편익 분석 등 계량적 방법론 활용	• Sha, M. et al.(2017), He, J. et al.(2015), Yu, H. et al.(2017), Alamoush et al.(2024), Sim, J.(2018), Geerlings & Van Duin(2011) 등	• 문헌분석 • 사례분석 • 이해관계자 의견 수렴 • 전문가 자문

자료: 저자 작성

02

하역장비 온실가스 배출관리 여건 검토

제1절 하역장비 온실가스 배출 관리 필요성

1. 하역장비 개념 및 범위

하역장비는 항만에서 화물의 이동, 보관, 하역 작업을 위해 사용되는 다양한 장비를 아우르는 개념으로 항만 운영의 필수 요소이다. 하역장비를 지칭하는 명칭이나 범위는 법령별로 상이한데, 먼저 「항만법」은 하역장비를 항만시설 중 기능시설 중 하나로 규정하고 있으며, 고정식, 이동식 장비로 분류하고 있다. 그리고 법 제31조에서 항만 내 사용을 위해 관리청에 등록이 필요한 하역장비를 동법 시행령 [별표 5]에 열거하고 있다. 「항만운송사업법」의 경우 정의를 명시적으로 규정하지는 않았으며, 항만하역사업 등록 시 필요한 하역장비의 범위를 동법 시행규칙 제7조 및 [별표 2]로 정하고 있다. 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법(이하 항만대기질법)」은 하역장비를 ‘항만하역사업에 사용되는 장비(선박, 뗏목 제외)’로 규정하고 있으며, 항만의 배출원으로 정의하고 그 범위를 ‘트랜스퍼 크레인, 갠트리 크레인, 스트래들 크레인, 야드 트랙터’로 규정, 컨테이너 터미널 하역

장비를 주요 관리 대상으로 설정하고 있다. 한편, 「항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률(이하 항만기술산업법)」에서는 ‘항만장비’라는 명칭을 사용하며 ‘항만법」시행령 [별표 5] 제5호부터 17호까지 및 제19호’로, 「항만설계기준」에서는 ‘하역기계’라는 명칭으로 ‘하역작업에 이용하는 기계로 항만구역에 설치되는 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인, 스트래들 캐리어, 야드 트랙터(무인 트랜스포터 포함), 리치스태커, 쉑언로더, 쉑로더, 스택커 리클레이머, 벨트컨베이어, 다목적크레인, 모빌하버 크레인, 로딩암 등’이라 정하고 있다.

이와 같이 하역장비의 범위는 관리 목적에 따라 법령별로 상이하게 규정되고 있다. 다만, 「항만대기질법」에서는 항만 내 주요 대기오염물질 배출원으로 컨테이너 취급 하역장비를 명시적으로 특정하고 있다. 본 연구에서도 이들 장비를 중심으로 온실가스 배출 저감을 위한 관리체계 개선 방안을 검토하고자 한다.

〈표 2-1〉 관계 법령상 하역장비의 정의 및 범위

분야	명칭	정의	범위
항만법	하역장비	• 법상 직접적 정의는 없으나, 항만시설 중 기능시설로 분류되는 하역시설의 구성요소로서 고정식 또는 이동식 하역장비가 포함	• 하역장비의 범위는 조문상 명확히 규정되어 있지는 않지만 「항만법 시행령」 별표 5에서 항만 내 설치, 철거시 신고가 필요한 시설장비 목록을 제시, 그 중 구조물·설비를 제외하고 하역장비로 간주할 수 있는 항목은 제5호부터 제17호까지 및 제19호로 구체적인 목록은 다음과 같음 - 컨테이너 크레인 - 트랜스퍼 크레인 - 스트래들 캐리어 - 야드 트랙터(AGV 포함) - 리치 스택커 - 야드 새시 - 쉑 로더 - 쉑 언로더

분야	명칭	정의	범위
			- 스택어 리클레이머 - 벨트 컨베이어 - 다목적 크레인 - 모빌 하버 크레인 - 로딩 암 - 그 밖의 시설장비
항만운송 사업법	하역장비	• 법상 직접적 정의는 없으나, 「항만운송사업법 시행규칙」 별표2의 18호를 참고하면, 항만에서 하역작업을 위하여 필요한 장비로 정의 가능	• 예인선 및 부선 • 기중기 및 기중기선 • 언로더 및 십로더 • 지게차 • 페이로더 • 포크레인 • 불도저 • 스트래들캐리어 • 컨베이어벨트 • 트럭 • 트랙터 및 트레일러 • 사일로 • 굴착기 • 스택어 리클레이머 • 크레인 • 야드 새시 • 고무 방충재 등 해상 환적용 장비 • 그 밖에 항만에서 하역 작업을 위하여 관리청이 필요하다고 인정하는 장비
항만대기 질법	하역장비	• 「항만운송사업법」 제3조제1호의 항만하역사업에 사용되는 장비(선박, 뗏목 제외)	• 트랜스퍼크레인 • 갠트리크레인 • 스트래들캐리어 • 야드 트랙터
항만기술 산업법	항만장비	• 항만 내에서 화물의 이동·보관·하역을 위하여 필요한 설비 또는 장치	• 「항만법 시행령」 별표 5 제5호부터 제17호까지에 해당하는 시설장비 및 제19호에 해당하는 시설장비(같은 표 제1호부터 제4호까지 및 제18호의 시설장비와 유사한 구조 및 기능을 가진 시설장비는 제외)

분야	명칭	정의	범위
			- 컨테이너 크레인 - 트랜스퍼 크레인 - 스트래들 캐리어 - 야드 트랙터 - 리치 스택커 - 야드 새시 - 십 로더 - 십 언로더 - 스택커 리클레이머 - 벨트 컨베이어 - 다목적 크레인 - 모빌 하버 크레인 - 로딩 암 - 그 밖의 시설장비
항만설계 기준	하역기계	• 하역작업에 이용하는 기계	• 항만구역에 설치되는 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인, 스트래들 캐리어, 야드 트랙터(무인 트랜스포터 포함), 리치스택커, 십언로더, 십로더, 스택커 리클레이머, 벨트컨베이어, 다목적크레인, 모빌하버 크레인, 로딩암 등

자료: 항만법 제31조, 항만법 시행령 제38조 및 [별표 5], 항만운송사업법 시행규칙 제7조 및 [별표 2], 항만대기질법 제2조 제4항, 항만대기질법 시행령 제3조 및 [별표 2], 항만기술산업법 제2조, 항만기술산업법 시행규칙 제2조, 해양수산부(2017), p. 5.

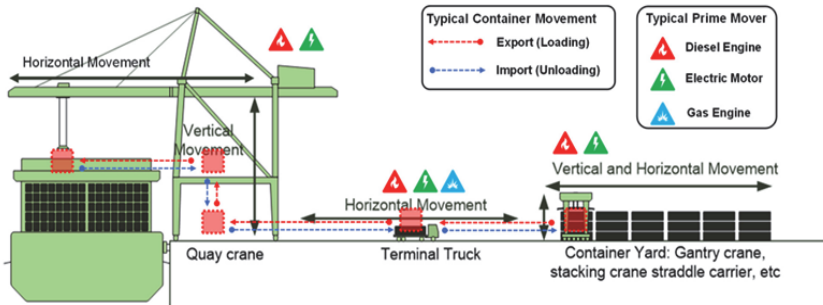
2. 하역장비 온실가스 배출 매커니즘

하역장비의 온실가스 배출은 장비 운행에 필요한 에너지를 소비하는 과정에서 발생한다. 따라서 온실가스 배출량은 에너지 종류(경유, LNG, 전기 등)와 에너지 소비량에 의해 결정되며, 에너지 소비량은 작업량과 작업 특성, 운영 효율 등에 좌우된다. 이러한 하역장비 온실가스 배출 매커니즘을 이해하기 위해서는 먼저 컨테이너 터미널의 작업 구조를 살펴볼 필요가 있다.

컨테이너 터미널은 선박↔터미널↔내륙간 컨테이너 화물을 처리하는 물류 거점으로, 크게 안벽, 야드, 게이트의 세 구역으로 구성된다. 각 구역에는 고유 작업을 수행하는 하역장비들이 배치되며, 하역장비별 작업을 중심으로 일반적인 컨테이너 터미널의 작업 흐름을 설명하면 다음과 같다.

수입을 기준으로 설명하면, 선박이 안벽에 접안하면 컨테이너 크레인이 선박에서 컨테이너를 내려 야드 트랙터에 직접 적재하거나, 스트래들 캐리어가 컨테이너를 이송할 수 있도록 노면에 내려둔다. 이후 야드 트랙터, 스트래들 캐리어가 컨테이너를 야드 구간으로 운반하고, 트랜스퍼 크레인이 이를 받아 야드에 적재한다. 이후 내륙으로 컨테이너를 반출하기 위한 외부 트럭이 도착하면 트랜스퍼 크레인이 적재된 컨테이너를 외부 트럭에 상차한다. 수출의 경우 이 과정이 역순으로 이루어지며, 환적은 외부 트럭의 개입 없이 컨테이너 크레인-야드 트랙터(또는 스트래들 캐리어)-트랜스퍼 크레인 간 이송만 수행된다. 한편, 리치 스택어, 탑핸들러 등과 같은 컨테이너 핸들러는 트랜스퍼 크레인을 보조하여 야드 내에서 컨테이너를 적치하거나 재배치하는 역할을 담당한다.

〈그림 2-1〉 컨테이너 터미널 하역장비의 일반적인 작업 흐름



자료: Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T.(2024), p. 4.

각 하역장비는 고유한 작업을 반복 수행하면서 온실가스를 배출하며, 장비별 작업 특성에 따라 온실가스 배출 특성 또한 상이하다. 예를 들어 야드 트랙터는 주행거리에, 컨테이너 크레인 작업횟수에 더 민감하게 반응한다. 또한 물동량이 증가할수록 작업량이 늘어나 배출량이 증가하며, 장비 운용이 비효율적일 경우 추가적인 배출이 발생한다. 이러한 특성은 Yu, H. et al.(2017)의 연구에서도 확인할 수 있는데, LA항의 경우 하역장비 대수가 감소하였음에도 작업량 증가 및 운영 비효율로 인해 CO₂ 배출이 18% 증가한 바 있다.

이처럼 하역장비는 에너지 종류뿐만 아니라 작업 특성, 물동량, 운영 효율 등 다양한 요인에 따라 배출량이 결정된다. 따라서 효과적으로 하역장비 온실가스 배출을 관리하기 위해서는 이러한 다양한 요인들을 체계적으로 파악하고 관리할 수 있는 관리체계 개선이 필요하다.

3. 하역장비 온실가스 배출 관리 필요성

항만 탄소중립 달성의 관점에서, 하역장비는 다음과 같은 근거로 우선적인 관리 필요성이 높은 대상이다. 첫째, 하역장비는 항만 운영 주체가 직접적으로 통제·운영 가능한 배출원이다. 항만은 해상 교통과 육상 교통이 만나는 교통 결절점으로, 항만과 관련된 배출은 크게 항만 운영주체의 직접적인 운영 범위에서 발생하는 내부 배출(항만 시스템 경계 관점의 Scope 1, 2)과 선박, 외부트럭 등 항만을 이용하는 외부주체의 활동에서 발생하는 외부 배출(항만 시스템 경계 관점의 Scope 3)로 구분할 수 있다. 내부 배출과 외부 배출을 모두 포함하는 항만 관련 배출(Port-related emissions)을 기준으로 보면 하역장비의 비중은 상대적으로 작지만¹⁰⁾, 외부 배출은 국제 해운, 도로수송 등 다른 활동부문에서 별도로 계상·관리되는 배출로서 항만 운영주체가 직접 통제하기 어려운 영역에 속한다. 통상 온실가스 배출 책임은 각 배출 주체가 지는 것이 원칙이며, 그에 따라 선박의 경우 선주가, 항만 운영에서 발생하는 배출은 항만 운영주체가, 화물차의 배출은 운송사가 관리 책임을 져야 한다. 즉, 선박과 화물차의 배출이 항만 내에서 발생한다 해도 이는 항만이 직접 관리할 수 없는 공급망 상·하류 활동의 일부인 것이다. 반면, 항만 운영 과정에서 발생하는 내부 배출은 항만 운영주체가 직접 관리·감축 전략을 적용할 수 있는 핵심 영역이다. 따라서 대표적인 항만 내부 배출원인 하역장비를 중심으로 배출 관리를 우선적으로 수행할 필요가 있다.

10) Shin & Cheong(2011)에 따르면 2000~2007년 부산항의 온실가스 배출량 비중은 선박 64%, 외부 육상교통수단 22%, 하역장비 14% 수준으로 나타남

〈표 2-2〉 항만 시스템 경계 관점에서의 Scope 구분

구분	정의	주요 배출원
Scope 1 (직접배출)	항만 운영 주체가 직접적으로 통제·운영할 수 있는 배출원에서 발생하는 배출	• 하역장비 • 운영 건물 • 예인선 등
Scope 2 (간접배출)	항만 운영 주체가 외부로부터 구매하는 전력으로 인해 발생하는 배출, Scope 2 배출은 물리적으로 전력 발전 설비에서 발생	• 하역장비 • 운영 건물 • 리퍼컨테이너 • 조명 등
Scope 3 (기타 간접배출)	항만 운영 주체 활동의 결과이지만, 관리 주체가 직접 소유하거나 통제하지 않은 배출원으로부터 발생하는 배출	• 선박 • 외부 트럭 • AMP 등

자료: WRI, C40CITIES, & ICLEI(2021)(검색일: 2025.4.30.), p. 11. 자료를 바탕으로 연구 목적에 맞게 저자 작성

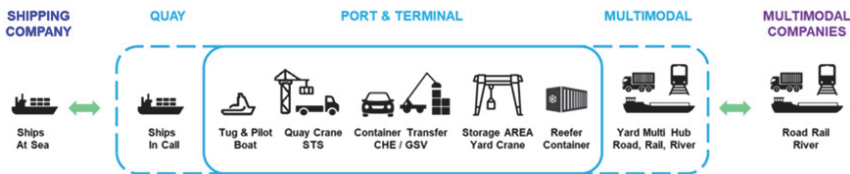
둘째, 하역장비는 항만 내부 배출원 중 가장 많은 온실가스를 배출하는 배출원이다. 항만 내부 배출원, 즉 항만 운영 주체가 직접 관리 가능한 배출원에는 하역장비, 운영 건물, 예인선, 리퍼 컨테이너, 조명 등이 있으며, 그 중 하역장비가 가장 많은 온실가스를 배출하고 있다. 이와 관련하여 Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.(2019)는 발렌시아항 Noatum 터미널에서 하역장비의 온실가스 배출이 전체의 80.9%를 차지한다고 보고하였으며, 부산항만공사¹¹⁾는 2023년 부산항 내부 온실가스 배출 중 하역장비가 약 83%를 차지하는 것으로 추정¹²⁾하였다. 이처럼 하역장비는 항만 내 온실가스 배출의 절대적 비중을 차지하는 주요 배출원으로서, 항만의 탄소중립 실현을 위해서는 하역장비 관리가 필수임을 의미한다.

11) 부산항만공사(2023)

12) 항만의 운영통제권 외부 배출원인 선박, 외부트럭 등은 제외하고, 항만의 운영통제권 내 배출원 중 하역장비의 배출 비중을 의미함(자료: 부산항만공사(2023))

셋째, 하역장비는 공급망 탄소중립 규제 대응을 위한 항만의 핵심 관리 영역이다. 최근 EU 등 주요국의 탄소 규제가 공급망 전반에서 발생하는 탄소배출량의 산정 및 감축을 요구하는 형태로 추진¹³⁾됨에 따라, 글로벌 화주, 선사 등에서 항만, 터미널에 대한 탄소 정보 공개 요구가 확산될 것으로 전망된다. 실제로 Apple과 같은 글로벌 선도 기업들은 운송 서비스 선택 시 탄소배출을 주요 결정 요인으로 고려하기 시작했으며¹⁴⁾, UNCTAD는 최근 항만 성과 측정 평가 지표에 탄소발자국, 에너지 소비량 등을 포함하는 등 환경 성과를 주요 평가 항목으로 포함하기 시작했다¹⁵⁾. 이와 같은 화주들의 행동 변화와 국제적 평가기준의 변화는 항만의 탈탄소화 노력이 곧 항만 경쟁력을 좌우하는 핵심 요소로 자리잡고 있음을 보여준다. 이러한 공급망 및 국제적 차원의 요구에 대응하기 위해서는 배출량의 정확한 산정과 실질적 감축이 필요하며, 특히 하역장비 단위 배출량 확보가 중요하다. 화주, 선주는 화물 처리 과정에서 직접 투입되는 자원의 배출 정보를 중시하므로, 하역장비는 공급망 차원의 투명성 확보와 기업 ESG 대응을 위한 핵심 관리영역이다. 아울러 하역장비는 항만 내 배출원 가운데 활동 자료 확보가 상대적으로 용이하므로 하역장비 단위 배출관리체계는 국제 규제와 시장 요구에 효과적으로 대응할 수 있는 실질적 기반이 된다.

〈그림 2-2〉 해상물류 공급망의 주요 배출원



자료: New Energies Coalition(2025), p. 11.

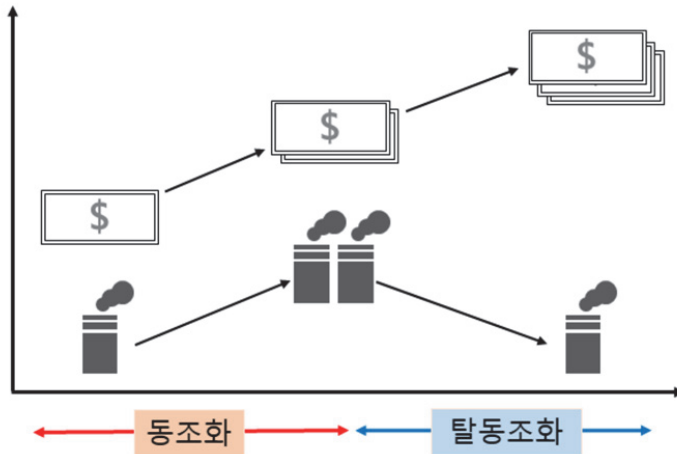
13) 산업통상자원부 보도자료(2024.7.25.)(검색일: 2025.5.4.)

14) Sugimura, Y.(2023), p. 29.

15) UNCTAD(2023), p. 3, pp. 33-40.

마지막으로 하역장비는 항만에서 탈(脫)동조화(Decoupling) 전략을 구현하기에 가장 핵심적인 배출원이다. 하역장비는 화물 하역 작업을 수행하는 활동 기반 배출원으로, 컨테이너 물동량이 증가할수록 온실가스 배출도 불가피하게 함께 증가하는 구조적 특성을 지닌다. 그러나 글로벌 탄소규제에 효과적으로 대응하는 방향은 처리 물동량과 부가가치는 증가하면서도 단위 물동량당 탄소배출은 낮추는 탈동조화 기반의 배출관리 전략 마련이 필요하다. 이러한 맥락에서 하역장비는 기술적·운영적 조치를 통해 탄소집약도(Carbon Intensity)를 줄여 탈동조화 경로를 확보하기에 적절한 대상이다. 구체적으로 장비 가동률 최적화, 대기시간 최소화, 공차거리 최소화, 작업 동선 효율화 등의 운영 개선과 함께 장비의 전동화, 에너지 효율이 높은 신규 장비 도입 등을 통해 배출 효율을 개선할 수 있다. 따라서 하역장비는 항만의 물동량 확대와 탄소감축을 동시에 달성하기 위한 전략적 관리 대상이라고 볼 수 있다.

〈그림 2-3〉 동조화와 탈동조화의 개념도



자료: 김동구·손인성(2020), p. 6.

제2절 국내 하역장비 현황 및 관리체계

1. 국내 하역장비 현황

1) 하역장비 등록현황

2025년 12월 기준, 국내 하역장비 등록 현황을 살펴보면, 국내 등록 하역장비는 총 5,776기¹⁶⁾이며, 이 중 자체 동력원이 없는 야드 새시를 제외하면 3,600기가 온실가스를 배출하는 하역장비로 간주될 수 있다. 이 가운데 컨테이너 취급을 위한 하역장비인 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인, 스트래들 캐리어, 야드 트랙터, 컨테이너 핸들러 등이 약 61.6%인 2,218기를 차지하고 있다. 구체적인 하역장비별 등록대수는 <표 2-3>과 같다.

<표 2-3> 국내 하역장비 현황(2025년 12월 기준)¹⁾

구분	컨테이너 크레인	트랜스퍼 크레인	스트래들 캐리어	야드 트랙터	컨테이너 핸들러 ²⁾	야드 새시	컨테이너 취급 장비 (야드 새시 제외)	그 외 (컨테이너 취급 장비 제외)
장비수	209	662	73	1,097	212	2,119	2,253	1,414

주 1) 화물 이송을 위한 하역장비로 보기 어려운 갑문본체, 갑문구동장치, 충수설비, 취수·배수설비와 탑승교는 제외하였음

2) 장비 등록 자료 기준, 갠트리 크레인은 컨테이너 크레인으로, AGV는 야드 트랙터로, 리치 스택커, 탑 핸들러, 엠프티 핸들러, 포크 리프트는 컨테이너 핸들러로 통합하여 표기함

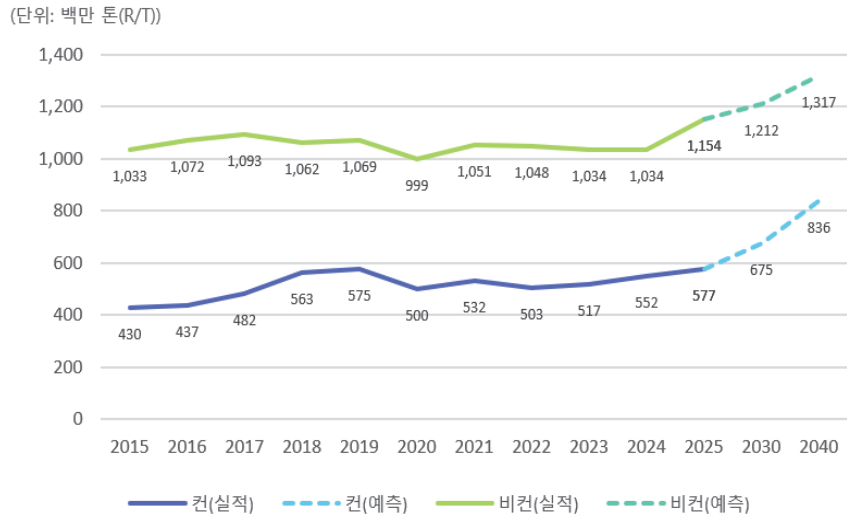
자료: KOTEC(2025.12.4.) 자료를 바탕으로 저자 정리

국내 하역장비의 과반이 컨테이너 취급 장비임에도 불구하고, 항만 물동량 중 컨테이너가 차지하는 비중은 2024년 기준 34.8% 수준으로, 이는 컨테이너 터미널이 비컨테이너 터미널에 비해 하역장비 집약도가 높음을 보여주며, 장비 관리 측면에서 우선적으로 주목해야할 대상임을 시사한다. 더

16) 화물을 이송을 위한 하역장비로 보기 어려운 갑문본체, 갑문구동장치, 충수설비, 취수·배수설비와 탑승교(해당 시설장비까지 포함할 경우 총 5,879기)는 제외하였음

육이 국내 컨테이너 물동량은 2015년 430백만 톤에서 2024년 552백만 톤으로 증가세를 보이고 있으며¹⁷⁾, 2040년까지 836백만 톤에 이를 것으로 전망¹⁸⁾된다(〈그림 2-4〉 참조). 물동량 증가는 하역장비 작업량 증가로 이어지며, 이는 곧 온실가스 배출량 증가를 의미한다. 이러한 높은 장비 집약도와 지속적인 물동량 증가 추세를 종합적으로 고려하면 컨테이너 터미널의 하역장비 배출관리 중요성은 더욱 증대될 것으로 예상된다.

〈그림 2-4〉 국내 항만 물동량 실적 및 예측



자료: Port-MIS(검색일: 2025.10.3.), 한국해양수산개발원(2023) 자료를 바탕으로 저자 정리

17) 2015년부터 2024년까지 연평균 2.83% 증가

18) 2024년부터 2040년까지 연평균 연평균 2.63% 증가 전망

2) 하역장비 특성

현재 국내 하역장비 등록 시 장비의 연료 관련 정보가 수집·관리되지 않아 각 장비별 에너지원 현황이나 에너지사용량 등에 대한 정확한 현황 파악에는 한계가 있다. 하지만 최근 선행연구¹⁹⁾와 현장 의견²⁰⁾을 종합하면 장비별 개략적인 에너지 소비 특성을 확인할 수 있다. 먼저 국내 컨테이너 터미널 하역장비가 소비하는 에너지원은 크게 유류(경유), LNG, 전기로 구분할 수 있으며, 전기를 연료로 사용하는 경우 공급 방식은 국가 전력망 등에 연결하여 연속적으로 공급받는 형태(이하 연속식)와 특정 주기별로 연료 공급이 필요한 형태(이하 충전식)로 구분할 수 있다(〈표 2-4〉 참조).

〈표 2-4〉 국내 컨테이너 터미널 하역장비의 주요 에너지원

구분	에너지원
컨테이너 크레인	전기(연속식)
트랜스퍼 크레인	전기(연속식)
	유류(경유)
스트래들 캐리어	유류(경유)
야드 트랙터	유류(경유)
	LNG
	전기(충전식)
컨테이너 핸들러(리치 스택어, 탑 핸들러 등)	유류(경유)
	전기(충전식)

자료: 저자 작성

한편, 장비 유형별로 작업 특성이 상이하므로 에너지 소비 구조에도 차이가 있다. 먼저 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인은 전기화가 상당히 진행되었으며²¹⁾, 이들은 대형 장비 특성상 대량의 전력을 소비한다. 더욱이

19) 안용성·이향숙·이지원(2024), 안승현 외(2022)

20) 부산항 일부 컨테이너 터미널, 부산항만공사 및 인천항만공사 자문의견(각 2025.9.1., 2025.4.30., 2025.7.8.)

트랜스퍼 크레인(이하 리핸들링)으로 인해 에너지 소비가 특히 많다. 실제 2020년 기준, 부산 신항 4개 터미널²²⁾의 전체 전기 사용량 중 컨테이너 크레인과 트랜스퍼 크레인 사용량이 57.2~74.4% 수준²³⁾으로 상당한 전력을 소모하고 있는 것을 확인할 수 있다. 스트래들 캐리어, 야드 트랙터, 컨테이너 핸들러의 경우 여전히 경유, LNG 등 화석연료에 대한 의존도가 높다. 2015년 이후 상당수 야드 트랙터가 LNG 모델로 전환되었고, 최근에는 전기 모델의 도입이 이루어지는 등 친환경 연료로의 전환이 이루어지고 있기는 하나, 여전히 화석연료 기반 장비가 대다수를 차지한다. 또한 터미널 내부 혼잡도, 대기시간, 운행 동선 등 운영 행태에 따라 에너지 소비 행태가 좌우된다.

한편, 2025년 12월 4일 기준 데이터를 활용, 국내에서 운행 중인 컨테이너 하역장비의 사용연식을 2025년 기준으로 분석한 결과, 컨테이너 크레인 평균 16.8년, 트랜스퍼 크레인 15.5년, 스트래들 캐리어 6년, 야드 트랙터 9.3년, 컨테이너 핸들러 9.3년 등으로 나타났다. 그리고 전체 장비 중 57.3%가 10년 이상, 14%가 20년 이상 사용된 것으로 나타났는데, 특히 경유 연료 사용이 많은 야드 트랙터나 컨테이너 핸들러의 경우 48.7%, 38.2%가 10년 이상된 장비로 나타나 노후 수준이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 해양수산부(2023)의 장비별 평균내용기간이나 해양수산부(2019)의 장비별 사용연한 기준과 비교하더라도 노후도가 높은 편이다(〈표 5-5〉참조). 물론 평균내용기간, 사용연한 기준 등은 장비 가동시간과 유지관리 수준에 따라 달라질 수 있기 때문에 이들 지표가 장비 노후도를 규정하는

21) 안용성·이향숙·이지원(2024)에 따르면 2023년 기준, 부산항, 인천항, 여수광양항, 울산항 하역장비 중 컨테이너 크레인은 100%, 트랜스퍼 크레인은 88.6%가 전기화되었으며 그 외 장비는 전기화된 장비가 전무한 것으로 나타남. 다만, 해양수산부 주도로 2025년부터 전기 야드 트랙터 보급사업 등을 추진함에 따라 최근 전기식 야드 트랙터 등이 도입되고 있음

22) 1부두(PNIT), 3부두(HJNC), 4부두(HPNT), 5부두(BNCT)

23) 김근섭 외(2021), pp. 60~65.

절대적인 기준은 아니지만, 장비의 실질적 운용 수명을 가늠하는 기준으로 활용될 수 있으며, 이와 비교했을 때 국내에 노후 경유 하역장비의 비중이 높은 편임을 알 수 있다. 한편, 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인 등도 20년 이상 지난 장비가 36.8%, 26.3%로 사용기간이 상당한 것을 확인할 수 있다.

〈표 2-5〉 선행연구별 하역장비 내용연수 기준

구분		내용
해양수산부 (2023)	장비별 평균내용기간	• 야드 트랙터 및 스트래들 캐리어: 6년 • 갠트리크레인: 15년 • 안벽크레인: 8년
해양수산부 (2019)	장비별 사용연한	• 안벽 크레인 및 야드 크레인: 20년 • 야드 트랙터, AGV, 리치 스택커, 탑 핸들러: 10년

자료: 해양수산부(2023), p. 420.(UNCTAD 항만개발계획(1985) 부록 “Average Economic Life For Port Facilities and Equipment” 발췌분), 해양수산부(2019), p. 240. 자료를 바탕으로 저자 작성

한편, 노후 경유 장비는 제작당시 기술수준의 한계, 엔진효율 저하 등으로 인해 동일 작업을 수행하더라도 에너지 소비량과 배출량이 증가하는 경향이 있다. 이러한 특성 때문에, Islam, M. R., Aziz, M. G., & Khan, M. B.(2022), Geerlings, H., & Van Duin, R.(2011) 등도 노후 장비를 교체하는 것이 온실가스 배출 저감을 위한 주요 방안임을 강조하였다. 따라서 국내 노후 경유 하역장비 비중이 높은 현실은 단순한 성능·안전 관리 차원을 넘어, 항만의 온실가스 배출 저감 차원에서도 관리전략 마련이 필요하다는 점을 시사한다.

〈표 2-6〉 컨테이너 취급 하역장비별 연식 분포(2025.12.4 등록 기준)

구분	2025년 - 장비 제작연도			장비수		
	평균	최대	최소	전체	10년 이상	20년 이상
컨테이너 크레인	16.8	43	2	209 (100%)	167 (79.9%)	77 (36.8%)
트랜스퍼 크레인	15.5	34	1	662 (100%)	488 (73.7%)	174 (26.3%)
스트래들 캐리어	6.0	14	1	73 (100%)	21 (28.8%)	0 (0.0%)
야드 트랙터	9.3	27	0	1,097 (100%)	534 (48.7%)	43 (3.9%)
컨테이너 핸들러	9.3	30	0	212 (100%)	81 (38.2%)	20 (9.4%)

주: 장비 등록 자료 기준, 갠트리 크레인은 컨테이너 크레인으로, AGV는 야드 트랙터로, 리치 스택커, 탑 핸들러, 엠프티 핸들러, 포크 리프트는 컨테이너 핸들러로 통합하여 표기함
 자료: KOTEC(2025.12.4.)을 활용하여 저자 정리

요약하면, 컨테이너 터미널의 하역장비는 장비 유형별로 서로 다른 에너지 사용 특성을 보이며, 이는 배출 관리에서도 장비의 배출 특성에 기반한 다각화된 접근이 필요함을 의미한다. 이러한 관점에서 다음의 네 가지 시사점이 도출된다. 첫째, 현재 하역장비의 에너지·배출 관련 기초정보 수집 체계가 부재하며, 장비 등록 단계부터 이러한 기초정보를 체계적으로 확보할 수 있도록 개선하여 향후 탄소중립 정책의 기반을 마련할 필요가 있다. 둘째, 컨테이너 크레인과 트랜스퍼 크레인과의 이미 전기화가 진전된 장비군은 에너지 소비 효율화, 전력 부하 관리, 재생에너지 활용 비중 확대 등 전력 기반 배출 관리가 필요하다. 셋째, 화석연료 의존도가 높은 스트래들 캐리어, 야드 트랙터, 컨테이너 핸들러 등은 친환경 전환이 우선 과제이며, 이를 원활히 추진하기 위해서는 장비 교체, 충전 인프라 확충, 전력 공급 안정성 확보 등 대규모 투자와 단계적 전환 전략이 필수적이다. 넷째, 국내에는 노후 장비 비중이 높은 편이므로 온실가스 감축 관점에서 노후

경유 장비를 우선적으로 친환경 장비로 교체하기 위한 장비 관리 전략이 요구된다.

2. 국내 하역장비 관리체계

1) 하역장비 등록제도

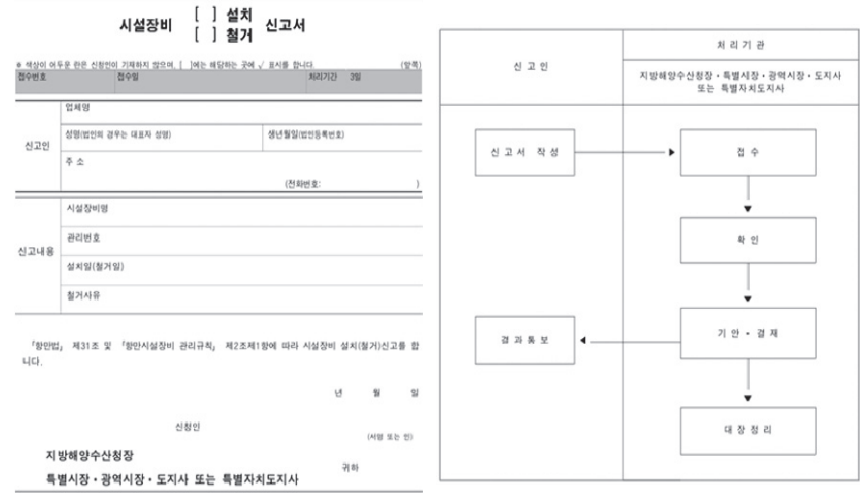
「항만법」에서는 항만 내에서 사용하는 하역장비를 포함한 시설장비²⁴⁾에 대한 등록을 의무화하고 있다. 이는 개별 시설장비를 고유하게 식별, 관리하기 위한 것으로 동법 제31조에 따라 터미널 운영사나 하역사 등 항만구역에서 시설장비를 새로 설치하거나 사용·관리하는 자(이하 시설장비관리자)는 시설장비를 설치·철거하려는 경우 관리청(항만관리기관)에 신고해야 한다. 신고 시에는 「항만시설장비 관리규칙」에 따라 ‘시설장비설치(철거)신고서’(〈그림 2-5〉 참조)와 함께 ‘항만시설장비 대장’ 및 ‘시설장비 검사 합격증’을 첨부하여야 하며, 설치 및 철거 신고는 해당 시설장비의 설치·철거 시작일 3일 전까지 해야 한다. 또한 시설장비관리자의 상호나 신고위치 등이 변경되는 경우에는 별도의 설치변경신고를 해야 한다. 관리청은 접수된 신고를 검토·승인하고 장비대장을 유지·관리하며, 매년 12월 31일을 기준으로 관할 시설장비 관리현황을 파악하여 다음 해 1월 31일까지 시설장비 관리현황을 해양수산부장관에게 제출하여야 한다.

한편, ‘항만시설장비 대장’에는 〈그림 2-6〉과 같이 시설장비의 기본정보(시설장비명, 관리번호, 설치항만 및 부두, 가격 등), 소유·관리정보(소유

24) 갑문본체, 갑문구동장치, 충수(充水: 물 보충)설비, 취수·배수설비, 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인, 스트래들 캐리어, 야드 트랙터, 리치 스택커, 야드 새시, 십 로더, 십 언로더, 스택커 리클레이머, 벨트 컨베이어, 다목적 크레인, 모빌 하버 크레인, 로딩 암, 탑승교, 그 밖의 시설장비 등(자료: 항만법 제31조, 항만법 시행령 제38조 및 [별표 5])

자, 관리자, 제작자, 제조·설치검사일, 검사합격번호 이력 등), 기술제원(하역능력, 정격하중, 정격마력, 부피, 처리능력 등) 등이 포함되며, 이를 통해 장비의 성능, 관리이력 등을 파악할 수 있다. 다만 관리항목이 장비의 구조적 제원과 행정정보 중심으로 구성되어 있어 엔진형식, 출력, 연료종류 등 에너지 소비나 배출특성을 확인할 수 있는 데이터는 포함되어 있지 않다. 즉, 현행 하역장비 등록제도는 안전 및 행정관리 중심 관리로, 배출관리체계로의 확장을 위한 데이터 구조적 연계는 미흡한 실정이다.

〈그림 2-5〉 시설장비 설치(철거) 신고서 양식 및 처리 절차



자료: 항만시설장비 관리규칙 [서식 1]

〈그림 2-6〉 항만시설장비 대장 양식

항만시설장비 대장	
시설 장비명	관리번호
설치항만	부두
종도(하급 하중)	소유자
제조·설치업체명	관리자
검사합격번호	제작자
검사기관	가격 / 대당 백만원
주요제원	
하역능력(문반능력) ()톤(시간/대/시간)	자중 톤
장력하중 톤	최대비위하중 톤/대 (최대잡지하중) (톤/제곱미터)
제일간격 미터	장력마력 마력
길이x너비x높이 세제곱미터	처리(적재)능력 단 알

시설장비 검사란					
일련번호	검사 구분	검사 일자	유효 기간	관리자	담당자
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

자료: 항만시설장비 관리규칙 [서식 2]

2) 하역장비 검사제도

등록된 시설장비는 「항만법」에 따라 시설장비의 구조, 성능 등을 확인하기 위한 주기적인 검사 의무가 부여된다. 이는 「항만법」 제32조부터 35조, 동법 시행령 제39조 및 제39조에 법적 근거를 두고 있으며, 구체적인 절차와 검사 대상, 검사방법, 검사항목 등은 「항만시설장비 관리규칙」과 「항만시설장비검사기준」에서 정하고 있다. 이러한 검사제도는 하역장비의 안전한 운용을 위한 핵심 관리수단으로서 장비 종류 및 구조적 특성에 따라 받아야 하는 검사 종류와 검사항목은 상이하다.

해당 법령에 따라 시설장비관리자는 매년 1회 이상 자체점검을 수행²⁵⁾

- 25) 1. 주간점검: 매주 1회 이상 시설장비를 점검하여 정상적인 기능을 유지하는지 확인하기 위한 점검
2. 분기점검: 매 분기 1회 이상 시설장비의 구조물, 작동장치 및 안전장치의 상태변화를 확인하여 정비·보수가 필요한지 판단하기 위한 점검
3. 특별점검: 지진, 태풍 또는 사고 등으로 시설장비의 안전성이 우려되는 경우 사용하기 전에 실시하는 점검

하여야 하며, 그와 별도로 제조검사, 설치검사, 정기검사, 수시검사 등 관리청이 실시하는 검사를 받아야 한다. <표 2-7>에 정리한 바와 같이, 제조검사는 장비를 새로 제조할 때, 설치검사는 설치 후 사용 전에 받는 검사이며, 정기검사는 시설장비 안전상태 확인을 위해 2년마다, 수시검사는 고정식 장비를 이설하거나 시설장비 구조 변경 시 수행하는 검사이다. 이때, 「건설기계관리법」 등 타 법령에 따라 이미 안전검사를 합격한 장비는 중복검사를 피하기 위해 정기검사가 면제되며, 구조가 단순한 야드 새시 등 일부 장비도 정기검사 대상에서 제외된다. 구체적인 검사범위와 방법은 「항만시설장비검사기준」에 규정되어 있다.

<표 2-7> 시설장비 검사종류 및 검사종류별 검사대상 시설장비의 범위

구분	내용	검사대상 시설장비
제조검사	시설장비를 제조할 때에 하는 검사	• 갑문본체, 갑문구동장치, 충수설비, 취수·배수 설비, 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인, 십로더 및 십언로더, 스택커 리클레이머, 벨트 컨베이어, 다목적 크레인
설치검사	완제품 형태의 시설장비를 설치할 때 하는 검사	• 로딩암, 탑승교
정기검사	사용 중인 시설장비의 안전상태를 확인하기 위하여 제조검사일이나 설치검사일부터 해양수산부령으로 정하는 기간마다 정기적으로 하는 검사	• 항만법 시행령 [별표 4]에 따른 시설장비 • 단, 리치스테커, 야드 새시 및 모빌하버 크레인 등 제외
수시검사	고정식 시설장비를 이설(移設)하거나 시설장비의 구조를 변경할 때에 하는 검사	• 고정식 시설장비를 이설하는 경우 제조검사 대상 시설장비 • 주요 구조를 변경하는 경우 시행령 [별표 4]에 따른 시설장비

자료: 항만법 제33조, 항만시설장비 관리규칙 [별표 1]을 바탕으로 저자 정리

3) 항만시설장비 관리시스템

항만시설장비 관리시스템(Harbor Equipment Management System, 이하 HEMS)은 상술한 「항만시설장비 관리규칙」상의 각종 절차를 효율화하고자 해양수산부가 구축한 전산 시스템이다. 2020년 개정된 「항만법」과 「항만시설장비 관리규칙」에 따라 시설장비의 설치신고, 자체점검, 검사신청 등의 절차를 온라인으로 처리할 수 있는 근거가 마련되면서 웹기반 플랫폼인 HEMS(hems.portcals.go.kr)가 구축되었다. 이를 통해 장비 안전 관리 절차를 간소화하고, 관계기관 간 정보 공유를 용이하게 하고 있다. 관계자 전용 로그인을 필요로 하는 폐쇄형 시스템으로 운영되고 있으며 현재 권한이 부여된 사용자만 회원가입 후 이용할 수 있다.

〈그림 2-7〉 HEMS 홈페이지



자료: 해양수산부 항만시설장비관리시스템(검색일: 2025.5.1.)

HEMS는 시설장비관리자, 관리청, 검사대행기관이 단일 시스템에서 항만시설장비 신고·검사 업무를 수행할 수 있도록 한다. 각 기관의 역할에 따라 시스템 접근 권한이 구분되어 있으며, 그로 인해 사용자 유형별로 이용 가능한 메뉴가 다르게 구성된다. 예를 들어 운영사 계정에는 설치·변경·철거 신고 및 정기검사 신청 메뉴가 활성화되고, 관리청 계정에는 접수된 신고·신청에 대한 승인처리 및 장비현황 관리 메뉴가 제공된다. 검사대행기관 계정에는 배정된 검사 건에 대한 일정관리와 검사결과 등록 메뉴가 주어진다. 이처럼 HEMS에는 항만시설장비 관리와 관련된 모든 절차 이력이 시스템에 기록되어 관계기관들이 공동으로 활용할 수 있다.

HEMS의 주요 구성요소로는 ① 시설장비 등록 DB, ② 검사관리 모듈, ③ 통계·보고 기능이 있다. 먼저, 시설장비 등록 DB에는 전국 항만별로 신고·등록된 모든 장비의 제원정보가 체계적으로 축적된다. 각 장비마다 고유식별번호가 부여되고, 장비 종류(컨테이너크레인, 트랜스퍼크레인, 야드 트랙터 등), 주요 제원(정격능력, 규격, 자중 등), 제조사 및 제작연도, 설치 위치(OO항 OO부두 등), 소유자 및 운영사 정보 등이 DB에 기록된다. 이는 항만시설장비 대장에서 수집되는 데이터와 동일하다. 다음으로 검사관리 모듈은 등록된 장비의 검사 이력을 관리하는 기능으로, 장비별 정기검사 도래 시 운영사가 HEMS를 통해 검사 신청을 하고 검사대행기관은 접수된 신청에 따라 검사 일정을 잡은 뒤 결과를 시스템에 입력하는 방식으로 이루어진다. 검사 완료 후 발급되는 검사성적서나 합격증도 HEMS를 통해 전자 교부되며, 관계자들은 해당 장비의 검사 이력을 상시적으로 조회할 수 있다. 마지막으로 통계 및 보고기능을 통해 관리청은 관할 항만의 장비현황표, 검사계획표 등을 시스템 자료를 바탕으로 손쉽게 출력·제출할 수 있고, HEMS에 집계된 전국 항만의 시설장비 규모, 종류별 노후도, 지역별 분포 등을 실시간으로 파악할 수 있다. 이를 통해 정책 수립이나 안전

관리대책 수립에 필요한 기초자료를 신속히 확보할 수 있다.²⁶⁾ HEMS에서 수집하는 장비 관련 입력 항목을 정리하면 <표 2-8>과 같다.

<표 2-8> 시설장비관리시스템(HEMS)에 등록되는 주요 데이터 항목

구분	HEMS 장비등록 데이터 항목
장비식별정보	관리번호(고유ID), 장비명, 장비종류, 제작연도, 제조사명, 모델명, 가격 등
소유·관리정보	운행사명(시설장비관리자), 법인등록번호, 소유자명, 관리자명 등
설치·신고정보	설치항만명, 부두명, 세부위치, 용도(취급화물) 내용, 설치신고일자 등
제원 및 성능	정격하중(톤), 자중(톤), 처리능력(개/시간등), 부피(길이×너비×높이), 엔진출력(마력), 배기량(cc) 등
검사관련정보	최초 검사종류(제조/설치) 및 일자, 최근 검사일자, 검사 합격증 번호, 검사 유효기간 등
첨부파일	장비사진, 도면, 합격증스캔본등파일자료의 ID 및 저장경로

자료: 해양수산부(2021a, 2021b, 2021c)의 자료를 바탕으로 저자 정리

<그림 2-8> HEMS 장비신고 등록 항목(운행사)

The screenshot shows a web-based registration form for HEMS equipment. It includes fields for:

- Basic Information:** Equipment name, management number, equipment type, manufacturing year, manufacturer, model name, and price.
- Ownership & Management:** Operator name, corporate registration number, owner name, and manager name.
- Installation & Reporting:** Port name, pier name, specific location, purpose (handling cargo), and installation/reporting date.
- Specifications & Performance:** Rated load (ton), weight (ton), processing capacity (pieces/hour), volume (length x width x height), engine output (horsepower), and exhaust volume (cc).
- Inspection Information:** Initial inspection type (manufacturing/installation) and date, latest inspection date, inspection pass certificate number, and inspection validity period.
- Attachments:** Fields for equipment photos, drawings, and scanned inspection certificates, including file IDs and storage paths.

 A red box highlights the '설비 위치 설정' (Set equipment location) button at the bottom right.

자료: 해양수산부(2021a), p. 28.

26) 해양수산부(2021a, 2021b, 2021c)의 자료를 바탕으로 저자 정리

4) 대기오염물질 배출 규제

2019년 4월 제정된 「항만대기질법」은 항만지역등의 대기질 개선을 위한 특별법으로, 항만의 주요 관리 대상 배출원을 선박, 하역장비, 자동차, 건설기계 등으로 구분하고 각 배출원의 관리 기준을 제시하고 있다. 이 법의 관리 대상 오염물질은 대기오염물질²⁷⁾이며, 온실가스는 관리 대상에 포함되지 않는다. 한편, 이 법은, 앞서 살펴본 바와 같이, 하역장비를 트랜스퍼크레인, 갠트리 크레인²⁸⁾, 스트래들 캐리어, 야드 트랙터 4종으로 한정하고 있으며, 하역장비의 대기오염물질 배출을 관리하기 위한 배출가스 허용기준과 환경친화적 하역장비 전환에 관한 규정을 포함하고 있다.

이 법에 따라 항만사업자²⁹⁾는 하역장비의 배출가스 허용기준을 준수하여 하역장비를 운영하도록 의무가 부과되며, 해양수산부장관은 하역장비 운영현황 파악을 위해 항만사업자에게 필요한 자료 제출을 요구할 수 있는 법적 권한을 가진다. 다만, 이 때 요구할 수 있는 자료는 원동기의 출력·제작연도, 원동기 배기량 등을 하역장비 제작 시점의 정보에 한정된다. 또한 항만사업자가 환경친화적 하역장비를 구매·교체할 경우 국가 또는 지방자치단체가 그에 필요한 비용을 지원할 수 있도록 하여 하역장비의 친환경 전환 촉진을 유도할 수 있는 근거를 마련하고 있다. 이 법에서 정하는 환경친화적 하역장비의 범위는 해양수산부령으로 정하는 배출가스 허용기준을 충족하는 장비, LNG, CNG, LPG, 메탄올, 수소, 전기 등을 연료로 사용하는 하역장비, DPF가 부착된 하역장비 등이다.

