

항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구

A Study on the Improvement of Carbon-neutral Port
Management System

안승현 · 김찬호 · 강무홍 · 김보경 · 박민정



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	안승현, 김찬호, 강무홍, 김보경, 박민정		
내부연구진	연구책임자	안승현	한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
	공동연구원	김찬호	한국해양수산개발원 항만연구본부 연구위원
	공동연구원	강무홍	한국해양수산개발원 물류해사연구본부 부연구위원
	공동연구원	김보경	한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
	공동연구원	박민정	한국해양수산개발원 항만연구본부 연구원
연구기간	2022. 1. 1. ~ 2022. 10. 31.		
보고서 집필내역			
연구책임자	안승현 연구총괄, 제1장 제1절, 제2절, 제4장 제1절 일부, 제2절 일부, 제3절 일부, 제5장		
	내부연구진		
	김찬호	제5장 일부	
	강무홍	제3장 제2절 일부	
	김보경	제1장 제3절 일부, 제2장 제1절 제3절 일부, 제3장 제1절 일부, 제2절 일부	
박민정	제1장 제3절 일부, 제2장 제2절, 제4장 제1절 일부, 제2절 일부, 제3절 일부		
산·학·연·정 연구자문위원	서수완	동서대학교	
	박두진	동명대학교	
	추윤식	해양수산부	

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

국제사회는 2022년 11월 20일 제27차 유엔기후변화협약 당사국총회를 통해 기후 변화로 인한 취약 국가의 손실과 피해에 대응하기 위한 재원을 마련하기로 하였다. 또한, 각국 정상들은 지구의 온도 상승을 1.5℃ 이하로 억제하기 위한 진전된 행동을 촉구하였다. 특히, 주요 국가는 최근 탄소 다배출 산업에 대한 탄소관세를 적용하는 방안을 논의하고 있다.

우리 정부도 2050년까지 탄소중립을 실현하기 위한 「2050 탄소중립 로드맵」을 수립하였다. 또한, 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 제정하고 2030 국가 온실가스감축목표를 기존 24.4%에서 40%로 상향하는 등 국제사회의 책임 있는 일원으로서 「파리협정」 이행을 위해 노력하고 있다.

이를 바탕으로 세계 주요 항만은 탄소중립 실현을 목적으로 로드맵을 수립하고 에너지 효율화, 신재생에너지 확대, 에너지 재활용 등을 추진하고 있다. 특히, 항만분야 탄소배출 인벤토리 구축, 보조금 지원, R&D 예산 지원 등 탄소 배출량 저감방안 마련, 저감목표 수립, 이행점검 등 관리체계를 마련하고 있다.

반면 우리나라 항만분야는 2050년까지 탄소중립항만을 실현하겠다는 비전은 제시하고 있으나, 정부의 주요 탄소중립 계획인 「2050 탄소중립 시나리오」, 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」 등에서는 항만분야의 구체적인 감축목표와 저감방안 등 항만의 탄소중립 추진을 위한 정책적 방향성을 제시하지 못하고 있다. 이러한 문제의 원인으로는 기초 통계자료 부족에 따른 항만분야의 탄소배출 인벤토리 미구축, 장래 탄소 배출량 전망 부재 등에 따른 관리체계의 미작동 등이다.

본 연구는 국내 항만의 장래 탄소 배출량을 전망, 개략적인 시기별 감축목표 설정, 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안과 이를 위한 정책제언 등을 종합적으로 제시하였다. 항만의 탄소중립은 먼 미래의 문제가 아닌 지금의 현안으로 받아들여야 한다. 이를 위해 「항만법」 개정을 통해 탄소배출 통계를 관리하는 체계도 마련되어야 할 것이며 항만분야 온실가스 관리제도 활성화, 탄소저감 기술개발 확대에도 노력해야 할 것이다.

본 연구가 우리나라 항만의 탄소중립 중요성과 시급성을 인식하는 시작점으로 향후 항만의 탄소중립 실현 방안 마련 등 정책을 마련하는 데 초석이 되기를 기대한다.

끝으로 이 연구의 책임을 맡은 안승현 전문연구원과 연구진인 김찬호 연구위원, 강무홍 부연구위원, 김보경 전문연구원, 박민정 연구원의 노고에 깊은 감사를 표한다. 아울러 심의 과정 전반에서 많은 조언을 아끼지 않은 동서대학교 서수완 교수, 동명대학교 박두진 교수, 해양수산부 추윤식 사무관, 우리 연구원의 김범중 명예연구위원과 김근섭 연구위원께도 깊은 감사의 인사를 드린다.

2022년 12월
한국해양수산개발원
원장 김 종 덕

목차

정책제안 _ i

요약 _ iii

Executive Summary _ ix

01

서론 _1

제1절 연구 배경 및 목적	1
1. 연구 배경	1
2. 연구 목적	4
제2절 연구 내용과 방법	6
1. 연구 내용	6
2. 연구 방법	8
제3절 선행연구와 본 연구의 차별성 검토	11
1. 선행연구	11
2. 본 연구의 차별성	19

02

해외 항만의 탄소중립 관리체계 _23

제1절 해외 항만의 탄소중립 관리체계	23
1. 미국	23
2. 일본	27
제2절 해외 항만의 탄소중립 이행방안	31
1. 미국 항만의 탄소중립 이행방안	31
2. 일본 항만의 탄소중립 이행방안	36
3. 유럽 항만의 탄소중립 이행방안	39
4. 중국 항만의 탄소중립 이행사례	41
5. 싱가포르 항만의 탄소중립 이행방안	43

제3절 시사점	46
---------	----

03 | 항만의 탄소 배출량 전망 및 감축목표 설정_49

제1절 현황 분석	49
1. 분석 개요	49
2. 자료 조사	58
제2절 항만별 탄소 배출량 전망 및 저감목표 설정	66
1. 배출량 산정 및 전망 개요	66
2. 항만 작업에 따른 배출량 산정 및 전망	66
3. 선박에 의한 배출량 산정 및 전망	94
4. 전체 항만 배출량 산정 및 전망 결과	108
5. 감축목표 설정	110
제3절 종합	113

04 | 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안_115

제1절 국내 탄소중립 관리체계	115
1. 관리체계 구성	115
2. 온실가스 인벤토리 구축	122
3. 온실가스 감축 · 이행점검	124
제2절 해양수산분야 탄소중립 관리체계	128
1. 해양수산분야 탄소중립 관리체계 구성	128
2. 해양수산분야 온실가스 인벤토리 구축	130
3. 해양수산분야 온실가스 감축 · 이행점검	132
제3절 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안	137
1. 관리체계 문제점 분석	137
2. 관리체계 개선방안	148
제4절 소결	154

05

결론 및 정책제언 _159

제1절 결론 및 연구의 한계점	160
1. 결론	160
2. 연구의 한계점과 향후 연구 과제	162
제2절 정책제언	164
1. 항만분야 탄소배출 통합정보체계 마련	165
2. 항만 탄소 저감계획 수립 및 평가 가이드 마련	167
3. 항만분야 온실가스 관리제도 활성화	168
4. 탄소중립 항만 기술개발 확대	169

참고문헌 _173

부록 _183

표 목차

〈표 1-1〉 IMO의 해운 CO ₂ 배출량 전망 방법 6단계	17
〈표 1-2〉 선행연구와의 차별성	21
〈표 2-1〉 CNP 구축계획에 기재하는 사항	28
〈표 2-2〉 탄소중립항만(CNP) 구축을 위한 주요 지원 제도	30
〈표 2-3〉 항만 관련 해양, 도로, 비도로 배출 규정	31
〈표 2-4〉 CAAP 부문별 이행전략	34
〈표 2-5〉 미국 항만별 청정 대기 정책	35
〈표 2-6〉 일본의 CNP 실현을 위한 구체적 이행사례	36
〈표 2-7〉 유럽 항만별 탄소중립 이행방안	40
〈표 2-8〉 상해시 종합교통발전 14·5계획의 항만 관련 저탄소 정책 추진 계획	43
〈표 2-9〉 MSDB 세부 전략	45
〈표 2-10〉 해외 항만 탄소중립 관리체계 및 이행방안 요약	48
〈표 3-1〉 품목별 물동량 현황 및 전망	52
〈표 3-2〉 영역별 주요 항만 장비	53
〈표 3-3〉 화물 품목별 주요 항만 장비	53
〈표 3-4〉 조사 응답 현황	62
〈표 3-5〉 수집된 전체 항만의 물동량, 유류, 전기, LNG 사용량	63
〈표 3-6〉 주요 장비 연간 평균 가동시간	65
〈표 3-7〉 IPCC 2006 guidelines의 탄소 배출량 산정방식	68
〈표 3-8〉 항만 하역장비의 배출량 산정 주요 변수	70
〈표 3-9〉 경유사용 장비에 대한 출력별 탄소(Co) 배출계수(g/kWh)	71
〈표 3-10〉 각 배출원별 이산화탄소 배출량 산정방식	73
〈표 3-11〉 컨테이너의 전체 탄소 배출량(tCO ₂)	74
〈표 3-12〉 비컨테이너의 전체 탄소 배출량(tCO ₂)	75
〈표 3-13〉 컨테이너의 단위 탄소 배출량(kgCO ₂ /TEU)	75
〈표 3-14〉 비컨테이너의 단위 탄소 배출량(kgCO ₂ /톤)	76
〈표 3-15〉 컨테이너의 연료별 단위 탄소 배출량(kgCO ₂ /TEU)	77
〈표 3-16〉 비컨테이너의 연료별 단위 탄소 배출량(kgCO ₂ /TEU)	78
〈표 3-17〉 연료별 품목별 단위 배출량(1)	80
〈표 3-18〉 연료별 품목별 단위 배출량(2)	80