27) 질소산화물, 황산화물, 휘발성유기화합물, 먼지, 미세먼지, 오존(O3)

28) 항만법 시행령 제38조 및 [별표 5]의 '컨테이너 크레인'와 동일한 장비를 지칭함

29) 이 법에서 "항만사업자"란 「항만법」, 「해운법」 및 「항만운송사업법」 등 관계 법령에 따른 면허·허가를 받거나 등록을 하고 항만지역등에서 사업을 영위하는 자'를 말함

〈표 2-9〉 하역장비 대기오염물질 배출 관리 관련 조문(항만대기질법 관련)

법	시행령	시행규칙
제14조(하역장비의 배출가스 허용기준 등) ① 항만사업자는 <u>대통령령으로 정하는 하역장비 배출가스허용기준에 맞게 하역장비를 운영하여야 한다.</u> ② 해양수산부장관은 제1항에 따른 하역장비 운영현황을 파악하기 위하여 <u>해양수산부령으로 정하는 바에 따라</u> 필요한 자료의 제출을 항만사업자에게 요구할 수 있다. 이 경우 자료의 제출을 요구받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 따라야 한다.	제9조(하역장비의 배출가스허용기준) 법 제14조제1항에서 “대통령령으로 정하는 하역장비 배출가스허용기준”이란 별표 4를 말한다.	제6조제2(하역장비의 배출가스허용기준 확인 등) 법 제14조 제2항 전단에 따라 지방해양수산청장이 항만사업자에게 제출을 요구할 수 있는 자료는 다음 각 호와 같다. 1. 하역장비의 원동기 출력 및 제작연도 2. 하역장비의 원동기 배기량, 수입 원동기의 경우 제작 시 적용된 제20 국가의 배출가스 허용기준 등 영 별표 4에 따른 하역장비의 배출가스 허용기준 충족 여부를 확인할 수 있는 자료(하역장비의 노후화 등에 따라 제1호의 자료를 확인할 수 없는 경우로 한정한다)
제15조(환경친화적 하역장비로의 전환 촉진 등) ① 항만관리청은 항만사업자가 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 환경친화적 하역장비(이하 “환경친화적 하역장비”라 한다)를 우선 사용하도록 권고할 수 있다. 1. 대기오염을 저감하는 기술을 적용하여 설계된 하역장비로서 <u>해양수산부령으로 정하는 기준에 적합한 하역장비</u> 2. 액화천연가스 등 <u>해양수산부령으로 정하는 환경친화적인 에너지를 동력원으로 사용하는 하역장비</u>		제7조(환경친화적 하역장비 기준 등) ① 법 제15조제1항제1호에서 “해양수산부령으로 정하는 기준”이란 별표의 배출가스허용기준을 말한다. ② 법 제15조제1항제2호에서 “액화천연가스 등 해양수산부령으로 정하는 환경친화적 에너지”란 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 에너지를 말한다. 1. 액화천연가스(LNG) 2. 압축천연가스(CNG) 3. 액화석유가스(LPG) 4. 메탄올(Methanol) 5. 수소(Hydrogen)

법	시행령	시행규칙
3. 「대기환경보전법」 제2조제17호에 따른 배출가스저감장치를 부착한 하역장비 4. 그 밖에 제1호부터 제3호까지에 따른 하역장비에 준하는 것으로 해양수산부장관이 정하여 고시하는 하역장비 ② 국가나 지방자치단체는 항만사업자가 환경친화적 하역장비를 구매하거나, 환경친화적 하역장비로 교체하는 데에 필요한 비용을 지원할 수 있다.		6. 전기 7. 그 밖에 해양수산부장관이 깨끗한 항만대기질 조성을 위해 필요하다고 인정하는 에너지

자료: 항만대기질법 제14조 및 제15조, 항만대기질법 시행령 제9조, 항만대기질법 시행규칙 제6조의2 및 제7조

한편, 이 법에서 정하는 하역장비 배출가스 허용기준은 경유를 사용하는 하역장비 원동기가 적용 대상이며, 제작·제작발주 계약일과 엔진 출력 범위에 따라 그 기준이 상이하다. 2020년 1월 1일 이전 제작·제작 발주 계약이 체결된 하역장비는 2004년 1월 1일 이후 제작된 건설기계 원동기 배출허용기준³⁰⁾과 유사하며, 미국 비도로장비 엔진 규제 Tier 1-2 수준과 유사하다. 2020년 1월 1일 이후 제작·제작 발주 계약이 체결된 하역장비의 경우, 2015년 1월 1일 이후 제작된 건설기계 원동기 배출허용기준³¹⁾과 유사하며 미국 비도로장비 엔진 규제 Tier 4 기준과 동일하다. 다만, 건설기계의 경우 기술 발전을 고려하여 비도로 장비 엔진에 대한 최신의 국제 규제인 EU NRMM Stage V에 부합하는 강화된 배출허용기준을 도입, 2020년 12월 1일 이후 제작된 건설기계에 적용한 반면, 하역장비는 법률 제정 이후 별도 개정이 이루어지지 않았다. 결과적으로 하역장비는 현재 건설기계 대비 상대적으로 완화된 대기오염물질 규제를 적용받는 상황이다. 한편,

30) 대기환경보전법 시행규칙 [별표 17] '4. 건설기계 원동기-가. 2004년 1월 1일 이후'와 유사함

31) 대기환경보전법 시행규칙 [별표 17] '4. 건설기계 원동기-라. 2015년 1월 1일 이후'와 유사함

배출가스허용기준을 준수하지 않거나 관련 자료 제출을 하지 않는 경우, 거짓으로 제출하는 경우에는 1백만원 이하의 과태료가 부과된다.

〈표 2-10〉 하역장비 배출가스허용기준(항만대기질법 시행령 제9조 관련)

구분	엔진 출력 범위	일산화탄소 (CO)	탄화수소 (HC)	질소산화물 (NOx)	입자상물질 (PM10)	측정방법
2020년 1월 1일 전에 제작되었거나 제작 발주 계약이 체결된 하역장비	19kW 이상 37kW 미만	5.5g/kWh 이하	9.5g/kWh 이하 (탄화수소 및 질소산화물)		0.8g/kWh 이하	건설기계 표준 측정모드 (KC1-8모드)
	37kW 이상 75kW 미만	5.5g/kWh 이하	1.3g/kWh 이하	9.2g/kWh 이하	0.6g/kWh 이하	
	75kW 이상 130kW 미만	5.0g/kWh 이하	1.3g/kWh 이하	9.2g/kWh 이하	0.6g/kWh 이하	
	130kW 이상 225kW 미만	5.0g/kWh 이하	1.3g/kWh 이하	9.2g/kWh 이하	0.54g/kWh 이하	
	225kW 이상	5.0g/kWh 이하	1.3g/kWh 이하	9.2g/kWh 이하	0.54g/kWh 이하	
2020년 1월 1일 이후에 제작 발주 계약이 체결된 하역장비	8kW 미만	8.0g/kWh 이하	7.5g/kWh 이하 (탄화수소 및 질소산화물)		0.4g/kWh 이하	NRSC모드 및 NRTC모드 (Non-Road Steady Cycle)
	8kW 이상 19kW 미만	6.6g/kWh 이하	7.5g/kWh 이하 (탄화수소 및 질소산화물)		0.4g/kWh 이하	
	19kW 이상 37kW 미만	5.5g/kWh 이하	4.7g/kWh 이하 (탄화수소 및 질소산화물)		0.03g/kWh 이하	비도로 장비에 적용되는 배출가스 고정 측정 모드 (Non-Road Transient Cycle)
	37kW 이상 56kW 미만	5.0g/kWh 이하	4.7g/kWh 이하 (탄화수소 및 질소산화물)		0.03g/kWh 이하	
	56kW 이상 130kW 미만	5.0g/kWh 이하	0.19g/kWh 이하	0.4g/kWh 이하	0.02g/kWh 이하	
	130kW 이상 560kW 미만	3.5g/kWh 이하	0.19g/kWh 이하	0.4g/kWh 이하	0.02g/kWh 이하	
	560kW 이상	3.5g/kWh 이하	0.19g/kWh 이하	3.5g/kWh 이하	0.04g/kWh 이하	비도로 장비에 적용되는 배출가스 단기 변화 측정 모드)

- 주: 1. 위 표는 경유를 연료로 사용하는 하역장비 원동기에 적용함
 2. 탄화수소(HC)는 비메탄탄화수소(NMHC)로 측정한다. 다만, 총탄화수소(THC)로 측정할 수 있으며, 이 경우에는 총탄화수소 측정값에 0.98을 곱한 값을 비메탄탄화수소 측정값으로 함
 3. 배출가스 측정방법 등에 관해 필요한 사항은 「대기환경보전법」 제50조제6항에 따라 환경부장관이 정하여 고시하는 바에 따름
 4. NRSC(Non-Road Steady Cycle) 모드는 비도로 장비에 적용되는 배출가스 고정 측정 모드, NRTC(Non-Road Transient Cycle) 모드는 비도로 장비에 적용되는 배출가스 단기 변화 측정 모드를 의미함

자료: 항만대기질법 시행령 제9조 및 [별표 4]

5) 시사점

검토 결과, 현재 하역장비 관리체계는 안전성과 대기오염물질 저감에 초점이 맞추어져 있어 온실가스 배출 관리에는 사실상 공백이 존재한다. 먼저 하역장비의 등록, 검사, 신고 등의 행정절차는 체계적으로 운영되고 있으나, 수집되는 정보의 범위가 매우 제한적이다. 에너지 유형, 엔진 정보 등도 수집되지 않고 있으며, 그로 인해 하역장비의 에너지 사용 특성이나 배출 특성을 파악하는 데 한계가 있다. 이는 단순히 온실가스 관리 부재를 넘어 장비 관련 데이터의 수집 범위가 협소하기 때문에 발생하는 문제이다. 이러한 관리범위의 편중은 향후 탄소중립 이행 과정에서 하역장비 정책 수단을 설계할 때 제약요인으로 작용할 수 있다.

또한 하역장비는 장비 운행 중 발생하는 온실가스 배출을 모니터링하거나 장비 노후화에 따른 배출 증가를 관리하는 체계는 부재하다. 이로 인해 운행 장비의 환경적 관리나 노후·고배출 장비의 단계적 전환 등을 체계적으로 유도하기 어렵다. 따라서 운행 중 배출을 지속적으로 모니터링하고 일정 조건에 부합하는 경우 조기폐차를 유도할 수 있는 관리기준 마련이 필요하다.

더불어 하역장비의 온실가스 배출량을 체계적으로 파악할 수 있는 기반이 미비하다. 앞서 지적한 것처럼 장비 관련 데이터가 부족할 뿐 아니라, 하역장비의 배출량을 산정하거나 감축 성과를 평가할 수 있는 근거 자체가 부재하다. 온실가스 배출 관리는 현황을 파악하는 것에서 시작하는 것이므로, 이를 위한 데이터 기반 관리체계를 마련할 필요성이 높다.

제3절 하역장비 온실가스 배출 관리 여건

1. 하역장비 온실가스 감축 관련 기본계획 및 로드맵

1) 탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획

기후변화 대응이 글로벌 과제로 부상하면서 국제사회는 탄소중립 패러다임으로의 전환을 본격화하고 있다. 이러한 국제적 흐름에 동참하기 위해 우리나라는 국가 탄소중립 실현을 위한 제도적, 전략적 기반을 지속적으로

〈그림 2-9〉 탄소중립 국가비전 및 국가전략 체계도



자료: 관계부처합동(2023), p. 16.

강화하고 있다. 그 일환으로 2021년 제정된 「탄소중립기본법」에 근거하여 2023년 4월, 기후위기 대응 및 지속가능발전을 위한 국가 최상위계획인 「탄소중립 녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」을 수립하였다.

이 계획에는 파리협정 목표 달성을 위해 2030년까지 2018년 배출량 대비 40%를 감축하는 것을 목표로 하는 2030 NDC 상향안의 수정안³²⁾이 포함되었다. 수정 NDC에 따른 구체적인 부문별 감축 목표는 <표 2-11>과 같다.

<표 2-11> 2030 NDC 상향안 부문별 감축 목표

(단위: 백만톤CO₂e, 괄호는 '18년 대비 감축률)

구분	부문	2018 실적	2030 목표	
			기존 ('21.10)	수정 ('23.3)
배출량(합계)		727.6	436.6(40.0%)	436.6(40.0%)
배출	전환	269.6	149.9(44.4%)	145.9(45.9%) ¹⁾
	산업	260.5	222.6(14.5%)	230.7(11.4%)
	건물	52.1	35.0(32.8%)	35.0(32.8%)
	수송	98.1	61.0(37.8%)	61.0(37.8%)
	농축수산	24.7	18.0(27.1%)	18.0(27.1%)
	폐기물	17.1	9.1(46.8%)	9.1(46.8%)
	수소	(-)	7.6	8.4 ²⁾
	탈루 등	5.6	3.9	3.9
	흡수원	(-41.3)	-26.7	-26.7
흡수 및 제거	CCUS	(-)	-10.3	-11.2 ³⁾
	국제감축	(-)	-33.5	-37.5 ⁴⁾

※ 기준연도('18) 배출량은 총배출량 / '30년 배출량은 순배출량 (총배출량 - 흡수·제거량)

1) 태양광, 수소 등 청정에너지 확대로 400만톤 추가 감축

2) 수소수요 최신회(블루수소 +10.5만톤), 블루수소 관련 탄소포집량은 CCUS 부문에 반영(0.8백만톤)

3) 국내 CCS 잠재량 반영(0.8백만톤), CCU 실증경과 등을 고려한 확대(0.1백만톤)

4) 민간협력 사업 발굴 및 투자 확대 등을 통해 국제감축량 400만톤 확대

자료: 관계부처합동(2023), p. 21.

32) 우리나라는 2021년 10월, 「탄소중립기본법」의 입법 취지와 국제 동향, 국내 여건 등을 고려하여 NDC 상향안을 발표하였으며, 2023년 발표된 「탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획」에는 이를 수정한 NDC가 포함되었음

2030 NDC 상향안 달성을 위한 항만 관련 과제는 수송, 수소, CCUS 부문에 분산되어 있으며, 하역장비 온실가스 배출 저감과 연계되는 과제는 수송부문에 한정된다. 수송부문의 경우 2030년까지 37.1백만 톤의 감축을 목표로 하고 있으며, 그 중 항만이나 하역장비가 부담해야 할 구체적인 비중은 제시되어 있지 않지만 세부과제로 항만 내 하역장비, 조명탑 등의 저전력, 고효율 전환이 포함되어 있다. 이는 정부가 하역장비를 국가 감축목표 달성을 위한 관리대상으로 인식하고 있음을 보여준다.

〈표 2-12〉 항만부문 온실가스 감축정책 및 추진방안

주요	단위과제명	세부과제	주요 내용
수송 부문	친환경 철도·항공·해운	친환경 해운물류체계 구축을 위한 선박 및 인프라 전환	• 탄소중립 항만(수소항만 등) 조성, 항만 내 시설물(하역장비·조명탑 등)의 저전력·고효율 전환 등 친환경 인프라 구축
수소 부문	빈틈없는 수소 인프라 구축	항만 내 수소 생산·도입 인프라 구축	• 시범항만 2개소를 시작('28)으로 암모니아 혼소 대상 석탄발전소, LNG 발전소, 산업단지 인근으로 수소항만 확대
	수소 산업 생태계 기반 강화	안전기준 마련, 법령정비, 인력양성 등 수소분야 기반 구축	• 수소도시·항만기지 등에서 안전성 강화 실증연구를 추진하여 제도화 지원
CCUS 부문	CCUS 기술개발 및 산업 인프라 구축	이산화탄소 포집 및 저장 기술개발 및 인프라 구축	• 저장소 지정 기준, 수용성 확보 방안, 항만 내 이산화탄소 저장시설 설치 기준 마련 등 이산화탄소 수송·저장을 위한 규정 마련

자료: 관계부처합동(2023), p. 54, p. 76, p. 86.

2) 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵

해양수산부는 2021년, 해운, 수산·어촌, 해양에너지, 블루카본, 항만의 5개 부문을 중심으로 하는 탄소중립 추진 정책 방향이 포함된 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 수립하였다. 동 로드맵에서는 2050년 해양수산분야 탄소배출량을 323.7만tCO₂eq 감축하겠다는 목표를 제시하고, 부

문별 감축 시나리오와 주요 활용 수단을 함께 제시하고 있다. 항만 부문은 ‘2050년 탄소배출 제로(0)’라는 목표가 설정되었으나, 이를 달성하기 위한 감축 목표치는 해양수산분야 총 감축 목표치인 323.7만tCO₂e_q에는 반영되지 않았다. 이는 현행 국가 온실가스 통계 체계상 항만 부문의 기준연도 배출량을 별도로 분류·산정할 수 없었기 때문이다. 그럼에도 불구하고 항만 부문의 2050년 목표가 ‘탄소배출 제로’로 설정된 것은 항만이 국가 감축전략 이행 차원에서 주요 관리대상임을 의미한다. 따라서 항만의 주요 배출원인 하역장비의 온실가스 감축 역시 중요한 정책과제라 할 수 있다.

한편, 항만 부문에서 제시된 주요 이행수단은 하역장비의 친환경 전환, 항만구역 내 태양광 발전시설 확대, LED 조명 교체, 항만 탄소저감 건설기술 마련 등을 통한 에너지 효율화, 수소항만 구축 등이다. 이 가운데 하역장비와 직접적으로 연관된 과제는 전기화·수소화 등 친환경 장비로의 전환이며, 무탄소 전원 확대는 운영 인프라 측면에서 간접적으로 연관된다. 즉, 하역장비 분야의 감축수단은 에너지 전환을 중심으로 구성되어 있다.

아울러 로드맵에서는 해양수산 전반의 탄소중립 추진에 있어 국제 기준에 부합하는 이행체계 구축을 위한 통계 기반 강화를 중점 과제로 포함하였다. 항만 부문은 현행 온실가스 통계 체계상 분류가 어려워 이행 실적 파악이 곤란함을 지적하고, 별도의 탄소배출 산정·관리 방안을 마련하고 모니터링을 수행하여 정량적 감축 이행 기반을 확보하겠다는 방침을 제시하였다. 이는 정부가 객관적 근거에 기반한 감축 이행체계의 필요성을 인식하고 있음을 보여주며, 하역장비를 포함한 항만 부문의 데이터 기반 마련이 시급한 과제임을 시사한다.

〈표 2-13〉 해양수산분야 2050 탄소중립 달성을 위한 추진목표

(단위: 만톤CO₂eq)

부문	'18년 배출량 (단위: 만t)	'50년 목표배출량	감축·흡수 수단
국내해운	101.9	30.7(△69.9%)	• 저탄소(LNG, 하이브리드, 혼합연료) 선박 • 무탄소(전기, 수소, 암모니아) 선박 • 에너지 효율기술 적용 및 운항효율 개선 • 저탄소·무탄소 관공선 보급
수산·어촌	304.2	11.5(△96.2%)	• 어선어업 효율화(어선 노후기관 교체, 대체건조, 감척 등) • 저탄소·무탄소(LNG, 전기, 하이브리드) 어선 • 양식장·수산물공공장 에너지절감 장비보급 • 양식장 친환경 에너지 생산 지원(태양광, 소수력 발전설비 등) • 국가어항 친환경 에너지 생산 지원(태양광, 파력 등)
해양에너지	-	-229.7(순감)	• 조력발전 보급 확대 • 조류·파력·복합발전 등 기술개발·상용화
블루카본	-	-136.2(순감)	• 연안습지 식생 복원 • 비식생습지 보호·복원 • 바다숲 조성 • 신규 블루카본 발굴(굴패각 재활용 등)
항만*	('19) 30	0	• 유류사용 장비 동력 전환(전기), 수소 하역장비 상용화 • 조명탑 등 항만 시설 에너지 사용 효율화 • 유휴공간 활용 친환경 에너지 생산시설 구축
합계	406.1	-323.7	

주: 항만 분야 배출량은 국가 온실가스 통계 체계상의 제약으로 항만 운영사를 대상으로 실시한 '19년 유류·전력사용량 조사를 기반으로 자체 추산하였으며, 그로 인해 전체 합계에서 제외되었음

자료: 해양수산부(2021), p. 14, p. 17 자료를 바탕으로 저자 정리

2. 하역장비 온실가스 감축 관련 법령

1) 탄소중립기본법

「탄소중립기본법」은 기후위기 대응과 탄소중립 사회로의 이행을 위한 국가 최상위 법률로서, 항만의 탈탄소화 정책 추진을 뒷받침하는 근거를 제공한다. 이 법에서는 국가, 공공기관, 사업자 등이 온실가스 배출을 줄이기 위한 노력할 것을 책무로 정하고 있으며(법 제4조, 제5조), 이는 다수 이해관계자가 공존하는 항만에서도 모든 주체(해양수산부, 항만공사, 항만사업자 등)가 온실가스 감축에 참여해야 하는 근거가 된다. 특히, 법 제44조에서는 정부가 항만의 친환경적 건설과 기존 시설의 친환경 전환을 위한 시책을 마련하도록 규정하고 있어 하역장비의 친환경 전환 추진의 근거가 된다.

〈표 2-14〉 탄소중립기본법 제44조(녹색국토의 관리)

분야	부문
제44조 (녹색국토의 관리)	① (생략)
	② 정부는 녹색국토를 조성하기 위하여 다음 각 호의 사항을 포함하는 시책을 마련하여야 한다.
	1-4. (생략)
	5. 도로·철도·공항·항만 등 인프라 시설의 친환경적 건설 및 기존 시설의 친환경적 전환
	6-7. (생략)
	③ (생략)

자료: 탄소중립기본법 제44조

2) 물류정책기본법

「물류정책기본법」은 국내외 물류정책·계획의 수립과 시행, 지원에 관한 기본법으로, 환경친화적 물류 촉진에 관한 규정이 마련되어 있다. 이 법 제46조에서는 해양수산부장관이 기존 물류시설·장비·운송수단을 환경친화

적인 것으로 전환하는 경우 행정적·재정적 지원을 할 수 있도록 규정하고 있다. 이때, 환경친화적 전환에는 온실가스 감축을 위한 하역장비의 전환도 포함될 수 있을 것으로 보인다.

〈표 2-15〉 물류정책기본법 제59조(환경친화적 물류의 촉진)

분야	부문
제59조 (환경친화적 물류의 촉진)	① 국토교통부장관·해양수산부장관 또는 시·도지사는 물류활동이 환경친화적으로 추진될 수 있도록 관련 시책을 마련하여야 한다. ② 국토교통부장관·해양수산부장관 또는 시·도지사는 물류기업, 화주기업 또는 「화물자동차 운수사업법」 제2조제11호가목에 따른 개인 운송사업자가 환경친화적 물류활동을 위하여 다음 각 호의 활동을 하는 경우에는 행정적·재정적 지원을 할 수 있다. 1. (생략) 2. 기존 물류시설·장비·운송수단을 환경친화적인 물류시설·장비·운송수단으로 변경 3. 그 밖에 대통령령으로 정하는 환경친화적 물류활동 ③ (생략)

자료: 물류정책기본법 제59조

3) 지속가능 교통물류 발전법(이하 지속가능교통법)

「지속가능교통법」은 지속가능한 교통물류정책 방향과 추진체계에 대한 사항을 규정하고 있다. 이 법에서는 교통·물류시설의 환경친화적 개발과 기술 지원 등을 규정하고 있으나, 이는 하역장비의 온실가스 배출 관리와

〈표 2-16〉 지속가능 교통물류 발전법 제26조(환경친화적 교통물류시설 개발)

분야	부문
제26조 (환경친화적 교통물류시설 개발)	①-② (생략) ③ 국토교통부장관·해양수산부장관은 환경친화적인 교통물류시설개발사업을 추진하기 위하여 대통령령으로 정하는 바에 따라 환경친화적 교통물류시설 개발 지침을 마련하여 고시하여야 한다. ④-⑤ (생략)

자료: 지속가능 교통물류 발전법 제26조

는 직접적인 관련성이 부족하다. 다만 향후 항만의 환경친화적 전환 정책(예: 친환경 터미널 개발, 친환경 장비 인프라 확충) 추진 시에는 간접적 연계가 가능할 것으로 보인다.

4) 항만법

「항만법」은 항만의 지정·개발·관리 및 사용을 규정하여 항만의 개발 촉진과 효율적 관리·운영을 도모하는 법률이다. 이 법은 전적으로 항만을 대상으로 하기 때문에 그 규정은 항만 및 하역장비의 탈탄소화와 직접적으로 연계된다. 법 제30조에서는 항만사업자가 저탄소 항만 구축을 위해 항만시설 이용시 온실가스 및 오염물질 배출 저감을 위해 노력할 것을 명시하고 있으며, 정부는 이를 위해 필요한 설비 설치를 권고할 수 있도록 규정하고 있다. 여기서 항만시설 이용에는 하역장비의 운영도 포함되므로 제30조는 하역장비의 탈탄소화 조치를 추진할 수 있는 직접적인 법적 근거로 해석될 수 있다.

〈표 2-17〉 항만법 제30조(온실가스 등 감축)

분야	부문
제30조 (온실가스 등 감축)	① 이 법, 「해운법」 및 「항만운송사업법」 등 관계 법령에 따른 면허·허가·등록 등을 받아 항만구역 안에서 사업을 영위하는 자(이하 "항만사업자"라 한다)는 저탄소 항만의 유지·관리를 위하여 항만시설 이용에 있어 온실가스와 오염물질 배출을 줄이도록 노력하여야 한다. ② 정부는 항만사업자에게 온실가스 등의 배출을 방지하거나 감축하기 위하여 필요한 설비의 설치 등을 권고할 수 있다.

자료: 항만법 제30조

3. 하역장비 온실가스 감축 이행 수단

1) 간접적 수단

(1) 온실가스 목표관리제

온실가스 목표관리제(이하 목표관리제)는 정부가 배출량이 일정 기준 이상인 업체에 대해 온실가스 감축목표를 부여하고 이행 여부를 관리하는 규제로, 2010년부터 시행되어 현재는 「탄소중립기본법」에 근거를 두고 있다. 하역장비는 목표관리제의 직접 규제 대상이 아니나, 터미널 운영사가 관리업체로 지정될 경우 운행사 배출량의 일부로서 간접적 관리 대상에 포함된다. 목표관리제는 최근 3년간 연평균 총배출량 5만 톤($tCO_2\text{-eq}$) 이상이거나, 최근 3년간 연평균 1만 5천 톤($tCO_2\text{eq}$) 이상을 배출한 사업장을 보유한 업체가 관리업체 지정 대상이며, 이 기준을 충족하지 않더라도 자발적 참여가 가능하다. 관리업체의 지정, 감축목표 설정, 배출량 산정 및 보고, 검증 등 구체적인 운영은 「온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」³³⁾에 따른다.

목표관리제 총괄기관은 기후에너지환경부이며, 항만 부문의 관장기관은 해양수산부, 실무대행은 해양환경공단이다. 항만 부문의 경우 2023년, 부산항 6개 컨테이너 터미널 운영사가 처음 관리업체로 지정되었으며, 2024년 한국허치슨터미널(주)이 추가로 지정되었다. 그러나 이 중 5개 업체는 이후 온실가스 배출권 거래제 할당대상업체로 전환되면서 2025년 현재 목표관리제 관리업체로 남아 있는 터미널 운영사는 2개이다. 한편, 항만 부문이 다소 최근 지정되기 시작한 것은 2022년 감사원 감사에서 다수의 터미널 운영사들이 관리업체 지정 기준을 충족했음에도 지정되지 않았음이 지

33) 환경부고시 제2025-165호

적되었기 때문이며, 이 계기를 통해 2023년부터 본격적으로 참여하게 되었다.³⁴⁾

〈그림 2-10〉 목표관리제 운영체계



자료: 해양환경공단, p. 8.

〈표 2-18〉 항만 부문 목표관리제 지정업체 현황(2025년 기준)

단위: tCO₂-eq, TJ

업체명	지정구분	2023년 온실가스 배출량	2023년 에너지 사용량
부산항터미널주식회사	사업장	47,455	887
한국하치슨터미널(주)	사업장	19,177	342

자료: 해양수산부 고시 제2025-109호, 국가온실가스종합관리시스템, 목표관리대상업체(검색일: 2025.9.3.), 국가온실가스 종합관리시스템, 명세서배출량통계-2023년도 명세서 주요정보(업체배출량)(검색일: 2025.9.3.)

앞서 살펴본 바와 같이 목표관리제는 기업 단위로 관리업체를 지정하여 온실가스 감축을 유도하기 위한 수단이다. 이 체계에서 하역장비는 독립적 규제대상은 아니지만, 터미널 운영사가 소유·운영하는 주요 배출원으로서

34) 감사원(2023), pp. 103-119.

배출량 보고 대상이자 감축 이행의 핵심 요소가 된다. 관리업체로 지정된 터미널 운영사는 하역장비의 활동자료와 배출량이 포함된 명세서를 제출하며, 해양수산부와 협의를 통해 감축목표³⁵⁾를 설정하고 그로부터 2년 후부터 이행실적 평가를 통해 감축 이행을 평가받는다. 이때 이행목표를 달성하지 못하면 개선명령 및 과태료 부과 등 행정조치가 이루어진다. 그러나 현 제도는 기업 단위 관리가 수행됨에 따라 명세서상 하역장비 단위 데이터가 포함됨에도 불구하고 정책적 관리나 통계 활용은 총량 수준에서만 이루어진다. 이로 인해 장비별 감축성과 추정이나 장비교체 등에 따른 개선 효과 분석 등 세부 이행관리로의 확장은 제한된다.

〈그림 2-11〉 목표관리제 추진 절차



자료: 해양환경공단, p. 9.

35) 관리업체로 지정된 연도의 직전 3개년 평균 배출량을 기준연도 배출량으로 하여 설정

한편, 명세서 작성시 하역장비 온실가스 배출량은 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 [별표 6]에 따라 ‘이동연소(도로 부문)’ 배출량 세부산정방법 및 기준에 따라 산정해야 한다.³⁶⁾ 지침에서는 Tier 1-3³⁷⁾의 세 가지 산정 방법론을 제시하고 있으며, 동 지침 [별표 5]에 의거하여 시설규모에 따라 Tier 1 또는 Tier 2 방법론을 적용하면 된다.³⁸⁾ 하역장비는 터미널 운영 데이터를 기반으로 Tier 3 수준의 정밀 산정이 가능하나, 제도상 Tier 1 또는 Tier 2 수준만 충족하면 되며, Tier 수준이 높아질수록 활동자료 수집이 번거롭고 산정이 복잡해지기 때문에 최소 적용 기준으로 산정하는 경우가 일반적일 것으로 보인다. 또한 현행 지침은 도로 차량 중심으로 구성되어 있어 비도로 장비인 하역장비의 특성이 반영되지 못할 뿐 아니라 운영사들이 실무적으로 활용하기에는 해석의 어려움이 있을 수 있다.

(2) 온실가스 배출권거래제

온실가스 배출권거래제는 정부가 온실가스를 배출하는 사업장을 대상으로 연간 단위 배출권을 할당하고, 할당 범위 내에서 배출을 허용하며, 여분 또는 부족분의 배출권은 업체 간 거래를 허용하는 시장기반 제도이다. 2015년부터 「저탄소 녹색성장기본법」 제46조(현 「탄소중립기본법」 제25조)에 의거하여 제정된 「온실가스 배출권 할당 및 거래에 관한 법률」에 따라 운영되고 있다. 배출권거래제의 할당 대상업체는 온실가스 다(多)배출기업을 중심으로 지정되며, 구체적인 기준은 최근 3년간 연평균 온실가스 배출량이 125,000톤(tCO₂-eq) 이상이거나 단일사업장의 배출량이 25,000

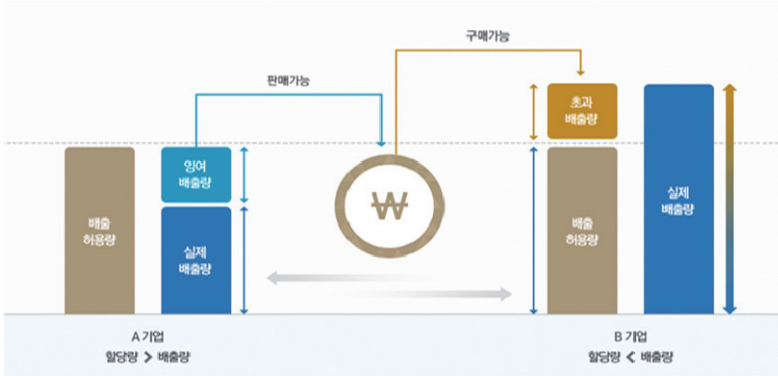
36) 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」 [별표 6]에서는 비도로 및 기타 자동차를 ‘건설기계, 농기계 등 비도로 차량 및 위에서 규정하지 않은 기타 차량’으로 정의하고 비도로 차량에 의한 온실가스 배출은 별도 구분 없이 이동연소-도로 부문의 방법을 적용하도록 함

37) 온실가스 배출량 산정등급으로 Tier가 높을수록 결과의 신뢰도와 정확도가 높아짐

38) 단, 이는 최소 적용 기준으로 정확도가 높은 자료를 활용할 수 있을 경우 Tier 3 사용이 권고됨

톤(tCO₂-eq) 이상인 업체이다.³⁹⁾ 이는 목표관리제보다 훨씬 강화된 기준으로 볼 수 있다.

〈그림 2-12〉 배출권 거래제의 개념



자료: 배출권시장 정보플랫폼(검색일: 2025.4.18.)

배출권거래제의 주무 부처는 기후에너지환경부이며, 2025년 9월 기준, 제4차 계획기간(2026~2030년)의 할당 대상업체는 총 774개가 지정되어 있으며⁴⁰⁾, 현재 할당 대상업체에 지정된 터미널 운영사들은 건물 부문⁴¹⁾으로 분류되어 관리되고 있다. 주목할 만한 점은 2023년, 6개 터미널 운영사가 목표관리제 관리업체로 최초 지정된 후, 그 중 5개 업체가 2025년부터 온실가스 배출권 할당 대상업체로 편입되었다는 점이다. 이는 터미널 운영업이 배출집약도가 높은 온실가스 다배출 산업임을 보여준다. 더구나 충분한 준비기간 없이 목표관리제에서 더욱 엄격한 배출권거래제로 전환됨에 따라 기업의 제도 대응 부담이 가중되면서 일부 터미널 운영사들은 배출권 거래제 대응을 위한 자발적 협의체를 구성하여 정기적으로 논의를 진

39) 최근 3년간 연평균 온실가스 배출량이 3,000톤(tCO₂-eq) 이상인 업체 중 자발적으로 참여를 신청한 업체도 참여 가능함

40) 국가온실가스종합관리시스템, 할당 대상업체 현황(검색일: 2025.9.3.)

41) 전환(발전), 산업, 수송, 건물, 폐기물, 공공·기타의 6개 부문으로 분류됨

행하고 있다. 이러한 민간의 노력을 뒷받침하기 위해 정부나 관련 공공기관 차원에서 항만 부문의 감축 이행과 운영사 역량 강화를 위한 정책 기반을 마련할 필요가 있다. 이러한 필요성을 인식하여 부산항만공사는 2024년, ‘온실가스 배출권거래제 설명회’를 개최하는 등 대상 기업들의 이해도를 제고하였다.⁴²⁾

〈표 2-19〉 항만 부문 배출권거래제 할당대상업체 현황(2025년 기준)

단위: tCO₂-eq, TJ

업체명	할당부문	2023년 온실가스 배출량	2023년 에너지 사용량
주식회사비엔씨티	건물	29,818	450
한진부산컨테이너터미널	건물	49,973	988
부산신항국제터미널(주)	건물	43,306	801
에이치엠엠피에스에이신항만(주)	건물	28,561	572
부산신항만주식회사	건물	35,541	658

자료: 국가온실가스종합관리시스템, 할당대상업체(검색일: 2025.9.3.), 국가온실가스 종합관리시스템, 명세서배출량통계-2023년도 명세서 주요정보(업체배출량)(검색일: 2025.9.3.)

배출권거래제 역시 기업 단위 규제수단으로서 목표관리제와 같이 간접적으로 하역장비의 데이터를 수집하며, 하역장비 탈탄소화를 유도하는 수단으로 작용한다. 온실가스 배출권거래제에서도 목표관리제와 마찬가지로, 할당 대상으로 지정된 터미널 운영사는 하역장비가 포함된 온실가스 배출량 명세서를 작성⁴³⁾하여 제출하며, 그를 바탕으로 매년 할당량을 기업계정으로 부여받는다. 그리고 기후에너지환경부는 등록부 자료를 바탕으로 각 기업의 할당량 준수 여부를 모니터링하고, 매 이행연도 종료 후 제출 의무를 점검하여 미이행 시 부족분의 최대 3배에 해당하는 과징금을 부과하게 된다.

42) 부산항만공사 보도자료(2024.8.28.)(검색일: 2025.5.1.)

43) 배출권거래제와 목표관리제의 명세서는 국가온실가스종합관리시스템을 통해 공통 양식을 사용하고 있어 작성항목은 사실상 동일하며, 법령에서도 두 제도의 명세서를 동일시하고 있음(자료: 「온실가스 배출권의 할당 및 취소에 관한 지침」 제2조제8호)

2) 직접적 수단

(1) 항만 무탄소화 전환 지원 사업

해양수산부는 2025년부터 항만 부문의 온실가스 감축활동 촉진을 위해 경유·LNG 야드 트랙터를 국산 전기 야드 트랙터⁴⁴⁾로 전환하는 경우 비용을 보조해주는 사업을 시행하고 있다. 하역장비 전기화 촉진을 목적으로 추진되는 지원사업이며, 근거법령은 「항만대기질법」 제15조, 제17조, 「물류정책기본법」 제59조, 제60조이다. 국가 25%, 항만공사 25%, 민간 50% 매칭을 통해 보조가 이루어지며 2025년 7월부터 부산항 신항에서 기술 신뢰성 확보를 위한 실증을 추진하고 있다. 100여대 전환도입을 지원할 예정이며, 2025년의 목표 전환 대수는 25대이며 전기 충전설비 설치비용 등은 민간사업자가 자부담하여야 한다.

이 사업의 성과는 전기 야드 트랙터 전환 대수를 기준으로 측정하며, 실제 장비 전환에 따른 온실가스 배출 저감 효과 등 구체적인 이행성과는 측정되고 있지 않다. 이는 정책 이행을 평가할 수 있는 기반이 마련되지 않았기 때문으로, 결과적으로 사업의 실질적인 감축 성과를 객관적으로 확인하기 어려운, 형식적인 관리 수준에 머무르고 있는 실정이다. 따라서 하역장비의 체계적인 배출관리를 위한 정밀한 이행관리체계 구축이 요구된다.

〈표 2-20〉 항만 무탄소화 전환 지원 사업 성과목표 및 지표

성과지표	2025년 목표치	최근 4개년 실적				지표산출 시기	측정방식
		21년	22년	23년	24년		
야드 트랙터 무탄소 전환대수(대)	25	-	-	-	-	매년 말	항만 야드 트랙터 무탄소 전환 실적

자료: 해양수산부(2025), p. 604.

44) 국내에 법인을 두고, 국내에 생산설비를 갖추어 제작된 야드 트랙터에 한함

(2) 하역장비 전환 관련 외부사업

온실가스 배출권거래제의 상쇄제도에 근간을 둔 외부사업은 할당대상업체의 조직 경계 외부에서 자발적으로 온실가스를 감축, 흡수 또는 제거하는 활동을 인증하여 그 실적을 배출권으로 활용할 수 있도록 하는 제도이다.⁴⁵⁾ 이는 배출권거래제나 목표관리제의 규제 대상이 아닌 터미널 운영사가 하역장비의 친환경 전환과 같은 자발적 감축 노력을 통해 경제적 인센티브를 얻을 수 있는 시장 기반의 감축 이행 촉진 수단으로 기능한다.

외부사업에 참여하기 위해서는 사전에 승인된 특정 방법론을 따라야만 감축 실적의 신뢰성을 인정받을 수 있다. 현재 하역장비 분야에는 해양수산부 직권으로 등록된 두 가지 방법론이 마련되어 있다. 첫 번째는 기존 화석연료를 사용하던 장비를 상대적으로 온실가스 배출이 적은 LNG 등 다른 화석연료로 전환하는 ‘항만 화물 운송장비 연료 전환 사업의 방법론’이며, 두 번째는 화석연료 장비를 전기로 교체하는 ‘화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감사업의 방법론’이다.⁴⁶⁾ 2025년 7월 기준, ‘화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감사업의 방법론’에 대하여 3개의 외부사업이 추진되었다.

〈표 2-21〉 하역장비 관련 외부사업 현황

구분	감축 기술	참여 사례
항만 화물 운송장비 연료 전환 사업의 방법론 (2020.10. 직권 등록)	탄소함량이 높은 화석연료를 사용하던 항만시설장비가 탄소함량이 낮은 연료로 전환하여 온실가스 배출이 감축되는 사업에 적용 (신규 장비 적용 불가)	-

45) 이경호(2025.7.1.), p. 5.

구분	감축 기술	참여 사례
화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감사업의 방법론 (2020.10. 직권 등록)	화석연료를 사용하던 항만시설장비가 동력을 전기로 전환함에 따라 온실가스 배출이 감축되는 사업에 적용 (신규 장비 적용 불가)	• 동원부산컨테이너터미널(주)의 트랜스퍼 크레인 동력을 전기로 교체함에 따른 온실가스 배출 감축 사업 - 외부사업 사업자: 동원부산컨테이너터미널(주), 부산항만공사 - 연평균 배출 감축량: 586tCO₂-eq(3대) - 인증 유효기간: 2022.6.30.-2032.5.31. • 한국국제터미널주식회사의 항만시설장비를 전기로 교체함에 따른 온실가스 배출 감축사업 - 외부사업 사업자: 한국국제터미널주식회사, 여수 광양항만공사 - 연평균 배출 감축량: 432tCO₂-eq(5대) - 인증 유효기간: 2023.3.9.-2033.3.8. • 광양항서부컨테이너터미널(주)의 항만시설장비를 전기로 교체함에 따른 온실가스 배출 감축사업 - 외부사업 사업자: 광양항서부컨테이너터미널(주), 여수광양항만공사 - 연평균 배출 감축량: 2,050tCO₂-eq(17대) - 인증 유효기간: 2025.6.9.-2035.6.8.

자료: (주)로엔컨설팅(2025.7.1.), pp. 3-8. 자료를 바탕으로 저자 정리

사업 시행 여부에 따른 감축량은 ‘베이스라인 배출량⁴⁷⁾-사업배출량-누출량’을 기준으로 산정한다. 구체적으로, 사업 전 단일 장비의 연간 가동시간, (hours/년), 단일 장비가 운송한 연간 총 물동량(TEU), 장비별 연료사용량 등 활동자료를 활용하여 베이스라인 배출계수(tCO₂/TEU·hours)를 도출하고, 이를 바탕으로 베이스라인 배출량과 예상 감축량을 계산한다. 특히, 사업 후 물동량이나 가동시간이 사업 전보다 증가하더라도 감축량이 과대 산정되지 않도록 조정계수를 적용하는 등, 단순 연료 전환뿐만 아니라 운영 효율성까지 고려하는 정교한 산정 체계를 갖추고 있다. 두 가지 외부사업 수행시, (주)로엔컨설팅(2025)에서 추정된 부산항의 부두별 예상 감축량은 아래와 같다.

46) 환경부(2020a), 환경부(2020b)

47) 사업 미시행시 배출량

〈표 2-22〉 외부사업 시행시 부산항 부두별 예상 감축량

단위: tCO₂-eq

항목	자세대	신선대	감만	신감만	신항1부두
YT(대) ¹⁾	90	104	54	45	82
연간감축량	3,118	3,603	1,871	1,559	2,841
TC(대) ²⁾	16	19	23	9	-
연간감축량	1,824	2,166	2,622	1,026	-
항목	신항2부두	신항3부두	신항4부두	신항5부두	신항6부두
YT(대)	154	106	85	10	10
연간감축량	5,336	3,326	2,945	346	346
TC(대)	-	-	-	-	-
연간감축량	-	-	-	-	-

주 1) '항만 화물 운송장비 연료 전환 사업의 방법론' 적용 가정

2) '화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감 사업의 방법론' 적용 가정

3) 예상감축량은 실제와 상이할 수 있음

자료: ㈜로엔컨설팅(2025.7.1.), p. 9. 자료를 바탕으로 저자 정리

한편, 이러한 감축 참여 유인 수단이 마련되어 있음에도 불구하고 현재 항만 부문의 외부사업 참여는 제한적인 수준에 머물러 있다. 그 중 가장 큰 장애물은 경제성 부족이다. 외부사업을 추진하기 위해서는 사업계획서 작성, 타당성 평가, 검증 등 복잡한 절차 이행을 위해 외부 전문기관의 컨설팅이 필요한데, 이에 소요되는 비용 부담이 크다. 반면, 현재 배출권 가격은 낮게 형성되어 있어 감축 실적 판매를 통한 기대수익이 투자비와 행정비용을 상쇄하기 어려운 실정이다⁴⁸⁾. 결국 외부사업이 하역장비 감축을 유도하는 실효성 있는 정책 수단으로 자리 잡기 위해서는 배출권 시장 안정화를 통한 경제적 유인 확보 노력이 병행될 필요가 있다.

48) 해양환경공단 자문의견(2025.8.14.)

3) 시사점

현재 하역장비는 목표관리제, 배출권거래제, 전기 야드 트랙터 지원사업, 외부사업 방법론 등을 통해 직간접적으로 배출 감축을 유도받고 있다. 그러나 이러한 규제 및 사업들은 다음과 같은 한계를 지니고 있다. 첫째, 하역장비 단위의 데이터 수집·산정 기반이 미흡하다. 목표관리제와 배출권거래제는 사업장 단위 총량 관리를 기준으로 운영됨에 따라 장비별 활동자료, 연료사용량 등 세부 데이터가 활용되기 어려운 구조이며 명세서 작성시 참고가 되는 지침 역시 하역장비 특성을 충분히 고려하지 못하고 있다. 또한 전기 야드 트랙터 지원사업의 경우 전환 대수를 성과 지표로 삼기 때문에 전환이 실제 어느정도 감축으로 이어졌는지를 확인할 수 있는 정량적 근거 확보에 한계가 있다.

둘째, 인센티브의 실효성이 낮고 감축 수단이 다양하지 않다. 전환지원 사업은 지원 대상이 상대적으로 고가인 국산 장비로 한정되어 있어 운영사업장에서 큰 유인 요인으로 다가오기 어렵다. 외부사업은 경제성이 충분히 확보되지 않아 실제 참여를 유인하는 것이 쉽지 않다. 게다가 두 사업 모두 연료 전환이 초점으로, 운영 최적화, 관리 고도화 등과 같은 다양한 감축수단을 고려하지 않고 있다.

이처럼 현행 규제와 사업들은 하역장비의 실질적 감축 이행을 뒷받침하기에는 한계가 뚜렷하다. 따라서 장비 단위 데이터 기반을 강화하고, 감축 성과를 명확히 측정, 보상할 수 있는 다각적이고 실효성있는 관리체계로의 전환이 요구된다.

4. 하역장비 온실가스 배출 관련 데이터 현황

1) 국가 온실가스 인벤토리

국가 온실가스 인벤토리는 온실가스 배출원을 부문별로 체계적으로 산정한 목록으로 국가 차원의 공식적인 온실가스 배출 통계를 뜻한다. 우리나라는 UN 기후변화협약(UNFCCC)에 따라, 매년 국가 인벤토리를 작성하여 UNFCCC에 제출하고 있다.