〈표 3-19〉 배출량 전망을 위한 물동량 예측치(전국 기준)	82
〈표 3-20〉 컨테이너 이산화탄소 배출량 전망(tCO ₂)	84
〈표 3-21〉 완전자동화 터미널 개장 개발 규모	85
〈표 3-22〉 완전자동화터미널 개장을 반영한 이산화탄소 배출량 저감 예측	86
〈표 3-23〉 양곡 이산화탄소 배출량 전망(tCO ₂)	87
〈표 3-24〉 철광석 등 이산화탄소 배출량 전망(tCO ₂)	88
〈표 3-25〉 잡화 등 이산화탄소 배출량 전망(tCO ₂)	89
〈표 3-26〉 잡화 등 이산화탄소 배출량 전망(tCO ₂)	90
〈표 3-27〉 전국 물동량 기준 이산화탄소 배출량(tCO ₂)	91
〈표 3-28〉 완전자동화터미널 감축량 반영 시 전국 물동량 기준 이산화탄소 배출량(tCO ₂)	92
〈표 3-29〉 주요 항만별 컨테이너선 연료소모량 및 이산화탄소 배출량	98
〈표 3-30〉 주요 항만별 벌크선 연료소모량 및 이산화탄소 배출량	100
〈표 3-31〉 주요 항만별 유조선 연료소모량 및 이산화탄소 배출량	102
〈표 3-32〉 주요 항만별 물동량 예측	103
〈표 3-33〉 주요 항만별 컨테이너선 이산화탄소 배출량 전망	104
〈표 3-34〉 주요 항만별 벌크선 이산화탄소 배출량 전망	105
〈표 3-35〉 주요 항만별 유조선 이산화탄소 배출량 전망	106
〈표 3-36〉 주요 선박 유형별 이산화탄소 배출량 전망	107
〈표 3-37〉 국내 항만 이산화탄소 배출량 전망(완전자동화터미널 감축량 미반영) ..	109
〈표 3-38〉 국내 항만 이산화탄소 배출량 전망(완전자동화터미널 감축량 반영)	109
〈표 3-39〉 항만분야 탄소배출 감축목표 및 감축량(완전자동화터미널 감축량 미반영)	111
〈표 3-40〉 항만분야 탄소배출 감축목표 및 감축량(완전자동화터미널 감축량 반영)	112
〈표 4-1〉 「장기저탄소발전전략」(2020.12) 탄소중립 5대 기본방향	118
〈표 4-2〉 2050 탄소중립녹색성장위원회 분과	121
〈표 4-3〉 분야별 관장기관 및 전담기관	122
〈표 4-4〉 관리업체 지정 기준	125
〈표 4-5〉 배출권거래제 계획 기간별 운영 개요	126

〈표 4-6〉 국가 온실가스 통계 산정 · 보고 · 검증 지침의 해양수산부 관장분야	130
〈표 4-7〉 해운분야 연료별 소비량 추이(2010~2019)	132
〈표 4-8〉 해양수산분야 온실가스 감축 · 이행점검 기관 지정	133
〈표 4-9〉 국내 연안해운 부문의 온실가스 목표관리제도 운영 일정	134
〈표 4-10〉 KOEM의 해양기후변화 대응 사업	135
〈표 4-11〉 KOMSA의 온실가스감축 외부사업 주요 업무	135
〈표 4-12〉 항만분야 온실가스 목표관리제도 편입 대상업체 현황(2022년 기준)	141
〈표 4-13〉 교토 메커니즘 요약	142
〈표 4-14〉 항만분야 온실가스 배출권할당 대상업체 현황(2022년 기준)	143
〈표 4-15〉 해운항만 부문 외부사업 현황	144
〈표 4-16〉 해운항만 부문 외부사업 방법론 현황(2021년 10월 기준)	144
〈표 4-17〉 항만 탄소중립 관리체계 현황 및 이행 개선방안	156
〈표 5-1〉 전국 예선업체 현황 및 이산화탄소 배출량 추정	164
〈표 5-2〉 「항만법 시행령」 제36조(환경실태조사의 대상지역 등) 개정(안)	165
〈표 5-3〉 「항만법」 제00조(항만 탄소배출 통합정보체계의 구축 · 운영) 개정(안)	166
〈표 5-4〉 「항만법」 제6조(항만기본계획의 내용) 개정(안)	168

그림 목차

〈그림 1-1〉 본 연구의 흐름도	10
〈그림 2-1〉 미국 항만 배출원별 전체 CO ₂ 배출량 BAU 전망(국가 항만 전력 평가) 25	
〈그림 2-2〉 미국 항만의 탄소중립 관리체계의 도식화	26
〈그림 2-3〉 CNP 구축계획 수립 절차	29
〈그림 2-4〉 기타큐슈항 수소·암모니아 등 수입 인프라 로드맵	38
〈그림 2-5〉 기타큐슈항 탈탄소화 로드맵	38
〈그림 3-1〉 2022년 5월 품목별, 항만별 물동량 순위	51
〈그림 3-2〉 컨테이너터미널 화물처리 프로세스	54
〈그림 3-3〉 양곡부두 화물처리 프로세스	55
〈그림 3-4〉 석탄부두 화물처리 프로세스	56
〈그림 3-5〉 잡화 부두 화물처리 프로세스	57
〈그림 3-6〉 자동차부두 및 유류부두 해측작업	58
〈그림 3-7〉 조사표 내용	60
〈그림 3-8〉 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 1도)	95
〈그림 3-9〉 주요 항만별 컨테이너선 연료사용량 비교	97
〈그림 3-10〉 광양항 구역별 컨테이너선 연료사용량 비교	98
〈그림 3-11〉 주요 항만별 벌크선 연료사용량 비교	99
〈그림 3-12〉 주요 항만별 유조선 연료사용량 비교	101
〈그림 3-13〉 주요 선박 유형별 이산화탄소 배출량 전망 추이	108
〈그림 4-1〉 국내 탄소중립 관리체계	117
〈그림 4-2〉 2050 탄소중립녹색성장위원회 연혁	119
〈그림 4-3〉 2050 탄소중립녹색성장위원회 조직도	120
〈그림 4-4〉 온실가스 인벤토리 산정 절차	124
〈그림 4-5〉 배출권 할당 대상업체 지정 기준	127
〈그림 4-6〉 해양수산업분야 탄소중립 관리체계	129
〈그림 4-7〉 항만 탄소중립 관리체계 이행방안	157

약어 목록

- AGV(무인운반차): Automated Guided Vehicle
- AHP(분석적 계층화 과정): Analytic Hierarchy Process
- AIS(선박자동식별시스템): Automatic Identification System
- AMP(육상전원공급설비): Alternative Maritime Power
- ARIMA(자동회귀 누적이동 평균): Auto-regressive Integrated Moving Average
- ARMGC(자동화 야드 크레인): Automatic Rail Mounted Gantry Crane
- BAU(통상경영추계방식): Business As Usual
- BCA(국경탄소조정): Border Carbon Adjustment
- BTC(교형크레인): Bridge Type Crane
- CAAAC(청정대기행동자문위원회): Clean Air Act Advisory Committee
- CAAP(청정대기행동계획): Clean Air Action Plan
- CARB(캘리포니아 대기자원위원회): California Air Resources Board
- CBAM(탄소국경조정제도): Carbon Border Adjustment Mechanism
- CCS(탄소포집저장): Carbon Capture and Storage
- CCUS(이산화탄소 포집·활용·저장 기술): Carbon Capture, Utilization, and Storage
- CDM(청정개발체제): Clean Development Mechanism
- CFR(미국연방규정집): Code of Federal Regulations
- CHE(하역장비): Cargo Handling Equipment
- CII(탄소집약도지수): Carbon Intensity Indicator
- CMAQ(대기질 개선 프로그램): Community Multi-scale Air Quality
- CNP(탄소중립항만): Carbon Neutral Port
- CO₂ (이산화탄소): Carbon Dioxide
- CORSIA(탄소상쇄·감축제도): Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation
- CTP(클린트럭프로그램): Clean Trucks Program