해양수산부는 「탄소중립기본법 시행령」에 따라 해양·수산·해운·항만·연안습지 분야 관장기관으로 항만 인벤토리를 구축해야 하며, 이를 위한 자료의 검토, 확인 및 기초자료 작성 업무는 해양환경공단에 위탁되어 있다. 다만, 현재 해양환경공단에서 산정하는 국가 온실가스 통계 산정 분야는 해운, 어업, 국제해운, 습지-연안습지 분야로 분류되어 있으며⁴⁹⁾, 항만 분

〈표 2-23〉 탄소중립기본법 시행령 제39조 및 제74조

분야	부문
시행령 제39조 (온실가스종합 정보관리체계의 구축 및 관리 등)	①-⑦ (생략) ⑧ 다음 각 호의 구분에 따른 중앙행정기관의 장은 법 제36조제2항에 따라 해당 호에서 정하는 분야별로 온실가스 정보 및 통계를 매년 3월 31일까지 온실가스 종합정보센터에 제출해야 한다. 1-4. (생략) 5. 해양수산부장관: 해양·수산·해운·항만·연안습지 분야 ⑨-⑬ (생략)
시행령 제74조 (업무의 위탁)	①-⑰ (생략) ⑱ 해양수산부장관은 법 제81조제2항에 따라 다음 각 호의 업무를 「해양환경 관리법」 제96조제1항에 따른 해양환경공단에 위탁한다. 1-5. (생략) 6. 제39조제8항제5호에 따른 해양·수산·해운·항만·연안습지 분야의 온실가스 정보 및 통계의 제출을 위한 자료의 검토·확인 및 기초자료의 작성 ⑲ (생략)

자료: 탄소중립기본법 시행령 제39조, 제74조

49) 해양환경공단, 해양기후변화대응(검색일: 2025.9.3.)

야는 별도 분리 산정되지 않고 다른 부문에 포함된 것으로 파악된다.

한편, 국가 인벤토리 보고서상에서 하역장비는 에너지 부문에 속하는 것으로 추정되나, 구체적인 세부 카테고리는 언급되지 않고 있다.⁵⁰⁾ 다만, 「제2차 국가 온실가스 통계 총괄관리 계획(2020~2024)」에서는 에너지 부분의 개선 과제로서 인벤토리 정확성 개선을 위해 항만 내 지상수송 배출량을 해운(1A3d) 항목에서 기타수송(1A3e)로 분류하여 보고가 필요하다고 제시한바, 해운 부문에 포함되어 보고되는 것으로 추정된다.⁵¹⁾ 그러나, 동 개선 과제는 최근 발표된 「제3차 국가 온실가스 통계 총괄관리 계획(안)」에서는 단기 추진이 곤란한 것으로 판단되어 과제에서 제외되었다.⁵²⁾

한편, IPCC 가이드라인(2006)에서도 항만에서의 지상활동(ground activities in harbours)은 ‘에너지(1)-연료연소 활동(1A)-수송(1A3)-기타수송(1A3e)-비도로(1A3e ii)’ 부문에 포함하도록 하고 있다. 따라서 하역장비는 비도로 이동원으로서 분리 집계が必要하며, IPCC 가이드라인의 권고와 같이 가능한 세분화된 활동도 자료를 기반으로 배출량을 산정할 필요가 있다.

〈표 2-24〉 IPCC 가이드라인의 수송부문 상세 분류

코드 및 이름		설명
1A3	수송(Transport)	• 부문(sector)에 관계없이, 아래의 하위 카테고리에 명시되어 있는 모든 수송활동(군사적 수송 제외)에 대한 연료의 연소와 증발에 의한 배출을 말함 • 국제수송(1A3a i 와 1A3d i)을 담당하는 항공이나 수상운수에서 소비된 연료로부터의 배출은 이 카테고리의 총계 및 소계로부터 가능한 제외시켜 따로 분리하여 보고해야 됨

50) 환경부 온실가스종합정보센터(2023), pp. 1-9.의 자료를 바탕으로 저자 정리

51) 관계기관합동(2020.2), 제2차 국가 온실가스 통계 총괄관리 계획(2020~2024), p. 30.

52) 관계기관합동(2025), p. 12.

코드 및 이름				설명
1A3	e	기타수송 (Other Transportation)		1A4c 농업 혹은 1A2 제조업 및 건설 부분에서 보고되지 않은 파이프라인 수송, 공항과 항만에서의 지상활동(ground activities in airports and harbours), 비도로 활동을 포함하는 모든 잔여 수송활동으로 부터의 배출 - 군사용 수송은 1A5(비특정부:Non-specified)에 보고되어야 함
1A3	e	i	파이프라인 수송 (Pipeline Transport)	- 펌프 동력실의 운영과 파이프라인의 보수로부터 연소배출 - 파이프라인을 통한 수송은 기체, 액체, 슬러리(혼합물) 그리고 기타 상품의 수송을 포함함 - 공급자로부터 최종 소비자까지의 천연가스 또는 제조가스, 물 또는 스팀의 수송은 제외시켜 1A1c ii 또는 1A4a에 보고해야 함
1A3	e	ii	비도로 (Off-road)	파이프라인 수송을 제외한 기타 수송으로부터의 연소 배출

자료: IPCC(2006a), 환경부·환경관리공단 역(2008), pp. 3.8-3.10, IPCC(2006b), pp. 3.8-3.10.

종합하면, 현재 국가 온실가스 인벤토리상 하역장비는 어떤 상세 분류에 해당하는지는 명확히 파악하기 어려운 실정이다. 이는 곧 하역장비 배출량 데이터가 국가 통계 차원에서 독립적으로 관리되거나 활용되고 있지 않음을 의미한다. 또한 「탄소중립기본법」에 따라 해양수산부는 매년 항만부문 온실가스 통계를 작성하여 온실가스 종합정보센터에 제출하여야 하나, 산정기관 지정, 활동자료 수집 근거 등은 마련되지 않은 상태이다. 즉, 법령상 보고 체계는 존재하나 하역장비를 별도 배출원으로 체계적으로 관리하고 통계화할 수 있는 기반은 부재하다.

2) 에너지 총조사⁵³⁾

에너지 총조사는 우리나라 전 수요부문에 대한 최종에너지 소비실태를 파악하여 국가 에너지정책 수립에 활용하기 위해 산업통상자원부 주관으로 시행되는 국가승인 통계조사이다. 법적 근거는 「에너지법」 제19조이며,

53) 에너지경제연구원(2023.7.19.)(검색일: 2025.4.18.)

1981년 처음 실시된 이후 3년마다 전국단위로 정기적으로 시행되고 있다. 전수조사가 현실적으로 어려운 관계로 통계적 표본추출 방법을 활용하며, 조사단위는 에너지 소비주체(예: 사업장, 가정 등)로 표본으로 선정된 대상은 자체 에너지사용 실적을 보고한다. 다만, 에너지 총조사에서 개별 응답자 단위 정보는 통계작성 용도로만 활용되고, 대외적으로 공개되지는 않는다.

2023년 에너지 총조사 기준, 항만 터미널은 운수업의 일부로 조사 대상에 포함된 것으로 추정된다.⁵⁴⁾ 컨테이너 터미널이 조사 표본으로 선정되는 경우, 운영사는 에너지사용 실태 조사표(설문지)를 작성하여 제출하게 된다. 조사표에는 사업장에서 사용하고 있는 사무실, 이동설비, 창고, 주차시설(하역시설 포함) 등의 연간 에너지 사용량을 에너지원별로 기재해야하며, 이 과정에서 하역장비의 에너지 사용 정보가 포함된다. 다만, 에너지 총조

〈그림 2-13〉 2019년 기준 에너지총조사 중 창고 및 운송관련 서비스업 조사표 양식

II. 2019년 사무실/부대건물/시설물, 주차시설(하역), 창고, 이동설비 현황

※ 창고/차량설비포함, 주차장(하역장포함), 보유 장비 등은 각 업체별로 해당되는 항목 전체 기입
※ 관리주의 원칙에 따라 타인소유와 입자 공유의 경우는 포함

가. 사무실, 부대건물 및 시설물 현황										㎡
나. 주차장, 하역장 현황										㎡
다. 창고 보유현황		별동·상당·지문창고								㎡
일반창고										㎡

※ 창고/차량설비포함, 주차장(하역장포함), 보유 장비 등은 각 업체별로 해당되는 항목 전체 기입
※ 관리주의 원칙에 따라 타인소유와 입자 공유의 경우는 포함

제. 이동설비 보유현황									
Code1. 에너지원									
① 경유 ② LPG ③ 천연가스(LNG, LNG) ④ 휘발유 ⑤ 전기 ⑥ 기타()									
Code2. 단위									
① ton ② 배 ③ m ³ ④ MWh ⑤ CO2배기량 ⑥ 대 ⑦ 기종()									
순번	설비명	용량	용량단위 (Code 2)	대수	에너지원 (Code 1)	단위 (Code 2)	구입년		
1									
2									
3									
4									
5									

에너지원	단위	사무실 (사무실/사무물 포함)										창고	운송관련 (에너지원 포함)										기타	합계					
		단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³		MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대			기종()				
전력	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
가스	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
LPG(프로판)	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
기타	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
지하열수	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()
	강																												
	공제	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()	단위	배	m ³	MWh	CO2배기량	대	기종()

자료: 에너지경제연구원·한국에너지공단(2022), [부록] 2019년 기준 에너지총조사 -창고 및 운송관련 서비스업 조사표-

54) 운수업에는 한국표준산업분류 상 "기타 운송관련 서비스업(529)"가 포함되며, 컨테이너 터미널은 항구 및 기타 해상 터미널 운영업(52921), 수상 화물 취급업 (52942) 등으로서 운수업 표본에 포함됨

사 목적상 하역장비만을 구분하여 별도로 데이터를 수집하거나 그 결과를 공개하지는 않으며, 하역장비 온실가스 배출량 파악이나 감축 이행에 활용하기 위한 수준에는 미치지 못한다.

3) 에너지사용량 신고제도

에너지사용량 신고제는 연간 총에너지 사용량이 2,000toe 이상인 에너지다소비사업장의 에너지 사용현황을 매년 정부에 신고하도록 하는 제도이다. 「에너지이용 합리화법」에 근거가 마련되어 있으며, 산업통상자원부가 주무부처로 한국에너지공단의 온라인 시스템을 통해 신고가 이루어지며, 신고된 데이터는 에너지공단이 구축한 국가 에너지이용실태 데이터베이스에서 통합 관리되어 산업통상자원부의 에너지 수요관리 정책 수립과 에너지진단 사업 등에 활용된다.⁵⁵⁾

신고 대상은 제조업 공장을 비롯해 건물, 시설 등 모든 분야를 포괄하므로 컨테이너 터미널 역시 대상에 포함된다. 실제 2023년, 감사원이 목표관리제 관리업체 지정 누락 의심업체들을 조사할 때, 항만 터미널의 경우 에너지사용량 신고자료를 활용하였다는 점을 고려하면, 항만 터미널 역시 에너지사용량 신고제도의 대상 업체임을 알 수 있다.⁵⁶⁾ 컨테이너 터미널이 에너지다소비사업자인 경우 운영사는 매년 전년도 에너지 사용 실적과 당해연도 에너지 사용계획을 신고하여야 하며, 하역장비도 주요 에너지 소비원이므로 신고 목록에 포함된다. 이 때 에너지사용량은 전기, 연료 등 사용한 에너지원별 양을 원단위로 환산하여 분기별로 작성하며, 대량 소비시설일수록 보다 정확한 계측 자료에 근거해 신고하도록 요구된다.

55) EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼, 에너지사용량 신고제도(검색일: 2025.5.1.), 한국에너지공단(검색일: 2025.5.1.)

56) 감사원(2023), 별표 7 목표관리제 관리업체 지정 누락의심업체, p.127.

다만, 에너지 사용량 실적 및 계획 작성시 고정시설, 이동시설, 원료로 구분하여 기재하도록 하고 있어 하역장비만의 사용량을 구분하여 입력하거나 통계로 활용할 수 있는 구조는 마련되어 있지 않다. 또한 제출된 데이터는 대외 공개되지 않기 때문에 에너지사용량 신고제도 또한 하역장비의 에너지 사용 실태를 면밀히 파악하거나 온실가스 배출량 산정을 위한 기초자료로 활용하기에는 구조적 한계가 존재한다. 한편, 신고 항목에는 제품 생산량도 포함되어 있는데, 이는 생산 대비 에너지 투입 효율(에너지원단위)을 파악하기 위함이다.⁵⁷⁾

〈그림 2-14〉 에너지사용 실적 및 계획 신고 양식

구분	에너지원	단위	(2024)년도 사용량 실적										(2025)년도 사용량 계획									
			고유단위 ^{주1}					toe ^{주2}					고유단위					toe				
			1분기	2분기	3분기	4분기	계	1분기	2분기	3분기	4분기	계	1분기	2분기	3분기	4분기	계	1분기	2분기	3분기	4분기	계
① 고정 시설	도시가스 (LNG)	천Nm ³																				
	전력	천kWh																				
	유연탄	ton																				
	소계	toe																				
② 이동 시설	휘발유	천ℓ																				
	경유	천ℓ																				
	계 (①+②)	toe																				
③ 원료	원료용 무연탄	ton																				
	나프타	L																				
	소계	toe																				

주1) 선택한 에너지원에서 사용되는 단위(예: 휘발유는 ℓ, 천연가스는 ton, 전력은 MWh 등)

주2) toe(tonnage of oil equivalent)란 「에너지법 시행령」 제15조제1항에 따라 석유를 중심으로 환산한 단위

※ 위 신고서는 오프라인 신고서 양식으로 분기별 집계가 필요하나, 온라인 신고시 편의성을 고려하여 월별 집계만 필요

자료: 한국에너지공단(2024), p. 27.

57) 한국에너지공단, 에너지사용량 신고제도(검색일: 2025.5.1.)

4) 시사점

온실가스 인벤토리, 에너지 총조사, 에너지사용량 신고 등은 하역장비 온실가스 배출과 관련된 주요 데이터 수집·관리체계에 해당한다. 이들 조사의 목적은 각각 다르지만 그 내역을 살펴보면 에너지 사용량, 설비 현황 등 유사한 자료가 반복적으로 요구되고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 자료는 대부분 사업장 단위로 데이터가 수집·제출되기 때문에 개별 하역장비 수준의 배출 특성 파악용으로 활용하기 어렵다. 또한 각 제도에서 수집된 데이터는 통계 목적으로만 활용되기 때문에 하역장비 감축정책 수립을 위한 기초자료로 활용되는 데에는 한계가 있다. 결과적으로 하역장비를 대상으로 하는 별도의 데이터 수집·관리체계는 부재하며, 이는 데이터에 근거한 감축정책 수립이나 이행 성과 평가를 어렵게 하는 요인이 된다.

제4절 하역장비 배출관리 한계점

1. 하역장비 배출관리 한계점 분석 개요

본 절에서는 현재 하역장비 온실가스 배출관리의 제약사항이 무엇인지 검토하고, 이를 토대로 관리체계 개선이 필요한 영역이 무엇인지 파악하고자 한다. 이를 위해 먼저 앞서 하역장비 현황, 관련 정책, 제도 현황 등을 검토한 결과를 바탕으로 주요 한계점을 정리하였다. 이어서 2025년 4월부터 9월까지 해양수산부⁵⁸⁾, 항만공사⁵⁹⁾, 터미널 운영사 등 관계기관 실무자와 항만 온실가스 배출량 산정기관 업무 관계자 등을 대상으로 인터뷰, 자

58) 해양수산부 항만기술안전과, 항만물류기획과, 항만정책과

59) 부산항만공사, 인천항만공사

문, 공청회 등의 의견을 수렴하였다. 이를 통해 현장에서 제기되는 제도적·행정적·기술적·운영적 애로사항을 파악하였다. 그리고 문헌·현황 기반 분석과 현장 의견을 종합하여 하역장비 배출관리의 한계점을 도출하고, 관리체계 관점에서 우선적으로 개선을 검토해야 할 핵심 요소들을 살펴본다.

〈표 2-25〉 하역장비 배출관리 한계점 파악을 위한 이해관계자 자문 내역

구분	부문
2025.4.30	부산항만공사
2025.7.1	에코시안
2025.7.8	인천항만공사
2025.7.9	항만협회
2025.8.14	해양환경공단
2025.9.1	부산항 컨테이너 터미널
2025.8-2025.9	해양수산부

자료: 저자 작성

2. 하역장비 배출관리의 주요 한계

1) 문헌·현황분석 결과

앞서 하역장비 현황, 관련 제도 및 정책, 데이터 수집 체계 등을 검토한 결과, 현행 하역장비 배출관리체계는 다음과 같은 구조적 한계를 지니는 것으로 나타났다. 첫째, 온실가스 배출 관리 차원에서 하역장비를 관리하기 위한 기반이 부족하다. 현재 하역장비는 안전이나 대기오염물질 관리 차원의 관리 기반은 마련되어 있으나, 온실가스 배출을 파악하고 감축하기 위한 관리체계는 다소 미흡하다. 목표관리제나 배출권거래제 등과 같은 간접적 규제나 전기 야드 트랙터 지원사업 등과 같은 직접적 수단이 존재하기는 하나, 이는 감축 압력을 부여하거나 특정 감축 방식을 지원하는데 그친다.

둘째, 장비 단위 데이터 기반이 미흡하여 배출관리의 정밀성이 확보되지 않는다. 현재 하역장비는 연료 사용량, 가동시간 등과 같은 구체적인 활동 자료뿐 아니라, 에너지원과 같은 기초 정보조차 확보되지 않고 있다. 이로 인해 항만 내 어떤 장비가 어떤 에너지를 사용하고있는지 파악하기 어려운 상황이며, 배출량 산정을 위한 기초 데이터 수집 근거도 미비하여 실질적으로 하역장비의 현재 배출량, 감축 이행 수준 등을 파악하는 것이 불가능하다. 이러한 데이터 기반의 부재는 장비별 감축 우선순위 설정, 감축 목표 설정, 감축사업의 실효성 평가 등 정책 설계를 어렵게 하는 근본적 한계로 작용한다.

셋째, 노후 경유 장비에 대한 관리가 미흡하다. 현재 국내에는 장비별 통상 내용연수보다 오랫동안 운행 중인 노후 장비가 다수 존재하며, 이 중 경유 장비가 다수 포함된다. 노후 경유 장비는 오래된 엔진 기술과 장기간 사용에 따른 엔진 성능 저하로 동일 작업 대비 온실가스 배출량이 많을 가능성이 높아 감축 관리의 우선 대상이 된다. 그러나 현행 제도에서는 장비의 배출성능 저하를 주기적으로 확인하거나 노후 경유 장비의 개선 및 전환을 적극적으로 유도할 수 있는 체계는 마련되어 있지 않은 실정이다.

넷째, 배출 저감 참여 유도를 위한 정책 수단의 다양성이 미흡하다. 선행 연구에서는 탄소중립을 효과적으로 추진하기 위해서는 다양한 정책 수단들을 조합한 복합적 접근의 중요성을 강조하고 있다. 그러나 우리나라의 경우 배출량 규제나 연료전환 기반 인센티브 정책 위주로 추진되고 있으며, 효율 개선, 운영 최적화 등 다양한 감축수단이 충분히 고려되지 못하고 있다. 이러한 구조에서는 하역장비 전반을 아우르는 종합적 감축 구조를 구축하기는 어렵다. 따라서 다양한 감축 수단을 연계, 활용할 수 있는 접근이 요구된다.

2) 이해관계자 자문 결과

자문 결과를 종합하면, 현재 하역장비 배출관리의 가장 큰 한계는 하역 장비 단위의 배출량을 체계적으로 산정·관리할 수 있는 기준과 절차가 부재하다는 점이다. 국가 온실가스 인벤토리는 항만 단위의 총량 중심으로 운영되어 장비별 배출을 따로 관리하지 않고 있으며, 해당 배출이 정확히 어느 부문에 포함되는지조차 불명확하다. 또한 현행 여건상 운영사에게 장비별 에너지 사용량, 출력, 가동시간과 같은 활동자료를 별도로 수집할 수 있는 법적 근거도 없다. 한편, 부산항만공사, 인천항만공사 등은 항만 배출 관리 차원에서 항만의 주요 배출원별 배출량 산정을 위한 기초 자료를 운영사 협조를 받아 취합하고 있는데, 표준화된 데이터 수집 지침이 없어 운영사별 데이터 제출 수준과 품질에도 편차가 존재한다. 또한 운영사들은 Tier 3 수준의 관리가 가능한 활동자료를 보유하고 있는 경우도 많지만 이를 어떤 범위와 방식으로 수집, 산정해야 하는지에 대한 국가 차원의 명확한 지침이 없어 자료를 활용하지 못하고 있다.

이러한 데이터 관리체계의 불완전성은 하역장비의 실제 배출 규모 파악을 어렵게 할 뿐 아니라 정책 설계, 감축 이행 효과 검증에도 한계를 초래한다. 또한 하역장비 배출 관리를 위한 공통된 베이스라인(baseline) 설정도 어려워 성과 평가와 정책 수립이 총량 관리 수준에 머물 수밖에 없다. 총량 중심 관리는 장비별 가동시간이나 처리물량 차이를 반영하지 못해 실제 효율 개선이나 감축 성과를 평가하기에는 한계가 있다. 또한 장기적으로는 글로벌 공급망에서 강화될 탄소 정보 요구에도 대응하기 어려운 구조가 지속될 수 있다. 결국 데이터에 기반한 관리체계가 확립되지 않는 한 하역장비 단위의 체계적 감축 관리는 실질적으로 추진되기 어렵다.

또한 하역장비 배출관리를 둘러싼 정책, 지원 체계와 관련하여서도 몇

가지 한계가 지적된다. 먼저 화석연료 기반 장비 전기화 전환 과정에서의 보완 장치가 부족하다는 점이 한계로 제기된다. 과거 정부는 대기오염 물질 저감을 위해 경유 야드 트랙터의 LNG 전환사업(2015년부터 진행) 및 DPF 부착사업(2020년부터 진행)을 추진하였으며, 부산항의 경우 2024년까지 야드 트랙터 98%를 LNG로 전환한 바 있다⁶⁰⁾. 하지만 최근 탄소중립 달성이 주요 정책 과제로 부상하면서 하역장비의 전기화로 정책 기조가 전환되었다. 여기서 문제는 이미 전환이 이루어진 LNG 장비와 설비가 감가 상각이 끝나지 않은 상태로 남아 있음에도 이를 어떻게 처리·관리할지에 대한 보완책이 제시되지 않았다는 점이다. 전기화 전환은 장비 교체뿐 아니라 충전설비, 전력 계통 증설 등 연계 인프라 투자를 수반하기 때문에 운영사 부담이 클 수밖에 없다. 따라서 정책 기조 전환 시 과도기 투자에 대한 대응 방안이 마련되지 않는다면 운영사들은 장기적인 설비 교체 계획과 자본 투자 전략을 수립하는 과정에서 불확실성에 직면할 수밖에 없다.

이와 함께 인프라 투자 공백도 지적된다. 이러한 제약은 항만별로 차이가 있기는 하나, 부산항 신항의 경우 변전소 용량 부족으로 원활한 전기화 전환 추진이 어려운 상황이다. 전기화에 대비해 안정적으로 항만에 전력을 공급하기 위한 기반시설 확충의 주체와 비용 부담을 둘러싼 불확실성이 해소되지 않은 것도 중요한 제약 요인이다. 무탄소 전원의 확대 역시 계통 연계 시 추가 용량 확보 문제로 추진에 제약이 따른다. 결국 안정적 전력 공급을 위한 기초적인 인프라가 충분히 확보되지 않은 점이 운영사들의 전환 속도를 지연시키는 원인이 되므로 시급한 개선이 필요하다.

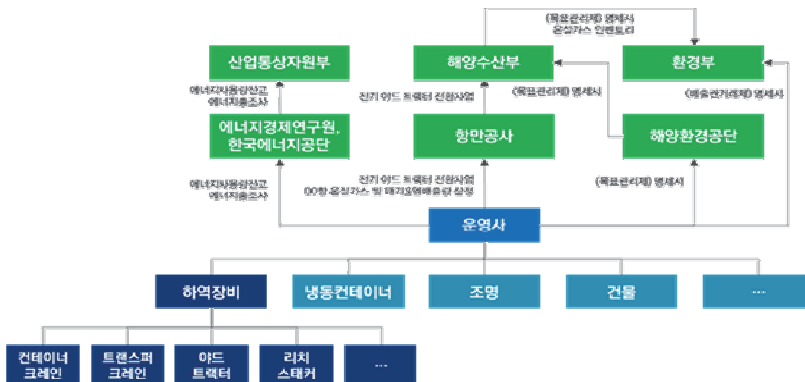
더 나아가 감축수단이 에너지 전환에 편중된 점도 한계 중 하나로 꼽을 수 있다. 현재 하역장비 배출 감축정책은 주로 화석연료 장비의 전기화와 무탄소 전원의 확대에 집중되어 있다. 그러나 무탄소 전원 확대는 터미널

60) 부산항만공사 공식블로그(검색일: 2025.9.5.)

내부에 신재생에너지 생산설비를 설치하는 것에 있어 공간 제약이 커 현실적 한계가 따른다. 또한 이미 전기화된 장비에 대한 효율화, 운영 최적화와 같은 에너지 절감을 통한 감축 방안은 정책적으로 충분히 고려되지 않고 있다. 이러한 수단 편중은 운영사 입장에서는 구체적인 이행 경로 없이 감축을 수행해야한다는 부담을 초래한다.

보고·제출 체계의 비효율성도 운영사에게 부담으로 작용한다. 현재 운영사들은 유사한 데이터(에너지사용량 등)를 여러 기관에 각각 다른 형식으로 제출해야 하며, 제출 주체와 양식이 기관마다 달라 행정적 중복과 혼선이 발생한다. 이러한 체계는 운영사 입장에서는 본연의 운영 업무와 병행하기 어려운 과도한 행정 부담으로 인식되고 있다.

〈그림 2-15〉 탄소배출량 관련 데이터(에너지데이터 포함) 제출 체계(예시)



주: 운영사가 하역장비 배출 관련 데이터를 제출하는 일반적인 체계를 도식화한 것으로, 터미널별 여건에 따라 실제 보고 내용은 상이할 수 있음
자료: 저자 작성

운영사 참여 측면에서도 여러 한계가 나타난다. 일부 규제 미대상 터미널은 법적 의무가 없기 때문에 하역장비 배출관리를 적극적으로 수행해야 할 필요성을 낮게 인식한다. 반면 규제 대상 터미널의 경우는 항만 부문이

온실가스 관리 제도에 포함된 지 오래되지 않아 전반적인 관리 역량이 아직 충분히 축적되지 않은 단계이다. 이러한 상황은 하역장비 배출관리의 내실화를 지연시키는 요인으로 작용한다.

운영사의 자발적 참여를 제약하는 또 다른 요인은 참여 유인의 부족이다. 운영사들은 전기 하역장비를 조기에 도입하는 등의 투자를 하더라도 별다른 이익이나 인정이 뒤따르지 않기 때문에, 선제적으로 감축에 나설 유인이 부족하다. 더불어 규제 미대상 터미널이 참여할 수 있는 외부감축 사업 역시 배출권 가격이 낮아 실질적 경제적 효과가 크지 않고, 배출권 가격 변동성과 규제 범위 확대 가능성은 운영사의 장기 투자 전략 수립을 어렵게 한다. 이러한 조건은 결과적으로 운영사의 참여 유인을 약화시키는 요인으로 작용하고 있다.

3. 한계점 종합

이상 현황조사 및 이해관계자 자문을 통해 도출된 항만 및 하역장비 배출관리의 한계점을 종합하면 <표 2-26>과 같다. 이처럼 하역장비의 탄소중립 이행 과정에는 다양한 제약이 존재하며, 2050년 항만 탄소중립이라는 목표 달성을 촉진하기 위해서는 모든 요소에 대한 정책적 논의가 필요하다. 다만, 본 연구의 목적이 하역장비의 실효성있는 온실가스 배출 관리를 위한 하역장비 관리체계 개선 방안을 마련하는 데 있는 만큼, 본 연구에서는 하역장비 관리체계와 직접적인 관련성이 높은 한계점을 중심으로 정책과제를 제시하고자 한다. 본 연구에서 다루지 않는 한계점들 역시 항만 탄소중립 달성을 위해 논의가 필요한 중요 사안이지만, 본 연구의 목적에 부합하는 영역에 우선적으로 정책적 논의를 집중하고자 한다.

〈표 2-26〉 하역장비 배출관리의 주요 한계점과 본 연구 검토 범위

구분	한계점	내용	검토범위
데이터 기반	데이터 기반 관리 한계	• 하역장비 단위 배출량을 체계적으로 파악·관리할 수 있는 통계 부재	●
	표준화 미흡	• 배출량 산정을 위한 산정기준, 활동자료 범위, 수집 기준 등에 대한 지침 미비로 표준화 수준 미흡 • 베이스라인 설정 한계	●
	정밀 관리 및 지표 설계 미비	• 정책 설계·이행평가 등을 위한 Tier 3 수준의 정밀 데이터 관리 미흡 • 실제 감축 노력을 반영할 수 있는 지표 부재	●
정책 방향	장비 노후화	• 주요 장비의 평균 사용연수가 10~20년 수준으로 에너지 효율 저하 및 배출량 증가 심화 우려	●
	온실가스 관리 공백	• 하역장비 관리가 안전관리 및 대기오염물질 규제 중심으로 이루어지고 있으며 온실가스 규제는 미흡	●
	과도기 장비 대응 미흡	• 최근 정책 기조가 전기화로 변경됨에 따라 과도기 장비인 LNG 장비, 설비에 대한 대응책 미흡	
	인프라 투자 공백	• 전력 인프라 부족으로 장비 전기화 지연 우려	
정책 방향	감축수단 편중	• 감축수단이 전기화, 무탄소 전원 확대에 치중 • 전기화된 장비의 효율화, 운영최적화 등 에너지 소비 절감 수단 미고려	●
규제·보고 체계	보고·제출 부담	• 유사한 데이터를 여러 기관에 상이한 형식으로 제출해야 해 행정적 부담 발생	
운영사 참여	인식·역량 부족	• 규제 미대상 터미널은 관리 필요성 인식 낮음 • 규제 대상 터미널은 관리 역량 초기 단계	
	참여 유인 부족	• 배출관리를 통해 얻을 수 있는 직접적 이익 불분명	●

자료: 저자 작성

제5절 소결

하역장비는 항만 내 배출원 중 가장 많은 배출을 발생시키는 배출원이자 항만 운영 주체가 직접 통제 가능한 관리 대상이라는 점에서 온실가스 감축의 핵심 영역이다. 항만에는 선박, 트럭, 건물 등 다양한 배출원이 혼재하지만, 선박과 화물차는 다른 주체의 책임영역이며, 하역장비는 운영사, 하역사 등이 소유·운영하는 자산으로서 관리 책임과 실행력이 분명하다. 또한 최근 강화되는 글로벌 공급망 규제에 대응하기 위해서도 하역장비의 배출 관리는 필수적이다.

국내에서 운행중인 하역장비의 경우 전기, 경유, LNG 등을 에너지원으로 사용하며, 노후 장비 비중이 높다. 특히 컨테이너 크레인, 트랜스퍼 크레인은 전기화가 일정 수준 진행되었고, 야드 트랙터, 스트래들 캐리어, 컨테이너 핸들러는 여전히 화석연료 기반 장비가 주를 이루고 있다. 한편, 현재 하역장비 관리체계는 안전성 및 대기오염물질 관리 중심으로 설계되어 있어 온실가스 배출 관리는 공백이 존재한다.

현재 국내 하역장비 배출 관리와 관련된 정책들은 장비 전동화, 무탄소 전원 확대 등 에너지 전환 중심으로 추진되고 있다. 그러나 감축 성과 측정은 전환 대수와 같은 단순 지표에 머무르고, 운영 최적화나 효율 개선 같은 다양한 감축 수단에 대한 관심은 상대적으로 낮다. 이러한 편중된 감축 방향 설정은 전환에 필요한 인프라와 보완 장치가 부족한 현 상황에서 감축의 불확실성과 부담을 가중시키고 있다. 뿐만 아니라 하역장비의 배출 감축을 직간접으로 유도하는 제도, 정책들도 여러 한계를 지닌다. 목표관리제와 배출권거래제는 배출 관리 단위가 사업장으로 장비 관련 데이터를 수집하고는 있지만 실질적인 장비 중심 관리는 미흡하다. 전기 야드 트랙터 지

원사업은 전환 규모를 기준으로 이행실적을 관리하기 때문에 실제 감축 성과 파악이 어렵다. 또한 외부사업은 낮은 배출권 가격으로 참여 유인이 낮아 실질적 효과를 발휘하지 못하고 있다. 게다가 관련 데이터를 수집하기 위한 제도 기반도 미흡하다. 온실가스 인벤토리, 에너지 총조사, 에너지사용량 신고 등은 모두 하역장비와 관련된 정보를 수집하고는 있지만 이 역시 사업장 단위로 데이터가 집계되기 때문에 장비별 배출량이나 배출 특성을 파악하기 어렵다.

한편, 현황 분석 및 이해관계자 자문 결과, 현행 하역장비 관리체계는 온실가스 배출 관리 측면에서 구조적 한계를 지닌 것으로 확인되었다. 특히, 온실가스를 관리할 수 있는 기준이나 제도적 근거가 미비하고, 현재 하역장비의 배출량을 파악하는 것조차 불가능하며, 배출량 산정 기준에 대한 표준화가 이루어지지 않아 각 하역장비 소유, 운영자가 배출량을 산정하더라도 비교, 활용의 의미가 없다. 또한 운행 중이거나 노후한 장비를 관리하기 위한 기반도 부재하다. 정책적으로 추진하고 있는 감축 수단은 에너지 전환에 치중되었으며 하역장비 소유, 운영자의 자발적 감축 이행을 촉진할 만한 유인수단도 없다. 이러한 여건에서는 하역장비의 온실가스 관리 실현에 한계가 있으며, 따라서 온실가스 관리 관점에서 하역장비의 관리체계를 개편할 필요가 있다. 이에 다음 장에서는 해외 항만의 선진적인 관리체계와 국내외 유사 사례를 참고하여 하역장비 배출 관리체계 개선을 위한 방향을 검토하고자 한다.

03

국내외 벤치마킹 사례 분석

하역장비 온실가스 감축을 위한 관리체계 개선 방안을 마련하기에 앞서, 국내외 유사 경험을 검토하는 것은 정책 대안의 방향성을 설정하는 데 중요한 참고자료가 된다. 이에 제3장에서는 미국, 일본, 싱가포르 등 주요국 항만 부문의 선진 사례와 더불어 수송, 산업, 건물 등 국내 타 분야의 배출 관리 사례를 분석하여 하역장비 관리체계 개선에 활용 가능한 시사점을 도출한다.

제1절 국외 하역장비 배출관리 정책수단

1. 정책 목표·추진전략 마련

1) 미국⁶¹⁾

미국은 항만을 배출저감 및 에너지 전환 거점으로 인식하고, EPA (Environmental Protection Agency)를 중심으로 항만 탄소중립 이행 지

61) EPA(검색일: 2025.4.30.), EPA(2024a) 자료를 참고하여 저자 작성

원을 위한 다양한 정책을 추진하고 있다. EPA는 항만의 대기질 개선 및 탄소중립 실현을 위한 종합적 지원 프레임워크인 ‘Ports Initiative’를 운영하고 있다. 여기서 주목할 점은 미국은 온실가스뿐 아니라 대기오염물질까지 포함하여 포괄적으로 배출관리 대상을 설정하고 있다는 점이다. 이 이니셔티브는 자발적 참여를 기반으로 하며, 청정기술 전환을 위한 자금지원, 기술자료 제공, 지역사회 협력, 정부간 조정, 정보공유의 5가지 주요 영역을 중심으로 구성된다.

2024년에는 해당 이니셔티브를 기반으로 총 30억 달러 규모의 ‘Clean Ports Program’이 본격적으로 도입되었다. 이 프로그램은 항만의 제로배출 전환 기반을 마련하고, 취약지역의 경유에 의한 오염을 줄이며, 지역사회와의 협력·참여를 항만 산업의 표준 관행으로 자리잡게 하는 것을 목표로 한다.

이 프로그램은 ‘제로배출 기술 도입 지원 공모(Zero-Emission Technology Deployment Competition)’ 및 ‘기후 및 대기질 계획 공모(Climate and Air Quality Planning Competition)’의 두 가지로 공모로 구성된다. ‘제로배출 기술 도입 지원 공모’는 하역장비, 항만 내 선박 등 항만의 이동식 오염원을 대상으로 제로배출 장비 도입과 에너지저장시스템, 장비 충전을 위한 전기·수소 인프라, 재생에너지(태양광·풍력) 기반 전력 인프라 구축 등과 같은 관련 인프라 구축을 지원한다. 또한 운영 데이터 수집·분석, 성능 모니터링, 운영계획, 인력교육 등의 관리 활동까지 포괄적으로 지원하는 것이 특징이다. ‘기후 및 대기질 계획 공모’는 항만이 자체적으로 배출 인벤토리와 배출계정(accounting practices)을 적용하고, 배출 감축을 위한 전략을 분석하고 목표를 설정하며, 항만 이해관계자 협력 및 소통을 강화하는 등의 계획 활동을 지원하기 위한 것이다. 이처럼 EPA는 하역장비의 전환 및 관련 인프라 구축 지원뿐 아니라 배출관리체계를 동시에 구축하도

록 유도하는 방식으로 하역장비 및 항만의 배출 관리를 추진하고 있다는 점에서 시사점이 크다.

〈그림 3-1〉 EPA Clean Ports Program



자료: EPA, Clean Ports Program Infographic(검색일:2025.4.28.)

2) 싱가포르⁶²⁾

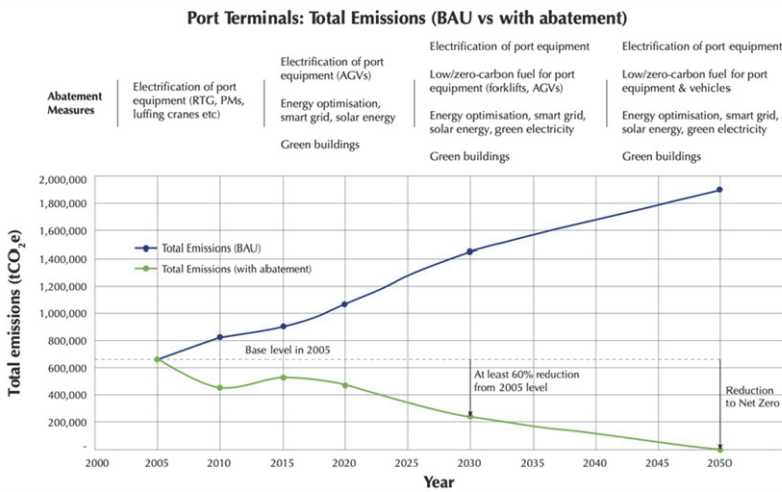
싱가포르는 해양 및 항만청(Maritime and Port Authority of Singapore, 이하 MPA)을 중심으로 항만 탄소중립을 추진하고 있다. 우선 MPA는 2022년, 'Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050'를 통해 지속가능한 해양 싱가포르 구축을 위한 장기 전략을 제시하였다. 이 로드맵에서는 싱가포르 해양 산업 탈탄소화를 위해 ① 항만 터미널, ② 국내 예인선, ③ 미래 해양 연료, 병커링 표준 및 인프라, ④ 싱가포르 등록 선박, ⑤ IMO 및 국제 플랫폼에서의 노력, ⑥ 연구개발 및 인재 육성, ⑦ 탄소 인식, 탄소 회계 및 녹색 금융의 7개 분야를 중점 관리 영역으로 설정하였다. 그 중 항만 터미널 분야에서는 2030년까지 청정 에너지, 자동화 및 디지털화를 통해 2005년 배출량의 60%를 감축하고, 2050년까지 탄소중립을 실현하는 것을 목표로 설정하였다. 이를 달성하기 위한 주요 전략 중 하역장비와 관련해서는, 친환경 장비 전환뿐 아니라 AI 기반 장비 운영 최적화, 스마트 그리드 관리 및 스마트 다중 에너지 시스템 도입, 그린 전력 및 재생에너지 활용 확대 등이 추진될 계획이다. 이 가운데 스마트 그리드 관리 시스템은 하역장비, 터미널 건물 및 기타 항만시설의 에너지 효율을 모니터링하고 에너지 소비를 통합 관리하는 시스템으로, PSA는 이 시스템이 파시르판장 터미널과 투아스항에 적용될 경우 전비 소비량이 약 3~5% 감소할 것으로 추정하고 있다. 이처럼 싱가포르는 에너지 전환, 에너지 효율화, 저·무탄소 전원 확대 등 다양한 수단을 병행하여 하역장비 배출 관리를 추진하고 있다는 점에서 시사점이 있다.

아울러 탄소 인식, 탄소 회계 및 녹색 금융 분야에서는 해양 산업 분야의 체계적인 배출 관리를 위해 탈탄소화를 정량적으로 이행, 관리할 수 있는 탄소 회계 및 보고 체계를 강화할 것임을 목표로 제시하였다. 이를 위해

62) MPA(2022), MPA(검색일: 2025.4.30.) 자료를 참고하여 저자 작성

해양산업 맞춤형 탄소회계 가이드라인을 개발하고, 기업의 탄소 배출량 측정 및 관리 역량 향상을 지원할 계획임을 밝혔다. 이처럼 MPA는 탄소 배출의 정량화 필요성을 분명히 인식하고, 이를 보다 체계적으로 수행하기 위한 정책적 방향을 제시하고 있다.

〈그림 3-2〉 2005년부터 2050년까지 BAU와 항만 터미널의 목표 배출량 비교



자료: MPA(2022), p. 8.

더불어 MPA는 현재 친환경적인 선박 운항 및 항만 운영을 촉진하는 기업을 대상으로 인정 및 인센티브를 제공하는 자발적 프로그램인 ‘Maritime Singapore Green Initiative; 이하 MSGI’를 운영하고 있다. MSGI는 5개 프로그램⁶³⁾으로 구성되며, 그 중 하역장비와 직접적인 관련이 있는 프로그램은 2024년 신설된 ‘Green Port Infrastructure Programme’이

63) Green Ship Programme(싱가포르 등록 선박 및 싱가포르항 입항 선박 대상 인센티브 프로그램), Green Port Infrastructure Programme(항만 사업자 및 운전자 대상 인센티브 프로그램), Green Craft Programme(신규 건조 예인선 대상 인센티브 프로그램), Green Energy and Technology Programme(싱가포르 소재 해양기업을 대상으로 친환경 기술개발 및 파일럿 시험 지원 프로그램), Green Awareness Programme(해양기업의 탄소회계 및 배출관리분야 인식 제고 및 감축역량 강화 지원 프로그램)의 5개 프로그램으로 구성됨

있다. 이 프로그램은 항만 운영 부문의 연료전환, 에너지 최적화, 재생에너지 도입 등 인프라 전환을 지원하기 위한 프로그램으로, 고효율 장비 도입을 촉진하기 위한 보조금 제도인 EEG(Energy Efficiency Grant)를 포함한다. EEG는 에너지 소비 절감 중심의 장비 전환을 유도하는 데 목적이 있으며, 기업 규모 및 투자 수준에 따라 차등화된 보조금이 제공되는 2단계 티어 체계로 구성되어 있다. 특히 터미널이 전동 포크리프트를 도입하는 경우, 70%까지 정부 지원을 받을 수 있도록 프로그램이 설계되어 있다.

또한 MPA는 ‘Green Awareness Programme’을 통해 해양 기업의 탄소회계 및 관리 인식과 역량 강화하기 위한 정책을 병행하고 있다. 이는

〈표 3-1〉 MSGI 프로그램 중 항만 및 하역장비 관련 프로그램

구분	개요	세부 내용
Green Port Infrastructure Programme	항만 사업자 및 운영자를 대상으로 연료 전환, 에너지 최적화, 재생에너지 생산을 통한 항만 탄소중립 전환을 지원하는 프로그램	- 에너지 효율성 보조금(Energy Efficiency Grant; EEG) 지원(~2026.3.31.) - (기본) 사전 승인된 고효율 장비에 대해 기업당 최대 S\$30,000 지원, 중소기업은 최대 70%, 비중소기업은 최대 30%까지 정부 지원 - (고급) 에너지 더 큰 투자로 더 높은 에너지 효율을 달성하는 기업을 지원, 기본 및 고급단계 합산 최대 지원한도는 기업당 S\$350,000, 장비에 대한 사전 승인은 불필요하나 350톤 이상의 에너지 절감 효과 입증 필요, 기본 계층의 지원을 또는 예상 에너지 절감량 기반 산정 중 더 낮은 값만큼 정부 지원 - 항만 부문의 경우 에너지 효율 전동 포크리프트 도입시 비용의 70%까지 정부 지원 가능
Green Awareness Programme	해양 기업의 탄소회계 및 관리 분야 인식 제고와 감축역량 강화를 지원하기 위한 프로그램	- 탄소 관리 워크숍 참가 비용의 50% 공동 부담 - (해양 SG 저탄소 50 프로그램) 탄소회계 및 관리 관련 교육 워크숍, 관련 이니셔티브, 제도, 기술 공유 포함 - (해양 SG 저탄소 50 어워드) 탄소회계를 적극적으로 정확하게 수행했으며, 명확하고 효과적인 배출 감축/관리 조치를 수행한 기업 대상 표창 수여

자료: MPA(검색일: 2025.4.30.); gobusiness, Energy Efficiency Grant(검색일: 2025.4.30.)

기업 단위의 탄소회계 역량이 강화될수록 데이터 기반 배출관리 수준이 높아진다는 점에서 하역장비 배출관리에도 간접적인 정책적 함의를 가진다.

2. 미국 CARB, CHE Regulation 개정 추진⁶⁴⁾

미국 CARB(California Air Resource Board, 캘리포니아 대기자원위원회)는 현재 하역장비 무공해(Zero Emission) 전환 촉진을 위해 「Cargo Handling Equipment Regulation(이하 CHE Regulation)」 개정을 추진하고 있다. 현행 「CHE Regulation」은 경유 하역장비를 대상으로 시행되는 NO_x, PM 중심 대기오염물질 규제로, 2005년 제정, 2011년 개정을 거쳐 2017년 전면 시행되었으며, 현재까지 온실가스는 규제 대상에 포함되지 않는다.

CARB는 2018년 3월, 하역장비 무공해 전환을 위한 규정 개발 계획을 이사회에 제출하였으며, 이후 2020년, 행정명령 N-79-20, 2025년 행정명령 N-27-25을 통해 2035년까지 캘리포니아주 내 비도로 장비의 100% 무공해화 목표가 확정되면서 규제 개정의 정책적 근거를 확보하였다. CARB가 제안한 규정 개발 계획에 따르면, 개정안은 경유 장비뿐 아니라 가솔린, LNG, CNG 등 화석연료를 사용하는 모든 내연기관 장비들을 무공해 장비로 전환하는 것을 포함하며, 규제 시행 시점은 2026년 이후로 제시되었다. 또한 규정 개정이 대기오염물질 및 온실가스 감축에 기여할 수 있을 것이라 밝혔다.

또한 CARB는 2025년, 규제 개정 앞서 ‘CHE Technical Assessments’를 실시하여 전기 모터 기반의 무공해 기술을 중심으로 기술 가용성과 운영

64) CARB(검색일: 2025.11.12.) CARB(검색일: 2025.11.24.) 자료를 바탕으로 저자 작성

타당성을 종합적으로 검토하였다. 이 평가는 대기오염물질뿐 아니라 온실가스도 배출하지 않는 무공해 기술만을 평가대상으로 삼았다는 점에서, 정책 및 규제의 초점이 경유 중심 대기오염물질 관리에서 모든 내연기관을 대상으로 하는 무공해 전환으로 변화되고 있음을 보여준다.

3. 데이터·MRV 기반 구축

1) 인벤토리·온실가스 배출량 산정 기준 표준화

(1) 미국 EPA, 항만 배출 인벤토리 가이드라인⁶⁵⁾

미국 EPA는 2022년, 항만과 관련된 이동식 배출원의 대기오염 및 온실가스 배출량 산정에 관한 지침인 ‘항만 배출 인벤토리 가이드라인’을 발간하였다. 이는 국가 차원에서 발행된 항만 부문 특화 정량화 지침의 대표 사례로, 항만공사, 항만 운영사, 지방정부, 지역사회 등 다양한 항만 이해관계자가 항만 유발 대기오염 및 온실가스 인벤토리를 작성하는 것을 지원하기 위해 마련되었다. 지침은 선박, 하역장비, 차량, 철도 등 항만의 다양한 배출원을 포괄하며, 배출량 인벤토리 산정을 위한 데이터 입력, 방법론을 중심으로 구성되어 있다.

이 가이드라인은 하역장비를 비도로 이동오염원으로 분류하고, MOVES-Nonroad 모델을 사용하여 배출량을 계산하도록 하고 있다. 하역장비의 배출량은 엔진 정격출력, 부하계수, 가동시간, 배출계수의 곱을 통해 산정하는 것을 원칙으로 하며, 장비당 배출의 합계를 통해 인벤토리를 구축하도록 하고 있다. EPA는 데이터 가용성을 고려하여 활동자료를 확보해 산

65) EPA(2022) 자료를 바탕으로 저자 작성

정하는 방식인 상세방식과, 자료가 부족한 경우에는 유사 항만의 평균 활동자료나 대표 장비 제원을 활용하도록 하는 대체방식을 활용할 수 있도록 하고 있으며 하역장비는 주로 상세방식을 적용하도록 한다. 한편, 하역장비 배출량 산정을 위한 부하계수, 배출계수는 하역장비 유형, 연료 유형, 엔진 연식 등을 기준으로 차등적용되며 이를 통해 장비 특성이 반영된다.

〈그림 3-3〉 EPA Port Emissions Inventory Guidance 주요 내용

U.S. Environmental Protection Agency

6 CARGO HANDLING EQUIPMENT

6.1 SOURCE DESCRIPTION

The cargo handling equipment (CHE) sector encompasses equipment used for moving cargo, products, and supplies around a port or other freight terminal, and on and off marine vessels, railcars, and onroad trucks. This section could be used to quantify CHE emission inventories at ports or at other locations where cargo is moved, such as off-port cargo distribution centers or intermodal freight terminals where freight is transferred between rail and trucks. CHE are typically classified as "nonroad equipment," i.e., mobile equipment that do not operate on roadways.

Equipment types to be considered in an emissions inventory for a port's CHE sector may include (but are not limited to):

- Aerial lifts
- Compressors
- Cranes
- Empty container handlers
- Excavators
- Forklifts
- Generators/power packs
- Light towers
- Mastiffs
- Off-highway trucks
- Rail pushers
- Reach stackers
- Rollers
- Rubber-tired gantry (RTG) cranes
- Side handlers
- Skid steer loaders
- Sweepers
- Top handlers
- Tractors/loaders/backhoes
- Welders
- Yard tractors

The scope of the inventory should be determined in advance of any calculations and in accordance with the overall inventory purposes, as discussed in Section 2. For example, while a port may have many different types of cargo handling equipment, it may be decided that it is most important to include equipment types that are most in use or the oldest, i.e., the equipment types that make up the largest contribution to emissions or those that would be the focus of replacement. Alternatively, it may be decided that every type of CHE present at the facility will be included, but the effort to gather detailed information would be focused on the most important equipment types. Information needed for a CHE inventory will likely come from the CHE owners or operators, which could include the port authority or

Port Emissions Inventory Guidance

83

6. Cargo Handling Equipment

port operator, port tenants, terminal operators, or other agencies, which highlights the importance of cooperation in the process of developing an inventory. Additionally, the inventory should be calculated at the temporal level of detail necessitated by the purpose of the inventory (e.g., at the year level for an annual inventory). See Section 2 of this guidance for more discussion about inventory purpose and time period covered.

6.2 EMISSIONS ESTIMATION OVERVIEW

This section provides guidance regarding CHE data sources and general approaches that are relevant for any port or freight terminal inventory, regardless of location. Other than in California, the nonroad module of EPA's MOVES model (referred to here as MOVES-Nonroad) is the primary tool for estimating emissions from CHE in the U.S.¹ When using MOVES to develop a CHE emissions inventory, the most recent version should be used. The information in this section is applicable to all versions of MOVES3 as well as future versions of the MOVES model, unless EPA notes otherwise when approving the model for state implementation plan (SIP) and conformity purposes.² Inventories of CHE emissions in California should reference guidance for the latest version of California Air Resources Board's CHE emissions model instead of the specific guidance here for using MOVES-Nonroad.³

Information on all CHE present at the port should be gathered from terminal operators, and both public and private terminals should be represented. Based on this information, MOVES-Nonroad can be used to produce emission factors that can be multiplied by port-specific activity data to generate a base year inventory. The MOVES Technical Guidance⁴ provides detailed information on how to generate emission inventories using MOVES-Nonroad. However, the general equation for calculating per unit CHE emissions based on MOVES-Nonroad output is as shown in Equation 6.1:

$$E = P \times LF \times A \times EF$$

Equation 6.1

Where E = per unit emissions (g)
 P = rated engine power (hp)
 LF = engine load factor (unitless)
 A = engine operating activity (h)
 EF = emission factor (g/hp-h)

Each of the above parameters may vary by equipment type and per unit. Therefore, it is important to account for equipment characteristics (Section 6.3) and activity (Section 6.4) accurately to ensure that operating power and hours are calculated correctly and that the right emission factors (Section 6.5) are applied to this activity.

There are different methods that can be used for estimating base year emissions from CHE, depending on data and resource availability:

- The primary method used to calculate a detailed emissions inventory is based on detailed CHE activity data and is described in Section 6.6, where emissions are calculated for each unit of CHE.

¹ In addition to U.S. states, this includes the District of Columbia, Puerto Rico, and the U.S. Virgin Islands. For more information about MOVES, see <https://www.epa.gov/moves>.

² Note that the information in this section also applies to all versions of MOVES2014.

³ For more information, see <https://www2.arb.ca.gov/mtd/documentation/offroad-diesel-equipment>.

Port Emissions Inventory Guidance

84

자료: EPA(2022), pp. 83-84.

한편, 가이드라인에서는 장비 가동률 증가율, 교체율 등을 반영하여 장래 배출량을 예측할 수 있는 방법도 함께 제시하고 있으며, 이를 통해 노후 장비 교체사업, 연료전환, 효율개선 효과를 시뮬레이션할 수 있도록 한다. 이를 통해 미국은 인벤토리 기반의 배출원 관리체계와 이행 기반 구축을 조기에 추진하고 있으며, 이는 정책의 실행력과 지속가능성을 확보하기 위한 선제적 대응으로 평가할 수 있다.

(2) 일본 국토교통성, 항만에서의 온실가스 배출량 산정 매뉴얼(안)⁶⁶⁾

일본 국토교통성은 항만에서의 온실가스 관리 강화를 위해 2009년, 「항만에서의 온실가스 배출량 산정 매뉴얼(안)」을 마련하였다. 이 매뉴얼은 항만관리자와 터미널 운영자가 항만 활동 전반의 배출량을 체계적으로 산정할 수 있도록 절차와 방법을 규정하고 있으며, 매뉴얼 적용 대상은 선박의 정박, 하역장비, 게이트 대기 차량, 항만 내 수송차량, 그리고 배후수송이 포함된다. 본 매뉴얼에서는 CO₂만을 대상으로 산정 방식을 제시하고 있으며, 타 물질은 별도 매뉴얼을 참고하도록 하고 있다.

〈그림 3-4〉 항만에서의 온실가스 배출량 산정 대상 배출원



자료: 일본 국토교통성 항만국 국제·환경과(2009)(검색일: 2025.8.1.)

매뉴얼은 항만의 배출원을 세분화하고, 각 배출원별로 활동자료를 활용하여 배출량을 산정하는 절차를 제시하고 있다. 하역장비의 경우 수집 자료 수준별로 두 가지 수준의 지표(〈표 3-2〉 참조)를 활용한 산정방식을 제시하고 있으며, 각 방식별로 산정 흐름, 활동자료 종류, 배출계수, 일부 데이터만 확보 가능한 경우 산정 방법 등을 제시하고 있다. 하역장비의 배출량은 원칙적으로 터미널 부두별로 산정하도록 하고 있으며 활동자료 수집

66) 일본 국토교통성 항만국 국제·환경과(2009)(검색일: 2025.8.1.) 자료를 바탕으로 저자 작성

시 배출 원단위 산정 등에 활용할 수 있도록 장비 대수나 처리물동량도 파악하는 것을 권고하고 있다. 한편, CO₂ 감축량을 산정하는 방식도 함께 다루고 있는데, 이는 감축대책을 시행하지 않았을 경우의 배출량과 감축 대책을 시행했을 경우의 배출량 차이를 기반으로 산정하도록 하고 있다. 또한 이 매뉴얼과 연계한 산정 도구도 별도 국토교통성 항만국 홈페이지에서 공개할 것임을 밝히고 있다.

〈표 3-2〉 하역장비 온실가스 배출량 산정을 위한 지표

구분	배출원	지표①		지표②	
하역 장비	컨테이너 하역장비, 벌크 화물 하역장비, 리퍼 컨테이너용 발전기	- 연료 사용량 - 전력 사용량 - 연료 종류 - 물동량	- 항만 관리자 - 터미널 운영사	- 항만 전체 물동량 - 가동 하역장비(마력 또는 정격 출력) - 부하율 - 가동시간 - 하역장비 대수 - 연료 종류	- 항만 관리자 - 터미널 운영사

자료: 일본 국토교통성 항만국 국제·환경과(2009)(검색일: 2025.8.1.)

2) 배출량 산정 도구

(1) 미국 EPA, MOVES⁶⁷⁾

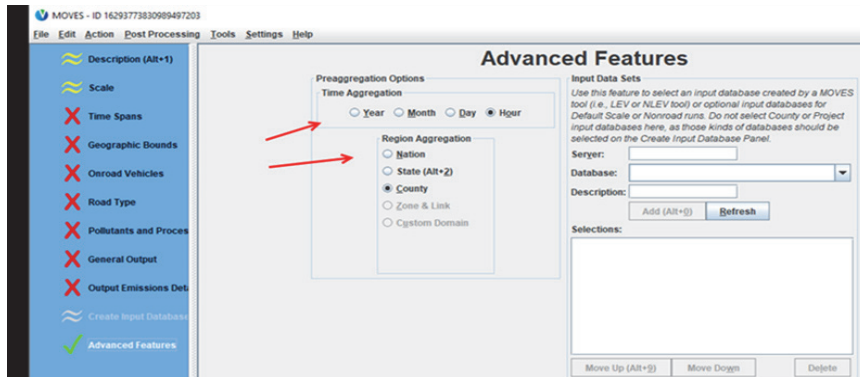
미국 EPA의 「Motor Vehicle Emission Simulator(MOVES)」는 도로 및 비도로 이동오염원의 배출량을 산정하는 국가 표준 모델이다. 2024년 발표된 최신 버전의 ‘MOVES 5.0’은 대기오염물질과 온실가스를 포괄하여 차량과 장비의 배출량을 정량화하도록 설계되었다. MOVES는 다양한 산정 단위를 제공하는 것이 특징으로, 국가 전체(default), 특정 카운티(county), 개별 도로 및 시설(project) 단위의 세분화된 분석이 가능하다

67) EPA(2022), EPA(2024b) 자료를 바탕으로 저자 작성

는 특징이 있다. 한편, MOVES는 주정부 대기질 개선계획, 교통부문 적합성 평가, 국가 배출량 인벤토리 구축 등에 공식적으로 활용되고 있다.

EPA의 ‘항만 배출 인벤토리 가이드라인’에 언급된 것처럼 MOVES는 하역장비의 온실가스 및 대기오염물질 배출량 산정 기능을 제공한다. 하역장비는 비도로 장비(Nonroad equipment) 모듈을 통해 관리되며, 장비의 제원, 연식, 가동시간 및 연료 사용량과 같은 활동 데이터를 입력하여 장비별 배출계수를 자동 산출하고, 이를 기반으로 총배출량을 집계하는 체계를 갖추고 있다. 이를 통해 동일한 입력자료로 온실가스와 대기오염물질을 함께 산정할 수 있으며, N₂O와 블랙카본의 경우 모델 내부에 배출계수 등이 반영되지 않아 후처리 단계에서 별도 산정이 필요하다. 한편, MOVES는 사용자 목적과 데이터 보유 수준에 따라 ‘인벤토리(Inventory) 모드’⁶⁸⁾와 ‘배출계수(Emission Rates) 모드’⁶⁹⁾의 두 가지 산정 모드를 제공한다.

〈그림 3-5〉 MOVES 인터페이스



자료: EPA(검색일: 2025.8.1.)

68) 주행거리(Vehicle Miles Traveled)나 장비 가동시간 등 활동도 총량을 입력하면 모델이 자동으로 총배출량을 산출하는 방식(자료: EPA, 2024b)

69) 특정 운행 조건에서의 단위 활동(예: g/mile, g/hour) 당 배출량을 산출해주어, 사용자가 보유한 상세 활동 데이터를 외부에서 결합하여 후처리할 수 있도록 지원(EPA, 2024b)

(2) 일본 국토교통성, 항만용 온실가스 산정 도구⁷⁰⁾

항만에서의 온실가스 배출량 산정 매뉴얼을 실제로 적용하기 위해 일본은 항만용 온실가스 산정 도구를 개발·보급하였다. 산정 도구는 매뉴얼의 산정식을 기반으로 항목별 입력칸과 자동 계산식을 내장하고 있으며, 항만 운영자가 직접 데이터를 입력하면 연간 CO₂ 배출량을 즉시 산출할 수 있도록 설계되었다. 입력 항목은 선박 정박, 하역장비, 관리동·조명, 게이트 대기 차량, 항만 내 수송, 배후수송 등으로 구성된다. 하역장비의 경우 장비 대수와 연료·전력 사용량을 기입하여 산정하도록 되어있다.

〈그림 3-6〉 「항만 온실가스 감축량 산정 도구」 인터페이스

2. 荷役 (荷役機械等) CO₂排出量

(1) 削減対象前

項目	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル
保有台数	5			3					
電力消費量 (kWh)	72,000			7,200					

排出係数 (調: 0.000000 t-CO₂/kWh) 0.000000

排出量 (調: 2.02 t-CO₂/年) 2.02

(2) 削減対象後

項目	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル	トンネル
保有台数	15	25							
電力消費量 (kWh)	15,000	1,400,000							

排出係数 (調: 2.02 t-CO₂/kWh) 2.02

排出量 (調: 2.02 t-CO₂/年) 2.02

削減率 (%) 40

削減量 (調: 0.808 t-CO₂/年) 0.808

削減率 (%) 25

削減量 (調: 0.505 t-CO₂/年) 0.505

削減率 (%) 45

削減量 (調: 0.909 t-CO₂/年) 0.909

자료: 일본 국토교통성, 港湾における温室効果ガス削減量算定ツール(검색일: 2025.8.1.)

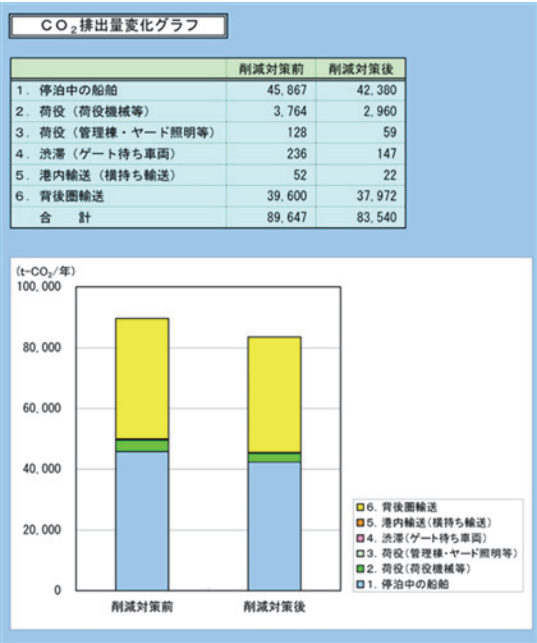
산정 도구는 입력된 값을 토대로 배출계수를 자동으로 적용하여 항목별·총합 CO₂ 배출량을 산출한다. 또한, 시나리오별 감축대책(하이브리드 트랜스퍼 크레인 도입, 게이트 대기시간 단축, 모달 시프트 적용 등)을 반영하

70) 일본 국토교통성, 港湾における温室効果ガス削減量算定ツール(검색일: 2025.8.1.),
일본 국토교통성, 温室効果ガス削減量算定シート(入力例)(검색일: 2025.8.1.) 자료를 바탕으로 저자 작성

면 감축 전후 비교가 가능하도록 설계되어 있다. 실제 출력 화면에는 감축 전후 배출량과 감축률이 그래프와 수치로 표시된다.

이 산정 도구는 사용자가 복잡한 계산식을 직접 적용하지 않아도 되도록 직관적인 UI를 제공하며, 입력값과 출력값의 연계가 명확해 실무자가 손쉽게 활용할 수 있는 장점이 있다. 특히, 항만관리자가 매년 데이터만 갱신하면 자동으로 배출량이 재산정되므로, 장비 교체사업이나 감축정책의 효과를 정량적으로 검증하는 데 효과적일 것으로 판단된다.

〈그림 3-7〉「항만 온실가스 감축량 산정 도구」 산정 결과



자료: 일본 국토교통성, 港湾における温室効果ガス削減量算定ツール(검색일: 2025.8.1.)

3) WPCAP, 글로벌 하역장비 인벤토리⁷¹⁾

IAPH가 주도하는 세계 항만 기후 행동 프로그램(World Ports Climate Action Program; WPCAP)은 항만 부문의 온실가스 감축을 위해 세계 주요 항만들이 자발적으로 참여한 국제협력 프로그램으로, 5개 워킹그룹을 구성하여 공동 과제를 추진하고 있다. 워킹그룹의 주제는 효율성, 정책, AMP, 연료, 하역장비로, 국제사회에서 하역장비를 주요 관리가 필요한 배출원으로 인식하고 있음을 보여준다. 미국의 LA항, LB항, NY/NJ항과 캐나다 벤쿠버항, 스페인 발렌시아항 등이 중심이 되어 참여하고 있으며, 각 항만의 기술 실증 결과를 공유하고 이를 바탕으로 공동의 정책 방향과 전환 로드맵을 수립하고 있다.

하역장비 탈탄소화를 담당하는 Working Group 5의 주요 활동 중 하나는 글로벌 하역장비 인벤토리 구축이다. 참여 항만들은 각 항만에서 운영 중인 하역장비의 종류, 연료유형, 수량, 사용시간 등을 체계적으로 수집하여 데이터베이스화 하고 있으며, 이를 통해 기술 전환의 우선순위를 설정하고 장비 제조사 및 기술 공급자와의 협상 등에 활용하기 위한 기반을 마련하는 데 활용하고 있다. 이러한 인벤토리는 단순 현황 파악을 넘어 장비 전환에 따른 비용 추정, 정책 설계, 보조금 적용 기준 마련 등에 필요한 실증적 자료로 활용된다. 더불어 각 항만에서 시행중인 실증 및 인프라 구축 사업의 성과 및 시행착오를 공유하여 동일 기술 실험의 중복을 방지하고, 개발비용 기간을 절감하는 효과도 함께 추구하고 있다.

인벤토리 작성을 위해 IAPH는 표준화된 하역장비 분류 체계를 제시하고 있으며, STS 크레인, RMGC, RTGC, 터미널트랙터, 컨테이너 핸들러, 탑 핸들러로 구분한다. 인벤토리에는 장비 종류, 연료 유형, 보유 수량과 같은

71) WPSP, Worldwide CHE Inventories(검색일: 2025.5.1.), WPSP, WPCAP WG 5 - Cargo Handling Equipment Database Worldwide CHE Inventories(검색일: 2025.5.1.) 자료를 바탕으로 저자 작성

기본 정보부터 사용시간, 가동률과 같은 운영 데이터, 연식, 제조사 등과 같은 상세 정보까지 다양한 정보를 수집한다.

WPCAP 사례에서 확인할 수 있듯 하역장비 인벤토리는 배출 관리를 넘어 정책 실행력을 강화하는 전략적 도구가 될 수 있다. 국내에서도 IAPH의 표준 체계를 참고하여 통일된 데이터 수집 기준을 마련하고 이를 통해 정책 설계에 활용 가능한 인벤토리 구축이 필요하다.

〈그림 3-8〉 WPCAP에서 구축 중인 글로벌 하역장비 인벤토리 예시

		CHE Type		Diesel	Zero-Emissions	Hybrid	Other Fuel
Yard tractor				432	0	0	0
Straddle carrier				371	0	0	0
Container handler				122	0	0	0
Ship to shore crane				4	57	0	0
RTG crane				53	0	0	0
Forklift - heavy duty				33	0	0	0
Reach stacker				23	0	0	0
RMG crane				0	22	0	0

Port Equip Type	Equip ID	VIN	OEM	Equip			Fuel	Engine		Engine		
				Model	Year	Make		Model	kW	HP		
Rub-trd Gantry Crane	ZT12	JL51A-04-587	ZPMC	RC50.8/66	2004	Diesel	Caterpillar	3412	778	1043		
Rub-trd Gantry Crane	ZT13	JL51A-04-988	ZPMC	RC50.8/66	2004	Diesel	Caterpillar	3412	778	1043		
Rub-trd Gantry Crane	ZT14	JL51A-04-589	ZPMC	RC50.8/66	2004	Diesel	Caterpillar	3412	778	1043		
Rub-trd Gantry Crane	ZT15	JL51A-04-590	ZPMC	RC50.8/66	2004	Diesel	Caterpillar	3412	778	1043		
Rub-trd Gantry Crane	ZT34	JL51B-05-1074	ZPMC	RC50.8/66	2005	Diesel	Caterpillar	3412	778	1043		
Rub-trd Gantry Crane	ZT35	JL51B-05-1075	ZPMC	RC50.8/66	2005	Diesel	Caterpillar	3412	778	1043		

Equipment	Equipment Year	Fuel Type Code	Engine Tech	Equipment Power Rating KW	Equipment Population Count
Pick Stacker	2000	D	T1	194.0	1.0
Pick Stacker	2000	D	T1	261.1	1.0
Pick Stacker	2002	D	T1	261.1	10.0
Pick Stacker	2014	D	T4N	261.1	4.0
Pick Stacker	2015	D	T4N	261.1	2.0
Pick Stacker	2003	D	T1	182.8	1.0
Pick Stacker	2003	D	T1	246.2	2.0

자료: WPCAP, Worldwide CHE Inventories(검색일: 2025.5.1.)

4. 감축 조치 및 성과 관리⁷²⁾

1) 에너지 효율화 조치

(1) PSA 싱가포르, ESS·태양광 패널 연계 스마트그리드 구축⁷³⁾

PSA 싱가포르는 2022년, EMA(Energy Market Authority)와 협력하여 항만의 에너지 소비를 모니터링하고 최적화하기 위한 ESS와 태양광 패널이 포함된 스마트 그리드 관리 시스템을 구축하였다. PSA는 항만 운영상 시간대별 수요 변동이 크다는 점에 착안하여 EnOS™ 플랫폼을 도입, 수백 대의 하역장비, 터미널 건물 및 기타 자산의 운용 데이터를 실시간으로 수집·분석하고 머신러닝 기반 수요 예측을 통해 장비의 최적 스케줄링과 에너지 관리를 최적화하였다. 이를 통해 에너지 비용과 탄소 배출을 줄이는 동시에 ESS를 활용하여 항만의 에너지 부하를 관리하고, ESS가 활용되지 않는 기간에는 싱가포르 국가 전력 기장에 참여하여 전력망 보조 및 추가 수익을 창출, 항만 운영의 경제성과 지속가능성을 모두 확보하였다. 이 시스템은 항만 운영의 에너지 효율을 2.5% 개선하고 탄소배출을 연간 1,000tCO₂e까지 줄일 수 있는 잠재력을 가지고 있다고 평가되며, 향후 투아스항에도 적용될 계획이 있다.

이 사례는 하역장비의 전환, 개조를 넘어 운영 단계에서 하역장비 운영을 최적화하는 것이 에너지 소비를 줄이고 배출을 감축하는 주요 수단이 될 수 있음을 보여준다. 따라서 하역장비 운영 효율화는 에너지 전환과 병행 가능한 실질적 감축 수단이며 탄소중립 항만 실현을 위해 반드시 고려되어야 할 전략이다.

72) 하역장비 친환경화(전동화, 수소화 등)나 신재생에너지 활용 확대 등 에너지 전환과 관련된 내용은 포함하지 않음

73) EMA(2022.7.13.)(검색일: 2025.8.29.), UNIVERS(검색일: 2025.8.29.), MPA(2022) 자료를 바탕으로 저자 작성

〈그림 3-9〉 파시르 판장 터미널의 ESS



자료: EMA(2022.7.13.)(검색일: 2025.8.29.)

(2) PSA 싱가포르, 스마트 프라임 무버 개발⁷⁴⁾

PSA 싱가포르는 이송장비 탈탄소화 전략의 일환으로 디지털 기술을 적극 활용하여 전기 스마트 프라임 무버를 개발하고 있다. 이 장비는 온보드 진단을 통해 센서와 텔레매틱스를 활용, 급제동이나 과도한 급가속을 피하도록 하여 에너지 소모를 줄이는 에코 드라이빙을 가능하게 한다. 또한 AI를 활용해 에너지 효율을 높이기 위해 경로, 속도, 가속을 최적화하는 자율주행 기능을 시험하고 있으며 앞으로 지속 확대해 나갈 계획이다. 이러한 자율주행 기술 기반의 전기 프라임 무버는 경유 프라임 무버에 비해 컨테이너 이동당 온실가스 배출량을 약 50% 줄일 수 있을 것으로 평가된다.

74) MPA(2022), p. 15. 자료를 바탕으로 저자 작성

2) 탄소중립 인증제

(1) 일본 국토교통성, 항만 터미널의 탈탄소화 추진에 관한 인증 제도⁷⁵⁾

일본 국토교통성은 2025년 3월부터 탄소중립 실현을 위한 ‘항만 터미널의 탈탄소화 추진에 관한 인증 제도(이하 CNP(Carbon Neutral Port) 인증)’를 도입하였으며, 현재 가이드라인이 공표되었다.⁷⁶⁾ 가이드라인에 따르면, CNP 인증은 당분간 컨테이너 터미널만을 대상으로 하며, 그 이유로 첫째, 글로벌 공급망을 지원하는 컨테이너 운송은 국제 경쟁력 측면에서 탈탄소화가 요구된다는 점, 둘째, 컨테이너 터미널은 탈탄소화 대상 에너지원이 많으며, 저탄소 설비 도입 등 탈탄소화 노력이 진행 중이라는 점, 셋째, 컨테이너 운송은 ISO 규격이 있으며, 벌크 등에 비해 탈탄소화 평가의 표준화가 쉽다는 점 등을 내세우고 있다.

〈표 3-3〉 CNP 인증의 의의

인증의 목적	• CNP 구축을 위한 터미널의 대응을 투명하고 객관적으로 평가함으로써 탈탄소화 촉진
인증의 의의	• 탈탄소화 평가항목 및 지표가 제시됨으로써 탈탄소화 추진 경로가 구체화 • 터미널을 이용하는 화주, 선사, 물류사업자 등의 탈탄소화에 기여 • 터미널의 탈탄소화 노력 결과를 객관화함으로써 터미널 이해 관계자 및 사회에 호소 가능하고, 화주, 선사 등으로 선택받는 경쟁력 있는 항만 구축에 기여 • 인증제를 바탕으로 한 터미널 탈탄소화를 해외에 보급 확대 등을 통해 세계 수준에서 ‘녹색해운회랑’에 대한 일본의 주도적 역할에 기여
인증의 장점	• 탈탄소화 노력의 성과를 국토교통성에 의한 객관적인 평가로 가시화 • 인증 취득은 항만 이용자(화주, 선사, 물류사업자 등) 또는 자금조달처(투자자, 금융기관 등), 사회 전체에 대한 홍보 도구로 활용 • 항만 전체의 CNP 구축 분위기 조성 및 기업과 항만의 브랜드 파워 제고 • 인증제도의 해외 인지도 향상 및 국제 평가 획득에 기여

자료: 일본 국토교통성(검색일: 2025.9.8.)

75) 일본 국토교통성(검색일: 2025.9.8.), 일본 국토교통성(2025) 자료를 바탕으로 저자 작성

76) 일본 국토교통성(2025)

CNP 인증의 평가는 크게 ① 터미널에서 화물 취급 등에 관한 탈탄소화 대책, ② 터미널을 이용하는 선박 및 차량의 탈탄소화 기여 활동으로 나누어진다. 그 중 하역장비 관련 평가항목은 갠트리크레인(컨테이너크레인) 및 트랜스퍼크레인, 스트래들캐리어, 야드 트랙터(AGV 포함)와 기타장비를 포함하고 있으며 저탄소·탈탄소화 장비 도입률(%)을 기준으로 하여 레벨 1부터 5까지로 측정하게 된다.⁷⁷⁾

〈표 3-4〉 CNP 인증 평가 항목 및 지표

구분		평가항목		평가 지표	인증수준*					
		대분류	중분류(소분류)		Lv.1	Lv.2	Lv.3	Lv.4	Lv.5	
① 터미널 화물 취급 관련 탈탄소화	공통	약속	• 터미널 탈탄소화 계획	• 터미널의 탈탄소화를 위한 실효성 있는 계획 수립	○	○	○	○	○	
			• 터미널 화물 취급에 따른 CO ₂ 배출량 단위	• 해당 터미널에서의 화물 취급에 따른 CO ₂ 배출량 기준치 산정						
	시설·장비	하역 장비	안벽 하역	갠트리 크레인	• 인버터 제어 방식 갠트리 크레인의 도입	-	○ 10%	○ 50%	○ 80%	○ 100%
			야드 내 이송	트랜스퍼 크레인	• 전동화·하이브리드화 등 저·탈탄소화 장비 도입 및 자동화를 통한 연비 개선	-	○ 10%	○ 50%	○ 80%	○ 100%
				스트래들 캐리어	• 상동	-	○ 10%	○ 50%	○ 80%	○ 100%
				YT** 및 기타 장비	• 전동화·하이브리드화 등 저·탈탄소화 장비 도입	+	+	+	+	+
		야드 내 시설	조명		• LED 조명 도입 등	-	○ 10%	○ 50%	○ 80%	○ 100%
			리퍼시설, 기타 시설		• 리퍼 시설에 대한 반사열 저감 포장 및 지붕 설치 등을 통한 전력 절감과 온도 상승 억제, 관리동의 에너지 절약 등	+	+	+	+	+

77) 이상의 하역장비 중 갠트리크레인, 트랜스퍼크레인, 스트래들 캐리어 외의 야드 트랙터 및 기타 하역장비에 대해서는 일본 내에 아직 저탄소·탈탄소형 보급이 진전되지 않은 점을 고려하여 권장사항으로만(평가항목에 +표기) 두고 있음(자료: 일본 국토교통성(2025), pp.19-20.)

구분	평가항목		평가 지표	인증수준*				
	대분류	중분류(소분류)		Lv.1	Lv.2	Lv.3	Lv.4	Lv.5
② 터미널 이용 선박과 차량의 탈탄소화 기여	선박	정박 중인 선박	• AMP 도입 등을 통한 CO ₂ 배출량 감축 등	+	+	+	+	+
		친환경 연료 공급	• 터미널에 정박하는 선박에 LNG 등 저탄소 연료 또는 수소·암모니아 등 무탄소 연료의 공급 체계 유무 등	+	+	+	+	+
		이용 촉진	• 저탄소·무탄소 연료 선박 등에 대한 인센티브 또는 화석 연료 선박에 대한 페널티 도입	-	-	-	○	○
	차량	효율화	• 우선 통행 차로 설치 등 인센티브 또는 화석 연료를 동력원으로 사용하는 차량에 대한 페널티 도입	-	-	-	○	○
		이용 촉진	• 대형 상용 전기차(EV) 및 연료전지차(FCV) 등 도입 인센티브	+	+	+	+	+
③ 기타	위 ① 및 ②에 해당하지 않는 저탄소·탈탄소화 노력		• 저탄소·탄소 중립화 전력·연료 도입, 환경 친화적 태그보드 도입, 요소 등 배출가스 저감 기술 도입, 해상 대기 시간 단축에 기여하는 조치, 내륙 항만 이용 촉진, 블루 카본, 탄소 오프셋 조치	+	+	+	+	+

주: * 인증수준에서 ○표시는 요구사항, +표시는 권장사항, ** 야드 트랙터(YT)는 AGV를 포함
 자료: 일본 국토교통성(2025), pp. 12-13.

CNP 인증에서는 항만하역장비의 저탄소·탈탄소화 방식의 예시를 아래 <표 3-5>와 같이 제시하고 있다. 또한, 동 예시에 기재되지 않았더라도 항만의 저탄소·탈탄소화에 기여하는 조치는 평가대상에 포함한다는 점을 언급하고 있다.⁷⁸⁾ CNP 인증은 항만 터미널의 탈탄소화 평가항목 및 지표가

제시됨으로써 탈탄소화 추진 경로가 구체화된다는 것이 대표적인 의의로 볼 수 있다. 또한, 터미널은 인증 획득을 통해 항만 이용자 또는 투자자, 사회를 대상으로 한 홍보 도구로 활용될 수 있으며, 해외 인지도 및 다른 국제 평가 획득에도 도움이 된다는 점을 들 수 있다. 그러나, 현재까지는 인증 획득에 따른 세제 감면, 보조금 등의 실질적인 인센티브는 없는 것으로 파악된다.

〈표 3-5〉 CNP 인증제에서 하역장비의 탈탄소 전환방식 예시

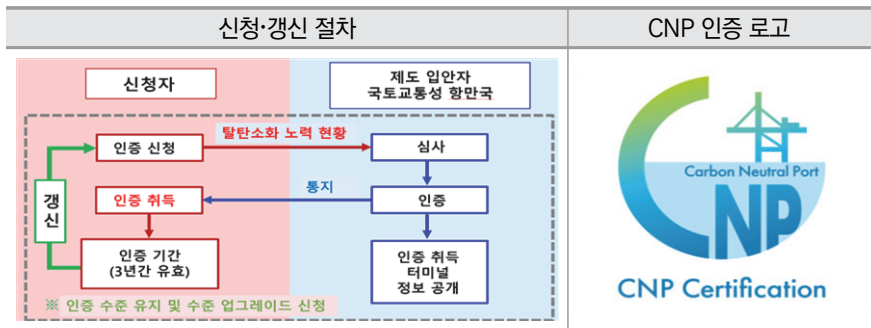
대상 장비	기존 방식	저탄소·탈탄소 방식의 예시
컨테리크레인	사이리스터 제어 방식	인버터 제어 방식, 하이브리드 방식, 수소 연료전지 방식, 수소 엔진 방식, 전동(배터리) 방식
트랜스퍼크레인	경유-전기 방식	전동(배터리) 방식, 하이브리드 방식, 수소 연료전지 방식
스트래들캐리어	경유-전기 방식	전동(배터리) 방식, 하이브리드 방식, 수소 연료전지 방식
야드 트랙터	경유 엔진 방식	연료전지 방식, 전동(배터리) 방식, 하이브리드 방식
포크리프트	경유 엔진 방식	연료전지 방식, 전동(배터리) 방식, 하이브리드 방식
리치스태커	경유 엔진 방식	연료전지 방식, 전동(배터리) 방식, 하이브리드 방식
탑 리프트	경유 엔진 방식	연료전지 방식, 전동(배터리) 방식, 하이브리드 방식
AGV	경유-전기 방식	전동(배터리) 방식

자료: 일본 국토교통성(2025.5.), p. 14.

현재 CNP 인증은 2025년 6월 30일부터 최초로 신청 접수가 시작되며 신청은 터미널 단위로 이루어진다. 공공터미널은 항만 관리청이 신청하고, 민간사업자가 운영하는 터미널은 터미널 운영자(또는 임차인)이 신청하는 방식이다. 인증 취득 시 유효기간은 3년이며, 신청자는 유효기간 이후 다시 인증 갱신을 신청할 수 있는 구조이다. 단, 신청자가 원할 시 인증 유효기간 내에서도 인증 레벨 변경은 신청이 가능하다.

78) 일본 국토교통성(2025), p. 14.

〈그림 3-10〉 CNP 인증 신청 절차 및 로고

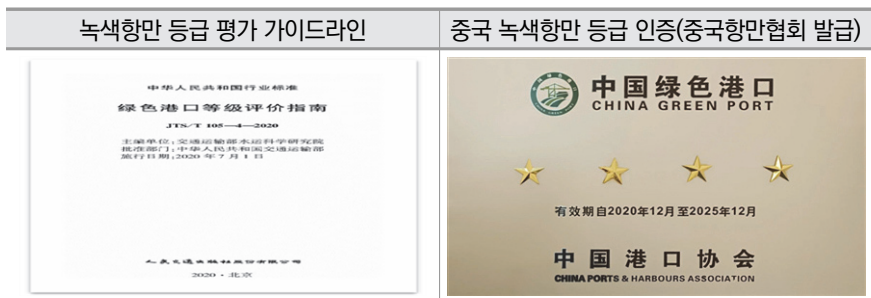


자료: 일본 국토교통성(검색일: 2025.9.8.)

(2) 중국 교통운수부, 녹색항만 등급 평가⁷⁹⁾

중국 교통운수부는 2013년 「녹색항만 등급 평가 가이드라인」(JTS/T 105-4-2013)을 제정하였고, 이를 기반으로 2020년 7월 1일부터 시행되는 개정판 「녹색항만 등급 평가 가이드라인」(绿色港口等级评价指南, JTS/T 105-4-2020)을 발표했다. 동 가이드라인은 항만의 친환경화 노력 정도를

〈그림 3-11〉 녹색항만 등급평가 가이드라인 및 인증서



자료: China Waterborne Transport Research Institute(2024.6.20.)

79) 중국 교통운수부(2020), China Waterborne Transport Research Institute(2024.6.20.), 우한시 교통운수국(검색일: 2025.9.8.) 자료를 바탕으로 저자 작성

객관적으로 평가하고 항만의 탈탄소 전환을 유도하는 것을 목적으로 하고 있다.

녹색항만 등급평가는 현재 운영 중인 컨테이너, 건화물, 액체화물, 크루즈 여객 터미널 등 모든 항만 터미널을 대상으로 한다. 평가 신청 대상은 최소 2년 이상 운영 실적이 있어야 하며, 신청 이전 최근 2년간 중대한 안전사고나 환경사고가 없어야 한다. 동 평가의 가장 큰 의의는 항만 분야에 구체적이고 표준화된 평가 지표 체계를 마련하여 각 항만의 친환경 발전 방향과 대응 조치를 명확히 제시했다는 점이다. 또한 항만 터미널은 교통운수부의 평가를 거쳐 ‘녹색항만’ 등급을 취득함에 따라서 대외적 신뢰도를 제고시키고, 항만 분야 전반에 우수 사례로 인정받아 다른 항만의 참여와 경쟁을 유도하는 긍정적 효과도 유발하고 있다. 참고로, 2024년 기준, 전국적으로 65개 터미널이 ‘녹색항만’으로 인증되었고, 이 중 58개 이상의 터미널이 4성급 이상으로 평가등급을 획득했다.⁸⁰⁾

녹색항만 등급평가는 ① 이념(理念), ② 행동(行动), ③ 관리(管理), ④ 효과(效果)의 4가지 평가 영역 아래 9개의 세부 평가분야 및 19개의 평가 지표로 구성된다. 평가항목 중 첫 번째 분야인 ‘이념’은 항만의 녹색발전에 대한 전략과 조직 문화를 다루며, 녹색성장 전략 수립 여부, 전담 예산 확보, 연간 실행계획의 수립 및 이행, 직원 교육훈련과 대내외 홍보활동 등이 포함된다.

〈표 3-6〉 녹색항만 등급평가의 주요 지표

항목(평가 비중)	내용	지표
이념 (10%)	전략	전략계획
		전용 자원
		업무계획

80) China Waterborne Transport Research Institute(2024.6.20.)

항목(평가 비중)	내용	지표
	문화	기업문화
		교육·훈련
		홍보활동
행동 (40%)	환경보호	오염 예방·통제
		자원 이용 및 생태보호
	에너지 절약·저탄소	주요 설비
		작업 공정
		에너지 소비
		보조 설비
관리 (15%)	체계	관리기구
		감사·인증
	제도	목표관리·평가
		통계·모니터링
효과 (35%)	수준	인센티브·규제
		환경보호·생태
		절약·저탄소

자료: 중국 교통운수부(2020), p. 4.

‘행동’ 분야는 항만 운영에서 실제로 시행하는 환경보호 및 에너지 절약·저탄소 기술 조치를 평가하는 영역으로 평가 비중이 가장 높다(40%). 이중 에너지 절약·저탄소 부분은 ① 주요 설비, ② 작업 공정, ③ 에너지 소비, ④ 보조 설비의 4가지 세부 지표들로 구분되며, 이중 하역장비와 관련된 지표는 ① 주요 설비와 ③ 에너지 소비라고 할 수 있다. 먼저, ① 주요 설비에서 하역장비들의 에너지 효율화 기술 적용을 평가 지표로 삼고 있으며, 장비의 에너지 회생제동 기술, 가변주파수(VFD, Variable-frequency Drive) 또는 직류 구동기술 사용 등 전동제어 시스템을 활용한 장비의 에너지 효율화가 포함된다. ③ 에너지 소비에서는 하역장비에서 신재생에너지를 엔진 동력원으로 사용하거나 연료전지와 축전지 또는 전기 구동방식

적용 등 평가지표로 활용된다. 아래 <표 3-7>은 컨테이너터미널의 ‘행동’ 부분의 하역장비 관련 배점 방식을 정리한 것이다.⁸¹⁾

<표 3-7> ‘행동’ 분야에서 하역장비 관련 배점 방식 (컨테이너터미널)

항목	내용	지표	계산 방법
행동 (100점)	에너지 절약·저탄소 (50점)	① 주요 설비 (20점)	(1) 갠트리크레인에 에너지 회생제동 기술 적용 (2) 야드크레인에 에너지 회생제동 기술 적용 (3) 갠트리크레인에 가변주파수 또는 직류 구동 기술 적용 (4) 야드크레인에 가변주파수 또는 직류 구동 기술 적용 ※ 위 네 가지 요건 중 4개 이상을 충족할 경우 16~20점, 3개 충족 시 11~15점, 2개 충족 시 6~10점, 1개 충족 시 1~5점 부여
		③ 에너지 소비 (10점)	(1) 항만하역장비의 엔진 동력원으로 청정에너지 또는 신에너지를 사용하거나 연료전지·축전지 또는 전기 구동 방식을 적용 (2) 항만 예선(曳船)에 청정에너지 또는 신에너지를 엔진 동력원으로 사용하거나 연료전지 또는 축전지 구동 방식을 적용 (3) 태양에너지, 풍력에너지 또는 지열·해수·공기열원 열펌프 등의 기술을 도입 및 적용 ※ 위 세 가지 요건 중 3개 이상 충족 시 6~10점, 2개 충족 시 3~5점, 1개 충족 시 1~2점 부여

주: 지표의 () 점수는 만점을 의미함
자료: 중국 교통운수부(2020), pp. 6~7.

그 외 녹색항만 등급평가에서 ‘관리’ 분야는 녹색경영을 위한 조직 체계와 제도 구축 측면의 평가 영역으로서(15%), 운영 주체의 환경경영 조직구성, 내부 목표관리 및 성과평가 제도, 환경정보 모니터링 및 보고 체계, 국제 표준 인증 취득 여부 등을 평가하고 있으며, ‘효과’ 분야는 항만 운영의 실질적인 환경성 성과를 정량적으로 측정하는 분야로(35%), 항만에서 발생하는 오염물질의 배출량, 에너지 소비량 및 탄소배출 효율 등을 평가한다.

81) 평가 대상 터미널이 컨테이너, 건화물, 액체화물, 크루즈 터미널에 따라 배점이 상이함

녹색항만 등급평가는 현재 신청 업체의 자발적인 인증제 형태로 운영된다. 평가는 교통운수부 산하의 중국항만협회에서 주관하며, 인증을 희망하는 항만 터미널 운영사는 자체 평가보고서와 신청서를 협회에 제출하여 등급 심사를 요청한다. 중국항만협회는 산학연 전문가들로 구성된 평가위원회를 통해 제출 자료를 검토하고 현장 실사를 시행한 뒤, 표준 기준 충족 여부를 종합 판단하여 해당 항만의 등급을 결정하게 된다.⁸²⁾ 평가를 통과한 항만 터미널은 중국항만협회를 통해 공식 녹색항만 인증서가 발급되며, 등급은 3~5성급으로 나누어진다. 3성급의 경우 종합 점수 75점 이상~85점 미만을 획득해야 하며, 최고 등급인 5성급 녹색항만은 평가 종합점수 95점 이상(‘행동’ 분야 90점 이상)을 획득해야 한다.

5. 국외 사례 분석의 시사점

앞서 살펴본 바와 같이 국내 하역장비 탄소배출 저감 논의는 전동화 장비 전환과 신재생에너지 활용 확대 등 에너지 전환 중심으로 이루어지고 있다. 그에 반해, 주요국과 글로벌 주요 항만들은 에너지 전환과 함께 하역장비 운행 과정에서 발생하는 배출을 지속적으로 모니터링하고 데이터를 통해 파악하며 그 성과를 인정하고 확산하는 체계를 구축하고 있다. 이러한 국외 사례 분석을 통해 얻을 수 있는 구체적인 시사점은 다음과 같다.

첫째, 장기적으로 장비의 배출 수준에 대한 규제를 강화할 필요가 있다. 미국 캘리포니아주는 기존 경유 장비만을 대상으로 하던 규제를 LNG, CNG 등 기타 화석연료까지 확대하고, 궁극적으로 무공해를 달성하기 위한 규제 개정안을 준비 중에 있다. 이는 오염 수준이 높은 장비부터 단계적

82) 우한시 교통운수국(검색일: 2025.9.8.)

으로 전환을 유도하는 접근이며, 결과적으로 이러한 규제는 NO_x, PM 등 특정 오염물질만을 줄이는 것이 아니라 온실가스 감축에도 기여할 수 있다. 반면, 국내는 현재 경유 원동기 기반의 하역장비에 한정되어 있는데, 이러한 사례를 참고하여 경유 장비를 우선적으로 전환하도록 유도하고 장기적으로는 LNG 장비에 대해서도 점진적으로 전환하도록 추진할 필요가 있다.

둘째, 표준화된 배출량 산정체계와 데이터 기반 관리도구 구축이 필요하다. 주요국들은 항만 인벤토리 가이드라인, 항만 배출량 산정 가이드라인 등을 통해서 하역장비의 배출량을 산정하기 위해 필요한 활동자료, 산정 방법, 장비별 배출계수, 활용 지표 등을 구체적으로 명시하고 있다. 또한 가이드라인과 연계하여 표준화된 배출량 산정 도구도 제공하고 있다. 이러한 체계는 실무자의 편의성을 높일 뿐 아니라 관계자가 모두 동일 기준으로 배출량을 산정할 수 있게 함으로써 타 항만과의 비교, 정책 효과 분석 이행 성과 평가 등이 가능하도록 한다. 그러나 국내는 아직 이러한 데이터 관리체계가 미흡하여 하역장비의 배출을 파악하고 정책을 설계하거나 이행 성과를 분석하는 데 어려움이 있다.

셋째, 효율향상 기술 및 장비전환을 연계한 지원체계 마련이 필요하다. 글로벌 항만은 전동화뿐 아니라 효율향상 기술 투자, 항만 에너지 소비 최적화 등의 전략을 병행하여 장비 운행 전 과정을 고려한 배출 감축 방안을 마련하고 있다. 특히 우리나라도 크레인류의 전기화가 상당히 진행되었고, 향후 야드 트랙터 등도 전기화가 확대될 전망이다. 그러나 전기화 이후의 간접배출 역시 탄소중립 관점에서는 감축 대상이므로 장비별, 장비군별, 터미널 전체 운영 차원의 효율을 향상할 수 있는 기술적, 운영적 조치를 추진할 필요가 있다.

넷째, 친환경 장비 도입 실적을 터미널 환경성과 연계하는 성과관리체계 구축이 필요하다. 일본과 중국은 친환경 장비 도입 실적을 터미널 인증·

평가 등 환경성으로 연계함으로써 하역장비 부문의 감축노력이 기업 성과로 인정되는 체계를 마련하고 있다. 이러한 방식은 기존 장비의 전환뿐 아니라 신규 터미널 개발이나 신규장비 구매 시에도 친환경 노력이 인정되며, 기업의 평가, 이미지 등 개선에 도움을 줄 수 있어 지속적 참여 유도가 가능하게 한다. 따라서 국내에서도 친환경 장비 도입 실적을 터미널 성과관리체계에 반영하기 위한 체계를 마련하는 것이 요구된다.

제2절 타 부문 정책수단

1. 법제도 마련

1) 자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준

기후에너지환경부는 자동차 제작사(수입사 포함)별 연간 판매된 차량의 평균 온실가스 배출량이 기준 이하가 되도록 하여 온실가스 저배출 차량의 확산을 유도하기 위해 2012년부터 자동차 온실가스 배출허용기준을 마련하여 운영하고 있다. 규제 적용 대상은 15인승 이하 승용자동차, 승합자동차, 총 중량 3.5톤 미만 자동차 및 화물자동차로, 자동차제작자는 평균에너지소비효율기준과 온실가스 배출허용기준 중 한 기준을 선택하여 준수하여야 한다. 이 기준을 미달하는 경우 초과분에 따라 과징금⁸³⁾이 부과된다. 구체적인 기준과 적용, 관리 방안은 「탄소중립기본법」, 「대기환경보전법」, 「자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시」⁸⁴⁾에 명시되어 있다.