-
- DERA(디젤배출감축법): Diesel Emissions Reduction Act
 - ECA(배출규제해역): Emission Control Areas
 - EEA(유럽환경청): European Environment Agency
 - EEDI(에너지효율설계지수): Energy Efficient Design Index
 - EEXI(에너지효율지수): Energy Efficiency Existing Ship Index
 - EPA(미국 환경보호청): Environmental Protection Agency
 - ETS(배출권거래제): Emission Trading Scheme
 - EU(유럽연합): European Union
 - GCMD(글로벌 해사 탈탄소화센터): Global Centre for Maritime Decarbonisation
 - GHGRP(온실가스 보고 프로그램): Greenhouse Gas Reporting Program
 - GDP(국내 총생산): Gross Domestic Product
 - GF(배출량 기준 할당방식): Grandfathering
 - GSP(그린쉽프로그램): Green Ship Programme
 - GPP(그린포트프로그램): Green Port Programme
 - GTP(녹색기술프로그램): Green Energy and Technology Programme
 - IAPH(국제항만협회): International Association of Ports and Harbors
 - IMO(국제해사기구): International Maritime Organization
 - IPCC(기후변화에 관한 정부 간 협의체): Intergovernmental Panel on Climate Change
 - JI(공동이행제): Joint Implementation
 - KOEM(해양환경공단): Korea Marine Environment Management Corporation
 - KOMSA(한국해양교통안전공단): Korea Maritime Transportation Safety Authority
 - KSIC(한국표준산업분류): Korean Standard Industrial Classification
 - LEDS(장기저탄소발전전략): Long-term low greenhouse gas Emission Development Strategies
 - LMC(인증된 운송업체): Licenced motor carrier

-
- LULUCF(토지이용, 토지용도변경 및 임업): Land-Use, Land-Use Change, and Forestry
 - MACC(한계저감비용곡선): Marginal Abatement Cost Curve
 - MARPOL(해양오염 방지협약): International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships
 - MPA(싱가포르 해운항만청): Maritime and Port Authority of Singapore
 - MRV(보고·검증제도): Measurement, Reporting, Verification
 - MSDB(싱가포르 해상 탈탄소화 전략): Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint
 - MSGI(싱가포르 그린해양 이니셔티브): Maritime Singapore Green Initiative
 - MSTRS(이동배출원기술검토소위원회): Mobile Sources Technical Review Subcommittee
 - NDC(국가 온실가스 감축목표): Nationally Determined Contributions
 - NOx(질소산화물) : Nitrogen Oxide
 - OGV(외항선박): Ocean-Going Vessel
 - OPS(육상전력공급장치): On-shore Power Supply
 - PDTR(항만운송트럭등록부): Port Drayage Truck Registry
 - PM(미세먼지): Particulate Matter
 - SCAQMD(사우스코스트 대기질 관리지구): South Coast Air Quality Management District
 - Sox(황산화물): Sulfur Oxides
 - TAP(항만 기술 발전 프로그램): Port's Technology Advancement Program

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. 유류, 전기 등 에너지 소비량 기반의 항만 탄소 배출량 전망
2. 2050년 기준 항만의 탄소 배출량은 약 370만 톤으로 2020년 대비 1.8배 증가 예상
3. 국내 항만분야의 탄소중립 관리체계는 비교적 잘 정비되어 있으나, 이행 체계 부재로 개선 필요

■ 정책제안

1. 「항만법」 개정을 통해 항만분야 탄소배출 통합정보체계 마련
2. 「항만법」 개정을 통한 항만 탄소 저감계획 수립 및 평가 가이드 마련
3. 전담기관 지정 등을 통한 항만분야 온실가스 관리제도 활성화
4. 에너지 효율화 기술, 신재생에너지 발굴 및 실증 등 탄소중립 항만 기술 개발 확대

요 약

항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구

안승현 · 김찬호 · 강무홍 · 김보경 · 박민정

1. 연구 목적

- 본 연구는 항만 탄소중립의 중요성을 강조하고, 탄소중립 실현을 위한 정책대안 제시를 목적으로 함
- 첫째, 대상 품목별 활동자료를 수집하고 분석하여 우리나라 항만의 탄소 배출량을 점검 및 장래 탄소 배출량을 전망하고자 함
- 둘째, 탄소 배출량 전망 결과, 국가 탄소 배출량 저감 계획, 부산항 진해신항, 인천신항, 광양항 항만자동화 테스트베드 등 완전자동화 터미널 도입을 고려한 시기별 탄소 배출량 저감목표를 설정하고자 함
- 셋째, 법·제도, 조직, 이행 주체 등 국내 탄소중립 관리체계, 해양수산분야의 탄소중립 관리체계 구성, 이행·점검 체계, 관리 주체 역할 등이 마련되어 있는지를 검토하여 항만분야 탄소중립 관리체계의 문제점을 분석하고 개선방안을 모색하고자 함
- 넷째, 항만의 탄소중립 관리체계의 작동을 위한 법·제도 개선방안 등 정부 정책을 제안하고자 함