83) 기준초과량(g/km)×판매대수(대)×과징금 요율(5만원), 단, 총 과징금은 매출액의 1% 이내 상한 적용

84) 환경부고시 제2025-165호

이러한 규제는 자동차의 설계 및 제조 단계에서의 에너지 효율 개선을 촉진하는 접근법으로, 장기적으로 수송 부문 전체의 에너지 효율 향상에 기여한다. 최근에는 규제가 점차 강화되면서 전기차, 수소차 등 무공해차량의 시장 점유율이 빠르게 증가하는 성과를 보이고 있다.

〈표 3-8〉 제작자동차의 온실가스 배출허용기준

구분	부문
탄소중립 기본법	제32조(녹색교통의 활성화) ① (생략) ② 정부는 자동차의 평균에너지소비효율을 개선함으로써 에너지 절약을 도모하고, 자동차 배기가스 중 온실가스를 줄임으로써 쾌적하고 적절한 대기환경을 유지할 수 있도록 자동차 평균에너지소비효율기준 및 자동차 온실가스 배출허용기준을 각각 정하여야 한다. 이 경우 「 대기환경보전법 」 제46조제1항에 따른 자동차제작자는 자동차 평균에너지소비효율기준과 자동차 온실가스 배출허용기준 중 하나를 선택하여 준수하여야 한다. ③-⑥ (생략)
대기환경 보전법	제76조의2(자동차 온실가스 배출허용기준) 자동차제작자는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 제32조제2항에 따라 자동차 온실가스 배출허용기준을 택하여 준수하기로 한 경우 기후에너지환경부령으로 정하는 자동차에 대한 온실가스 평균배출량이 기후에너지환경부장관이 정하는 허용기준(이하 “온실가스 배출허용기준”이라 한다)에 적합하도록 자동차를 제작·판매하여야 한다.

자료: 탄소중립기본법 제32조, 대기환경보전법 제76조의2

2) 건설기계 배출가스 정기검사

건설기계는 하역장비와 마찬가지로 건설기계의 안전 운행 등을 위한 검사제도를 운영하고 있다. 건설기계 소유자는 건설기계 운용을 위해 신규 등록검사, 정기검사, 구조변경검사, 수시검사 등을 수행하여야 하며, 특히 정기검사 시에는 「대기환경보전법」 제62조에 따른 배출가스 정기검사를 수행해야 한다. 이는 비록 대기오염물질 규제에 초점을 두고 있으나, 건설기계의 운행 단계에서 주기적으로 배출허용기준을 충족하는지 점검하기 위한 관리체계가 마련되어 있다는 점에서 중요한 시사점을 제공한다.

〈표 3-9〉 건설기계 정기검사 항목(배출가스 정기검사 포함)

구분	부문
건설기계 관리법	제13조(검사 등) ① 건설기계의 소유자는 그 건설기계에 대하여 다음 각 호의 구분에 따라 국토교통부령으로 정하는 바에 따라 국토교통부장관이 실시하는 검사를 받아야 한다. 1. (생략) 2. 정기검사: 건설공사용 건설기계로서 3년의 범위에서 국토교통부령으로 정하는 검사유효기간(이하 “검사유효기간”이라 한다)이 끝난 후에 계속하여 운행하려는 경우에 실시하는 검사와 「 대기환경보전법, 제62조 및 「소음·진동관리법, 제37조에 따른 운행차의 정기검사 」 3.-4. (생략) ②-⑪ (생략)
대기환경 보전법	제62조(운행차의 배출가스 정기검사) ① 자동차 〔자동차관리법, 제3조제1항제5호에 따른 이륜자동차(이하 “이륜자동차”라 한다)는 제외한다. 이하 이 항에서 같다〕의 소유자는 「자동차관리법, 제43조제1항제2호와 「건설기계관리법, 제13조제1항제2호에 따라 일정 기간마다 그 자동차에서 나오는 배출가스가 운행차배출허용기준에 맞는지 를 검사하는 운행차 배출가스 정기검사를 받아야 한다. 다만, 저공해자동차 중 기후에 저지환경부령으로 정하는 자동차와 제63조에 따른 정밀검사 대상 자동차의 경우에는 해당 연도의 배출가스 정기검사 대상에서 제외한다. ②-⑧ (생략)

자료: 건설기계관리법 제13조, 대기환경보전법 제62조

3) 노후·고배출 자동차·건설기계 운행 규제

「대기환경보전법」 제58조는 자동차와 건설기계를 대상으로 한 저공해 전환·개조 및 조기폐차의 법적 근거를 규정하고 있다. 이 조항에 따라 지자체장은 관할 지역의 대기질 개선이나 온실가스 감축이 필요하다고 판단되는 경우 자동차 및 건설기계의 차령과 배출정도를 기준으로 저공해자동차 및 저공해건설기계로의 전환·개조를 명령하거나 조기폐차를 권고할 수 있다. 조기폐차 권고 대상은 일정 기간 이상 등록된 노후·고배출 자동차 및 건설기계 중 정상 가동이 가능성이 확인된 자동차 및 건설기계이며, 이러한 전환을 지원하기 위해 자금을 보조하거나 융자하는 것도 가능하다. 또

한 이 규정은 자동차에 「항공사업법 시행령」에 따른 항공기취급업(항공기 급유업, 항공기하역업, 지상조업사업)의 장비도 포함하고 있다는 점에서도 주목된다. 이러한 제도는 노후·고배출 장비의 체계적 퇴출과 친환경 장비로의 전환을 제도적으로 유도한다는 점에서 의미가 크다.

〈표 3-10〉 저공해자동차·건설기계 운행 규제

분야	부문
대기환경 보전법	제58조(저공해자동차의 운행 등) ① 시·도지사 또는 시장·군수는 관할 지역의 대기질 개선 또는 기후·생태계 변화유발물질 배출감소를 위하여 필요하다고 인정하면 그 지역에서 운행하는 자동차 및 건설기계 중 차량과 대기오염물질 또는 기후·생태계 변화유발물질 배출정도 등에 관하여 기후에너지환경부령으로 정하는 요건을 충족하는 자동차 및 건설기계의 소유자에게 그 시·도 또는 시·군의 조례에 따라 그 자동차 및 건설기계에 대하여 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 조치를 하도록 명령하거나 조기에 폐차할 것을 권고할 수 있다. 1.-3. (생략) ② (생략) ③ 국가나 지방자치단체는 저공해자동차 및 저공해건설기계의 보급, 배출가스저감장치의 부착 또는 교체와 저공해엔진으로의 개조 또는 교체를 촉진하기 위하여 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자에 대하여 예산의 범위에서 필요한 자금을 보조하거나 융자할 수 있다. 1.-4. (생략) 5. 제1항에 따른 권고에 따라 자동차 또는 건설기계를 조기에 폐차하는 자 6. (생략) ④-⑯ (생략)
대기환경 보전법 시행규칙	제79조(저공해 조치 대상 자동차 및 건설기계) ① 법 제58조제1항 각 호 외의 부분에서 “기후에너지환경부령으로 정하는 요건을 충족하는 자동차 및 건설기계”란 다음 각 호의 구분에 따른 자동차 및 건설기계를 말한다. 1. 다음 각 목의 구분에 따른 요건을 충족하는 자동차 가. 별표 18에 따른 배출가스 보증기간이 지난 자동차: (생략) 나. 「항공사업법 시행령」 별표 7 제2호에 따른 장비 기준에 해당하는 자동차: 2006년 전에 제작된 자동차 2. 건설기계: 별표 17 제4호가목에 따른 배출허용기준에 맞게 제작되었거나 2003년 12월 31일 이전에 제작된 지게차 또는 굴착기 ② 법 제58조제1항 각 호 외의 부분에서 조기 폐차 권고 대상이 되는 자동차 및 건설기계는 제1항제1호·제2호에 따른 자동차 및 건설기계 중 다음 각 호의 요건을 모두 갖춘 자동차 및 건설기계를 말한다. 1. 조기에 폐차할 것을 권고하는 시점부터 거꾸로 계산하여 6개월 이상 연속하여 등록된 자동차 및 건설기계

분야	부문
	2. 다음 각 목의 검사 결과 적합판정을 받은 자동차 및 건설기계 가. 「자동차관리법」 제43조의2제1항제1호에 따른 관능검사(官能検査, 사람의 감각기관으로 자동차의 상태를 확인하는 검사를 말한다) 나. 「건설기계관리법」 제13조제1항제2호에 따른 정기검사 3. 지방자치단체 또는 법 제58조제14항에 따라 절차를 대행하는 자가 발급한 조기 폐차 대상 차량 확인서상에 정상가동 판정이 있는 자동차 및 건설기계 ③ (생략)

자료: 대기환경보전법 제58조, 대기환경보전법 시행규칙 제79조

2. 데이터·MRV 기반 구축

1) 건설기계 등록

국내에서 건설기계를 운행하기 위해서는 하역장비와 같이 관리청에 등록하는 절차가 필요하다. 건설기계를 등록할 때에는 건설기계 제원표를 제출하여야 하며, 제출하는 제원정보는 모든 장비가 동일한 항목을 제출하는 것이 아니라, 장비 구조나 동력에 따라 타이어식, 무한궤도식 등, 타워크레인으로 구분하여 서로 다른 제원정보를 수집하도록 구성되어 있다. 구체적으로 엔진을 장착한 장비는 엔진형식, 연료유형, 기통수, 최고출력 등을 기본 제원으로 수집하며(타이어식, 무한궤도식, 타워크레인 등), 타워크레인의 경우 전압, 전류, 출력 등 전기 관련 제원을 중심으로 데이터를 수집한다. 한편, 이러한 정보는 조기폐차 지원사업, 엔진교체사업, 전동화 개조사업 등 다양한 정책사업의 근거로도 활용되고 있다.

이는 하역장비에도 시사점을 제공한다. 하역장비 관리 정책 설계를 위해서는 어떤 연료를 쓰고있는지, 어떤 동력 구조를 갖는지와 같은 기본 제원 정보가 확보되어야 기초자료로서 활용이 가능하다. 또한 하역장비는 건설기계처럼 원동기식 장비와 전기구동 장비가 혼재되어 있으므로 장비별 특

〈그림 3-12〉 건설기계(타이어식, 무한궤도식 등, 타워크레인)제원표

자료: 건설기계관리법 시행규칙 [별지 제3호서식], [별지 제3호의2서식], [별지 제3호의3서식]

85) 한국에너지공단, 산업부문 온실가스 배출통계(검색일: 2025.11.28.), 한국에너지공단, 국가온실가스 배출량 종합정보 시스템(검색일: 2025.11.28.) 자료를 바탕으로 저자 작성

2011년 이전까지는 산업, 가정·상업, 수송 통계 조사를 추진하였으나, 이후에는 부문별 관장기관 원칙에 따라 매년 산업부문 통계조사만 실시하고 있다.

조사는 주로 사전에 섭외하여 방문조사로 진행되며, 조사 항목은 ① 사업장별·연소설비별 에너지사용량, ② 온실가스 배출량, ③ 생산품목 정보, ④ 에너지 사용설비 현황 등으로 구성된다. 이렇게 수집된 데이터는 국가 온실가스 배출량 종합정보시스템(NETIS)에 데이터베이스화 되어 체계적으로 저장·관리되며, 이 플랫폼을 통해 각종 통계를 제공한다.

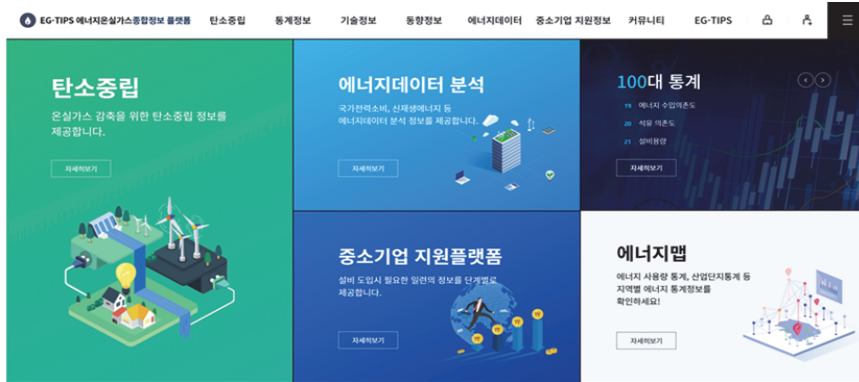
산업부문 에너지사용 및 온실가스 배출량 조사 제도는 기후변화협약 대응을 위한 기초자료 확보와 온실가스 감축잠재량 분석, 배출권거래제 기초자료 제공 등에 기여하고 있다. 그러나, 이 제도는 조사대상이 광업·제조업에 집중되어 전 산업을 포괄하지 못하며, 5인 미만 사업장에 대해서는 표본 조사를 진행 하여 소규모 배출원이 누락된다는 한계점이 있다.

3) 산업부문 에너지·온실가스 종합정보 플랫폼(이하 EG-TIPS)⁸⁶⁾

EG-TIPS는 한국에너지공단이 운영하는 에너지절감 및 온실가스감축 종합 플랫폼으로, 2015년 홈페이지가 오픈되었다. 홈페이지에서는 정부 사업과 관련된 유관 기술정보, 업종·설비별 절감기법 및 적용사례 DB, 에너지 및 온실가스 통계, 국내외 탄소중립 정책 및 기술 동향, 중소기업 지원정보, 온실가스 분석 모형 등 매우 다양한 정보를 제공하고 있다. 이 플랫폼은 에너지절감기술 지식 허브의 역할과 국내 에너지서비스산업 육성, 민간 주도 에너지절약 투자사업 활성화 등을 목적으로 한다.

86) EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼(2025.5.1.), EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼, EG-TIPS 소개(검색일: 2025.10.4.), 박윤석(2015.3.11.)(검색일: 2025.10.4.) 자료를 바탕으로 저자 작성

〈그림 3-13〉 EG-TIPS 메인 화면



자료: EG-TIPS 에너지온실가스통합정보 플랫폼(2025.5.1.)

4) 교통부문 온실가스 관리시스템(이하 KOTEMS)⁸⁷⁾

국토교통부는 교통부문 온실가스 배출정보를 체계적으로 관리하고 온실가스 저감 정책을 효율적으로 지원하기 위한 시스템인 KOTEMS를 구축·운영하고 있다. 2012년부터 서비스를 제공하기 시작하였으며, 대내외 정책 및 여건 변화를 고려하여 지속 기능 고도화를 추진하고 있다. KOTEMS의 주요 시스템은 교통물류 부문 온실가스 배출정보 시스템, 온실가스 목표관리 지원시스템, 온실가스 감축정책 효과 평가 시스템으로 구성된다. KOTEMS는 「지속가능 교통물류 발전법」, 「탄소중립기본법」 등에 근거를 두고 있으며, 현재 이 시스템은 교통안전공단에서 위탁·운영하고 있다.

온실가스 인벤토리와 관련하여 KOTEMS는 국내 교통부문(도로, 철도, 항공, 해운) 온실가스 배출량, 교통수단별 연료 사용량, 온실가스 원단위 정보, 배출계수 등을 제공하고 있다. 특히, 국가 통계 차원의 Tier 1 수준

87) 교통부문 온실가스 관리시스템(검색일: 2025.7.25.), 국토해양부 보도자료(2012.11.19.)(검색일: 2025.11.10.), 이규진 외(2017) 자료를 바탕으로 저자 작성

배출량뿐 아니라 국가 통계에서 제공하지 않는 Tier 2 기반의 교통부문 세부 배출정보와 통행량, 평균속도 등 운전조건 데이터를 활용하여 시·군·구 및 도로 유형별 Tier 3 배출량 산정 정보도 제공하여 온실가스 통계의 정밀도를 높이고 있다. 아울러 KOTEMS는 감축전략별 온실가스 저감효과를 평가하는 교통정책평가 기능도 제공하고 있으며, 이는 교통부문 이행계획을 상시 모니터링, 점검하고 수송부문 감축 이행계획 수립에 활용되고 있다.

〈그림 3-14〉 KOTEMS



자료: 교통부문 온실가스관리 시스템, KOTEMS 소개-지자체 교통(검색일: 2025.11.10.)

3. 녹색기술⁸⁸⁾ 보급·지원사업 추진

1) 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업⁸⁹⁾

산업계 에너지관리시스템 보급지원사업은 사업장의 에너지 효율 향상 및 온실가스 감축을 체계적으로 유도하기 위하여 중소·중견기업을 대상으로 에너지관리시스템 도입 컨설팅 및 인프라 구축을 지원하는 사업이다. 이 사업은 「에너지이용합리화법」 제28조의2와 「에너지경영시스템의 지원 등에 관한 규정」에 근거하여 추진되며, 산업통상자원부가 사업을 총괄하고 한국에너지공단이 운영하고 있다. 지원사업장(수요기업)은 컨설팅 및 시스템 구축을 담당하는 전문기업과 사업 컨소시엄을 구성하여 참여할 수 있으며, 지원대상은 연간 에너지사용량이 500toe 이상인 중소·중견기업이다. 비용은 사업장 규모 및 에너지사용량에 따라 1억 원에서 2억 원까지 차등 지원하며, 지원사업장은 인프라 구축 완료 후 10일 이상의 실제 데이터를 기반으로 사업결과보고서를 한국에너지공단에 제출하여야 한다.

이 사업은 단순한 시스템 설치 지원을 넘어 사업장의 에너지관리체계를 정립하고 지속적으로 성과를 개선할 수 있도록 하는 데이터 기반 관리인프라를 확충하는 데 기여한다. 또한 기업의 투자 부담을 완화하고 실시간 모니터링을 통해 에너지 효율을 향상하는 등 기업의 관리 역량을 강화하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

88) 본 연구에서 '녹색기술'은 탄소중립기본법 제2조제16항을 참조하여 '기후변화대응 기술(「기후변화대응 기술개발 촉진법」 제2조제6호에 따른 기후변화대응 기술을 말한다), 에너지 이용 효율화 기술, 청정생산 기술, 신·재생에너지 기술, 자원순환(「순환경제사회 전환 촉진법」 제2조제6호에 따른 자원순환을 말한다. 이하 같다) 및 친환경 기술(관련 융합기술을 포함한다) 등 사회·경제 활동의 전 과정에 걸쳐 화석에너지의 사용을 대체하고 에너지와 자원을 효율적으로 사용하여 탄소중립을 이루고 녹색성장을 촉진하기 위한 기술'로 정의함

89) 한국에너지공단, 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업(검색일: 2025.11.13.) 자료를 바탕으로 저자 작성

2) 무공해건설기계 보급 및 전동화 개조 지원사업⁹⁰⁾

기후에너지환경부는 미세먼지 감축, 탄소중립 달성 등을 위해 경유 중심의 건설기계를 무공해 장비로 전환하기 위하여 전기 굴착기 및 수소 지게차를 신규로 구매하는 개인 및 법인에게 구매 보조금을 지원하고 있다. 이 사업은 「대기환경보전법」에 근거하고 있지만, 전기굴착기·수소지게차 등 무공해 장비로의 전환을 지원함으로써 연료연소 기반 배출원이 제거되어 온실가스 감축으로도 직접적으로 이어지는 전환형 사업이다. 전기굴착기의 경우 배터리 용량, 모터 정격출력, 총중량 등에 따라, 수소지게차의 경우 최대 들어올림 용량에 따라 보조금이 차등화된 구조로 설계되어 있어 가격, 성능 차이를 반영한 지원체계를 구축하고 있다. 한편, 무공해 건설기계 보조금을 받은 경우 8년간 의무운행을 하여야 하며 의무운행기간을 충족하지 못한 경우 보조금 환수가 이루어진다. 또한 기후에너지환경부는 2024년부터 건설기계 중 2톤급 경유 지게차를 전동화로 개조하는 경우 비용을 지원 하는 사업도 추진하고 있다. 이 사업은 자기부담금 없이 전액 지원하며 배터리 유형에 따라 지원비용에 차이가 있다.

이러한 보조사업과 더불어, 건설기계는 전동화 초기 단계로서 기술개발 등 과제가 존재하는 상황으로, 건설기계를 관장하는 기후에너지부에서는 전동화에 대한 중장기 이행 로드맵을 마련하고 재정지원을 강화함과 함께 산업 생태계 육성 및 지원방안을 마련할 계획임을 밝혔다. 이러한 접근은 하역장비 분야에 시사점을 제공하는데, 친환경 장비로의 전환뿐 아니라 기존 장비의 개조 지원도 필요하며, 장비 전환 속도를 뒷받침할 수 있도록 친환경 장비 관련 기술개발 추진 역시 병행될 수 있도록 하는 정책 설계가 필요하다.

90) 기후에너지환경부 수도권대기환경청(검색일:2025.10.24.), 환경부(2025), 환경부 보도자료(2025.9.4.) (검색일: 2025.10.24.) 자료를 바탕으로 저자 작성

4. 감축 조치 및 성과 관리

1) 제로에너지건축물 인증제(이하 ZEB 인증제)⁹¹⁾

ZEB 인증제는 건물부문 온실가스 감축목표(2030년까지 32.8% 감축) 달성을 위해 2017년 1월 도입되었다. 이 제도는 「녹색건축물 조성 지원법(이하 녹색건축법)」 제17조, 동법 시행령 제12조 등을 근거로 하며, 2020년부터 공공건축물 중심으로 단계적 의무화를 추진 중이다. 2020년 연면적 1,000㎡ 이상 공공건축물을 시작으로 2023년 500㎡ 이상까지 확대되었으며, 2025년부터는 건축물에너지효율등급 및 ZEB 인증제를 통합하고 민간건축물까지 확대할 예정이다.

ZEB 인증제는 국토교통부와 산업통상자원부가 공동 관장하며, 한국에너지공단이 운영기관, 6개 기관이 인증기관으로 지정되어 있다. 인증기준은 ① 에너지자립률(20~120% 이상), ② 연간 단위면적당 1차에너지소요량, ③ 건축물에너지관리시스템(이하 BEMS) 설치로 구성되며, 에너지자립률에 따라 ZEB+ 등급부터 ZEB 5등급까지 부여된다. ZEB 인증을 취득하기 위해서는 ① 또는 ②와 ③을 만족하여야 하며, 인증등급은 ① 또는 ② 중 높은 등급산정 기준을 ZEB 인증등급으로 한다. 인센티브는 인증 등급별로 차등하여 제공되며, 건축기준 최대 완화 비율(최대 15%), 취득세 감면(최대 20%), 주택도시기금 대출한도 상향(20% 한도), 신재생에너지 보조금 가점 부여, 기반시설 기부채납률 경감(최대 15%) 등이 제공된다.

공공부문 ZEB 의무화 이후 인증 건축물이 급증하고 있으며, BEMS 의무화와 함께 건축물 에너지관리 스마트화에 기여하고 있다. 그러나 신재생에

91) 관계부처 합동(2021), 제로에너지건축물, 인증제도 기준(검색일: 2025.11.17.), 제로에너지건축물, 인센티브(검색일: 2025.11.17.), 제로에너지건축물, 운영기관 및 인증기관(검색일: 2025.11.17.), 한국에너지공단(검색일: 2025.11.17.) 자료를 바탕으로 저자 작성

너지 설비(태양광 등), 고효율 단열재, 에너지 관리 시스템 등 초기 투자비용과 관련 유지보수 비용이 일반 건축물 대비 높아 민간 확산에 어려움이 있다. 또한, 중소기업의 BEMS 운영부담과 전문인력 부족, 인증 이후 사후관리체계 미흡 등이 한계로 지적되고 있다.

2) 에너지진단사업⁹²⁾

에너지진단사업은 에너지다소비업자의 에너지낭비요소를 발굴, 분석하는 기술컨설팅 제도로, 에너지절약 기반 강화 및 온실가스 배출 감축을 목적으로 한다. 법적 근거는 「에너지이용 합리화법」 제32조(에너지진단 등), 제57조(사업) 등이며, 동법 시행령 및 시행규칙, 「에너지진단 운용규정」(산업통상자원부 고시)에 따라 운영되고 있다. 상기 법에 따라 연간 에너지사용량 2,000toe 이상의 에너지다소비업자는 3년 또는 5년 주기로 의무적으로 에너지진단을 받아야 하며, 산업통상자원부 주관하에 한국에너지공단⁹³⁾이 사업을 운영하고 있다. 다만, 의무진단 대상이 아니더라도 자발적 신청 시 에너지진단사업에 참여할 수 있다. 2025년 기준, 84개 진단기관이 지정되어 있으며, 2024년 기준, 총 896개 사업장에 대해 에너지진단을 수행하여 온실가스 감축잠재량 1,748천tCO₂/년을 도출하였다.

에너지진단에서는 사업장의 에너지이용 현황파악, 손실요인 발굴, 에너지 절감을 위한 개선안 제시 등이 이루어지며, 이를 통해 에너지다소비업자는 에너지효율 개선활동을 위한 투자비와 투자비에 대한 경제성, 개선활동에 따른 에너지/온실가스 저감 기대효과에 대한 정보를 제공받는다. 이러한 에너지진단사업은 사업자에게 에너지 절약 및 온실가스 감축 활동에

92) 한국에너지공단 에너지진단제도 ONE-STOP 전자민원, 제도개요(검색일: 2025.11.17.), 한국에너지공단 에너지진단제도 ONE-STOP 전자민원, 진단기관 현황(검색일: 2025.11.17.), 한국에너지공단, 에너지진단사업(검색일: 2025.11.17.) 자료를 바탕으로 저자 작성

대한 기술정보와 경제성 분석을 제공함으로써 자발적 효율 개선 투자를 유도하고 감축 성과를 확산하는데 중요한 역할을 하고 있다.

3) 에너지절약기술 정보협력사업(이하 ESP⁹³⁾)⁹⁴⁾

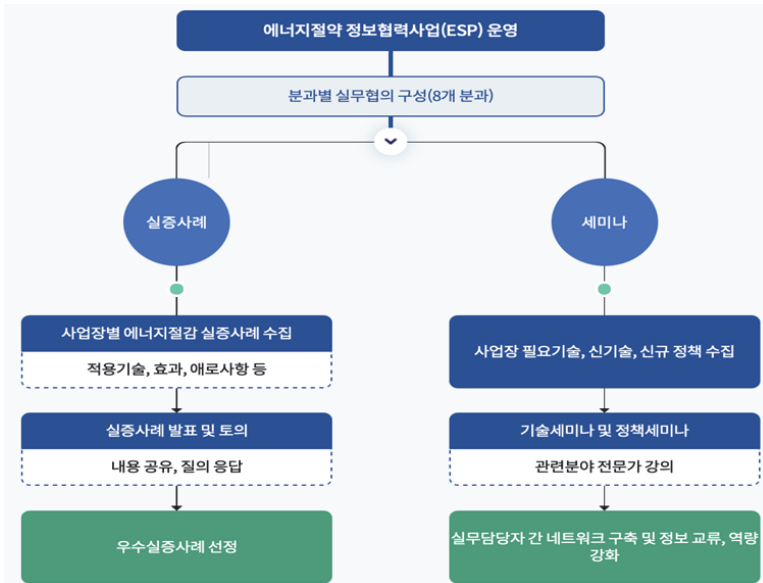
ESP는 동종 업종 기업간 협의체를 구성하여 에너지 절약 실증사례와 기술 정보를 상호 공유하고, 이를 현장에 적용함으로써 산업부문 에너지 절약과 온실가스 감축을 도모하는 사업이다. 「에너지이용합리화법」 제57조에 근거해 추진되며, 연간 에너지사용량 2,000toe 이상의 다소비 산업체를 중심으로 석유화학, 제지, 전기전자, 식품, 발전에너지, 철강, 자동차, 시멘트 등 8개 분과로 운영되고 있다.

분과별 실무협의회에서는 사업장별 에너지절감 실증사례를 수집하고 그 효과와 애로사항 등을 공유·확산하며, 기술세미나 및 정책세미나 등을 통해 실무역량을 강화한다. 에너지 사용 현황을 비교·분석하고, 절감 실증사례·적용기술·문제점 등을 공유하며, 우수 활동 및 실증사례에 대해 포상을 수여함으로써 회원사를 독려하고 실무협의회를 활성화하고 있다. 이처럼 ESP는 개별 기업 단위의 에너지절감 노력을 넘어, 동종 산업간 기술·사례·정책 공유 및 확산을 통해 산업 전반의 효율성 향상과 온실가스 감축의 시너지를 창출하는 데 기여하고 있다.

93) Energy Saving through Partnership

94) 한국에너지공단, 에너지절약기술 정보협력사업(ESP)(검색일: 2025.11.13.) 자료를 바탕으로 저자 작성

〈그림 3-15〉 ESP 운영 체계



자료: 에너지관리공단, 에너지절약기술 정보협력사업(ESP)(검색일: 2025.11.13.)

5. 타 분야 사례 분석의 시사점

산업, 수송, 건물 등 타 부문에서는 온실가스 배출 관리를 위한 다양한 제도 및 정책들이 마련되어 운용되고 있다. 이러한 타 부문 사례는 하역장비 관리체계 구축 과정에서 참고할 수 있는 여러 가지 시사점을 제공한다.

첫째, 하역장비 온실가스 배출을 관리하기 위한 기준을 마련할 필요가 있다. 수송 부문은 자동차(또는 건설기계)의 제작 단계의 온실가스 배출허용 기준을 마련하고 있으며, 대기오염물질에 대해서는 운행단계의 모니터링을 위한 정기검사체계를 운영하 있다. 뿐만 아니라 노후 고배출 차량의 조기폐차 및 전환을 유도하는 관리체계를 갖추고 있다. 반면, 하역장비는

제작 단계의 대기오염물질 배출허용 기준만 존재할 뿐, 온실가스 배출허용 기준, 운행단계 모니터링 체계, 노후 고배출 장비 조기폐차 등을 위한 기준은 마련되어 있지 않다. 따라서 하역장비 관리주기 전반을 고려한 온실가스 배출 관리 기반 마련이 필요하다.

둘째, 장비 등록정보의 다각화가 요구된다. 자동차나 건설기계 부문에서는 연료유형, 엔진사양, 배기량 등 다양한 제원정보를 신규 자동차(또는 건설기계) 등록시 제출하도록 하여 현황 파악 및 정책 설계에 활용하고 있다. 반면 하역장비는 이러한 기초 데이터 구축이 부족해 등록 장비의 연료 구성, 배출특성 등을 파악하기 어렵다. 따라서 하역장비 등록단계에서 연료유형, 엔진·출력 등 정보 범위를 확대하여 수집할 필요가 있다.

셋째, 데이터 기반 온실가스 배출 관리가 필요하다. 타 부문은 에너지 사용·배출량 데이터를 수집·보고·검증·활용하는 체계나 이를 통합하여 지표화·통계화하는 플랫폼을 운영하고 있다. 하역장비 관리 역시 이러한 흐름과 연계하여 등록정보·운행기록·연료·전력사용량 등을 통합적으로 수집·관리하고, 이를 기반으로 인벤토리 구축, 정책평가, 감축성과 모니터링까지 이어지는 데이터 기반 관리체계를 단계적으로 구축할 필요가 있다.

넷째, 감축 이행 및 참여 유도를 위한 정책 수단 다양화가 필요하다. 현재 하역장비 온실가스 감축정책은 에너지 전환에 집중되어 있으며, 장비 개조나 운영 효율화 등 다양한 감축 방식에 대한 기술 개발·보급 지원은 미흡한 실정이다. 또한 기업들이 자발적으로 감축에 참여할 수 있도록 유도하는 인증제도, 기술사례 공유 등의 수단도 충분히 활용되지 못하고 있다. 타 부문에서는 다양한 정책 수단을 조합하여 감축 이행을 촉진하고 있는 바, 하역장비 부문에서도 이러한 복합적 접근이 필요하다.

제3절 소결

국제사회는 하역장비를 항만의 핵심 배출원으로 인식하고, 인벤토리 구축과 데이터 기반 산정체계 마련을 적극 추진하고 있다. 싱가포르의 전동화를 넘어 고효율 장비 전환, 스마트 에너지 관리 시스템, 디지털 운영 최적화까지 포함한 다층적 접근을 추진하며, 일본과 중국은 인증·등급제도를 통해 이해관계자의 참여를 촉진하고 있다. 이는 단순한 연료 전환만으로는 충분하지 않으며, 데이터 기반 관리와 효율화 기술, 참여 유인 설계를 결합한 종합적 관리가 필요함을 보여준다.

또한 건물·산업·수송 등 타 부문 사례는 데이터 관리와 인센티브 연계를 통해 참여를 확대하고, 운영 효율성을 높이는 다양한 정책 모델을 제시하고 있다. 항만 부문 역시 이러한 교훈을 바탕으로 단순한 데이터 수집을 넘어 운영 효율성·비용 절감이라는 실질적 가치를 제공하는 항만 특화 관리체계를 구축해야 한다. 이를 위해 목표 설정, 장비 단위 데이터 확보, 인센티브 연계, 플랫폼 구축, 검증 체계 마련 등 다각적 접근이 필수적이다.

지금까지 국외 주요 항만과 국내 타 부문의 사례를 통해 도출한 시사점을 살펴보았다. 다음 장에서는 이러한 시사점을 바탕으로 하역장비 배출의 지속가능한 관리를 위한 정책 방안을 제안한다. 특히 실행 가능성과 단계적 이행 전략을 고려하여 정책적 효과를 극대화하고, 궁극적으로는 항만 부문의 탄소중립 실현에 기여할 수 있는 구체적 방안을 제시한다. 국내외 사례분석에 기반하여 하역장비 관리체계 개선 방향을 정리하면 <표 3-11>과 같다.

〈표 3-11〉 사례 분석 기반 하역장비 관리체계 개선 방향

구분		주요 사례	하역장비 관리체계 개선 방향
국외 사례	정책 목표·추진전략 마련	• 미국 Port Initiative, Clean Port Program • 싱가포르 Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050, MSGI	• 정책방향 다각화
	제도기반 정비	• 미국 CARB, CHE Regulation 개정 추진 및 CHE Technical Assessments 수행	• 배출허용기준 활용 온실가스 관리 체계 마련
	데이터·MRV 기반 구축	• 인벤토리·온실제도기반 정비배출량 산정 가이드라인 • 항만 배출량 산정 도구 • 글로벌 하역장비 인벤토리	• 하역장비 배출량 산정 가이드라인 마련 • 온실가스 인벤토리 구축
	감축 조치 및 성과 관리	• 에너지 효율화 조치 • 탄소중립 인증제	• 에너지 효율화 조치 강화 • 저탄소 장비 인증제 도입
타 분야 사례	제도기반 정비	• 자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 • 건설기계 배출가스 정기검사 • 노후·고배출 자동차·건설기계 운행 규제	• 운행 장비의 배출가스 정기검사 추진 • 엔진 등급, 배출허용기준 기반 노후 경유 장비의 순차적 퇴출 유도
	데이터·MRV 기반 구축	• 건설기계 등록정보 • 산업부문 온실가스 배출량 조사 • EG-TIPS • KOTEMS	• 등록정보 다각화 • 데이터 수집, 관리체계 구축
	녹색기술 보급·지원사업 추진	• 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업 • 무공해건설기계 보급 및 전동화 개조 지원사업	• 에너지 효율화 기술개발 및 보급 사업 추진
	감축 조치 및 성과 관리	• ZEB 인증제 • 에너지진단사업 • 에너지절약기술 정보협력사업	• 저탄소 장비 인증제 도입 • 감축기술 및 시장정보 제공

자료: 저자 작성

04

하역장비 관리체계 개선 방안

앞선 제2장, 제3장에서는 온실가스 배출 저감을 위한 국내 하역장비 관리 여건과 한계, 그리고 벤치마킹할 수 있는 국내외 주요 사례들을 살펴보았다. 검토 결과, 국내 하역장비 부문은 온실가스 배출 관리 기반이 미흡하다는 점이 확인되었다. 정부가 ‘2050년 항만 탄소중립 실현’이라는 정책목표를 설정한 만큼, 항만 배출의 핵심인 하역장비에 대한 체계적 관리가 목표 달성의 관건이 될 것이다. 이에 본 장에서는 앞선 검토 결과를 바탕으로 하역장비 온실가스 배출을 체계적으로 관리하기 위한 정책 추진 방향과 구체적인 실현 방안을 제시하고자 한다.

제1절 하역장비 관리체계 개선 방향

앞서 강조한 바와 같이 하역장비는 항만의 주요 배출원으로서 체계적인 관리 없이는 탄소중립 항만의 실현이 어렵다. 그러나 현재의 장비 관리체계는 안전성 확보와 대기오염물질 저감 중심으로 운영되고 있어 온실가스 배출 관리 기반은 매우 미흡한 실정이다. 특히, 하역장비별 배출량 산정 기준과 보고체계의 부재, 장비 등록정보의 제한적 활용, 노후 경유 장비에 대

한 교체·전환 유도정책 미비 등 제도적·기술적 한계가 복합적으로 작용하고 있다. 또한 온실가스 배출계수나 활동자료 관리기준이 마련되어 있지 않아 항만별·운영사별 배출 현황을 정량적으로 비교하거나 정책효과를 평가하기 어렵다. 이러한 문제로 인해 하역장비의 온실가스 배출관리는 항만 전체의 감축목표 달성을 위한 체계적 관리수단으로 기능하지 못하고 있다.

이에 본 연구는 ‘하역장비 온실가스 배출 제로(0)를 위한 하역장비 관리 체계 고도화’를 목표로 이를 실현하기 위한 세 가지 정책 방향을 설정하였다. 첫째, 하역장비 관리 범위를 온실가스까지 확장하는 것이다. 현재 하역장비는 온실가스 배출을 지속적으로 파악하고 관리하는 체계가 부재하여 장비별 배출량 및 배출 특성 파악, 노후 고배출 장비의 감축 이행 관리, 감축정책 효과 검증 등에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 하역장비가 등록 된 이후 운행, 폐기에 이르기까지의 과정에서 온실가스 배출을 일관되게 파악하고 감축 이행을 관리할 수 있는 관리체계 개선 방안을 제안하고자 한다.

둘째, 하역장비 온실가스 배출량 산정, 보고, 검증 체계를 구축하는 것이다. 배출량 파악은 하역장비 감축정책 수립과 이행 성과 검증의 출발점으로, 온실가스 관리를 위한 기초 단계이다. 그러나 현재는 장비 단위 배출량을 파악할 수 있는 데이터 기반이 부족할 뿐 아니라 표준화된 배출량 산정 기준도 부재하다. 따라서 하역장비 관리자⁹⁵⁾가 배출 수준을 일관되게 파악할 수 있는 표준화된 산정 기준과 온실가스 감축정책 수립의 근거가 되는 데이터 기반 구축 방안을 제시하고자 한다.

셋째, 감축 이행을 촉진하기 위한 실행 수단을 다각화하고 탈탄소 노력을 지속할 수 있는 체계를 구축하는 것이다. 탄소중립 실현에 있어 배출량

95) 시설장비관리자 중 하역장비를 사용·관리하는 자를 지칭. 이하 동일

파악이 출발점이라면, 실질적인 감축 성과는 이행 단계에서 결정된다. 하역장비 온실가스 배출은 에너지 소비에 기인하는 만큼 저탄소 에너지로 전환하거나 개별 장비의 에너지 효율을 높이고 운영을 최적화하여 에너지 소비 자체를 줄이는 접근이 필요하다. 그러나 이러한 감축 이행은 상당한 비용과 시간이 수반되기 때문에 민간의 자율적 노력만으로는 속도를 내기 어려우며, 규제나 의무화 방식으로는 정책 수용성을 확보하기 어렵다. 따라서 정부가 민간의 감축 활동을 유도하고 이행을 조기에 촉진할 수 있는 정책 수단을 마련하는 것이 필요하다. 이에 감축 이행을 뒷받침할 수 있는 관리체계 구축 방안을 제시하고자 한다.

제2절 하역장비 관리체계 개선 방안

1. 장비관리기준 강화

1) 하역장비 등록정보 확대

하역장비 온실가스 감축정책을 효과적으로 설계하기 위해서는 우선 국내에 설치된 하역장비의 동력원 구성, 연료 효율 등 원동기 특성이 어떠한지 파악하는 것이 선행되어야 한다. 이러한 정보는 하역장비를 감축정책의 적용 대상을 정의하고 정책 우선순위를 설정하기 위한 기초 정보이기 때문이다. 그러나 현행 항만시설장비대장은 동력, 엔진·모터 제원, 연비 등 온실가스 배출과 연계되는 기초 정보를 수집하지 않고 있어 하역장비의 동력원 분포가 어떻게 구성되어 있는지도 파악하기 어렵다. 이에 하역장비 등록 단계에서 최소한의 온실가스 배출 관련 제원 정보를 확보하도록 항만시설장

비대장 서식을 정비할 필요가 있다. 이는 온실가스 감축정책이 작동하도록 대상을 정의하고 정책을 정밀하게 설계하는데 필요한 정보일 뿐 아니라, 대기오염물질 관리, 인프라 계획, 장비 안전 확보 차원에서 활용될 수 있는 주요 정보이므로 등록 단계에서 수집한다면 다양한 목적으로 활용 가능할 것으로 기대된다.

하역장비는 엔진 기반의 내연기관 장비와 모터 기반의 전기 구동 장비로 구분할 수 있는데, 이들은 작동 원리와 특성이 다르므로 필요한 관리정보 역시 상이하다. 따라서 모든 장비에 동일한 정보를 요구하는 방식이 아닌, 원동기 특성에 따라 필요한 정보를 차등적으로 수집하는 형태로 서식을 정비할 필요가 있다. 예를 들어 엔진 기반 야드 트랙터는 연료 유형, 연비, 배기량 등을, 모터 기반 야드 트랙터는 모터 전압 및 전류, 전력소비량, 배터리 용량 등을 수집하는 것이다. 특히, 원동기 출력, 배기량 정보의 경우 「항만대기질법」에 따라 해양수산부장관이 배출가스허용기준 충족 여부 확인을 위해 제출 요구가 가능한 항목인 만큼, 등록 단계에서 확보할 수 있도록 등록서식을 정비한다면 행정 일관성 및 편의성 확보 측면에서도 효과적일 것이다.

한편, 하역장비는 장비 유형에 따라 구조가 크게 달라 유의미한 제원 항목 역시 상이하다. 그러나 현재의 등록 서식은 모든 장비에 동일한 제원 항목을 수집하고 있어 장비 유형별 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 건설기계가 타이어식·무한궤도식·타워크레인 등 형식별로 등록제원표를 구분하여 운영한다는 점을 감안하면, 하역장비 역시 주요 유형별로 등록서식을 구분하여 필요 정보를 선택적으로 수집하는 방식이 합리적이라 판단된다. 이에 본 연구는 하역장비 온실가스 감축정책이 실제로 작동하기 위한 최소한의 관리 기반으로서 하역장비 유형과 원동기 특성을 반영하여 필요한 등록서식을 개정하는 방안을 제안한다. 아래 <그림 5-1>은 주요 하역

장비를 대상으로 원동기 특성을 포함, 수집이 필요한 제원 항목을 예시로 제시한 것이다. 이러한 등록정보 정비는 하역장비 보유현황을 동력원 기준으로 인벤토리화하고 고배출 장비군을 식별하기 위한 기초 데이터로 기능하여 친환경 장비 전환 지원 우선순위 설정 등 정책 추진을 위한 관리 기반으로 활용될 수 있을 것이다.

〈그림 4-1〉 장비등록대장 서식 개정(안)

항만시설장비(컨테이너 크레인) 대장				항만시설장비(트랜스퍼 크레인) 대장			
시설장비명		관리번호		시설장비명		관리번호	
설치장안		부두		설치장안		부두	
용도(취급 화물)		소유자		용도(취급 화물)		소유자	
제조·설치일자		관리자		제조·설치일자		관리자	
검사합격번호		제작자		검사합격번호		제작자	
검사기관		가격 / 대당	백만원	검사기관		가격 / 대당	백만원
주요제원				주요제원			
정격하중(스프레드 일)	톤	컨테이너	정격하중	m/min	정격하중	톤	m/min
바다측 도달거리	m	무부하	m/min	바다측 도달거리	m	무부하	m/min
(바다측 도달중심 기준)				(바다측 도달중심 기준)			
육지측 도달거리	m	트롤리 횡행 속도	m/min	육지측 도달거리	m	트롤리 횡행 속도	m/min
(육지측 도달중심 기준)				(육지측 도달중심 기준)			
상방 연장도	m	컨트리의 주행속도	m/min	상방 연장도	m	컨트리의 주행속도	m/min
(컨트리의 연장 상면 기준)				(컨트리의 연장 상면 기준)			
하방 연장도	m	물 관상, 관하 소요시간	분	하방 연장도	m	물 관상, 관하 소요시간	분
(컨트리의 연장 상면 기준)				(컨트리의 연장 상면 기준)			
컨트리의 연장 간격	m	평균 작업주기 시간	초	컨트리의 연장 간격	m	평균 작업주기 시간	초
컨트리의 연장 규칙		작업시	m/sec	컨트리의 연장 규칙		작업시	m/sec
에그간 내측 간격	m	속속	m/sec	에그간 내측 간격	m	속속	m/sec
에그간 내측 간격	m	추진시	m/sec	에그간 내측 간격	m	추진시	m/sec
트롤리 총길이	m	작업시	육지측 톤/m	트롤리 총길이	m	작업시	육지측 톤/m
트롤리 총길이	m	추진시	바다측 톤/m	트롤리 총길이	m	추진시	바다측 톤/m
주행방향 크레인 폭	m	공급전원	Ph V Hz	주행방향 크레인 폭	m	공급전원	Ph V Hz
(범의 끝에서 범의 끝까지)				(범의 끝에서 범의 끝까지)			
자중	톤	기타		자중	톤	기타	
구조물 사용 등급	사이클			구조물 사용 등급	사이클		

자료: KOTEC 자문의견을 참고하여 저자 작성

2) 노후 경유 장비 관리 강화

온실가스 감축 차원에서 노후 경유 하역장비의 관리에 특히 중요하다. 앞서 설명한 것처럼 하역장비는 화석연료를 사용하는 내연기관 장비와 전기를 사용하는 전기 구동 장비로 구분된다. 이 중 전기 구동 장비는 모터 구동 특성상 노후화 자체가 추가적인 배출량 증가로 이어지지는 않는다.

반면, 내연기관 장비는 노후화로 인한 열화(deterioration)로 엔진 출력, 성능 및 연비 저하가 발생하여 동일 작업량 대비 온실가스를 더 많이 배출하게 된다.

국내 내연기관 장비는 경유와 LNG를 사용하는 장비들이 있으며, 그 중 경유 장비의 관리 우선순위가 높다. 경유는 연료 성상과 연소 특성상 동일한 에너지 기준으로 LNG보다 이산화탄소 배출 계수가 높기 때문에 우선 관리 대상이 된다. 또한 경유는 PM, NO_x 등 대기오염물질 배출 수준도 상대적으로 높아 현행 하역장비 대기오염 관리체계 역시 주로 경유 하역장비를 주요 관리대상으로 삼고 있다. 따라서 온실가스 감축 측면에서도, 경유 장비를 중심으로 관리체계를 강화하는 것이 기존 정책과의 일관성과 효율성 측면에서 타당하다. LNG 장비는 경유보다 CO₂ 배출은 적지만, 연소 과정에서 소량의 미연소 메탄이 배출되는 메탄슬립(methane slip) 문제가 존재하며, 메탄은 CO₂보다 지구온난화지수가 매우 높기 때문에 중장기적으로는 LNG 장비 역시 중요한 관리대상이다. 다만, 국내에서 사용하고 있는 LNG 하역장비는 운용 사례가 부산항에 제한되어 있고, 2015년 이후 저탄소 전환 촉진 목적으로 도입되어왔다는 점을 감안하면, 단기적인 감축 정책 대상으로 보기는 어렵다. 이러한 점을 종합적으로 고려할 때, 현시점에서는 노후 경유 장비의 관리 강화가 가장 효과적이고 현실적인 우선 과제로 판단된다.