2. 연구의 방법과 특징

1) 연구의 방법

- 선행연구와 해외사례는 기존 문헌과 인터넷 자료 등 광범위한 검토를 통해 수행함
- 대상 품목별 항만 하역사업자를 대상으로 활동자료를 수집하고, IPCC 방법론을 준용하여 장래 탄소 배출량을 전망함
 - 또한, 항만 구역 내에서 발생하는 탄소 중 큰 비중을 차지하는 선박 기인 탄소는 AIS 자료를 활용하여 전망함
- 국가 온실가스 감축목표 등 정부의 탄소 배출 저감 계획을 고려하여 항만분야의 시기별 탄소저감목표를 제시함
- 해외사례, 국내 타 분야의 탄소중립 추진체계 분석, 연구과정 전반에서 제시한 전문가와 이해관계자의 다양한 의견수렴을 바탕으로 항만 분야 탄소중립 관리체계 개선방안을 마련함

2) 연구의 특징

- 본 연구는 중요성에 비해 그간 국내에서 관심과 준비가 부족했던 항만의 탄소중립과 관련한 종합적 연구라는 특징이 있음
 - 특히 선행연구에서 자료 확보 등의 어려움으로 수행되지 못했던 항만의 탄소 배출량을 전망함
- 또한 항만분야의 탄소중립 관리체계에 대한 문제점을 분석하고, 관리 체계의 원활한 작동을 위한 개선방안을 제시함

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- **항만의 탄소 배출량 저감, 당면 핵심과제**
 - 항만 물동량 증가에 따라 탄소 배출량의 증가가 예상되나, 국내 항만의 탄소중립실현을 위한 정책은 미흡한 실정이며, 문제의 시급성을 인지하고 핵심과제로 다루어야 함
- **항만분야 온실가스 인벤토리 구축 및 전망 연구 필요**
 - 국내 항만분야의 온실가스 인벤토리 구축은 탄소중립 실현을 위한 첫걸음으로, 유류, 전기 등 에너지 사용량 조사와 방법론 개발을 통한 인벤토리 구축이 시급하며, 이를 바탕으로 장래 탄소 배출량 전망 연구가 필요
- **항만의 탄소배출은 지속적으로 증가 예상**
 - 항만에서 처리하는 화물 증가에 따라 배출되는 탄소도 지속적으로 증가하여 2050년 기준 370만 톤(하역작업 73만 톤, 선박 297만 톤)으로 전망됨
 - 부산항 진해신항, 인천신항, 광양항 등 자동화를 고려하면 하역작업에 의한 배출량은 71만 톤으로 소폭 감소
- **항만의 탄소중립 실현을 위한 간접배출 저감 중요**
 - 전력 중심 장비로 교체, 생활 여건 변화와 콜드체인 시장 확대에 인헤리퍼컨테이너 증가, AMP 등 친환경 장비 도입, 항만 자동화 가속화 및 스마트화 본격 추진 등 장래 항만의 탄소배출 대부분은 간접배출로 전환 예상
 - 진정한 의미의 항만 탄소중립 실현을 위해서는 간접배출 저감 방안 마련이 매우 중요

■ 국내 항만 탄소중립 관리체계 개선 필요

- 국내 탄소중립 관리체계는 비교적 잘 운영되고 있으며, 항만분야 또한 상위법에 따라 관리체계가 마련됨
- 다만, 온실가스 인벤토리 부재, 감축·이행점검 체계 미흡 등에 따라 관리 체계가 제대로 작동하지 않고 있으며, 관리체계의 유기적 작동을 위한 법·제도 정비 등 개선이 필요함

2) 정책대안 제시 내용과 정책화 활용

■ 항만분야 탄소배출 통합정보체계 마련

- 탄소 배출량 추정을 위한 기초자료 수집의 법적 규정화가 필요하며, 본 연구에서는 「항만법」에 ‘항만분야 탄소배출 통합정보체계 구축과 운영’의 신설을 제안

〈표 요약-1〉 「항만법」 제00조(항만 탄소배출 통합정보체계의 구축·운영) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	신설	① 해양수산부 장관은 항만의 탄소중립 실현을 위하여 필요한 경우에는 항만 탄소배출 통합정보체계를 구축·운영할 수 있다. ② 해양수산부 장관은 제1항에 따라 항만 탄소배출 통합정보체계를 구축·운영하기 위하여 다른 중앙행정기관, 지방자치단체 및 「공공기관의 운영에 관한 법률」에 따른 공공기관(이하 “공공기관”이라 한다)의 장 및 항만시설 운영자에게 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다. ③ 해양수산부 장관은 항만탄소배출통합정보체계를 적절하게 관리할 수 있는 인력 및 조직과 시설·장비를 갖춘 자를 전담기관으로 지정하여 항만건설통합정보체계를 관리·운영하게 할 수 있다.