한편, 현재 하역장비 오염물질 배출규제는 대기오염물질에 한정되어 있으며, 이마저도 장비 제작 당시 정보를 기반으로 충족 여부를 확인하는데 초점이 맞춰져 있다. 즉, 현행 제도는 운행 중 배출을 모니터링하는 체계는 마련되어 있지 않기 때문에 노후화로 인한 배출 증가를 파악하거나 고배출 장비를 식별하는 것은 불가능하다. 따라서 하역장비 온실가스를 효과적으로 관리하기 위해서는 운행 단계의 배출성능을 모니터링하고, 고배출 장비

의 선제적 교체를 유도하기 위한 체계 마련이 필요하다.

한편, 하역장비의 온실가스와 대기오염물질은 모두 연료 연소 과정에서 동시에 발생한다는 점에서⁹⁶⁾ 두 오염물질을 별도의 규제로 관리하기보다는 하나의 제도 하에서 통합적으로 다루는 것이 효율적일 것으로 판단된다. 이에 본 연구는 노후 경유 장비의 관리를 강화하기 위한 방안으로 기존의 대기오염물질 배출규제를 기반으로 배출가스 정기검사 및 노후 장비 조기 폐차 제도를 마련하는 것을 제안한다.

먼저 운행 장비의 배출을 모니터링하고 관리하기 위해 운행 단계에서의 배출기준 준수 여부와 배출성능 저하를 정기적으로 확인할 수 있는 검사체계를 마련할 필요가 있다. 정기검사는 제작 당시의 기준 충족 여부와 별개로, 실제 운행 과정에서 엔진 성능이 유지되고 있는지, 고배출 장비가 발생하고 있지는 않은지를 주기적으로 점검하는 기능을 수행한다. 건설기계의 경우 정기검사 시 배출가스검사를 함께 실시하도록 하여 고배출 장비의 운행을 관리할 수 있는 체계가 마련되어 있다. 이를 참고하여, 하역장비 역시 정기검사 시 배출가스검사를 병행하도록 하여 운행단계에서의 배출기준 준수 여부와 배출 성능 저하를 주기적으로 모니터링할 필요가 있다.

그러나 정기검사만으로는 ‘기준은 충족하지만 상대적으로 온실가스 배출 부담이 높은 노후 경유 장비’를 적극적으로 퇴출·전환하기 어렵다. 노후 경유 장비가 구조적으로 온실가스 배출 부담이 크다는 점을 감안하면, 안전기준과 배출허용기준을 충족하더라도 노후 경유 장비를 전략적으로 조기 전환하는 것이 온실가스 관리 측면에서 더 효과적이다. 다만, 하역장비는 노후 장비 관리를 위한 수단이 미흡하여 정책적으로 노후 경유 장비의 퇴출을 유도하기 어렵다. 반면, 버스, 자동차, 건설기계 등 타 분야에서는 차

96) 대기오염물질은 연소 효율에, 온실가스는 연료 연소량에 영향을 받음

령, 배출허용기준 등을 고려하여 상대적으로 배출량이 많은 노후 차량의 조기폐차, 전환 지원제도가 운영되고 있다. 이러한 사례는 정상 운행이 가능한 장비라도 상대적 배출 수준을 고려해 선제적 전환을 유도하는 정책이 온실가스 감축에 효과적임을 시사한다.

따라서 하역장비 또한 운행기준을 충족하더라도 엔진 성능이 상대적으로 낮은 노후 경유 장비를 전략적 우선 전환 대상으로 설정할 필요가 있다. 농기계, 건설기계, 항공기취급업 장비 등은 장비 제작연도나 국내외 비도로 엔진 규제 등급 등을 활용하고 있다.⁹⁷⁾ 하역장비의 경우 경유 장비가 우선 전환 대상이므로 엔진 규제 등급을 활용하는 것이 적절하며, 미국이나 유럽의 비도로 엔진 규제가 국제적으로 통용되는 기준이라는 점에서 이를 활용하는 것이 합리적이라 판단된다. 국내 하역장비 배출허용기준도 미국의 비도로 엔진 규제 등급과 유사하여 제도 일관성 측면에서도 타당하다.⁹⁸⁾ 그러므로 일정 등급 이하 엔진(예: Tier-2 이하)을 탑재한 장비를 조기폐차 권고 대상으로 지정하고, 조기폐차 또는 친환경 장비 전환 시 비용을 지원하는 체계를 구축할 필요가 있다. 다만, 구체적인 기준은 국내 하역장비 현황 등을 고려하여 추가 연구를 통해 마련해야 할 것이다.

97) 노후 농기계의 경우 2012.12.31. 이전 생산된 경유 사용 트랙터·콤바인, 건설기계의 경우 2009.8.31. 이전 배출허용기준이 적용되어 제작된 덤프트럭·콘크리트믹서트럭·콘크리트펌프트럭과 Tier-1 이하 엔진을 탑재한 지게차·굴착기(2004년 이전 제작된 것이나 75kw 이상 130kw 미만은 2005년 이전 제작 또는 75kw 미만은 2006년 이전 제작된 것), 항공기취급업 장비의 경우 2006년 이전 제작된 장비 등으로 조기폐차 대상을 정하고 있음(자료: 농림축산식품부 지침관리시스템(검색일: 2025.11.27.), 기후에너지환경부 수도권대기환경청(검색일: 2025.9.24.), 「대기환경보전법 시행규칙」 제79조제1항)

98) 국내 하역장비 배출가스허용기준의 경우 미국의 비도로 장비 엔진 규제 틀을 참고한 것으로 보이는데, 2020년 이전 제작 장비의 경우 미국 비도로 장비 엔진 규제 Tier 1-2 수준과 유사하며, 2020년 이후 제작 장비의 경우 미국 비도로 장비 엔진 규제 Tier 4에 해당함

2. 배출량 산정, 보고, 검증(MRV) 체계 구축

1) 하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인 마련

하역장비의 온실가스 배출을 체계적으로 관리하기 위해서는 먼저 배출량을 정확하고 일관된 기준으로 산정할 수 있어야 한다. 그러나 현재는 하역장비 배출량 산정을 위한 공통된 기준이나 절차가 명확히 정립되어 있지 않아 각 주체별 산정 결과의 일관성과 비교가능성을 확보하기 어려울 뿐 아니라, 그 결과를 정책관리 지표로 활용하는 데에도 한계가 있다. 하역장비 온실가스 관리의 출발점은 산정방식의 표준화와 상호호환성 확보에 있다. 따라서 모든 주체가 동일한 기준과 절차에 따라 배출량을 산정할 수 있도록 해양수산부 차원의 행정지도 형태로 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」을 마련할 필요가 있다.

이 가이드라인은 배출량 산정 주체가 쉽게 이해하고 적용할 수 있는 실무지침이자, 국가·항만 차원의 온실가스 배출량 통합관리 기반이 되는 표준 문서로 해야 한다. 이를 위해 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」에는 산정대상 및 적용범위, 산정대상 온실가스, 산정 절차 및 기준, 배출계수 선정, 활동자료 선정, 품질보증 및 데이터 관리 기준 등에 관한 내용을 포함해야 하며, 국제기준과 국내 표준에 부합하는 형태로 설계되어야 한다.

〈표 4-1〉 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」 구성(안)

구분	내용
목적	• 하역장비 온실가스 배출량 산정방식의 표준화 및 상호호환성 확보 • 산정주체가 쉽게 이해하고 산정할 수 있도록 하는 실무지침 제공
기본원칙	• 가능한 한 활동자료 기반의 정밀 산정(IPCC 가이드라인 Tier 3 수준)을 지향하되, 산정대상 온실가스 특성, 데이터 확보 여건 등을 고려하여 탄력적으로 적용
대상	• 하역장비 관리자 및 항만당국 • 국외 항만, 기타 항만 이해관계자도 참조 기준으로 활용 가능
주요 내용	• 산정대상 및 적용범위 • 산정대상 온실가스 • 산정기준 • 배출계수 선정 • 활동자료 선정 • 품질보증 및 데이터 관리 기준

자료: 저자 작성

한편, 하역장비 온실가스 관리체계가 실효성을 가지려면 활동자료 기반의 정밀 산정체계를 구축하는 것이 필요하다. 그러므로 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」에서는 IPCC 가이드라인의 접근방식(Tier 1-3)을 모두 제시하되, 가능한 Tier 3 수준의 정밀 산정을 기본 원칙으로 설정해야 한다. 하역장비는 항만 운영 특성상 세부 활동자료 확보가 용이하며, 같은 장비군이라도 에너지원, 엔진 등급, 엔진 출력 등에 따라 배출 특성의 편차가 크다. 특히, 산정대상 온실가스 중 CH₄와 N₂O는 배출 비중은 작지만 엔진 등급(Stage I~V)이 높을수록 배출이 감소하므로, 가능한 상위 Tier를 적용하는 것이 바람직하다(IPCC, 2006; EMEP/EEA, 2023). 따라서 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」은 Tier 3 수준의 산정을 기본으로 권고하되, 데이터 확보가 어려운 경우에는 Tier 2 또는 Tier 1 방식을 보완적으로 적용하도록 해야 한다.

이러한 기본방향을 기반으로, 각 항목별로 구체적인 세부 기준과 절차를

제안하면 다음과 같다. 먼저 산정대상 및 적용범위는 배출량 산정의 책임 소재와 경계를 명확히 하여 산정의 중복과 누락을 방지하고, 산정 주체의 일관성을 확보하기 위한 것이다. 하역장비는 소유자와 운영자가 상이한 경우가 있으므로 산정주체 결정기준과 장비별 산정대상 포함 기준을 가이드라인에 명시하는 것이 필요하다. EPA, Ports Australia, IGEF-UNDP-IMO GloMEEP Project & IAPH 등 국외 주요 항만 인벤토리 및 탄소배출량 산정 가이드라인에서도 항만의 배출원에 대해 운영통제권을 기준으로 산정주체를 구분하도록 권고하고 있으며, 이러한 접근은 GHG Protocol 및 IPCC(2006)의 조직경계 설정 원칙과도 일치한다.

한편, 하역장비의 배출량 산정시에는 경유, LNG 등 화석연료 사용에 따른 직접배출뿐 아니라 외부에서 공급된 전기 사용, 즉 구입전력 사용에 따른 간접배출도 포함해야 한다. 하역장비 배출량 산정의 목적은 각 장비의 운용과정에서 발생하는 온실가스를 파악하는 것이므로, 하역장비에 사용되는 모든 에너지원에 대한 배출을 산정해야 한다. 이는 국가 전체 통계작성을 위해 중복산정을 방지하고자 전력 생산에 의한 배출을 별도⁹⁹⁾로 계상하는 국가 온실가스 인벤토리와 달리, 하역장비 배출량 산정은 실질적인 하역장비의 배출 기여도를 파악하기 위한 것이기 때문이다. 따라서 연료연소에 따른 직접배출과 함께 구입전력 사용에 따른 간접배출¹⁰⁰⁾도 산정대상에 포함하는 것이 타당하다.

다음으로 배출량 산정 대상이 되는 온실가스 종류를 명확히 해야 한다. 기본적으로 연료연소 부문의 산정 대상 온실가스는 CO₂, CH₄, N₂O이다. 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」에서도 이동

99) 에너지-A. 연료 연소-1. 에너지산업-a. 공공전기 및 열 생산, 자료: 국가온실가스 인벤토리

100) 단, 자체 발전설비를 통해 생산한 전력을 사용하는 경우는 전력 생산에 따른 배출량을 별도 산정하여야 하며, 이 때 화석연료 발전분은 직접배출로 포함하여 산정하고, 비연소형 신재생에너지 발전분은 배출량 0으로 처리함

연소(비도로)와 구입전력 사용에 따른 배출량 산정시 동일한 3종의 온실가스를 보고 대상 온실가스로 규정하고 있으며, 국제 기준 또한 그러하다. 그러므로 하역장비의 배출량 산정 대상 역시 CO₂, CH₄, N₂O 세 가지 물질을 산정 대상 온실가스로 규정하여야 한다. 그리고 각각 산정된 세 가지 물질은 최종적으로 CO₂ 환산량(CO₂eq)으로 통합하여 표기할 수 있다.

배출량 산정기준은 가이드라인의 핵심 구성 요소로서, 산정주체가 일관된 방식으로 배출량을 산정할 수 있도록 각 변수의 정의와 적용 단위를 명확히 제시해야 한다. 이 때 국제적으로 통용되는 IPCC 가이드라인(2006)의 기본 산정식을 공통틀로 하되, 활동자료 정밀도에 따라 Tier 1-3으로 구분하여 산정할 수 있도록 각 Tier별 산정기준을 구체적으로 제시할 필요가 있다. EMEP/EEA(2023)와 EPA(2022) 역시 IPCC 기본식을 바탕으로 하역장비 배출량 산정에 필요한 변수 체계와 산정기준을 명확히 정하고 있다. 다만, 두 기관의 산정기준은 Tier 구성과 보정계수에서 차이를 보인다. EMEP/EEA(2023)는 Tier 1-3 수준의 산정식을 모두 제시하면서,¹⁰¹⁾ Tier 3 방식에서 엔진 노후 보정을 주요 변수로 포함하여 노후 장비의 배출 특성을 반영할 수 있도록 하고 있는 반면, EPA(2022)는 Tier 3 수준 산정식을 기본으로 제시하며 엔진 노후 보정은 고려하지 않는다. 다만, 국내 하역장비는 노후장비 비중이 높고, 장비 노후도가 배출량에 미치는 영향이 크다는 점을 감안하면, 국내 하역장비 배출량 산정가이드라인에는 EMEP/EEA(2023)의 산정체계를 참고하여 산정기준을 제시되는 방식이 바람직해 보인다.

101) 참고로 EEA는 비도로 장비(Non-Road Mobile Machinery, NRMM) 배출량 산정방식을 Tier 1-3으로 구분하여 제시하고 있으며, 하역장비는 이 비도로 장비 범주에 포함됨

〈표 4-2〉 주요 가이드라인별 하역장비 온실가스 배출량 산정식

구분	내용
EMEP/EEA (2023)	• 비도로 장비당 배출량 산정식(기본 구조)
	Tier 1 $E = \sum FC \times EF$
	Tier 2 $E = \sum \sum FC \times EF$
	Tier 3 $E = N \times HRS \times P \times (1 + DFA) \times LFA \times EF$ • N=장비당 엔진수, HRS=연간 사용시간, P=엔진 출력(kW), DFA=열화계수 보정값(엔진 노후 보정), LFA=부하율 보정 값, EF=배출계수(g/kWh)
EPA(2022)	• 하역장비당 배출량 산정식(기본 구조)
	$E = P \times LF \times A \times EF$ • E=배출량, P=엔진 정격출력(hp), LF=엔진 부하율(%), A=가동시간(h), EF=배출계수(g/hp·h)

자료: EMEP/EEA(2023), p. 21, p. 28, pp. 34-35, EPA(2022), p. 84 자료를 바탕으로 저자 작성

한편, 산정식의 주요 변수인 배출계수와 활동자료는 배출량 산정의 정밀도를 좌우하는 핵심 요소이다. 따라서 가이드라인에는 이러한 기준이 반드시 포함되어야 한다. 이와 관련하여 국제 가이드라인의 사례를 참고하면, EMEP/EEA(2023)는 비도로 장비 배출계수를 연료 유형, 섹터, 엔진 기술 단계, 엔진 출력 등을 기준으로 세분화하여 표로 제공한다.¹⁰²⁾ 이러한 세분화된 체계를 통해 동일한 야드 트랙터라도 150kW-경유-Stage II 장비와 185kW-경유-Stage V 장비에 서로 다른 배출계수를 적용하여 보다 정확한 배출량을 산정할 수 있다. 단, 해당 가이드라인에서는 CO₂는 Tier 2, CH₄와 N₂O는 Tier 3까지 배출계수를 제시하고 있다. EPA(2022) 역시 하역장비 배출계수를 연료 유형, 섹터, 엔진 출력을 기준으로 배출계수를 구분하여 제공한다. 두 기관 모두 실제 장비 운전 특성을 반영할 수 있도록 세분화된 배출계수를 제공하고 있다. 한편, 국내 도로수송 부문은 CO₂,

102) Tier 2는 연료 유형-장비 부문-엔진 기술단계를, Tier 3은 연료 유형-엔진 출력-엔진 기술단계를 기준으로 배출계수를 구분함

CH₄, N₂O 모두 Tier 3 수준의 배출계수를 차량 유형, 연료 유형별로 제공하고 있으며 최근에는 차량 주행행태를 반영한 미시적 배출계수 고도화 연구도 진행되고 있다.¹⁰³⁾ 이러한 사례를 참고하여, 가이드라인에서는 Tier 별로 적용가능한 연료 유형, 섹터, 엔진 기술단계, 엔진 출력 등을 기준으로 세분화된 별도 배출계수를 제공하여야 한다. 다만, 현재 국내에는 하역 장비용 배출계수가 개발되지 않았으므로, 단기적으로는 EMEP/EEA(2023)의 비도로 장비 계수를 기본 참조값으로 제시하되, 국내 하역장비 특성을 고려한 보정 적용 가능성을 열어두고, 장기적으로는 국내 하역장비 특성을 고려한 고유 배출계수를 개발하여 제시하여야 한다. 이를 통해 국내 여건을 고려한 Tier 3 수준의 정밀 산정과 장비군별 감축 잠재량 파악 및 국제 보고 요구에 효과적으로 대응할 수 있을 것이다.

〈그림 4-2〉 비도로 이동기계(경유)의 엔진 출력, 기술 단계에 따른 배출계수 테이블 (Tier 3)

Engine Power (kW)	Technology Level	NO _x	VOC	CH ₄	CO	N ₂ O	NH ₃	PM	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC	FC
56<P<75	1981-1990	8.60	2.00	0.048	5.30	0.035	0.002	1.200	1.200	1.200	0.660	275
56<P<75	1991-Stage I	11.50	1.50	0.036	4.50	0.035	0.002	0.800	0.800	0.800	0.440	260
56<P<75	Stage I	7.70	0.60	0.014	2.20	0.035	0.002	0.400	0.400	0.400	0.320	260
56<P<75	Stage II	5.50	0.40	0.010	2.20	0.035	0.002	0.200	0.200	0.200	0.160	260
56<P<75	Stage IIIA	3.81	0.40	0.010	2.20	0.035	0.002	0.200	0.200	0.200	0.160	260
56<P<75	Stage IIIB	2.97	0.28	0.007	2.20	0.035	0.002	0.025	0.025	0.025	0.020	260
56<P<75	Stage IV	0.40	0.28	0.007	2.20	0.035	0.002	0.025	0.025	0.025	0.020	260
56<P<75	Stage V	0.40	0.13	0.003	2.20	0.035	0.002	0.015	0.015	0.015	0.002	260
75<P<130	<1981	10.50	2.00	0.048	5.00	0.035	0.002	1.400	1.400	1.400	0.770	280
75<P<130	1981-1990	11.80	1.60	0.038	4.30	0.035	0.002	1.000	1.000	1.000	0.550	268
75<P<130	1991-Stage I	13.30	1.20	0.029	3.50	0.035	0.002	0.400	0.400	0.400	0.220	255
75<P<130	Stage I	8.10	0.40	0.010	1.50	0.035	0.002	0.200	0.200	0.200	0.160	255
75<P<130	Stage II	5.20	0.30	0.007	1.50	0.035	0.002	0.200	0.200	0.200	0.160	255
75<P<130	Stage IIIA	3.24	0.30	0.007	1.50	0.035	0.002	0.200	0.200	0.200	0.160	255
75<P<130	Stage IIIB	2.97	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.025	0.025	0.025	0.020	255
75<P<130	Stage IV	0.40	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.025	0.025	0.025	0.020	255
75<P<130	Stage V	0.40	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.015	0.015	0.015	0.002	255
130<P<560	<1981	17.80	1.50	0.036	2.50	0.035	0.002	0.900	0.900	0.900	0.450	270
130<P<560	1981-1990	12.40	1.00	0.024	2.50	0.035	0.002	0.800	0.800	0.800	0.400	260
130<P<560	1991-Stage I	11.20	0.50	0.012	2.50	0.035	0.002	0.400	0.400	0.400	0.200	250
130<P<560	Stage I	7.60	0.30	0.007	1.50	0.035	0.002	0.200	0.200	0.200	0.140	250
130<P<560	Stage II	5.20	0.30	0.007	1.50	0.035	0.002	0.100	0.100	0.100	0.070	250
130<P<560	Stage IIIA	3.24	0.30	0.007	1.50	0.035	0.002	0.100	0.100	0.100	0.070	250
130<P<560	Stage IIIB	1.80	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.025	0.025	0.025	0.018	250
130<P<560	Stage IV	0.40	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.025	0.025	0.025	0.018	250
130<P<560	Stage V	0.40	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.015	0.015	0.015	0.002	250
P>560	Stage V	3.50	0.13	0.003	1.50	0.035	0.002	0.045	0.045	0.045	0.002	250

자료: EMEP/EEA(2023), p. 38.

103) 김대진 외(2024), p. 273.

또한 활동자료 수집범위를 제시해야 한다. 미국 EPA의 「Clean Ports Program 활동 데이터 수집 가이드」와 일본의 항만 온실가스 산정 매뉴얼을 벤치마킹하여, 필수로 수집이 필요한 데이터와 선택적으로 수집이 가능한 데이터의 2단계 구조로 설계할 필요가 있다. 필수 항목은 모든 운영사가 반드시 수집해야 하는 최소 요건으로, ① 장비 기본정보(장비 ID, 유형, 엔진 제원), ② Tier 3 핵심 데이터(연료·전력 소비량, 총 가동시간, 작업량/TEU)를 포함한다. 선택 항목은 운영 효율성 지표로서 평균 부하율(Load Factor), 개별 충전 세션별 에너지량 등이다.

〈표 4-3〉 하역장비 배출량 산정을 위한 수집 활동자료 수집 범위(안)

변수명	설명	측정 단위	권장 수집 주기	산정식 활용
장비 ID	고유 식별 코드	-	변경 시 업데이트	기본 식별 정보
장비 유형	QC, YT, RTG 등	-	변경 시 업데이트	장비별 맞춤 산정 모델 선택
연료/동력원 유형	경유, LNG, 전기 등	-	변경 시 업데이트	적용 배출계수 결정
에너지 소비 데이터				
연료 소비량	특정 기간 동안 소비된 연료량	L, kg, m³	실시간~시간 단위	Tier 1 모형 검증
전력 소비량	특정 기간 동안 소비된 전력량	kWh	실시간~시간 단위	Tier 1 모형 검증
운영 활동 데이터				
총 운영 시간	엔진/모터 가동 총 시간	시간(hr), 분(min)	일 단위, 작업 단위	Tier 3 모형 활용
작업 시간	실제 부하가 걸린 작업 시간	시간(hr), 분(min)	실시간~작업 단위	Tier 3 모형 활용
공회전 시간	작업 없이 엔진/모터만 가동 시간	시간(hr), 분(min)	실시간~작업 단위	Tier 3 모형 활용
주행 거리	장비 수평 이동 총 거리	km, m	실시간~작업 단위	Tier 3 모형 활용
작업 부하율	정격 용량 대비 사용 부하 비율	%	실시간~작업 단위	보정 계수(LF) 결정
처리 물동량	처리한 화물량	TEU, Box, ton	작업~일 단위	배출 원단위 계산
엔진 RPM	엔진 회전 속도	RPM	실시간~초 단위	엔진 부하상태 판단

자료: 저자 작성

그리고 데이터 품질보증/품질관리(QA/QC) 절차도 포함되어야 한다. 배출량 산정은 결국 수집된 데이터의 정확성에 달려 있으므로, 수집-처리-보고 전 과정에서 일관된 검증 체계를 갖추는 것이 중요하다. 따라서 활동자료의 범위·단위·형식 등과 표준화된 보정 방식을 가이드라인에 제시해주어야 한다. 또한 모든 자료를 전수 확인하기 어려운 만큼, 통계적 신뢰수준을 확보할 수 있는 샘플링 규정을 명확히 제시해 데이터의 대표성과 신뢰성을 담보해야 한다. 이러한 QA/QC 절차가 가이드라인에 명시되면, 운영사별 편차 없이 동일한 기준으로 데이터가 관리되고, 국제 보고·검증 체계와의 정합성도 확보할 수 있다.

장기적으로는 가이드라인의 현장 적용성을 높이기 위해 가이드라인과 연계된 표준 배출량 산정 도구를 개발하는 방안도 고려할 필요가 있다. 미국 EPA는 MOVES를 활용하여 하역장비의 배출량을 일관된 방식으로 산정하도록 하고 있으며, 일본은 항만 배출량 산정 가이드라인과 연계된 전용 Excel 툴을 제공하여 운영 현장에서의 계산 부담을 완화하고 있다. 이러한 산정도구 제공은 배출량 산정 주체의 부담을 완화하고 산정의 일관성을 확보하는 데 기여할 수 있다.

산정 도구는 국가가 보유한 하역장비 등록정보를 기본 데이터셋으로 활용하여, 산정 주체는 활동자료만 입력하여 반복 입력 부담을 최소화하는 것이 바람직하다. 산정 방식은 기본적으로 Tier 3 방식을 적용하되, 모든 운영사가 모든 장비에 대해 동일한 수준의 정밀 데이터를 확보하는 것은 어려울 수 있으므로 데이터 확보가 제한적인 경우는 Tier 1-2 방식을 활용할 수 있는 혼합형 구조로 개발해야 한다. 이를 통해 각 주체별 데이터 편차를 반영하면서도 중장기적으로 Tier 3 중심 산정체계로 유도할 수 있는 유연성을 확보할 수 있다. 또한 일본의 Excel 기반 산정 도구와 같이, 장비 교체나 효율 개선 조치 전후의 효과를 시뮬레이션할 수 있는 What-if 분석 기능을

탐재하여 정책 효과나 투자 성과를 사전에 검증할 수 있도록 지원할 필요가 있다. 아울러 사용자 수용성 제고를 위해 사용자 친화적 인터페이스를 구축하고 실무자를 대상 교육 및 기술지원 체계를 마련하여 현장 활용도를 높이는 것이 요구된다.

2) 국가 하역장비 온실가스 인벤토리 구축

국가 차원에서 하역장비의 온실가스 배출을 체계적으로 관리하기 위해서는 장비 단위 배출량을 파악할 수 있는 인벤토리가 필수적이다. 이를 위해서는 신뢰성 있는 하역장비 활동자료 데이터를 수집·산정·보고할 수 있는 데이터 관리체계 마련이 선행되어야 한다. 그러나 현행 제도권 내에서는 운영사 등 하역장비 소유·운영자에게 개별 장비의 세부 활동자료나 배출량 데이터를 수집·보고하도록 요구하는 것은 현실적으로 한계가 크다. 먼저 운영사 등은 이미 에너지총조사, 에너지사용량신고, 항만공사 자체 요구자료, 배출권 명세서 등 다양한 경로로 관련 자료를 제출하고 있어 추가적인 데이터 보고에 부담을 느낄 가능성이 크다. 또한 데이터 제출이 기업의 실질적 이익으로 환류되지 않기 때문에 자발적 참여를 기대하기도 어렵다. 아울러 일부 하역장비 소유·운영자는 장비 단위 활동자료를 체계적으로 관리할 수 있는 시스템이 갖추어지지 않은 경우도 있으며, 이를 위한 시스템 구축을 위해서는 상당한 비용이 수반되어 정책 수용성이 낮다.

무엇보다 이러한 정보는 민간에서 자체적으로 비용을 들여 공유할 유인이 거의 없다. 이러한 데이터는 주로 터미널 운영 최적화 등을 위해 활용되며 외부 시장에서 거래되는 시장재로 보기 어렵다. 또한 장비 운행정보는 기업 운영전략, 항만 생산성 등 기업의 경쟁력에 직결되는 민감정보로 해석될 수 있기 때문에 외부 공유에 대한 보안적 부담도 크다. 즉, 민간 입장

에서는 데이터 공개에 대한 위험·비용 부담은 큰 반면, 편익은 불분명하기 때문에 자발적 참여 동기가 부족하다.

강제적인 규제 방식으로 접근하는 방식도 실현 가능성이 낮다. 단지 통계 작성만을 위해 장비 단위 데이터 수집·보고 체계를 의무화하는 것은 규제 부담 대비 공익적 편익이 낮다고 판단될 소지가 크기 때문이다. 그러나 이러한 데이터는 국가 온실가스 관리 차원에서 매우 중요한 기초자료이며, 항만부문 온실가스 인벤토리 정교화, 하역장비 감축목표 설정 및 감축수단 효과 검증체계 구축 등을 위해 반드시 필요한 데이터이다. 즉, 하역장비 인벤토리는 공공정책 영역에서는 명확한 수요가 존재함에도 민간 영역에서 공급이 이루어지기 어려운 데이터로, 공공의 목적 달성을 위해 국가가 관련 데이터를 확보·관리할 수 있는 체계를 마련할 필요가 있다.

이러한 현실을 감안하면, 하역장비 인벤토리 구축은 ‘민간이 수집하기 어려운 데이터를 국가가 비용을 들여 확보하는 관점’의 지원·협력 모델을 활용하는 것이 적절하다 판단된다. 이에 인벤토리 구축의 첫 단계로 하역장비의 활동자료와 배출량을 자동으로 수집할 수 있는 디지털 MRV 인프라 보급사업을 추진하는 것을 제안한다. 즉, 하역장비의 연료 사용량, 가동 시간, 주행거리 등의 활동자료를 자동으로 계측하고 이를 기반으로 배출량을 산정·검증·보고할 수 있는 계측장치 및 소프트웨어를 보급하는 것이다. 이를 통해 국가는 디지털 MRV 인프라 구축 비용의 일부를 지원하고 그 대가로 신뢰성 있는 장비 단위 데이터를 안정적으로 확보할 수 있고, 하역장비 소유·운영자는 별도 보고 부담 없이 장비 효율 관리, ESG 경영, 탄소규제 대응 등 측면에서 실질적 편익을 얻을 수 있게 된다. 중소벤처기업부의 ‘디지털기반 자동화 MRV 보급사업’과 같이 정부가 데이터 인프라 구축을 지원한 선행사례가 존재하는 만큼, 이는 실현 가능성이 높다고 판단되며, 이를 통해 하역장비 부문의 탄소규제 대응 역량을 강화하고 국가 차원

의 인벤토리 구축 기반을 확보하는 데 기여할 것이다.

한편, 디지털 MRV 인프라를 통해 확보된 데이터는 HEMS를 중심으로 관리하는 것이 바람직하다. 앞서 설명한 바와 같이 HEMS는 이미 하역장비에 대한 다양한 행정정보를 수집·관리하고 있으므로, 여기에 ‘인벤토리 모듈’을 추가 구축하여 하역장비 활동자료 및 배출량 관련 데이터를 수집·저장·분석하는 기능까지 확장하는 방안을 제안한다. 이때, 수집된 데이터는 HEMS를 통해 자동 집계되고, 하역장비 소유·운영자는 시스템을 통해 내부관리용 리포트나 ESG·탄소규제 대응 문서를 자동으로 생성할 수 있으며, 정부는 인벤토리 구축, 현황 모니터링, 통계지표 생산 등을 수행할 수 있도록 할 필요가 있다. 즉, 민·관 모두가 실질적 편익을 얻을 수 있는 형태로 모듈을 설계하여 지원사업의 참여 유인을 높이고 데이터 활용성을 제고할 필요가 있다.

다만, 데이터 민감도를 고려하여 HEMS 운영체제와 동일하게 개별 장비 또는 운영사 수준의 데이터는 외부에 직접 공개하지 않는 것이 적절하다. 대신 EG-TIPS, KOTEMS와 같이 정제·가공된 통계지표만을 외부에 공개하는 방식으로 설계하여 데이터 보안을 유지하면서 공공적 활용성을 높이는 방안이 타당하다. 나아가 이렇게 축적되는 데이터는 단순히 온실가스 인벤토리에 그치지 않고, 항만 운영지표, 에너지 통계 등 다양한 국가 통계자원으로 발전할 수 있으며, 장비별 배출계수 산정, 에너지 수요 예측, 배출규제 기준 마련 등 항만정책 전반의 기초자료로 확장 활용될 수 있다. 결과적으로 하역장비 인벤토리는 단순한 온실가스 관리체계를 넘어 항만운영 효율화, 에너지 관리 등 정책 의사결정을 지원하는 국가 기반 데이터 인프라로서 활용 잠재력을 지닌다. 또한 HEMS는 안전 분야를 넘어 환경, 운영 데이터까지 아우르는 통합 데이터 플랫폼으로 발전할 수 있을 것이다.

〈그림 4-3〉 KOTEMS의 도로부문 배출통계 제공 예시



자료: KOTEMS 교통부문 온실가스관리 시스템(검색일: 2025.9.8.)

운영체계 측면에서는, 하역장비 인벤토리는 항만 온실가스 인벤토리 관장기관인 해양수산부가 총괄하되, HEMS의 기존 기능과 신규 인벤토리 기능을 명확히 분리하여 관리하는 것이 바람직하다. 현재 HEMS는 시설장비 관리 기능을 중심으로 운영되고 있으므로 기본적인 시스템 유지·운영은 장비 관리 부서에서 수행하는 것이 적절하 판단된다. 다만, 인벤토리 모듈과 관련된 기능은 항만 온실가스 인벤토리 업무 담당 부서에서 책임지고 운영하는 방식이 타당하다. 또한 「탄소중립기본법 시행령」 제74조는 항만 분야 온실가스 정보 및 통계 제출을 위한 기초자료 작성 업무를 해양환경공단에 위탁할 수 있도록 규정하고 있으므로, 하역장비 인벤토리 작성 관련 기능을 해양환경공단에 위탁하는 방안이 제도적·운영적 안정성을 높이는 대안이 될 수 있다. 이러한 역할 분담 구조는 국토교통부가 교통부문 온실가스 인벤토리 업무를 총괄하고, 한국교통안전공단이 KOTEMS를 운영하는 체계와도 유사하며, 하역장비 역시 이러한 방식을 채택하는 것이 효과적일 것이라 판단된다.

3. 감축이행관리체계 마련

1) 에너지 효율 향상 기술 개발 및 보급

전기화가 본격 추진되는 현시점에서 에너지 소비 자체를 줄이는 기술 확보가 중요하다. 이를 위해서는 장비 자체의 에너지 효율을 높이고 운용 과정의 에너지 낭비를 줄이는 기술 개발과 보급 사업을 적극 추진할 필요가 있다. 전기화를 넘어, 에너지 소비를 줄이는 것이 실질적인 온실가스 배출 감축의 핵심이기 때문이다. 특히 공간 제약으로 대규모 재생에너지 설비를 설치하기 어려운 항만에서는 에너지 최적 이용이 중요한 감축 전략이 될 것으로 기대된다.

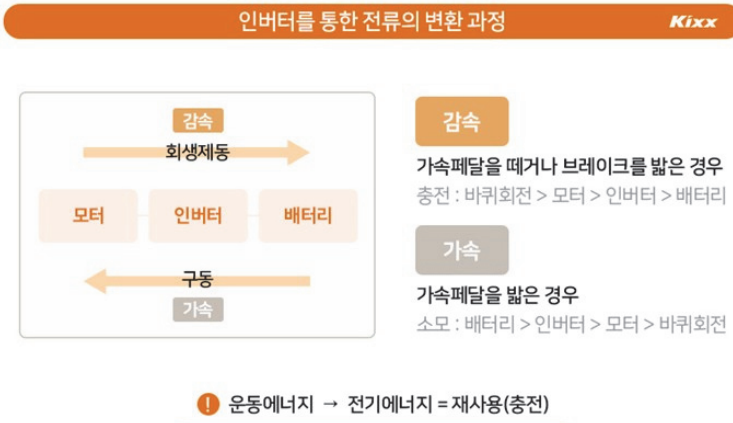
대표적인 장비 단위 에너지 효율 향상 조치로는 회생제동 기술을 들 수 있다. 회생제동 기술은 하역장비 작업시 발생하는 운동·위치에너지를 전기 에너지로 회수하여 재사용하는 원리로, 항만 내 크레인 장비에서도 일정 수준 기술 개발 및 상용화가 이루어진 기술이다. 부산항은 이미 2013년에 회생전력을 활용하는 크레인을 도입, 전기에너지를 30% 가량 절감하는 성과를 낸 바 있다.¹⁰⁴⁾ 참고로 당시에는 정전 대비 목적으로 활용되었으나 현재는 에너지 절감의 핵심 기술로 주목받고 있다.¹⁰⁵⁾

한편, 자동차 산업 분야에서는 단순한 에너지 회수 기능을 넘어 AI가 주변 상황을 고려하여 회생제동 강도와 관성 주행 여부를 자동으로 조절하여 에너지 회수 효율을 최적화하는 등 기술 고도화가 상당히 진전된 상황이다. 이러한 선진 사례를 참고하여 하역장비 분야에서도 항만 작업 특성에 맞는 기술 고도화를 추진해야 한다. 크레인 장비는 더 높은 회수율 확보와 비용 저감을, 전기 이송장비는 주행 패턴에 최적화된 회생재생 시스템 개발이 필요하다.

104) 노해리(2024.7.18.)(검색일: 2025.9.10.)

105) 오수희(2013.6.28.)(검색일: 2025.9.10.)

〈그림 4-4〉 회생제동 기술을 통한 전기에너지 생산 방식(전기차)



자료: 홍성인(2024.4.29.)(검색일: 2025.9.10.)

한편, 장비 단위의 효율 향상만으로는 배출량 감축에 한계가 있는 바 터미널 운영 차원의 에너지 효율 개선도 중요한 과제이다. 운영 과정의 에너지를 절감하기 위한 기술의 대표적인 사례는 에너지 관리 시스템(Energy Management System, 이하 EMS)으로, 타 산업분야에서는 이미 보편화된 기술이다. 공장(Factory EMS), 건물(BEMS), 가정(Home EMS) 등 분야에서는 각 분야 특성에 맞는 시스템이 개발, 보급되어 실시간 모니터링, 에너지 소비 예측, 피크 부하 관리 등을 통해 상당한 에너지를 절감하고 있다. 하역장비는 터미널 운영이라는 목적 하에 다양한 장비들이 유기적으로 연계 운영되므로, 터미널 전체를 아우르는 ‘항만 에너지관리시스템(가칭 PEMS; Port EMS)’을 개발하고 보급할 필요가 있다. 이를 통해 하역장비들의 실시간 에너지 소비를 통합 모니터링하고, 작업 스케줄과 연계한 전력 피크 예측 및 분산, 장비 간 에너지 최적 배분 등을 구현한다면 하역장비뿐 아니라 터미널 전체의 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

한편, 이러한 기술들의 개발과 확산은 민간 자율에만 의존하는 데 한계가 있기 때문에 정부가 초기 시장을 조성하고 기술 확산을 도모하기 위해 적극적으로 지원할 필요가 있다. 「탄소중립기본법」, 「기후기술개발촉진법」을 보면 정부에서도 국가가 이러한 역할을 해야한다고 판단하고 있는 걸로 확인되는데, 정부가 탄소중립 기술의 육성·촉진·활성화를 추진하고 관련 연구기반 조성을 지원할 것임을 명시, 따라서 이러한 법적 근거를 바탕으로 하역장비의 에너지 효율화, 운영 효율화 기술에 대한 정부 차원의 연구개발 및 보급지원사업을 추진할 필요가 있다.

한편, 이러한 기술에 대한 보급지원 사례는 다수 추진된 바 있다. 예를 들어, 과거 한국전력공사는 2017년부터 2019년까지 전력 수요관리 차원에서 ‘항만크레인 회생제동장치 효율향상사업’을 추진한 바 있으며, 선박이나 자동차, 건설기계 분야에서는 효율화 개조 지원사업, 엔진교체사업 등이 추진되고 있다. 또한 에너지 소비를 효율화하는 차원에서 에너지 관리 시스템 보급사업도 활발히 이루어지고 있는데, 공공기관의 경우 10,000㎡ 이상 건축물 신축·증축 시 BEMS 설치가 의무화되었고,¹⁰⁶⁾ 한국에너지공단은 산업계 중소·중견기업을 대상으로 에너지관리시스템 보급지원사업을 추진 중이다. 하역장비 분야에서도 이러한 선례를 참고하여 정부 주도의 기술개발·실증·보급 지원사업을 추진해야 한다.

이 때 필요한 재원은 「탄소중립기본법」 제69조에 따라 조성된 기후대응기금을 활용할 수 있을 것이다. 동법 제70조에 따라 기후대응기금의 재원은 탄소저감 기술개발 및 보급, 감축사업 지원 등에 활용할 수 있도록 정하고 있으므로, 하역장비 효율화 및 온실가스 저감 기술개발 지원사업의 재정적 기반으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

106) 산업통상자원부고시 제2017-13호.

〈그림 4-5〉 2019년 항만크레인 회생제동장치 효율향상사업 시행 공고

1. 사업개요

- 항만크레인에 설치된 저항제동장치를 회생제동장치로 교체하여 에너지소비 효율향상

2. 지원대상

- 전기로 구동하는 항만크레인의 저항제동장치를 회생제동장치*로 교체하는 고객
- 한전에서 지정한 시험기관의 성능시험을 받아 한전과 보급 및 인정계약이 체결된 제품에 한함

3. 지원금

용량	지원금	크레인 용량
250kW이상	540만원/대	40톤
400kW이상	650만원/대	50톤
600kW이상	830만원/대	65톤

※ 지원금 상한 : 전기사용계약 단위별 1억원

4. 사업예산 및 신청기간

- 사업예산 : 5억원
- 신청기간 : '19. 1. 2(수) ~ 예산소진 시까지
- '19. 12. 13(금) 이전까지 지원금을 신청하지 않거나 지원사업 신청서 접수일로부터 3개월 이내에 지원금 신청이 없는 경우 승인된 지원사업 신청건은 취소
- 신청방법 : 한전 지역별 관할지사(지사담당자 불임참고)

자료: KEPCO(2019.01.03)(검색일: 2025.9.10.)

〈그림 4-6〉 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업 지원기준

구분	정부 지원	민간 부담	에너지 사용량(toe)	지원 한도 (억원)	비고
중소	70%	30%	500 이상 ~ 2,000 미만	1	* 부가가치세(VAT) 지원사업장부담
			2,000 이상 ~ 10,000 미만	1.5	
중견	40%	60%	10,000 이상	2	

* 인프라 구축 비용은 계측기와 제어 및 에너지관리시스템 구입비, 설치공사비, 감리비, 시운전비 등에 한함(토지구입비 및 건물공사비 등은 제외)

** KEEP30 참여기업 및 협력사, KEEP+ 선도기업의 경우, 에너지사용량에 관계 없이 사업비 최대한도(2억원) 내 지원 및 지원 비율 10% 상향(중견 40→50%, 중소 70→80%)

자료: 한국에너지공단(2025.3.24.)(검색일: 2025.9.10.), p. 2.

〈표 4-4〉 탄소중립기본법 제70조(기금의 용도)

분야	부문
제70조 (기금의 용도)	기금은 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 용도에 사용한다. 1. (생략) 2. 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장의 추진을 위한 산업·노동·지역경제 전환 및 기업의 온실가스 감축 활동 지원 3. (생략) 4. 기후위기 대응을 위한 녹색기술 연구개발 및 인력양성 5. 기후위기 대응을 위하여 필요한 융자·투자 또는 그 밖에 필요한 금융지원 6-11. (생략)

자료: 탄소중립기본법(법률 제20514호, 2024. 10. 22. 시행)

향후 항만의 전기화가 본격화되면 전체 전력 수요가 급증할 것으로 예상되는 만큼 에너지 효율화 기술의 중요성은 더욱 커질 것이다. 에너지 효율화 기술 보급의 가장 큰 이점은 항만의 전력 인프라 부담 완화 효과를 가져오는 것이다. 즉, 외부 전력망에 대한 의존도를 줄일 수 있어 안정적인 전력 수급 체계 확보에 기여할 수 있다. 또한 운영비 절감 효과로도 이어질 수 있다. 에너지 소비의 효율화는 결국 에너지를 절감하는 것으로, 이는 곧 전력 사용 비용 절감으로 이어진다. 이는 운영사 입장에서는 전기화 전환 이후 경제적 부담을 완화할 수 있는 방안이 된다.

2) 항만 터미널 탄소중립 인증제(가칭) 도입

앞서 살펴본 바와 같이 중국과 일본에서는 항만 터미널의 친환경 노력 수준을 평가·인증하는 제도를 운영 중에 있으며, 인증의 평가 체계 안에서 항만 하역장비의 친환경 전환 및 에너지 효율화 기술 적용 정도를 측정하고 있다. 따라서, 우리나라도 이러한 ‘항만 터미널 탄소중립 인증제(가칭)’ 도입을 고려해 볼 수 있다.

‘항만 터미널 탄소중립 인증제(가칭)’ 도입을 위해서는 먼저 인증의 주체가 될 해양수산부와 연구기관, 업계가 함께 인증 기준과 평가 체계 및 평가 방법론을 명확하게 수립하여 객관적이고 공정한 평가가 이루어지도록 해야 한다. 평가지표는 친환경 하역장비의 도입률 등의 정량지표와 탄소중립 관련 경영전략 수립 여부 등의 정성지표를 병행 설정해야 할 것이다. 특히 일본 CNP 인증 및 중국의 녹색항만 평가 항목들을 참고하여 항만 하역장비의 전기·신재생에너지 동력 방식 도입, 에너지 회생제동 기술 적용 실적 등을 핵심 평가지표로 반영함으로써 항만 터미널의 하역장비 친환경 전환을 유도할 수 있다. 국내 항만의 경우 이미 하역장비 동력원이 경유에서 LNG 및 전기로 전환되고 있는 과정이므로, 이러한 평가항목은 현실성과 실효성이 높다고 판단된다. 또한, 평가 인증의 경우 일본이나 중국과 같이 인증 수준을 등급별로 측정하는 것이 터미널들의 지속적인 개선을 유도하고 등급이 높은 항만 터미널을 우수사례로 부각시키는 데 도움이 될 것이다.

새로운 제도 도입을 위해서는 인증제 도입 취지와 평가 기준에 대해 터미널 운영사들과 사전에 충분히 논의하여 업계의 합의와 참여 의지를 확보하는 것이 전제되어야 한다. 마련된 인증 평가 기준을 일부 터미널을 대상으로 시범 적용한 후 문제점 발굴 및 개선을 통해 참여 대상을 확대하고, 정식 운용하는 것이 제도 정착의 단계적인 방안으로 판단된다. 일본의 CNP 인증 역시 2022년부터 워킹그룹 구성을 통해 평가 방법, 지표 등에 대한 장기적인 검토 및 시범실시 기간을 거쳤음을 참고할 필요가 있다.

〈표 4-5〉 일본 CNP 인증 제도 시행 연혁

일시	내용
2022년 6월 28일	• 제1차 검토회 개최
2022년 8월 30일, 9월 30일	• 제1~2차 워킹그룹 회의 개최
2022년 12월 7일	• 제2차 검토회 개최
2023년 1월 19일, 3월 2일	• 제3차 워킹그룹 회의 개최, 제3차 검토회 개최
2023년 3월 30일	• CNP 인증 제도(안) 수립
2023년 11월~	• 시범실시
2024년 3월 5일, 3월 22일	• 제4차 워킹그룹 회의 개최, 제4차 검토회 개최
2024년 9월 9일, 9월 25일	• 제5차 워킹그룹 회의 개최, 제5차 검토회 개최
2024년 10월~	• 추가 시범실시
2025년 2월 3일, 3월 4일	• 제6차 워킹그룹 회의 개최, 제6차 검토회 개최
2025년 3월 21일	• CNP 인증 제도 최종안 발표

자료: 일본 국토교통성, CNP 인증(컨테이너 터미널) 제도 설명회 자료(검색일: 2025.9.8.)

공정하고 효율적인 인증제도 운영을 위해서는 관련 업무 전담조직 구성도 필요하다. 일본의 경우, 국토교통성 항만국에서 별도의 CNP 추진팀을 설립하여 평가를 총괄하고 있으며, 신청 접수는 각 지방청 개발국이나 정비국에서 받고 있다. 중국의 녹색항만 평가 인증의 경우에는 중국항만협회가 평가부터 인증서 발급까지를 담당하고 있다. 국내 유사 제도로 볼 수 있는 ‘우수녹색물류실천기업’의 경우 국토교통부 물류정책과가 총괄하나, 지정심사 대행기관을 지정하여 신청업무의 접수 및 심사단의 구성, 결과 보고, 홍보 등을 업무를 대행하도록 하고 있다.¹⁰⁷⁾ 따라서, 해양수산부에서도 ‘항만 터미널 탄소중립 인증제(가칭)’ 시행 시, 관련 업무를 공신력 있는 공공기관, 연구기관 또는 협회에 위임하여 업무 전문성과 효율성을 제고하는 방안 역시 모색해 볼 수 있을 것이다.

107) 지정 대행기관은 공공기관 및 정부출연연구기관으로 정하고 있음, 「물류정책기본법」 제60조의 7 및 국토교통부, 「우수녹색물류실천기업 지정요령」 제2조

이와 함께 인증제도의 성공적인 정착과 지속성을 위해서는 관련 법령과 제도를 정비하여 운영기반을 마련해야 한다. 현행 「항만법」에는 제30조 ‘온실가스 등 감축’의 조항이 존재하므로, 동 조항에 추가적인 항목을 신설하여 ‘항만 터미널 탄소중립 인증제(가칭)’를 운영할 수 있는 법적 근거를 확보할 수 있을 것이다. 또한, 일본이나 중국에서는 인증제도 관련 지침 및 가이드라인을 수립한 바와 같이 「항만법」 하위 행정규칙 제정 등을 통해 인증 평가항목과 절차, 인증위원회의 구성·운영 등에 관한 세부사항을 명문화해야 할 것이다. 이러한 법적 체계와 관련하여 우리나라 국토교통부가 「물류정책기본법」 하위 행정규칙으로 제정한 「우수녹색물류실천기업 지정 요령」을 참고할 수 있을 것이다.

인증제 도입을 통해 정부에서는 인증 결과를 탄소중립 항만 추진 정책 평가 및 터미널 지원 정책에 활용할 수 있다. 특히, 하역장비 전환 실적을 인증 평가에 포함하여 이를 현재 시행 중인 ‘항만 무탄소화 전환 지원 사업’ 등과 같은 친환경 장비 전환사업과 연계해 인증을 획득한 터미널은 해당 사업 참여 시 지원 폭을 더욱 확대하는 등의 인센티브를 준다면 인증제의 활성화와 터미널의 친환경 장비 전환을 한층 효과적으로 촉진할 수 있을 것이다. 나아가, 인증을 획득한 터미널 운영사에 대해 터미널 운영 계약(또는 갱신) 시의 가산점 부여, 금융기관과 협력을 통한 융자 혜택 부여 등 다양한 인센티브를 통해 운영사의 참여를 유도할 수 있다. 또한, 정부에서는 인증제 추진 성과를 기반으로 항만분야의 국가 탄소중립 전략 이행 상황을 점검하는 지표로 삼고, 한국형 인증을 획득한 터미널을 국제 친환경 항만의 모범사례로 소개하고 APEC ‘녹색항만 어워드(Green Port Award System, GPAS)’ 등 국제 인증에도 도전함으로써 우리나라 항만의 위상을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

터미널 운영사의 경우, 인증을 획득한 후 이를 대내외 홍보에 적극 활용

할 수 있다. 정부가 공인한 인증은 해당 터미널의 친환경 성과를 입증하는 객관적 지표이므로 화주, 선사, 투자자 등에 친환경 기업의 이미지와 신뢰도를 높일 수 있다. 실제로 친환경 인증을 취득한 터미널은 고객 입장에서 공급망의 탄소발자국을 줄이는 데 기여하므로 고객 확보에도 유리할 것으로 판단된다. 또한 터미널 운영사 내부적으로도 인증 기준을 지속적인 경영개선 목표로 삼아 에너지 효율 향상과 운영 최적화를 지속적으로 점검할 수 있는 선순환 효과를 기대할 수 있다. 그 외에도 항만의 다양한 이해관계자들도 인증제도를 적극 활용할 수 있다. 선사의 경우, 선박 기항지를 선택할 때 해당 터미널의 인증 획득 여부를 고려하여 ‘저탄소 해운 루트’를 최적화할 수 있고, 제조·유통기업들은 인증받은 터미널을 이용함으로써 자사 물류의 Scope 3 배출량 감축 노력을 입증할 수 있다. 또한, 항만 하역장비 제조사나 에너지 관련 기업 등 관련 산업계도 인증 기준에 부합하는 신기술 시장이 확대되면 새로운 사업 기회를 창출할 수 있을 것으로 판단된다.

3) 감축기술·시장정보 DB 구축

하역장비 배출량 파악부터 실제 감축, 이행 관리까지는 인적 역량 확보부터 비용 투자까지 상당한 자원 투입이 이루어져야 하는데, 초기 비용 부담과 더불어 다양한 감축 기술 중 어떤 것이 실제로 투자 대비 효과를 보장할 수 있을지, 터미널 운영 여건상 어떤 투자를 하는 것이 효과적인지 판단하기 어려워 사업자의 적극적 참여를 주저하게 만들고 있다. 이와 관련하여 한철환(2024)¹⁰⁸⁾은 탈탄소 기술에 대한 신뢰할 만한 정보의 부족은 적절한 기술 선택과 투자 결정을 어렵게 할 수 있음을 지적한 바 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 감축 성과별로 인센티브를 제공하고, 우수 실행사례를 공유·확산하는 체계가 필요하다. 이를 통해 정부와 민간이 상

108) 한철환(2024), p. 145.

생하는 지속가능한 탄소 감축 체계를 구축할 수 있다.

다만, 하역장비 분야는 장비별 감축을 위해 적용 가능한 기술, 관련 기술, 서비스 제공업체 현황, 기술별 감축효과 등 시장, 기술 정보 기반이 충분히 구축되어 있지 않다. 즉, 어떤 장비에 어떤 감축기술을 적용하는 것이 유리한지, 기술 적용 시 감축 효과는 어느 정도인지, 관련 기술과 서비스를 제공하는 업체가 누구인지 등에 관한 체계적인 정보가 부족하여 운영사는 장비 전환이나 효율화 투자를 검토하더라도 최적 대안을 선택하는 것에 어려움을 겪을 수 있다.

한편, 앞서 살펴본 바와 같이 연간 총 에너지 사용량이 2,000toe 이상인 에너지다소비업자는 「에너지이용 합리화법」 제32조에 따라 ‘에너지 진단’을 의무적으로 실시하게 되는데, 진단 결과는 EG-TIPS의 감축활동 DB에

〈그림 4-7〉 EG-TIPS의 감축활동 DB

감축활동 Database 검색

업종
업종선택
KSIIC 직접입력

월감액
선택

에너지사용(단위:toe)
선택

투자비회수기간
선택

전단년도
선택

설비
선택

계산활동
선택

투자비
선택

조회하기

총 80188 건

계산활동명	대상설비	계산구분	투자비 회수기간 (년)	월감액 (백만원/년)	투자비 (백만원)	전단년도
냉각탑 Cooling Fan 회전수제어	송풍기 설비	회전수제어설비도입	3.3	0.7	2.3	2024
공기압축기 토출압력 조정	공기 압축기 설비	적정압력관리	0	7.8	0	2024
압축공기 누설방지	공기 압축기 설비	기체(온전관리)	1.4	6.9	10	2024
유압원프 운전합리화	원프 설비	운전방법개선	0.3	32.4	10	2024
냉각수원프 적정량량 고효율원프교체	원프 설비	노후설비대체	3.4	17.8	60	2024
ESS 도입으로 PEAK 전력제어	수.보.배전 설비	산설비도입	7.4	67.42	500	2024
변압기 동계합	수.보.배전 설비	기존설비동계합	1.1	2.85	3	2024
고효율 LED조명등으로 교체	조명 설비	절전형조명설비개체	1	9.43	9.83	2024
경영 고효율 물리 도입	동력설비	부속장치교체및보완	2.3	2.18	5.1	2024
스팀배관 및 부속류 보온강화	보일러	부속장치교체및보완	2.5	1.4	3.54	2024

자료: 한국에너지공단, 에너지진단사업(검색일: 2025.11.13.)

공유된다. 그러나 현재 온실가스 배출권거래제 등 규제를 적용받고 있는 운영사들은 에너지다소비업자에 해당하지만 에너지 진단 대상에서는 제외된 것으로 파악된다. 결과적으로 항만 부문은 감축 기술 발굴을 위한 체계적 정보 제공 체계가 부재한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 하역장비에 대하여 해양수산부 주도로 감축기술 및 시장정보 DB를 구축하고 이를 제공하는 체계를 마련할 것을 제안한다. 장비 종류별로 적용 가능한 절감기술, 기술·서비스 제공업체 현황, 감축효과, 투자비·회수기간 등 핵심 정보를 체계적으로 정비하여 제공한다면 운영사는 장비 전환이나 효율화 전략을 수립하는 데 필요한 기초자료를 확보할 수 있을 것이다. 이러한 정보 기반 구축은 직접적인 컨설팅을 수행하지 않아도 하역장비 감축 투자를 촉진하는 효과적인 정책수단이 될 수 있다. 국외에서도 유사한 방식으로 정보 기반 지원이 이루어지고 있는데, 미국 EPA는 홈페이지에 하역장비 배출 저감을 위한 기술 옵션, 관련 기술자료, 실제 적용사례 등을 제공하고 있으며 CARB는 하역장비 기술평가 보고서 등을 통해 하역장비에 적용가능한 감축 관련 정보들을 제공하고 있다.

이렇게 구축된 DB는 터미널별 여건에 맞는 감축 전략을 수립하는 데 활용될 수 있다. 특히 감축 효과, 투자비용, 회수기간 등에 대한 실질적 정보는 운영사의 전략적 의사결정을 지원하는 핵심 근거로 기능할 것이다.

〈그림 4-8〉 CARB 보고서에 제시된 상용화된 무공해 하역장비 리스트(일부)

CHE Type	CHE Sub-Category	Manufacturer	Platform/Model	Fuel Type/ Power Source	Commercially Available in the US?
AGV	N/A	Kalmar	Fastcharge ¹⁵³	BE	Yes
AGV	N/A	Konecranes	Gottwald AGV ¹⁵⁴	BE	Yes
AGV	N/A	Sany	SIGV8850 ¹⁵⁵	BE	Yes
AGV	N/A	ZPMC	Durapower Battery ¹⁵⁶	BE	No
Rail-Mounted Gantry Crane	N/A	Aicrane	RMG ¹⁵⁷	GE	Yes

CHE Type	CHE Sub-Category	Manufacturer	Platform/Model	Fuel Type/ Power Source	Commercially Available in the US?
Rubber-Tired Gantry Crane	N/A	PACECO	Grid-Electric Conversion ¹⁸⁵	GE	Yes
Rubber-Tired Gantry Crane	N/A	Vahle	Grid-Electric Conversion ¹⁸⁶	GE	Yes
Rubber-Tired Gantry Crane	N/A	Shanghai Zhenhua Heavy Industries (ZPMC)	Grid-Electric Conversion ¹⁸⁷	GE	Yes
Ship-to-Shore Crane	N/A	Doosan Vina	Electric ship-to-shore crane ¹⁸⁸	GE	Yes
Ship-to-Shore Crane	N/A	Hyundai-Samho	Electric ship-to-shore crane ¹⁸⁹	GE	Yes
Ship-to-Shore Crane	N/A	Kalmar Global	Electric ship-to-shore crane ¹⁹⁰	GE	Yes

CHE Type	CHE Sub-Category	Manufacturer	Platform/Model	Fuel Type/ Power Source	Commercially Available in the US?
Yard Truck	N/A	Autocar	E-ACTT ²¹³	BE	Yes
Yard Truck	N/A	Autocar	E-ACTT 4x2 MY2025/2026 Off-Road ²¹⁴	BE	Yes
Yard Truck	N/A	Autocar	E-ACTT 4x2 DOT ²¹⁵	BE	Yes
Yard Truck	N/A	BYD/Ride	8Y ²¹⁶	BE	Yes
Yard Truck	N/A	Easy Mile	TractEasy ²¹⁷	BE	Yes
Yard Truck	N/A	Hyster-Yale	182,000 GCWR ²¹⁸	BE	Yes
Yard Truck	N/A	Kalmar	T2 EV ²¹⁹	BE	Yes

자료: CARB(2025)(검색일: 2025.11.13.) B-23, B-28, B-32.

제3절 정책화 로드맵

본 연구에서는 하역장비의 온실가스 배출을 효과적으로 관리하기 위해 제안한 정책방안들에 대하여 하역장비의 ‘장비관리기준 강화’, ‘배출량 산정, 보고, 검증 체계 구축’, ‘감축이행관리체계 마련’이라는 3개 축을 중심으로 로드맵을 구성하였다. 각 과제는 추진 난이도와 정책 여건, 추진 시급성을 고려하여 단기(2027년 내) 및 중장기(2028년 이후) 단계로 구분하였으며, 구체적인 추진 내용은 다음과 같다.

단기적으로는 온실가스 배출 관리를 위한 장비 관리체계가 작동할 수 있도록 하는 기반을 정비하는 데 집중해야 한다. 장비 등록 정보를 다각화하고 배출량 산정 기준을 표준화하는 것은 향후 모든 온실가스 관련 정책의 전제가 되므로 초기 단계에 우선적으로 추진할 필요가 있다. 감축기술·시장정보 DB 역시 동일한 맥락에서 중요하다. 하역장비 소유·운영자의 본격적인 투자가 이행되기 전, 어떤 기술이 존재하고 어느 정도 감축효과가 예상되는지를 제시해야 하는 역할을 해야 하기 때문이다.

중장기적으로는 실제 배출관리와 장비 전환을 효과적으로 실행할 수 있는 체제로 확장해야 한다. 배출가스 정기검사, 노후 경유 장비 조기폐차 유인 제도와 같은 조치는 중장기 단계에서 본격 시행하는 것이 적절하다. 다만, 이러한 조치가 작동하기 위해서는 검사기준, 노후장비 기준에 대한 검토가 선행되어야 할 것이다. 배출량 산정가이드라인의 경우 단기에 정립한 절차에 더해, 국가 고유 배출계수를 개발하고 가이드라인을 고도화하는 것을 중장기 과제로 설정하였다. 또한 하역장비 온실가스 인벤토리 구축, 에너지 효율 향상 기술 개발 및 보급, 하역장비 탄소중립 인증제(가치) 도입 등은 준비에 시간이 소요되고 일정 수준의 데이터 및 운영 경험이 축적되

여야 효과적인 운영이 가능하므로 중장기 과제로 제안하였다.

〈표 4-6〉 탄소중립항만 전환을 위한 하역장비 관리체계 개선 과제별 이행 시기

구분	정책방안	추진 내용 및 목적	관련주체	이행 시기	
				단기	중장기
장비관리 기준 강화	하역장비 등록정보 확대	• 장비 등록 시 연료유형, 엔진정보 등 온실가스 배출 관련 제원 정보를 추 가로 확보하여 관리정보 정밀화	해양수산부	●	
	노후 경유 장비 관리 강화	• 배출가스(대기오염물질) 정기검사 도입을 통한 운행 단계의 배출 관리 추진 • 정기검사, 엔진 규제 등급 등을 활용 한 노후 경유 장비 조기폐차 유도 근 거 마련	해양수산부, 검사기관		●
배출량 산정, 보고, 검증 체계 구축	배출량 산정 가이드라인 마련	• 항만별·장비별 온실가스 배출량 산 정 일관성 확보를 위한 하역장비 온실 가스 배출량 산정 기준 표준화	해양수산부	●	●
	하역장비 온실가스 인벤토리 구축	• 개별 장비의 온실가스 배출 정보를 통합관리할 수 있는 통계체계 구축	해양수산부, 해양환경공단, 항만협회		●
감축이행 관리체계 마련	에너지 효율 향상 기술 개발 및 보급	• 에너지 효율 향상, 운영최적화 등 기 술 개발 및 보급을 통한 하역장비 에 너지 절감과 온실가스 감축 실현	해양수산부, KIMST		●
	하역장비 탄소중립 인증제(가 칭) 도입	• 자발적 감축 참여 유도를 위해 감축 성과가 확인된 장비를 인증하고, 인 센티브를 제공하는 체계 구축	해양수산부		●
	감축기술· 시장정보 DB 구축	• 하역장비 온실가스 배출 감축 기술 및 시장 정보를 DB로 제공하여 자발 적 투자 촉진 유도	해양수산부	●	●

주: 단기는 2년 이내, 중장기는 3년 이상으로 설정함

자료: 저자 작성

제4절 기대효과

1. 정책적 기대효과

관리체계 정비에 따른 정책적 기대효과는 다음과 같다. 첫째, 하역장비 감축정책이 ‘사업 중심’에서 ‘상시 관리 중심’으로 전환될 수 있다. 그동안 하역장비 감축정책은 전기 장비 전환사업을 중심으로 추진되어 왔으며, 장비 전반의 배출 수준을 지속적으로 파악·관리하는 체계는 상대적으로 미흡하였다. 하역장비 관리체계 정비는 특정 사업에 의존하는 방식이 아니라, 배출 현황 파악-이행 점검-환류로 이어지는 행정적 관리 프로세스를 구축함으로써 온실가스 감축정책이 상시적으로 운영·관리되는 형태로 전환되는 데 기여할 수 있다.

둘째, 항만 부문 온실가스 배출의 관리·감축 이행 기반이 강화되어 국가 감축목표 이행의 실효성을 제고할 수 있다. 하역장비는 항만 내 온실가스 배출의 높은 비중을 차지하는 만큼, 관리체계에 온실가스 관리가 포함되면 장비 단위의 배출 현황 파악과 감축 이행 여부 점검이 가능해진다. 이는 국가 온실가스 감축정책의 실효성을 높이는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 또한 정책 집행의 일관성과 연속성을 확보하는 기반으로 작용하여 안정적인 감축정책 운영을 가능하게 한다.

셋째, 하역장비 감축정책의 예측 가능성과 정밀성이 제고된다. 현재와 같이 관리 기반이 미비한 상태에서는 대상 장비, 적용 시점, 감축 수준을 합리적으로 설정하는 데 한계가 존재한다. 하지만 관리체계 정비를 통해 현재 장비별 온실가스 배출 수준과 배출 특성이 체계적으로 파악되면 중장기 감축목표 설정, 우선관리대상 선정, 지원 기준 마련 등 정책 설계의 정

밀도가 높아지고, 정책 이행 과정에서 예측 가능성과 수용성도 개선될 수 있다.

넷째, 항만 부문 온실가스 정책 설계 및 계획 수립을 위한 기초 기반이 확보될 수 있다. 하역장비 관리체계 구축 과정에서 축적되는 운영 경험들은 향후 항만 내 다른 배출원을 대상 감축정책 기반을 마련할 때 참고 근거로 활용될 수 있다. 또한 장비 관리체계를 통해 파악된 에너지 사용 및 배출 특성 정보들은 항만의 에너지 인프라 확충, 시설계획 등을 수립하는 데 필요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

2. 사회경제적 기대효과

관리체계 정비에 따른 사회경제적 기대효과는 다음과 같다. 첫째, 데이터 기반 정책 수립이 가능해져 정책 리스크와 사회적 비용을 완화할 수 있다. 하역장비 관리체계 개선을 통해 장비별 온실가스 배출 관련 정보가 축적되면 감축정책은 추정이나 경험에 의존하는 방식에서 벗어나 객관적 데이터에 기반해 설계될 수 있다. 이는 과도한 규제나 비효율적 투자 등으로 발생할 수 있는 사회·경제적 비용 발생 가능성을 줄이는 데 기여할 수 있다.

둘째, 국내 항만의 친환경 경쟁력과 대외 신뢰도를 제고할 수 있다. 하역장비 단위의 온실가스 관리체계 확립은 국제 선사나 화주의 ESG 요구에 효과적으로 대응할 수 있는 기반을 제공한다. 이를 통해 국내 항만은 친환경 운영 역량을 체계적으로 입증할 수 있으며, 국제 해운·물류 시장에서의 신뢰도와 경쟁력 제고로 이어질 수 있다.

셋째, 감축 투자가 운영 성과로 환원될 수 있는 구조가 형성되어 감축의 지속가능성이 제고될 수 있다. 하역장비 관리체계 정비를 통해 체계적인

감축 성과 관리가 가능해지면 감축 활동의 효과가 객관적으로 확인·인정될 수 있는 기반이 형성된다. 이는 운영비용 절감, 감축 성과에 대한 인센티브 연계, 친환경 운영 역량에 대한 인증 등과 결합되어 운영사 입장에서 감축 투자가 단순한 비용 부담이 아니라 실질적 편익으로 작용할 수 있는 환경을 조성한다. 이러한 선순환 구조는 장기적으로 운영사 중심의 지속적인 감축 이행을 가능하게 하는 기반으로 작용할 수 있다.

05

결론 및 정책제언

제1절 결론

1. 하역장비 온실가스 관리체계 정비 시급

기후변화 대응은 국제사회의 핵심 과제로 자리잡았으며, 이에 따라 항만 부문에서도 탄소중립 달성을 위한 온실가스 배출 관리 중요성이 빠르게 확산되고 있다. 특히 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 통해 항만 부문의 탄소중립 목표가 공식화되면서 항만 내 주요 배출원의 온실가스 감축 노력이 주요 정책 과제로 부상하고 있다. 이 과정에서 하역장비는 항만 운영주체의 직접적 관리가 가능하고, 항만 내 온실가스 배출 비중이 높으며, 공급망 차원의 탄소발자국 관리나 물동량과의 탈동조화 전략을 구현하는 데에도 적절한 관리 대상이라는 점에서 우선적인 관리 대상으로 인식되고 있다.

그러나 현행 하역장비 관리체계는 안전성 확보와 대기오염물질 저감을 중심으로 구축되어 있어 온실가스 감축활동을 체계적으로 추진하는 데 한

계가 있다. 또한 현재 하역장비 온실가스 감축정책은 주로 에너지 전환에 초점을 두고 있으며, 목표관리제나 배출권거래제 등을 통해 간접적으로 관리되는 수준에 머물러 있다. 장비 등록 단계에서는 온실가스 관리에 필요한 기초 정보가 충분히 수집되지 않고 있으며, 운행 단계에서는 장비별 배출량을 산정하거나 실제 배출을 모니터링하고 고배출 장비를 식별할 수 있는 기준과 절차, 제도적 근거가 마련되어 있지 않다. 아울러 노후 경유 장비와 같이 온실가스 배출 부담이 큰 장비에 대해서도 선제적으로 운행을 제한하거나 전환을 적극 유도할 수 있는 관리수단이 부족하다. 이처럼 현행 관리체계 하에서는 하역장비의 온실가스 배출 수준을 파악하거나 감축 정책의 이행 성과를 평가하는 것이 어려우며, 효과적인 감축 이행을 추진 하는데 한계가 있다.

따라서 국내 항만 탄소중립 실현을 위해서는 하역장비를 온실가스 관리 대상으로 명확히 하고 하역장비 관리주기 전반에서 발생하는 배출을 파악하고 관리할 수 있도록 하는 하역장비 관리체계를 조속히 정비할 필요가 있다. 이는 특정 사업과 같은 단편적 감축 수단에 의존하는 것이 아니라, 하역장비의 감축 활동이 효과적으로 이루어질 수 있도록 하는 관리 기반을 정비하는 것으로서 항만 탈탄소화를 위한 핵심 과제라 할 수 있다.

2. 주요국 및 타 부문은 온실가스 관리 기반 강화 중

최근 주요국들은 하역장비의 온실가스 배출 저감을 위해 장비 전동화와 같은 단일 기술 조치에 그치지 않고, 인벤토리 구축, 기준·도구 제공, 인증 제도 도입 등 다양한 정책수단을 병행하는 방향으로 접근을 확장하고 있다. 즉, 하역장비 관리주기 동안 발생하는 온실가스 배출을 파악하고 감축 이행을 뒷받침할 수 있도록 관리 기반을 정비하는 흐름이 강화되고 있다.

예를 들어, 미국 CARB는 대기오염물질 기반의 경유 하역장비 운행규제를 넘어 무공해 장비로의 전환을 유도하기 위한 제도 개선을 추진하는 한편, 친환경 장비 전환 지원사업, 하역장비 온실가스 인벤토리 가이드라인 및 산정 도구 제공 등을 통해 데이터 기반 관리를 추진하고 있다. 싱가포르 는 장비 전동화와 더불어 고효율 장비 도입, 에너지 관리 시스템 도입, 디지털 기반 운영 최적화 등 운영적 조치를 관리전략으로 함께 추진하고 있으며, 일본은 하역장비 온실가스 배출량 산정 방법론 마련, 산정 도구 제공, 탄소중립항만 인증제 도입 등을 통해 관리 기반을 정비하고 있다.

건물·산업·수송 등 부문에서도 관리대상을 중심으로 다양한 정책수단을 활용하는 방식으로 관리 기반이 정비되고 있다. 산업 부문은 에너지 절감이나 온실가스 감축과 관련된 성과 공유 체계를 구축하고, 데이터 기반 관리와 감축 이행을 촉진하기 위한 여러 지원사업들을 추진하고 있다. 건물 부문은 온실가스 감축 기여를 인정하는 인증제도를 마련하고 그에 상응하는 인센티브를 제공하고 있으며, 수송 부문은 건설기계, 화물차 등의 운행 단계 배출의 정기적 모니터링(대기오염물질 대상), 온실가스 고배출 차량의 조기폐차 유도, 친환경 전환 지원사업 추진, 데이터 기반 관리 등 다양한 관리수단을 활용하고 있다.

이러한 사례들은 하역장비 온실가스 감축이 특정 기술적 조치만으로 해결되는 문제가 아니며, 하역장비를 중심으로 온실가스 감축 활동이 장비 관리주기 동안 상시적·지속적으로 이루어질 수 있도록 하는 관리 기반을 마련하는 것이 중요한 정책 과제를 시사한다. 따라서 하역장비 온실가스 감축활동이 효과적으로 이루어질 수 있도록 하역장비 관리체계 정비를 추진해야 한다.

3. 효과적인 온실가스 감축을 위한 하역장비 관리체계 개선 필요

하역장비 온실가스 감축이 효과적으로 이루어지기 위해서는 등록-운행-폐기에 이르는 하역장비 관리주기 전반에서 배출 정보를 파악하고 관리할 수 있는 장비 관리 기반이 필요하다. 이는 하역장비 관리체계가 기존의 안전·대기오염물질 중심에서 나아가 온실가스 감축 이행으로 연결되도록 그 틀을 보완·확장하는 것을 의미한다.

이를 위해 첫째, 장비 관리주기별로 온실가스 감축 이행을 위한 관리 기반을 정비할 필요가 있다. 등록 단계에서는 동력원 유형, 엔진 또는 모터 특성 등 온실가스 배출 특성 파악을 위해 필요한 정보를 충분히 확보하고, 운행 단계에서는 엔진의 주기적 성능 점검을 통해 배출 성능 변화를 모니터링할 수 있어야 한다. 또한 온실가스 배출 부담이 큰 노후 경유 장비부터 퇴출을 유도하기 위해 일정 조건 충족 시 조기폐차를 유도할 수 있는 근거를 마련하여 고배출 장비가 장기간 운행되는 현재 구조를 개선해야 한다.

둘째, 하역장비 배출량을 측정, 파악하고 이를 활용해 데이터 기반 의사결정을 할 수 있는 기반을 마련해야 한다. 이를 위해서는 먼저 일관성 있는 배출량 산정을 위한 표준화된 배출량 산정 가이드라인을 마련해야 한다. 그래야만 장비·항만 간 비교가 가능해지고, 감축정책 효과를 평가할 수 있다. 또한 하역장비 인벤토리를 구축하여 장비 단위 온실가스 통계를 확보하고, 이를 다양한 통계 지표로 확장하여 정책적·산업적 활용이 가능하도록 할 필요가 있다.

셋째, 감축 이행을 지속적으로 유도할 수 있는 지원·유인 구조를 마련해야 한다. 이를 위해 정부는 기술적·운영적 조치를 위한 다양한 감축기술 개발과 보급을 확대해야 한다. 또한 온실가스 감축 노력에 대한 터미널 단위의 감축 성과를 인정하는 인증제도를 마련하고 투자 결정에 참고할 수 있

는 기술 및 시장정보 공유체계를 마련하여 운영사의 자발적·지속적 참여를 유도해야 한다. 그래야만 온실가스 감축이 사업 중심 접근을 넘어, 관리·이행이 지속적으로 작동하는 구조로 정착될 수 있다.

제2절 정책제언

1. 하역장비 등록대장 서식 개정

하역장비의 온실가스 배출을 체계적으로 관리하기 위해서는 장비 등록 단계에서 온실가스 배출에 직접적인 영향을 미치는 원동기 관련 기초 제원 정보를 정확하게 확보할 필요가 있다. 이를 위해 「항만시설장비 관리규칙」 [별지 제2호서식]을 개정해야 한다.

한편, 현재 하역장비 등록은 주로 HEMS를 통해 온라인으로 이루어지고 있으므로 등록절차의 디지털 입력 방식을 표준화하여 데이터 정확성과 활용성을 높이기 위한 노력도 필요하다. 실제로 자유 입력(오픈 문항) 방식은 단위 불일치, 오기입, 숫자자리 오류 등 입력 오류가 빈번하게 발생하여 데이터 품질을 저하시킨다는 문제가 제기되고 있다. 따라서 입력 항목은 가능한 객관식(선택형)으로 제공하여 단위 불일치나 입력오류를 최소화해야 한다. 예를 들어, 연료 유형은 ‘경유·LNG·전기·수소·기타’ 등 선택형 객관식 문항을 활용하고, 엔진 또는 모터 출력(HP 또는 kW), 회전수(RPM), 엔진 배기량(cc), 모터 정격 전압(V) 등 수치 입력이 필요한 항목은 가능하면 선택형 또는 범위형 객관식 문항을 도입하여 단순 입력오류를 최소화할 필요가 있다. 부득이하게 주관식 입력이 필요한 경우에는 시스템에서 허용 가능한 값의 범위를 설정하고, 그 범위를 벗어나는 값은 자동으로 오류 검

증 절차를 거치도록 하여 입력 결과의 정확성을 확보할 수 있다.

이러한 서식 개선은 장비의 제원정보를 체계적으로 확보함으로써 향후 온실가스 배출량 산정 및 장비 전환정책의 기초자료로 활용될 수 있는 데이터 기반 관리체계의 기반 마련으로 이어질 것이다. 또한 입력항목의 표준화는 운영사별 보고 기준 차이를 줄여 통계의 신뢰성과 관리 효율성을 동시에 높이는 효과를 가져올 것으로 기대된다.

2. 운행 장비 배출가스 관리·노후 경유 장비 전환 촉진 근거 마련

하역장비 온실가스 배출을 효과적으로 감축하기 위해서는 배출 기여도가 높은 경유 장비를 체계적으로 관리해야 한다. 그러나 현행 법령은 장비가 사용되는 과정에서의 배출 성능 변화를 지속적으로 모니터링하거나, 노후·고배출 장비 운영을 억제할 수 있는 근거가 마련되어 있지 않다.

이에 ① 장비 배출가스 정기검사 기준 마련, ② 노후 하역장비 조기폐차 권고 근거 마련, ③ 조기폐차 지원 근거 마련을 통해 운행 단계의 배출을 직접 관리할 수 있도록 하는 제도를 마련해야 한다. 이때, 경유 하역장비의 경우 노후화에 따라 엔진 성능이 저하되면 연료 효율 악화로 온실가스와 대기오염물질이 동시에 증가하는 경향이 있음을 고려하면 현행 대기오염물질 규제 체계를 활용하는 방식으로 접근하였다. 온실가스 배출 규제를 새로 도입하는 것이 직접적인 수단일 수 있으나, 이미 대기오염물질 관리체계가 구축되어 있다는 점을 고려하면 기존 체계를 활용하는 것이 실행 가능성과 관리 효과 측면에서 더 유리하기 때문이다.

이를 위해서는 먼저 하역장비 배출가스를 정기적으로 검사하는 체계를 마련해야 한다. 앞서 살펴본 바와 같이 현행 「항만대기질법」은 장비 제작

단계의 배출가스 허용기준 충족 여부를 서류로 확인하는 수준에 머무르고 있다. 반면, 건설기계 분야에서는 「대기환경보전법」, 「건설기계관리법」 등을 통해 건설기계 정기검사 시 배출가스 검사를 병행하도록 의무화하여 실사용 단계의 배출을 관리하고 있다. 경우 장비는 연식, 정비 상태, 작업 강도 등에 따라 배출량이 달라질 수 있으므로 하역장비 또한 「항만대기질법」과 「항만법」 개정을 통해 운항단계에서 발생하는 배출성능 저하를 주기적으로 점검·관리할 수 있는 체계를 구축할 필요가 있다. 더불어 법 개정이 이루어진다면, 「항만시설장비 검사기준」에 배출가스 검사 관련 항목을 보완하여 검사체계를 강화하여야 할 것이다.

〈표 5-1〉 항만대기질법 개정(안)-하역장비 배출가스 정기검사

현행	개정(안)
제14조(하역장비의 배출가스허용기준 등) ① 항만사업자는 대통령령으로 정하는 하역장비 배출가스허용기준에 맞게 하역장비를 운영하여야 한다. ② 해양수산부장관은 제1항에 따른 하역장비 운영현황을 파악하기 위하여 해양수산부령으로 정하는 바에 따라 필요한 자료의 제출을 항만사업자에게 요구할 수 있다. 이 경우 자료의 제출을 요구받은 자는 특별한 사유가 없으면 이에 따라야 한다. 〈신설〉	제14조(하역장비의 배출가스 허용기준 등) ① (현행과 같음) ② (현행과 같음) ③ 항만사업자는 「항만법」 제33조에 따라 일정 기간마다 하역장비에서 나오는 배출가스가 하역장비 배출가스허용기준에 맞는지를 검사하는 하역장비 배출가스 정기검사를 받아야 한다. 다만, 환경친화적 하역장비 중 해양수산부장관이 정하는 하역장비의 경우에는 배출가스 정기검사 대상에서 제외한다.

자료: 저자 작성

〈표 5-2〉 항만법 개정(안)-하역장비 정기검사

현행	개정(안)
제33조(시설장비의 검사 등) ① 시설장비관리자는 사용·관리하는 시설장비에 대하여 다음 각 호의 구분에 따라 관리청이 실시하는 검사를 받아야 한다. 1-2. (생략) 3. 정기검사: 사용 중인 시설장비의 안전상태를 확인하기 위하여 제조검사일이나 설치검사일부터 해양수산부령으로 정하는 기간마다 정기적으로 하는 검사 4. (생략) ②-③ (생략)	제33조(시설장비의 검사 등) ① (현행과 같음) 1-2. (현행과 같음) 3. 정기검사: 사용 중인 시설장비의 안전상태를 확인하기 위하여 제조검사일이나 설치검사일부터 해양수산부령으로 정하는 기간마다 정기적으로 하는 검사와 「항만대기질법」에 따른 하역장비의 정기검사 4. (현행과 같음) ②-③ (현행과 같음)

자료: 저자 작성

이와 함께 노후 경유 하역장비의 조속한 친환경 전환 유도를 위해 〈표 5-3〉, 〈표 5-4〉와 같이 「항만대기질법」 및 시행령을 개정해야 한다. 현행 제도상으로는 「항만대기질법」상 배출허용기준과 정기검사 기준을 충족하는 경우 장비 운행 제약이 없다. 하지만 노후 경유 장비는 온실가스 감축 차원의 관리 필요성이 상대적으로 높으므로, 운행 기준을 충족하더라도 특정 엔진 규제 등급 이하 엔진을 탑재한 장비를 조기폐차 권고 대상으로 설정하여 노후 경유 장비부터 단계적으로 친환경 장비로 전환하도록 유도하는 관리체계를 구축할 필요가 있다.

〈표 5-3〉 항만대기질법 개정(안)-노후·고배출 하역장비의 운행관리 등

현행	개정(안)
〈신설〉	제00조(노후·고배출 하역장비의 운행관리 등) ① 해양수산부장관은 항만의 대기질 개선 및 기후·생태계 변화유발물질 배출감소를 위하여 필요하다고 인정하면 해양수산부장관이 정하는 요건을 충족하는 하역장비의 소유자에게 조기 폐차를 권고할 수 있다. ② 국가나 지방자치단체는 환경친화적 하역장비의 보급, 전환을 촉진하기 위하여 제1항에 따른 권고에 따라 하역장비를 조기 폐차를 이행하는 항만사업자에 대하여 필요한 비용을 지원할 수 있다.

자료: 저자 작성

〈표 5-4〉 항만대기질법 시행규칙 개정(안)-조기폐차 대상 하역장비

현행	개정(안)
〈신설〉	제00조(조기폐차 대상 하역장비) 법 제00조제1항에 따른 “해양수산부장관이 정하는 요건을 충족하는 하역장비”는 다음 각 호의 요건을 모두 갖춘 하역장비를 말한다. 1. 조기에 폐차할 것을 권고하는 시점부터 거꾸로 계산하여 6개월 이상 연속하여 등록된 하역장비 2. 「항만법」 제33조에 따른 정기검사에서 적합판정을 받은 하역장비 3. 「항만대기질법」 제14조 및 동법 시행령 제9조에 따른 배출허용기준에 부합하는 하역장비 4. 해양수산부장관이 정하는 기준에 부합하는 노후 하역장비

자료: 저자 작성

3. 온실가스 배출량 산정체계 정비

하역장비의 온실가스 배출량을 체계적으로 파악하고 관리하기 위해서는 표준화된 산정 기준을 정비하는 것이 필요하다. 현재 하역장비 배출량은 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」의 도로 이동 연소 부문의 산정방식을 준용하거나 미국 EPA의 ‘항만 배출 온실가스 인벤토리 가이드라인’을 참고하여 산정하는 것이 일반적이다. 그러나 하역장비는 자동차와는 작업부하, 가동시간, 운행패턴 등 운행 특성이 상이하여

도로 이동연소 부문 산정방식으로는 실제 배출 특성을 반영하기 어렵다. 또한 미국 EPA 기준을 그대로 준용하는 것은 국내 운행환경, 연료특성 등이 다르기 때문에 한계가 있다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 먼저 표준화된 산정체계를 마련하는 것이 필요하다. 따라서 해양수산부 주도로 행정지침 수준의 「하역장비 온실가스 배출량 산정 가이드라인」을 제정하고, 시범항만 운영 등을 통해 그 적정성을 검증한 뒤 국가 산정체계로 정립하는 방식을 고려할 수 있다. 지침에는 산정식, 산정 시 활용될 활동자료 정의 및 범위, 데이터 품질 기준, 배출계수 등 산정 표준화를 위해 필요한 사항들이 포함되어야 한다.

이때, 배출계수의 경우 하역장비 특성을 고려한 국가 고유 배출계수 개발사업을 추진해야 한다. 현재 도로 이동연소 부문의 경우 CO₂, CH₄, N₂O 배출계수가 모두 존재하지만, 하역장비 부문은 국가 배출계수가 부재하여 세계 평균치인 기본 배출계수나 미국 EPA의 배출계수를 활용해야 하는 실정이다. 특히 CH₄와 N₂O는 엔진 기술수준에 따라 배출 특성이 크게 달라지기 때문에, 국내 하역장비 에너지원, 운행 특성 등을 고려한 국가 고유 배출계수의 확보를 개발·이용하는 것이 필요하다. 배출계수 개발은 초기 단계에는 국제 주요 가이드라인의 계수를 참고하되, 국내 운행 환경 특성을 반영한 보정계수를 적용하여 활용하는 방안을 고려할 수 있다. 이후에는 주요 항만의 하역장비를 대상으로 실측을 통해 조사하여 국가 고유 배출계수 3종을 도출하는 형태로 접근하는 것이 적절하다. 그리고 국가 고유 배출계수가 개발되면 온실가스종합정보센터 검증을 거쳐 공식 국가계수로 공표하는 절차가 필요하다.

〈그림 5-1〉 국가 온실가스 배출, 흡수계수 개발-공표-활용 체계



자료: 온실가스종합정보센터(2020), p. 7.

4. 하역장비 온실가스 인벤토리 구축

현재 산업부문의 경우 「에너지법」 제19조(에너지 관련 통계의 관리·공표)에 따라 매년 산업부문 에너지 사용 및 온실가스 배출현황 조사를 수행하고, 이를 통해 국가 온실가스 인벤토리를 구축하고 있다. 건물부문 역시 「녹색건축법」 제10조(건축물 에너지·온실가스 정보체계 구축 등)에 따라 온실가스 통계를 구축하고 있으며, 교통부문의 경우 「지속가능교통법」 제7조(지속가능 국가교통물류발전 기본계획의 수립)를 통해 지방자치단체장과 교통물류운영자에게 관련 자료 제출을 요구할 수 있도록 하고 있다. 이처럼 타 부문은 관련 법령에 근거하여 에너지 사용이나 온실가스 배출 현황을 파악하고, 이를 국가 통계 및 인벤토리 구축에 활용하고 있다.

그러나 「항만법」에서는 온실가스 통계와 관련한 조항은 부재하며, 온실가스 관련 내용을 담은 제30조는 항만사업자의 온실가스 감축 노력과 정부

의 권고를 규정하는 선언적 조항에 머물러 있다. 그로 인해 항만 부문 온실가스 통계 작성에 필요한 자료를 확보할 수 있는 법적 근거가 미흡하다. 그러나 「탄소중립기본법」 제36조는 해양수산부 장관이 항만 부문을 포함한 통계를 매년 작성해 종합정보센터에 제출하도록 규정하고 있는 바, 항만 부문에서도 온실가스 인벤토리 작성을 위한 자료 확보 근거를 마련할 필요가 있다. 다만, 이는 새로운 의무 제출 규제를 도입하려는 취지보다는, 통계 작성에 필요한 범위에서 자료를 요청, 수집할 수 있는 제도적 기반을 정비하는 데 목적이 있다.

온실가스 인벤토리는 배출량을 산정하고 기록하는 계정으로, 작성 대상의 배출 추이를 파악하고 정책효과 평가를 가능하도록 하는 데이터 기반이 된다. 이러한 관점에서 항만 부문 온실가스 인벤토리는 항만 전체 단위로 그치기 보다는, 하역장비를 대상으로 하는 온실가스 인벤토리를 병행 구축할 필요가 있다. 이에 「항만법」 제30조를 개정하여 해양수산부장관이 항만 온실가스 통계를 구축할 수 있는 근거를 마련하고, 그 작성 단위를 항만과 하역장비로 구분할 것을 제안한다. 이러한 체계가 마련되면 항만 부문 국가 온실가스 인벤토리 작성의 기초 자료로 활용되는 동시에, 하역장비 온실가스 감축정책의 설계와 이행 점검을 뒷받침하는 기반으로 활용될 수 있을 것이다.

〈표 5-5〉 항만법 개정(안)-하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련

현행	개정(안)
제30조(온실가스 등 감축) ①-② (생략) 〈신설〉	제30조(온실가스 등 감축) ①-② (현행과 같음) ③ 해양수산부장관은 항만의 온실가스 배출량 관련 시책의 효과적인 수립, 시행을 위하여 이와 관련된 통계를 구축할 수 있다.
〈신설〉	④ 제3항에 따른 통계 작성 단위는 대통령령으로 정한다.

자료: 저자 작성

〈표 5-6〉 항만법 시행령 개정(안)-하역장비 온실가스 인벤토리 구축 근거 마련

현행	개정(안)
〈신설〉	제00조(온실가스 통계 작성 단위 등) ① 법 제30조 제4항에 따른 통계 작성 단위는 다음 각 호와 같다. 1. 항만 2. 하역장비
〈신설〉	② 해양수산부장관은 법 제30조 제3항에 따른 통계 작성을 위하여 필요한 경우 관계 중앙행정기관의 장 또는 항만사업자에게 자료 제출이나 협조를 요청할 수 있다.

자료: 저자 작성

5. 기술개발 및 보급사업 추진 확대

하역장비 온실가스 배출 감축이 실현되기 위해서는 적용 가능한 감축기술이 전제되어야 한다. 따라서 온실가스 감축 및 에너지 효율 향상을 위한 기술투자는 온실가스 감축정책의 핵심 요소이다. 특히 하역장비는 시장 규모가 제한적이고 야드 트랙터와 같은 이송장비를 제외하고, 크레인류는 일반적으로 수요자 요구에 맞추어 주문제작 형태로 공급된다. 또한 고출력·연속운전 등의 작업특성으로 인해 자동차나 건설기계, 농기계 등과는 다른 기술적 요구가 존재한다. 아울러 감축기술 도입을 통해 발생하는 온실가스 저감 효과는 국가 감축 목표 달성에 기여하지만, 초기 투자 비용과 운영 부담은 터미널 운영사에 집중된다. 이러한 구조에서는 민간 기업이 주도적으로 기술개발 투자를 추진하기 어렵고 기술 확산 속도 또한 제한될 수밖에 없다. 따라서 국가 주도로 차세대 저탄소·무탄소 엔진 기술, 회생제동 기술, 에너지관리시스템 기술, 장비 운영 최적화 기술 등 온실가스 감축 기술 확보를 위한 연구개발과 실증, 보급사업을 적극 추진해야 한다.

특히 2050년 항만 탄소중립 달성이라는 중장기 목표를 고려할 때, 하역 장비 감축 기술은 관련 기술 성숙도를 고려하여 핵심 기술 확보부터 실증 및 보급사업까지 연계 추진할 필요가 있다. 아울러 기술 보급 시에는 「탄소 중립기본법」, 「에너지이용합리화법」 등 기존 탄소중립·에너지 전환 관련 재원을 활용, 해양수산부-운영사 간 매칭펀드 형태로 보급사업을 추진해야 한다. 이를 통해 기술의 현장 수용성을 높이고 기술 도입 및 운영에 대한 민관 공동의 책임성을 확보할 수 있을 것이다. 나아가 국내 항만에서 축적된 기술과 운영 경험을 바탕으로 해외 항만 시장으로 확산하여 관련 산업의 경쟁력을 강화하는 전략적 접근도 함께 추진할 필요가 있다.

6. 에너지 전환의 과도기적 대응체계 마련

하역장비 에너지 전환 과정에서 LNG 장비는 독특한 위치를 가진다. LNG는 경유 대비 CO₂ 및 대기오염물질 배출이 적어 환경적 우위가 존재한다. 하지만 전기 장비에 비해서는 그 효과가 제한적이며, 특히 메탄슬립(Methane slip) 문제로 인해 장기적 탈탄소 전략에서 지속가능한 대안이 될 수 없다. 따라서 LNG 장비는 최종적으로 전환 대상이라는 점에서 경유 장비와 동일한 범주에 포함되지만, 전환의 우선순위와 속도는 경유 장비의 후순위로 설계하는 것이 합리적이다.

한편, 하역장비의 에너지 전환 추진은 단순한 장비 교체를 넘어, 기존 연료 인프라, 감가상각 잔존가치 등 복합적 문제를 수반한다. 항만 내 LNG 장비는 도입 당시 대기오염물질 저감을 목적으로 2015년부터 보급 활성화 되었으나 최근 탈탄소화 정책의 중심이 전기화로 이동하면서 아직 감가상각 기간이 남은 장비와 기구축된 충전 인프라를 유지할 것인지, 조기 전환할 것인지를 둘러싼 운영사의 고민이 커지고 있다. 이는 2000년대 초반 정

부 지원으로 대규모로 보급된 CNG 버스가 전기·수소 버스로 정책방향이 전환되면서 충전 인프라 운영 손실, 운영 리스크 확산 등 문제가 불거진 사례와 유사하다.¹⁰⁹⁾ 이 사례는 연료 전환 정책이 단순한 장비 교체 차원을 넘어 인프라 투자, 운영계약, 재정 지원 구조 등과 긴밀히 얽혀 있음을 보여준다. 항만 역시 LNG 장비와 충전 인프라가 단기간에 내 활용 한계에 직면할 경우 유사한 상황이 발생할 수 있으며, 이는 운영사 입장에서 상당한 부담으로 작용할 수 있다.

그 외 환경적 측면에서 도입된 지 몇 년 되지 않은 LNG 장비를 조기에 폐기·교체하는 것은 제조·폐기 과정에서의 추가 배출과 자원 낭비를 유발하여 오히려 환경적 비효율을 초래할 가능성이 크다. 또한 하역장비는 고하중 반복작업 특성상 고출력 및 장시간 연속 운전이 요구되는데, 현재 기술 수준에서 이러한 요구 수준을 완전히 충족시키는 데에는 한계가 있다. 따라서 단기간에 모든 장비를 전기식으로 전환하는 것은 기술적, 운영적 제약이 있으며, LNG 장비는 이러한 전환 과정에서 필요한 과도기적 역할을 수행할 수 있는 가교(bridge) 기술로서 일정 기간 활용될 수 있다.