자료: 저자 작성

■ 항만 탄소 저감계획 수립 및 평가 가이드 마련

- 「탄소중립기본법」 제정에 따른 “기후변화영향평가” 제도 신설로 국가 항만기본계획, 신항만건설기본계획 등을 수립할 때, “기후변화영향평가”를 수행 필요. 이에 본 연구에서는 「항만법」 제6조를 개정하여 탄소 저감계획 마련을 포함하고 관련 가이드 마련을 제안

〈표 요약-2〉 「항만법」 제6조(항만기본계획의 내용) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	① 항만기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.	(현행과 같음)
	1.~8. (생략)	(현행과 같음)
	9. 그 밖에 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항	9. 그 밖에 항만의 탄소 저감계획 수립 등 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항

자료: 항만법 제6조 제1항

■ 항만분야 온실가스 관리제도 활성화

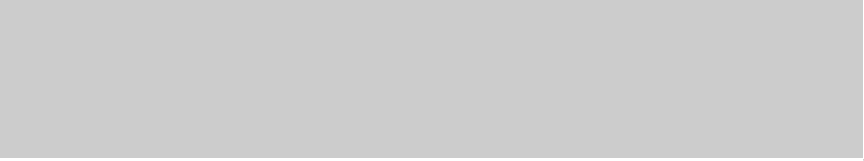
- 항만분야 온실가스 목표관리제도 관리기관 지정을 통해 항만분야의 업체들의 온실가스목표관리제, 배출권거래제도 등 온실가스 관리제도 편입으로 체계적 관리 및 저감 이행 필요

■ 탄소중립 항만 기술 확대

- 항만의 전력 에너지 사용에 따른 간접배출을 가장 효과적으로 줄일 수 있는 고효율 항만 실현을 위해 마이크로그리드 도입, 에너지 회수 크레인 기술개발 등 필요
- 항만의 입지를 활용하여 조력, 파력, 블루·그린 수소, 해수온도차발전 등 다양한 신재생 에너지원을 발굴하고 실증하여 항만의 에너지 자립 확대 및 간접배출 저감, 에너지 비용 절감 추진 필요

3) 정책적 기여 등 기대효과

- 항만의 탄소배출 저감 필요성 강조를 통한 정책 추진 동력 마련
 - 항만의 탄소 배출량 전망을 바탕으로 저감 필요성을 강조하여 관련 항만정책 추진 당위성 확보
- 국가의 탄소중립 실현에 기여
 - 항만의 탄소중립 관리체계 개선을 통해 장기적으로 국가 탄소중립 목표 실현에 기여가 가능함
- 항만 탄소저감 기술 발전
 - 본 연구에서 제안한 탄소저감, 에너지 효율화, 신재생에너지 연구개발(R&D) 확대를 기술을 확보하고, 이를 전국 항만에 확대하여 실용성 확보할 수 있음



EXECUTIVE SUMMARY

A Study on the Improvement of Carbon-neutral Port Management System

Seung-Hyun An · Chan-Ho Kim · Moo-Hong Kang · Bo-Kyung Kim
· Min-Jeong Park

1. Purpose

- This study aims to highlight the importance of carbon neutrality at ports and suggest policy measures to achieve it.
- First, this study intends to examine carbon emissions in Korean ports and forecast the future amount of carbon emissions by collecting and analyzing activity data per target cargo.
- Second, based on the forecasts of carbon emissions, this study aims to establish a reduction target of carbon emissions per time period by considering the National Plan for Carbon Emission Reduction as well as the introduction of fully-automated terminals such as port automation test beds in Jinhae New Port, Incheon New Port, and Gwangyang Port.

-
- Third, this study intends to review the preparedness in terms of domestic management systems for carbon neutrality such as laws, systems, organizations and principal actors; the structure of carbon neutrality management system; an implementation and monitoring system and the role of principal agents of management. Based on the review, this study analyzed problems related to the carbon neutrality management system in ports sector while seeking countermeasures.
 - Fourth, governmental policies were suggested including legal and institutional improvements for the operation of the carbon-neutral port management system.

2. Methodology and Features

1) Methodology

- Preceding studies and foreign cases were broadly studied through the review of existing literature and Internet data.
- Activity data were collected targeting terminal operators per target cargo, and future carbon emissions were forecasted by applying the IPCC methodology.
- This study utilized AIS data to predict carbon emissions originating from ships which account for a large proportion of carbon emissions generated within port areas.

- Taking the National Plan for Carbon Emission Reduction into consideration including the national target for GHG reduction, this study suggested a carbon reduction target per time period in the port sector.
- The improvement measures for the carbon-neutral port management system were suggested based on foreign studies, an analysis of systems for carbon neutrality in other sectors and the collection of a variety of opinions coming from experts and stakeholders during the process of conducting this research.