이에 따라 LNG 장비를 당장의 폐기·전환 대상으로 볼 것이 아니라, 우선적으로 경유 장비의 퇴출과 전환을 추진하는 것이 합리적이다. 이를 위해 경유 장비의 조기폐차 유도 정책을 우선 시행하는 한편, 일정 기간 동안 LNG 장비를 저탄소 장비로 인정하는 체계를 마련할 필요가 있다. 예를 들어, ‘항만 터미널 탄소중립 인증제(가칭)’의 심사 기준 등에 LNG 장비를 부분적 감축 기여 장비로 인정하는 방안을 고려할 수 있을 것이다. 다만 이러한 인정은 과도기적 조치에 해당하며, 경유 장비 퇴출이 상당 수준 진전된 이후에는 LNG 장비 역시 본격적 전환 대상으로 포함시키는 것이 바람직하다.

109) 유재준(2024.1.4.)(검색일: 2025.8.25.), 주병국(2020.8.14.)(검색일: 2025.8.25.)

한편, 전기화 확산으로 LNG 장비가 전체 하역장비 비중이 일정 수준 이하로 축소되는 단계에서는 충전 인프라와 잔존 장비의 운영을 위한 최소한의 인프라 유지가 필요할 수 있다. 과거 버스 부문에서도 CNG 충전소 이용 규모가 작거나 충전운행 대수가 기준 이하인 경우, 충전소 접근성이 낮아 공차주행이 길어지는 경우에 한해 에너지 공급자 또는 운송사업자에게 한시적으로 연료비 보조가 이루어진 바 있다.¹¹⁰⁾ 따라서 이러한 사례를 참고하여, LNG 하역장비의 추가 확산을 유도하지 않는 범위 내에서, 충전 인프라의 안정적 운영을 목적으로 한시적·예외적 조치로서 연료비 보조 방안도 고려해볼 수 있을 것이다.

제3절 향후 연구

본 연구는 컨테이너 터미널 하역장비의 온실가스 감축 활동을 효과적으로 추진하기 위한 관리체계 구축에 초점을 두었으나, 하역장비의 원활한 감축 이행과 항만의 탄소중립 목표 달성을 위해 병행되어야 할 보완적 과제들을 추가적으로 제안하고자 한다. 첫째, 본 연구가 컨테이너 터미널 중심의 하역장비를 대상으로 관리체계를 설계한 만큼, 향후에는 컨테이너 외 양곡, 석탄, 목재, 잡화 등 일반화물을 취급하는 하역장비까지 고려한 관리체계를 마련할 필요가 있다. 일반화물 취급 장비는 장비 종류 및 구조, 작업 패턴 등이 컨테이너 취급 장비와 상이하여 배출 특성 또한 다르다. 따라서 항만 하역장비 전반의 배출 실태를 파악하고 실효성있는 감축 전략을 수립하기 위해서는 일반화물 하역장비를 대상으로 하는 연구 또한 추진될 필요가 있다.

110) 환경부(2022), pp. 6-9.

둘째, 온실가스와 대기오염물질을 통합 관리하는 체계가 필요하다. 현재 두 오염물질은 각 「탄소중립기본법」, 「항만대기질법」 등에 따라 별도 관리되고 있으나, 두 오염물질 모두 동일한 장비를 대상으로 유사한 활동자료를 기반으로 산정되는 만큼 기술적·실무적 측면에서 통합 관리 적합성이 높다. 현재 미국 등 주요국은 두 오염물질 배출을 함께 관리하며, 궁극적으로 무공해 전환을 목표로 하는 방향으로 정책이 마련되는 추세이다. 따라서 우리나라 역시 하역장비 배출 관리를 온실가스와 대기오염물질을 포괄하는 통합적 체계로 전환한다면 정책 실행력을 강화할 수 있을 것이다.

셋째, 항만 전력 인프라 확충을 조속히 추진해야 한다. 안정적 전력 공급 인프라의 중요성이 높아지며, 따라서 전기화가 본격화되기 전 충분한 전력 공급 인프라가 전제되어야 한다. ABS, & AAPA(2024) 조사에 따르면 안정적 전력 공급이 주요 탈탄소화 장애 요인으로 지적되었으며 실제 전기화 이후 정전을 경험한 항만도 25%에 달했다.¹¹¹⁾ 현재 운영 중인 터미널들은 하역장비의 대규모 전기화를 고려하지 않은 상태에서 설계, 건설된 경우가 많아 변전소 증설, 충전 인프라 구축 등 상당한 규모의 전력 인프라 투자가 필요한 상황이다. 따라서 「전기사업법」 따른 전력수급기본계획과 「국가기간 전력망 확충 특별법」에 따른 국가기간 전력망 확충 기본계획에 항만 수요를 반영, 변전소 증설 등 계통 인프라의 빠른 구축을 추진하여 전기화 정책의 실행력을 확보할 필요가 있다.

넷째, 항만 특성에 맞는 무탄소 전원 확대 전략이 필요하다. 항만은 부지 제약으로 대규모 신재생에너지 설비를 터미널 내에 직접 설치하기 어렵다. 따라서 외부에서 생산된 친환경 전력을 안정적으로 끌어와서 활용할 수 있도록 하는 방안을 마련해야 한다. 최근 정부가 추진 중인 ‘에너지 고속도로’는 재생에너지 생산 거점에서 산업 수요처로 전력을 신속히 전달하는 국가 전력망 확

111) ABS, & AAPA(2024), p. 11.

충 전략으로, 항만도 이 체계에 포함시키는 방안을 제안한다. 이는 항만 내 전력계통의 탈탄소화를 가속화할 뿐 아니라 국가 차원의 신재생에너지 확대 정책과도 시너지를 낼 수 있다.

다섯째, 전기식 하역장비의 확산에 대응하여 배터리 안전 관리체계를 구축할 필요가 있다. 2023년 프리맨틀 하이웨이호 화재 사례¹¹²⁾나 국내 다수 발생한 전기차 폭발 사고에서 확인할 수 있듯 배터리를 사용하는 전기 장비는 열폭주 현상, 유독가스 발생, 진압 어려움 등 특수한 위험 요소를 내포하고 있다. 작업자가 상주하고 대량의 화물이 집적된 항만에서는 이러한 위험이 대형 사고로 이어질 수 있어 체계적인 안전 기준이 반드시 마련되어야 한다. 현재의 항만시설장비 검사체계는 기계식 부품과 고정식 전기 설비 위주로 설계, 항만시설장비검사기준을 개정하여 배터리 시스템 도입을 고려한 안전 관리 기준을 신설할 것을 제안한다. 기준 마련 시에는 선박, 전기차 등 부문의 안전 기준과 KS C IEC 60204¹¹³⁾, KS C IEC 62619¹¹⁴⁾ 등의 국제 표준을 참고하되, 하역장비 특성을 고려하여야 할 것이다. 이는 새로운 리스크에 대응하고 하역장비 전기화의 지속성을 확보하는 데 기여할 수 있을 것이다.

112) Paul Bartlett(2025.6.17.)(검색일: 2025.9.8.)

113) 기계류의 안전성-기계의 전기 장비

114) 알칼리 또는 기타 비산성 전해질을 포함하는 이차전지 셀 및 전지 - 산업용 리튬이차전지 셀 및 전지의 안전 요구사항

참고문헌

국내 문헌

- 감사원(2023), 기후위기 적응 및 대응실태 III(온실가스 감축 분야), 감사원.
- 관계기관합동(2020), 제2차 국가 온실가스 통계 총괄관리 계획(2020~2024).
- 관계기관합동(2025), 제3차 국가 온실가스 통계 총괄관리 계획(안).
- 관계부처 합동(2021), 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안.
- 관계부처합동(2023), 탄소중립·녹색성장 국가전략 및 제1차 국가 기본계획(중장기 온실가스 감축목표 포함).
- 김규승 외(2023), 도로화물수송부문 탄소중립 이행을 위한 정책 방안 연구 -친환경 수단 전환을 중심으로-, 한국교통연구원
- 김근섭 외(2021), 항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구, 한국해양수산개발원.
- 김대진 외(2024), 미시적 수준 도로 수송부문 온실가스 배출량 산정을 위한 감가속 보정계수 개발, 대한교통학회지, 42(3), pp. 268-283.
- 김동구·손인성(2020), 주요 제조업의 온실가스 배출 탈동조화 촉진 방안 연구, 에너지 경제연구원.
- 김선구·최용석(2012), 컨테이너터미널의 온실가스 저감 방안에 관한 연구, 한국항만 경제학회지, 28(1), pp. 105-122.
- 김우선·최상희·하태영(2007), 컨테이너터미널 에너지비용 절감방안 연구, 한국해양수산개발원.
- 김환성 외(2013), 항만 하역장비 온실가스 배출 저감방안, 한국해양수산개발원.

-
- 노영훈·장영태(2015), 인천항 육상하역 작업에 따른 온실가스 및 유해가스 발생 추정, 한국항만경제학회, 31(4), pp. 133-150.
- 부산항만공사(2023), 2023년 부산항 온실가스 및 대기오염물질 배출량 산정(내부자료).
- 석주현 외(2017), 화물 수송부문 전기차 도입을 위한 제도 개선 방안 연구, 에너지경제연구원.
- 안승현 외(2022), 항만분야 탄소중립 관리체계 개선 방안 연구, 한국해양수산개발원.
- 안용성·이향숙·이지원(2024), 컨테이너 항만 하역장비의 친환경 전환에 따른 탄소 배출저감 효과 분석, 한국항만경제학회지, 40(2), pp. 39-52.
- 양창호 외(1999), 항만장비 정보관리체계구축방안, 한국컨테이너부두공단.
- 에너지경제연구원·한국에너지공단(2022), 2020년도(2019년 기준) 에너지총조사보고서, 산업통상자원부.
- 온실가스종합정보센터(2020), 국가 온실가스 배출·흡수계수 개발·검증 지침.
- 이규진 외(2017), 신기후체제 대응 교통온실가스 감축정책평가시스템 소개, 교통 기술 및 정책, 14(2), pp. 44-49.
- 조준행·신승식·정경화(2008), 수송부문 온실가스배출통계체계 구축 및 관리, 한국교통연구원.
- 최기철 외(2025), 탄소중립 이행 촉진 및 대기오염 동시감축을 위한 대기관리체계 전환 방안, 한국환경연구원.
- 최민애 외(2010), 비도로 수송에 의한 온실가스 배출량 추정, 한국기후변화학회지, 1(3), pp. 211-217.
- 최형립 외(2010), Green Port 구현을 위한 물류장비 탄소배출 모니터링 시스템, 한국IT서비스학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, pp. 80-84.
- 한국에너지공단(2024), 2025년 에너지사용량 신고 매뉴얼, 한국에너지공단.
- 한국해양수산개발원(2023), 품목별 항만물동량 예측보고서.
- 한진석 외(2019), 육상화물운송수단의 미세먼지 및 온실가스 저감 방안 연구, 한국환경정책평가연구원.
- 한철환(2024), 항만의 탈탄소 전환에 관한 연구 : 장애요인과 해결방안을 중심으로, 한국항만경제학회지, 40(2), pp. 137-155.
- 해양수산부(2017), 항만설계기준-항만하역시설(KDS 64 90 10 : 2017).

- 해양수산부(2019), 고생산성 자동화컨테이너 터미널 구축 추진 전략 연구.
- 환경부(2020a), 항만 화물 운송장비 연료 전환 사업의 방법론, 03A-017-Ver01.
- 환경부(2020b), 화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감사업의 방법론, 03A-019-Ver01.
- 해양수산부(2021a), 2021년 항만시설장비관리 시스템 관리개선 용역 : 항만시설장비 관리시스템 사용자 지침서(운영사 사용자).
- 해양수산부(2021b), 2021년 항만시설장비관리 시스템 관리개선 용역 : 항만시설장비 관리시스템 사용자 지침서(관리청 사용자).
- 해양수산부(2021c), 2021년 항만시설장비관리 시스템 관리개선 용역 : 항만시설장비 관리시스템 사용자 지침서(검사대행기관 사용자).
- 해양수산부(2021d), 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵.
- 해양수산부(2023), 2023~2024 항만업무편람.
- 해양수산부(2025), 2025년 해양·수산·항만 온실가스 목표관리제 운영 매뉴얼.
- 해양환경공단, 2024년 해양·수산·항만 온실가스 목표관리제 운영 매뉴얼.
- 환경부(2022), 천연가스자동차 보급사업 - 보조금 업무처리지침.
- 환경부(2025), 「2025년 무공해건설기계 보급사업」 보조금 업무처리지침.
- 환경부 온실가스종합정보센터(2023), 2022 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 온실가스종합정보센터.
- 환경부 온실가스종합정보센터(2024), 2023 국가 온실가스 인벤토리 보고서, 온실가스종합정보센터.
- 홍동희 외(2000), 항만장비관리를 위한 멀티미디어 정보체제 구축 방안, 한국OA학회 논문지, 5(2), pp. 71-80.
- IPCC(2006a), 국가 온실가스 인벤토리 작성을 위한 2006 IPCC 가이드라인 제2권, 환경부·환경관리공단.
- KOTEC(2025.12.4.), 하역장비 등록현황(내부자료).

국외 문헌

- ABS, & AAPA(2024), Port Decarbonization Survey: Trends and Lessons Learned.
- Alamouh, A. S.(2024), Harboring change: Exploring the multifaceted and complex determinants of decarbonizing ports, *Energy Research & Social Science*, 118: 103751, <https://doi.org/10.1016/j.erss.2024.103751>.
- Alamouh, A. S., Ballini, F., & Ölçer, A. I.(2024), Investigating determinants of port decarbonisation implementation using the lens of implementation theory, *Transport Economics and Management*, 2, pp. 90-111.
- Alamouh, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F.(2022), Port greenhouse gas emission reduction: Port and public authorities' implementation schemes, *Research in Transportation Business & Management*, 43: 100708, <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100708>.
- APM Terminals, & DP World(2023), Reaching a tipping point in Battery-Electric Container Handling Equipment.
- Azarkamand, S., Ferré, G., & Darbra, R. M.(2020), Development of a standardized tool to calculate carbon footprint in ports, *Journal of Maritime Research*, 17(3), pp. 74-80.
- Azarkamand, S., Wooldridge, C., & Darbra, R. M.(2020), Review of initiatives and methodologies to reduce CO₂ emissions and climate change effects in ports, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11): 3858, <https://doi.org/10.3390/ijerph17113858>.
- Budiyanto, M. A., Huzaifi, M. H., & Sirait, S. J.(2019), Estimating CO₂ emissions in a container port based on modality movement in the terminal area, *International Journal of Technology*, 10(8), pp. 1618-1625.
- Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T.(2024), Modest method for estimating CO₂ emissions from container handling equipment at ports, *Sustainability*, 16(23):10293, <https://doi.org/10.3390/su162310293>.
- Buttigieg, A.(2023), Environmental assessment for GHG minimisation at seaports using Life Cycle Assessment (LCA) approaches(Doctoral dissertation, Unive

- rsity of Surrey).
- China Waterborne Transport Research Institute(2024.6.20.), 제24회 동북아항만국장회의 워킹그룹회의 중국측 발표자료.
- Densberger, N. L., & Bachkar, K.(2022), Towards accelerating the adoption of zero emissions cargo handling technologies in california ports: Lessons learned from the case of the ports of Los Angeles and Long Beach, *Journal of Cleaner Production*, 347: 131255, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131255>.
- EMEP/EEA(2023), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 - Non-road mobile sources and machinery.
- EPA(2022), Port Emissions Inventory Guidance: Methodologies for Estimating Port-Related and Goods-Movement Mobile Source Emissions, EPA-420-B-22-011.
- EPA(2024b), MOVES5 Technical Guidance: Using MOVES to Prepare Emission Inventories for State Implementation Plans and Transportation Conformity, EPA-420-B-24-043.
- EPA(2025), EPA Clean Ports Program: Guide for Vehicle, Equipment, and Infrastructure Activity Data Collection..
- Geerlings, H., & Van Duin, R.(2011), A new method for assessing CO₂-emissions from container terminals: A promising approach applied in Rotterdam, *Journal of Cleaner Production*, 19, pp. 657-666.
- GEF-UNDP-IMO GloMEEP Project, & IAPH(2018) Port Emissions Toolkit, Guide No. 1, Assessment of port emissions.
- He, J. et al.(2015), Integrated internal truck, yard crane and quay crane scheduling in a container terminal considering energy consumption, *Expert Systems with Applications*, 42(5), pp. 2464-2487.
- Huang, Y., Mamatok, Y., & Jin, C.(2021), Decision-making instruments for container seaport sustainable development: Management platform and system dynamics model, *Environment Systems and Decisions*, 41, pp. 212-226.
- Islam, M. R., Aziz, M. G., & Khan, M. B.(2022), Strategies to reduce carbon footprint in port and terminal operations, *Journal of Agroforestry and Environment*,

-
- 15(1), pp. 36-42.
- IPCC(2006b), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2 Energy.
- Kang, Z. et al.(2024), Research on energy efficiency statistics and online monitoring scheme of port fuel oil equipment under dual carbon background, Proc. SPIE 13439, Fourth International Conference on Testing Technology and Automation Engineering (TTAE 2024): 1343914, <https://doi.org/10.1117/12.3055344>.
- Kim, J., Rahimi, M., & Newell, J.(2012), Life-cycle emissions from port electrification: A case study of cargo handling tractors at the port of Los Angeles, International Journal of Sustainable Transportation, 6, pp. 321-337.
- Lam, J. S. L., & Notteboom, T.(2014), The greening of ports: A comparison of port management tools used by leading ports in Asia and Europe, Transport Reviews, 34(2), pp. 169-189.
- Mao, X., & Meng, Z.(2023), Port of Yangpu emissions inventory report using the goPEIT model, International Council on Clean Transportation, Working Paper 2023-26, pp. 1-25.
- Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.(2019), Energy efficiency and CO₂ emissions of port container terminal equipment: Evidence from the port of valencia, Energy Policy, 131, pp. 312-319.
- Mamatok Y. et al.(2019), A system dynamics model for CO₂ mitigation strategies at a container seaport, Sustainability, 11(10): 2806, <https://doi.org/10.3390/su11102806>.
- MPA(2022), Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050.
- New Energies Coalition(2025), Decarbonize Ports & Manage Energies Efficiency –Key finding of the study carried out by our Working Group dedicated to Ports.
- Okşas, O.(2023), Carbon emission strategies for container handling equipment using the activity-based method: A case study of Ambarlı container port in Türkiye, Marine Policy, 149: 105480, <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105480>.

- Ports Australia(2025), Greenhouse Gas Emissions – Inventory Guidance for Ports.
- Schmidt, J. et al.(2015), Using battery-electric AGVs in container terminals — Assessing the potential and optimizing the economic viability, *Research in Transportation Business & Management*, 17, pp. 99-111.
- Sha, M. et al.(2017), Scheduling optimization of yard cranes with minimal energy consumption at container terminals, *Computers & Industrial Engineering*, 113, pp. 704-713.
- Shen et al.(2025), Sources, calculation methods, and reduction strategies for GHG emissions at ports: current status and future trends, *Frontiers in Marine Science*, 12: 1542255, <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1542255>.
- Shin, K., & Cheong, J.(2011), Estimating transportation-related greenhouse gas emissions in the port of Busan, S. Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(1), pp. 41-46.
- Sim, J.(2018), A carbon emission evaluation model for a container terminal, *Journal of Cleaner Production*, 186(10), pp. 526-533.
- Song, D.(2024), A literature review of seaport decarbonisation: Solution measures and roadmap to net zero, *Sustainability*, 16: 1620, <https://doi.org/10.3390/su16041620>.
- Sorte, S. et al.(2021), Emission inventory for harbour-related activities: Comparison of two distinct bottom-up methodologies, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14, pp. 831-842.
- Sugimura, Y. (2023), *Climate Change Countermeasures in Ports Toward Carbon Neutrality*, Springer.
- UNCTAD(2023), *Port Management 2023*, Vol.11, Port Performance Indicators.
- Wang, L., & Li, Y.(2023), Estimation methods and reduction strategies of port carbon emissions - what literatures say?, *Marine Pollution Bulletin*, 195: 115451, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115451>.
- Wei, D., & Giuliano, G. (2025), Estimating the economic impacts of cargo handling equipment electrification: A case study of the San Pedro bay ports, *Research in Transportation Business & Management*, 59: 101281, <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2025.101281>.

1016/j.rtbm.2024.101281.

Yang, Y., & Chang, W. (2013), Impacts of electric rubber-tired gantries on green port performance, *Research in Transportation Business & Management*, 8, pp. 67-76.

Yang, Y., & Lin, C. (2013), Performance analysis of cargo-handling equipment from a green container terminal perspective, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, pp. 9-11.

Yu, H. et al. (2017), CO₂ emission evaluation of yard tractors during loading at container terminals, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53, pp. 17-36.

Zhang, Y. et al. (2017), Air emission inventory of container ports' cargo handling equipment with activity-based "bottom-up" method, *Advances in Mechanical Engineering*, 9(7), pp. 1-9.

일본 국토교통성(2025), Guidelines for the Certification System for Decarbonization Efforts at Port Terminals.

중국 교통운수부, 绿色港口等级评价指南(JTS/T 105-4-2020).

인터넷 자료

교통부문 온실가스 관리시스템, <https://www.kotems.or.kr>(검색일: 2025.7.25.)

교통부문 온실가스관리 시스템, KOTEMS 소개-지자체 교통, <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/forward?pageUrl=/kotems/ptl/kotems/KotemsPtlKotemsInfoVw>(검색일: 2025.11.10.)

국가온실가스 종합관리시스템, <https://ngms.gir.go.kr:8443/main.do>(검색일: 2025.4.18.)

국가온실가스 종합관리시스템, 명세서배출량통계-2023년도 명세서 주요정보(업체배출량), <https://ngms.gir.go.kr:8443/subMain.do?link=/hom/bbs/OGCMBBS023V.xml&menuNo=50900503>(검색일: 2025.9.3.)

- 국가온실가스종합관리시스템, 목표관리대상업체, <https://ngms.gir.go.kr:8443/subMain.do?link=/hom/bbs/OGCMBBS023V.xml&menuNo=50900503>(검색일: 2025.9.3.)
- 국가온실가스종합관리시스템, 할당 대상업체, <https://ngms.gir.go.kr:8443/subMain.do?link=/hom/bbs/OGCMBBS021V.xml&menuNo=50900501>(검색일: 2025.9.3.)
- 국토해양부 보도자료(2012.11.19.), 12월부터 ‘교통 온실가스 배출정보’ 서비스-운행 특성별 배출량 분석·예측, 합리적 관리 및 저감 기대, <https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=155862608>(검색일: 2025.11.10.).
- 기후에너지환경부 수도권대기환경청, 대기마당-대기환경정보-운행차 배출가스 저감사업-보조금 지원, <https://eng.mcee.go.kr/mamo/web/index.do?menuId=16244>(검색일:2025.10.24.)
- 김윤구(2023.12.4.), 해수부 “2050년까지 탄소중립 항만 구축”, 연합뉴스, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20231204116500030>(검색일:2025.5.2.)
- 노해리(2024.7.18.), “희생제동은 계륵?”…신기술로 편견 깬다, 이뉴스투데이, <http://www.ewestoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=2153983>(검색일: 2025.9.10.)
- 박윤석(2015.3.11.), 에너지관리공단, 에너지절감 기술정보 한 곳에서 해결, Electric Power Journal, <https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=7975>(검색일: 2025.10.4.)
- 배출권시장 정보플랫폼, <https://ets.krx.co.kr/main/main.jsp>(검색일: 2025.4.18.)
- 부산항만공사 공식블로그, https://blog.naver.com/busanport_authority/223598550595?trackingCode=blog_bloghome_searchlist(검색일: 2025.9.5.)
- 부산항만공사 보도자료(2024.8.28.), BPA, 부산항 운영사 대상 ‘온실가스 배출권 거래제 설명회’ 개최, <https://www.busanpa.com/kor/Board.do?mode=view&idx=32623&mCode=MN1445> (검색일: 2025.5.1.).
- 산업통상자원부 보도자료(2024.7.25.), 민-관 합동 ‘산업 공급망 탄소데이터 플랫폼’ 구축 추진, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=43&boardNo=3564&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=92>(검색일: 2025.5.4.)

-
- 에너지경제연구원(2023.7.19.), [안내] 2023년도(2022년 기준) 에너지총조사 시행, https://www.keei.re.kr/board.es?mid=a10201010000&bid=0005&act=view&list_no=98550(검색일: 2025.4.18.)
- 오수희(2013.6.28.), 부산항만공사, 부산항에 이동식 비상발전기 운영, 연합뉴스, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20130627189800051>(검색일: 2025.9.10.)
- 우한시 교통운수국, https://jtj.wuhan.gov.cn/jtzx/zwdt/202307/t20230712_2230220.shtml(검색일: 2025.9.8.).
- 유재준(2024.1.4.), 대기환경 개선 1등 공신 ‘천연가스車’ 토사구팽되나, 가스신문, <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=113603>(검색일: 2025.8.25.)
- 이경호(2025.7.1.), 온실가스 배출권거래제 상쇄제도 개요, 2025년 온실가스 배출권 거래제 상쇄제도 해양수산부문 외부사업 설명회, 해양수산부.
- 일본 국토교통성, 港湾における温室効果ガス削減量算定ツール, <https://www.mlit.go.jp/common/000043036.xls>(검색일: 2025.8.1.)
- 일본 국토교통성, 温室効果ガス削減量算定シート(入力例), <https://www.mlit.go.jp/common/000043035.pdf>(검색일: 2025.8.1.)
- 일본 국토교통성, CNP認証 (コンテナターミナル), https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_fr4_000088.html(검색일: 2025.9.8.)
- 일본 국토교통성, CNP 인증(컨테이너 터미널) 제도 설명회 자료, <https://www.mlit.go.jp/kowan/content/001893488.pdf>(검색일: 2025.9.8.).
- 일본 국토교통성 항만국 국제·환경과(2009), 港湾からの温室効果ガス排出量算定マニュアル(案), <https://www.mlit.go.jp/common/000043052.pdf>. (검색일: 2025.8.1.)
- 제로에너지건축물, 운영기관 및 인증기관, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_006.do(검색일: 2025.11.17.)
- 제로에너지건축물, 인센티브, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_003.do(검색일: 2025.11.17.)
- 제로에너지건축물, 인증제도 기준, https://zeb.energy.or.kr/BC/BC03/BC03_05_002.do(검색일: 2025.11.17.)
- (주)로엔건설팅(2025.7.1.), 해양수산부문 외부사업 합동 설명회 - 항만/수산부문 외부

- 사업 추진 현황 및 방법론 소개, 2025년 온실가스 배출권거래제 상쇄제도 해양수산부 외무사업 설명회, 해양수산부.
- 주병국(2020.8.14.), 전기버스 급증...CNG버스 교체물량이 대부분 희생, 가스신문, <https://www.gasnews.com/news/articleView.html?idxno=92568>(검색일: 2025.8.25.)
- 한국에너지공단, 국가온실가스 배출량 종합정보 시스템, <https://min24.energy.or.kr/netis>(검색일: 2025.11.28.)
- 한국에너지공단, 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업, <https://www.energy.or.kr/front/conts/105002001002000.do>(검색일: 2025.11.13.)
- 한국에너지공단, 산업부문 온실가스 배출통계, <https://www.energy.or.kr/front/conts/105003003006000.do>(검색일: 2025.11.28.)
- 한국에너지공단, 에너지사용량 신고제도, <https://www.energy.or.kr/front/conts/105003003001000.do>(검색일: 2025.5.1.)
- 한국에너지공단, 에너지절약기술 정보협력사업(ESP), <https://www.energy.or.kr/front/conts/105002001004000.do>(검색일: 2025.11.13.)
- 한국에너지공단, 에너지진단사업, <https://www.energy.or.kr/front/conts/105002001006000.do>(검색일: 2025.11.13.)
- 한국에너지공단, 제로에너지 건축물 인증제도, <https://www.energy.or.kr/front/conts/105002002003000.do>(검색일: 2025.11.17.)
- 한국에너지공단(2025.3.24.), 2025년 산업계 에너지관리시스템 보급 지원사업 공고 (1차) 안내 - 첨부_1.2025년도산업계에너지관리시스템보급지원사업시행계획공고문(안)_vF★, <https://www.energy.or.kr/front/board/View2.do?boardMngNo=2&boardNo=24388>(검색일: 2025.9.10.)
- 한국에너지공단 에너지진단제도 ONE-STOP 전자민원, 진단기관 현황, https://min24.energy.or.kr/nedms/front/sub/situation_list.do(검색일: 2025.11.13.)
- 한국에너지공단 에너지진단제도 ONE-STOP 전자민원, 설치 사업자금지원 안내, <https://min24.energy.or.kr/nedms/front/sub/sub01.do>(검색일: 2025.11.13.)
- 해양수산부 항만시설장비관리시스템, <https://hems.portcals.go.kr/>(검색일: 2025.5.1.)
- 해양환경공단, 해양기후변화대응, <https://www.koem.or.kr/site/koem/04/10401050000002019051004.jsp>(검색일: 2025.9.3.)

-
- 홍성인(2024.4.29.), 내연기관 자동차와는 다른 전기차의 구동원리, <회생제동>이란 무엇일까?, Kixx 전문가칼럼, <https://kixxman.com/regenerative-braking> (검색일: 2025.9.10.)
- 환경부 보도자료(2025.9.4.), 건설•농업기계분야전동화•전기화의 미래를 논의한다 (<https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=43&boardNo=6735&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=73>)(검색일: 2025.10.24.)
- CARB, Cargo Handling Equipment Regulation to Transition to Zero-Emissions, <http://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/cargo-handling-equipment-regulation-transition-zero-emissions>(검색일: 2025.11.12.)
- CARB, Draft 2025 CHE Technology Assessment-Appendix B: Commercially Available CHE, <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2025-10/CHE%20TA%20Appendix%20B.pdf>(검색일: 2025.11.13.)
- CARB, CHE Technology Assessments, <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/cargo-handling-equipment/che-technology-assessments>(검색일: 2025.11.24.)
- EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼, <https://tips.energy.or.kr/main/main.do>(검색일: 2025.5.1.)
- EG-TIPS 에너지온실가스종합정보 플랫폼, EG-TIPS 소개, <https://tips.energy.or.kr/about/info.do>(검색일: 2025.10.4.)
- EG-TIPS 에너지온실가스 종합정보 플랫폼, 에너지사용량 신고제도, https://tips.energy.or.kr/statistics/statistics_view1113.do(검색일: 2025.5.1.)
- EMA(2022.7.13.), Singapore's First Energy Storage System at PSA's Pasir Panjang Terminal, <https://www.ema.gov.sg/news-events/news/media-releases/2022/singapores-first-energy-storage-system-at-psas-pasir-panjang-terminal>(검색일: 2025.8.29.)
- UNIVERS, PSA Decarbonizes Operations with Smart Grid Solutions, <https://univers.com/customer-stories/psa-decarbonizes-operations-with-smart-grid-solutions/>(검색일: 2025.8.29.)
- EPA, Clean Ports Program, <https://www.epa.gov/ports-initiative/cleanports>(검색일: 2025.4.30.)

- EPA, Clean Ports Program Infographic, https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-11/clean-ports-program-infographic_508.pdf(검색일: 2025.4.28.)
- EPA, How can I run MOVES3 for the entire U.S or for an entire year?, <https://www.epa.gov/moves/how-can-i-run-moves3-entire-us-or-entire-year>(검색일: 2025.8.1.)
- EPA(2024a), Clean Ports Program 'Fast Facts', Office of Transportation and Air Quality, EPA-420-F-24-020, <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P101A2VI.pdf>(검색일: 2025.4.30.)
- EPA(2025), How can I run MOVES3 for the entire U.S or for an entire year?, <https://www.epa.gov/moves/how-can-i-run-moves3-entire-us-or-entire-year>(검색일: 2025.8.1.)
- KEPCO(2019.01.03), '19년 항만크레인 회생제동장치 효율향상사업 시행 공고, http://home.kepco.co.kr/kepco/CY/K/ntcob/ntcobView.do?pageIndex=1&boardSeq=21038050&boardCd=BRD_000039&menuCd=FN02070501&parentScrpSeq=21035440&searchCondition=total&searchKeyword=항만크레인(검색일: 2025.9.10.)
- KOTEMS 교통부문 온실가스관리 시스템, <https://www.kotems.or.kr/app/kotems/forward?pageUrl=/kotems/ptl/emissionstat/road/KotemsPtlEmissionstatRoadEmissionEnergyLs&topmenu1=02&topmenu2=02&topmenu3=02&topmenu4=01>(검색일: 2025.9.8.)
- MPA, Maritime Singapore Green Initiative, <https://www.mpa.gov.sg/maritime-singapore/sustainability/maritime-singapore-green-initiative>(검색일: 2025.4.30.)
- gobusiness, Energy Efficiency Grant, <https://www.gobusiness.gov.sg/energy-efficiency-grant/>(검색일: 2025.4.30.)
- Paul Bartlett(2025.6.17.), EV Fires on ships spark insurers concern, SeatradeMaritime News, <https://www.seatrade-maritime.com/accidents/ev-fires-on-ships-spark-insurers-concern>(검색일: 2025.9.8.)
- Port-MIS, 항만물류통계, <https://new.portmis.go.kr/portmis/websquare/websquare.jsp?w2xPath=/portmis/w2/main/index.xml&page=/portmis/w2/cm/>

sys/UI-PM-MT-001-021.xml&menuId=0045&menuCd=M4735&menuNm
=%EC%82%AC%EC%9D%B4%ED%8A%B8%EB%A7%B5(검색일: 2025.10.3.)

WRI, C40CITIES & ICLEI(2021), Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Inventories – An Accounting and Reporting Standard for Cities, Version 1.1(검색일: 2025.4.30.)

WPSP, Worldwide CHE Inventories, <https://sustainableworldports.org/wpcap/wg-5/worldwide-che-inventories/>(검색일: 2025.5.1.)

WPSP, WPCAP WG 5 – Cargo Handling Equipment Database Worldwide CHE Inventories, <https://sustainableworldports.org/wpcap/wg-5/>(검색일: 2025.5.1.)

법령 및 고시 자료

2025년도 해양·수산·해운·항만 부문 온실가스 관리업체 지정 고시(해양수산부 고시 제2025-109호, 2025.6.27.)

건설기계관리법(법률 제19365호, 2023.4.18.)

건설기계관리법 시행령(대통령령 제35811호, 2025.10.1.)

건설기계관리법 시행규칙(국토교통부령 제1515호, 2025.8.5.)

공공기관 에너지이용 합리화 추진에 관한 규정(산업통상자원부고시 제2017-13호, 2020.11.19.)

기후변화대응 기술개발 촉진법(법률 제18865호, 2022.6.10.)

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(법률 제21122호, 2025.11.11.)

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령(대통령령 제35822호, 2025.10.21.)

녹색건축물 조성지원법(법률 제21065호, 2025.10.1.)

대기환경보전법(법률 제21123호, 2025.11.11.)

대기환경보전법 시행규칙(기후에너지환경부령 제4호, 2025.11.3.)

물류정책기본법(법률 제21065호, 2025.10.1.)

- 에너지법(법률 제21065호, 2025.10.1.)
- 에너지이용합리화법(법률 제21065호, 2025.10.1.)
- 온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침(환경부고시 제2025-64호, 2025.4.11.)
- 온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침(환경부고시 제2025-165호, 2025.10.1.)
- 우수녹색물류실천기업 지정요령(국토교통부고시 제2022-242호, 2022.5.2.)
- 자동차 평균에너지소비효율기준·온실가스 배출허용기준 및 기준의 적용·관리 등에 관한 고시(환경부고시 제2025-165호, 2025.10.1.)
- 지속가능 교통물류 발전법(법률 제18563호, 2021.12.7.)
- 항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률(법률 제20135호, 2024.1.23.)
- 항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률 시행규칙(해양수산부령 제721호, 2025.2.4.)
- 항만법(법률 제20231호, 2024.2.6.)
- 항만법 시행령(대통령령 제35811호, 2025.10.1.)
- 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법(법률 제21065호, 2025.10.1.)
- 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법 시행령(대통령령 제35811호, 2025.10.1.)
- 항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법 시행규칙(해양수산부령 제770호, 2025.10.31.)
- 항만시설장비 관리규칙(해양수산부령 제592호, 2023.3.10.)
- 항만시설장비검사기준(해양수산부고시 제2021-187호, 2021.9.29.)
- 항만운송사업법 시행규칙(해양수산부령 제735호, 2025.5.28.)
- 화물자동차 운수사업법(법률 제21025호, 2025.8.14.)
- 화물자동차 운수사업법 시행령(대통령령 제35832호, 2025.10.28.)

부 록

1. 주요 선행연구 요약

저자	연도	연구목적	연구방법
Budiyanto, M. A., Ichfari, F., & Shinoda, T.	2024	• 컨테이너 터미널 하역장비 CO ₂ 배출량 추정 모델 평가	비교 분석, 사례연구
Wei, D., & Giuliano, G.	2025	• 하역장비 전기화의 경제적 효과 분석	경제성 분석, 사례연구
Yang, Y., & Chang, W.	2013	• 경유 RTGC에서 전기 RTGC로 전환시 성능 개선효과 비교 및 정책적 시사점 제시	비교 분석, 사례연구
Schmidt, Jet al.	2015	• 경유 AGV를 전기 AGV로 전환했을 경우 경제적 효과 분석 및 최적 운영 전략 제시	경제성 분석, 시뮬레이션 분석, 사례연구
Yang, Y., & Lin, C.	2013	• 친환경 컨테이너 터미널 관점에서 야드 하역장비의 성능을 비교, 분석하고 최적 장비를 도출	비교 분석, 사례연구
Sha, M. et al.	2017	• 저탄소 관점에서 컨테이너 터미널의 야드 크레인 스케줄링 최적화 문제 해결을 위한 새로운 모델 개발	모델 개발, 사례연구
He, J. et al.	2015	• 총 에너지 소비량 최소화를 위한 하역장비 통합 스케줄링 모델 개발	모델 개발
안용성·이항숙·이지원	2024	• 국내 컨테이너 항만 하역장비의 친환경 전환 시나리오에 따른 배출저감 효과 산정	시나리오 분석
김근섭 외	2021	• 부산항 신항의 전기에너지 소비 최적화를 위한 기술과 정책대안, 로드맵 제시	시계열 분석, 시나리오 기반 예측, 사례분석

저자	연도	연구목적	연구방법
안승현 외	2022	• 주요 항만 배출원인 선박과 하역장비의 CO ₂ 배출량을 추정하고, 항만분야 탄소중립 실현을 위한 탄소중립 관리체계 구축 방안을 제안	배출량 전망, 비교 분석
김환성 외	2013	• 하역장비별 온실가스 배출량을 분석하고 저감기술 및 적용방안을 검토	사례연구, 비교 분석
김규승 외	2023	• 도로화물수송부문의 국가 온실가스 감축목표 달성을 위해 사업용 화물자동차 친환경 수단 전환의 장애요인을 검토하고 이를 해결하기 위한 사업용 친환경 화물자동차 전환 추진전략과 세부 실행과제를 수립	사례 분석, 시나리오 분석, 문헌연구
한철환	2024	• 항만 탈탄소 전환을 위한 방해요인과 해결방안과 세계 주요 항만의 탈탄소화 목표 및 전략을 검토하고, 성과기반 스코어 측정방법을 이용하여 국내 5대 항만들의 탈탄소화 이행 수준을 정량적으로 평가	문헌연구, 비교 분석
양창호 외	1999	• 하역장비 정보관리시스템 구축 방안 제시	시스템 설계
김우선·최상희·하태영	2007	• 컨테이너터미널의 운영효율성 향상 및 경쟁력 강화를 위한 항만의 에너지비용 절감 모델을 개발하고 모델별 대안을 제시	사례조사, 이해관계자 자문
최형림 외	2010	• 터미널 내 하역장비의 탄소배출량을 직접적으로 측정하여 실시간으로 관리할 수 있는 모니터링시스템 개발 방안 제시	기술개발 방안 제시
노영훈·장영태	2015	• 인천항 하역장비의 유해가스 및 온실가스 배출량을 파악하고 각 부두별 배출량 차이를 검토	사례연구
홍동희 외	2000	• 효율적인 항만장비관리체제 구축을 위한 정보체제 구축방안 제시 및 경제적 편익 추정	설문조사, 경제성 분석
김대진 외	2024	• 미시적 수준의 도로 수송부문 온실가스 배출량 산정을 위한 자동차 온실가스 가감속 보정계수 개발 및 적용 방안 검토	시나리오 분석, 보정계수 개발, 모델 개발
Shin, K., & Cheong, J.	2011	• 부산항을 대상으로 활동 기반 온실가스 배출량을 추정	사례연구
김선구·최용석	2012	• 국내 컨테이너 터미널의 온실가스 저감방안 제시	설문조사, 퍼지 AHP
Geerlings, H., & Van Duin, R.	2011	• 로테르담항 컨테이너 터미널의 CO ₂ 배출량을 분석하기 위한 방법론 제시 및 CO ₂ 배출 감축 방안을 제시	사례연구, 비교 분석

저자	연도	연구목적	연구방법
Okşas, O.	2023	• 터키 Ambarlı 1 컨테이너 터미널의 하역장비 배출량을 추정하고 탄소 배출 감축 전략을 제시	사례연구, 비교 분석
Sorte, S. et al.	2021	• 두 가지 방법론(EMEP/EEA, US/SCG)을 적용한 포르투갈 Leixões항의 선박 및 하역장비 배출량 인벤토리 개발	사례연구, 비교 분석
Mao, X., & Meng, Z.	2023	• 2019년 양푸항의 대기오염 및 온실가스 배출량 산정을 통해 goPEIT의 기능을 입증	사례연구
Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Maldonado, J. A. G.	2019	• 발렌시아항 Noatum 컨테이너 터미널의 에너지 효율성과 CO ₂ 배출량을 분석하고 배출량 감축을 위한 주요 대안을 검토	사례연구, 시나리오 분석
Kang, Z. et al.	2024	• 컨테이너 터미널의 이송장비의 에너지 모니터링 체계 구축 방안 제안	기술개발 방안 제시, 사례연구
Budiyanto, M. A., Huzaifi, M. H., & Sirait, S. J.	2019	• 인도네시아 Belawan 국제 컨테이너 터미널의 하역장비 기반 CO ₂ 배출량 추정	사례연구
Azarkamand, S., Ferré, G., & Darbra, R. M.	2020	• 항만의 탄소발자국 산정을 위한 표준화된 도구 개발 방안 제시	기술개발 방안 제시
Lam, J. S. L., & Notteboom, T.	2014	• 정책 및 관리적 관점에서 항만/공공 당국이 활용 가능한 항만 관리 도구를 조사하고, 친환경 항만 개발을 촉진하는 정책 및 관리 도구의 효과를 평가	비교 분석
Huang, Y., Mamatok, Y., & Jin, C.	2021	• 컨테이너 항만의 온실가스 배출 감축을 위한 의사결정 도구로서의 시스템 다이내믹스 기반 관리 플랫폼 제안	모델 개발, 사례연구
Yu, H. et al.	2017	• 컨테이너 터미널에서 적재 중 야드 트랙터가 발생시키는 CO ₂ 배출량 평가 방법을 제시	모델 개발, 시뮬레이션 분석
Buttigieg A.	2023	• 항만 터미널 운영 과정(특히 하역작업활동)에서 발생하는 CO ₂ 배출을 식별하고 생애주기 평가, 생애주기 인벤토리 데이터를 구축하기 위한 방법론을 개발	사례연구, 비교 분석

저자	연도	연구목적	연구방법
Sim, J.	2018	• 부산항 컨테이너 터미널 내 모든 활동에서 발생하는 탄소배출량 분석을 위한 시스템 다이내믹스 모델을 개발하고 국가 감축 목표 달성을 위한 탄소 감축 목표량을 산정	모델 개발, 사례 연구
Wang, L., & Li, Y.	2023	• 문헌분석을 통해 항만의 탄소 배출량 추정 방법론, 정량적 연구 결과, 감축 기법 등을 검토하고 항만 탄소배출량 추정 및 감축 개발 방향을 제시	문헌연구
Islam, M. R., Aziz, M. G., & Khan, M. B.	2022	• 방글라데시 차토그램항의 사례를 통해 항만 운영에서 발생하는 탄소발자국을 줄이기 위한 효과적인 전략을 제안	사례연구
Alamoush, A. S., Ballini, F., & Ölçer, A. I.	2024	• 구현이론 및 항만 탈탄소화에 관한 문헌검토를 통해 항만 탈탄소화 조치를 살펴보고 주요 쟁점과 적용가능성, 핵심 실행요인 등을 검토	문헌연구, 개념적 프레임워크 구축
Alamoush, A. S.	2024	• 223개 항만 데이터를 기반으로 항만 탈탄소화의 실행 수준과 요인 결정 요인을 식별하고, 전 세계 항만 탈탄소화 이행 수준을 평가	모델 개발(다중회귀분석)
Densberger, N. L., & Bachkar, K.	2022	• LA항, LB항 사례 분석을 통해 제로 배출 하역장비 도입 가속화를 위한 주요 교훈과 전략을 도출하고, 캘리포니아 항구 전체의 지속 가능한 전환 지원을 위한 방안을 제시	사례연구
Alamoush, A. S., Ölçer, A. I., & Ballini, F.	2022	• 항만에서 온실가스 배출 감축을 위해 시행하는 정책 수단 및 도구를 식별하고 분석	문헌연구
최민애 외	2010	• 건설장비, 항공지상지원장비, 항만하역장비, 농업업기계를 포함하는 비도로 수송 부문 온실가스 배출량을 1996년, 2006년 IPCC 가이드라인을 기반으로 산출하고 비교	비교 분석
Zhang, Y. et al.	2017	• 활동 기반의 상향식 접근법을 활용하여 난징 룡탄 컨테이너 터미널의 하역장비 배출량 인벤토리를 구축	사례연구
Song, D.	2024	• 항만 내 구역을 기준으로 배출원을 구분하고 배출원별 감축 방안을 검토, 항만 탈탄소화를 위한 단계별 로드맵과 실행과제를 제시	문헌연구
Sugimura, Y.	2023	• RTGC의 전동화와 스트레들 캐리어의 하이브리드화를 추진한 하카타항을 사례로 해당 대책의 CO ₂ 배출 저감 효과를 검토	사례연구

저자	연도	연구목적	연구방법
Kim, J., Rahimi, M., & Newell, J.	2012	• 수명주기 관점에서 경유 및 전기 야드 트랙터 간의 배출을 비교 분석	비교 분석
Azarkamand, S., Wooldridge, C., & Darbra, R. M.	2020	• 항만에서의 CO ₂ 배출량 및 기후 변화 영향을 계산하고 감축하기 위해 시행된 이니셔티브와 방법론을 수집한 뒤 강점 및 개선방향을 연구	비교 분석
조준행·신승식·정경화	2008	• 수송부문 온실가스 배출 통계의 정확한 산정 및 정책 활용을 위한 자료 조사, 분석 체계 제시	문헌연구, 전문가 자문
한진석 외	2019	• 국내 육상화물운송수단 중 미세먼지, 온실가스 등 주요 오염물질의 배출비중이 높은 경유 화물차의 오염물질 저감 방안을 검토	데이터 분석, 사례 분석, 교통수요모형 분석, 전문가 자문
최기철 외	2025	• 탄소중립 이행에 따른 대기관리 여건 변화를 고려하여 기존 대기관리체계의 변화 방향을 탐색	사례 분석
석주현 외	2017	• 국내 전기화물차 도입여건 및 문제점을 진단하여 화물차 시장에서 전기자동차 도입을 위한 제도개선 방안을 제시	사례 분석

자료: 저자 작성

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2025년

01	청색경제 이행지표 개발 및 투자효과 분석	김주현
02	해양문화산업의 지역 경쟁력 진단과 발전전략 연구	이슬기
03	유해·교란 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	이혜경
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 법제 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 법제 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:해양수산물야를 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 중소선사의 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	해양수산 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	김염지
02	전환기 글로벌 해양환경규범의 대응력 강화 연구	박수진
03	해양 지속가능성 시범 평가 연구	최희정
04	Scope 3 기준 원양산업 탄소배출추정 및 대응방안 연구 - 원양저연승어업을 중심으로	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, 잡화를 중심으로	이나영
11	접안 대기시간 감소에 따른 탄소집약도지수(CII) 변화 분석	김보람

기본연구 2025-17

탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구

인쇄 2025년 12월 29일

발행 2025년 12월 31일

발행인 조 정 희

발행처 한국해양수산개발원

주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 캡스앤디컴퍼니(051-911-9890)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원

탄소중립항만 전환을 위한 항만하역장비 관리체계 개선 방안 연구

A Study on Improving Cargo Handling Equipment
Management Framework for Carbon-Neutral Port Transition



49111 부산광역시 영도구 해양로301번길 26 (동삼동)

TEL. 051-797-4800

FAX. 051-797-4810