2) Features

- This study bears significance as a comprehensive research covering carbon neutrality at ports which has not received its due attention in Korea.
- In particular, this study includes the forecasting of carbon emissions at ports which has not been performed in preceding studies due to difficulties in securing data.
- While analyzing the problems of carbon-neutral port management system, it also provides improvement measures to the seamless operation of the management system.

3. Result

1) Summary

- Reduction of carbon emissions is an imminent key task for ports.
- Although carbon emissions are expected to incline following the increase of port traffic volumes, Korean ports are underprepared in terms of policies to realize carbon neutrality in ports. It is time to recognize the urgency of the problem and deal with it as a key task.
- The construction of GHG inventory and forecasting research in the port sector is necessary
- As an initial step towards achieving carbon neutrality, the construction of GHG inventory for domestic ports is an imminent task that should be conducted by investigating energy consumption such as oil and electricity as well as developing relevant methodologies. Based on this information, research on forecasting future carbon emissions is required.
- Carbon emissions from ports are expected to continue increasing.
- As the amount of carbon emitted from ports is expected to rise following the increase of cargoes processed in ports, carbon emissions are estimated to reach 3.7 million tons (730,000 tons from terminal operation, 2.97 million tons from ships) by 2050.

- Considering the port automation underway in Jinhae New Port, Incheon New Port and Gwangyang Port, the carbon emissions resulting from cargo handling is expected to show a modest decline at 710,000 tons
- Reduction of indirect carbon emissions is important to realize carbon-neutral ports.
- Most of the carbon emissions generated from future ports are expected to change into indirect emissions for the following reasons; conversion to electric-powered equipment, increase of reefer containers with the expansion of the cold chain market, the introduction of eco-friendly equipment such as AMP, acceleration of port automation and fully implemented smartization, etc.
- Therefore, preparing measures for reducing indirect emissions is extremely important to realize the true meaning of carbon-neutral ports.
- The carbon-neutral port management system in Korea should be improved.
- Domestic carbon-neutral management systems have been relatively well established and operated. The management system in the port sector was also established in accordance with upper laws.
- However, the management system does not work sufficiently due to the absence of a GHG inventory and a substandard reduction, implementation, and monitoring system. Therefore, relevant laws and systems should be improved for the systematic operation of the management system.

2) Policy suggestions and policy-making activities

- Establishing a comprehensive carbon emission information system in the port sector
- The collection of basic data for the estimation of carbon emissions should be stipulated into law, and this study proposes the inclusion of an article ‘Establishment and Operation of an Integrated Carbon Emission Information System in Ports’ within the Harbor Act.

〈Summary tale-1〉 Amendment (proposal) of the “Harbor Act” Article 00
(Establishment and Operation of an Integrated Carbon Emission Information System in Ports)

Category	Current law	Improvement (proposal)
Content	Newly established	① The Minister of Oceans and Fisheries shall establish and operate an ‘Integrated Port Carbon Emission Information System’ if necessary to realize carbon-neutral ports. ② To establish and operate an Integrated Port Carbon Emission Information System pursuant to paragraph (1), the Minister of Oceans and Fisheries may request the heads of other central administrative agencies, local governments, and public institutions designated under the Act on the Management of Public Institutions (hereinafter referred to as “public institutions”) and port facility operators to provide necessary data or information. ③ The Minister of Oceans and Fisheries may designate a person, which has facilities and equipment as well as human resources and an organization capable of properly managing the Integrated Port Carbon Emission Information System, as a dedicated institution for managing and operating the integrated information system.

Source: Prepared by the authors

- Preparing a guideline for establishing and assessing port carbon reduction plans
- With the establishment of ‘climate change impact assessment’ scheme following the enactment of the Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth, a climate change impact assessment should be conducted in establishing the Port Master Plan and Basic Plan for the Construction of New Ports. Therefore, this study revised article 6 of the Harbor act to include the preparation of carbon reduction plans along with relevant guidelines

〈Summary table -2〉 Amendment (proposal) of the Harbor Act Article 6
(Details of Harbor Master Plans)

Category	Current law	Improvement (proposal)
Content	① A port master plan shall include the following matters: 1. ~8. (Omitted) 9. Any other matter deemed necessary by the Minister of Oceans and Fisheries	(Same as the current provision) (Same as the current provision) 9. Any other matter deemed necessary by the Minister of Oceans and Fisheries including <u>the establishment of carbon reduction plans in ports</u>

Source: Article 6 of the Harbor Act

- Activating GHG management system in ports
- By designating a management system for GHG Target Management System in ports, companies in the port industry should be incorporated into GHG management systems including GHG Target Management System and Emission trading

systems to enable systematic management and emission reduction.

- **Expanding carbon-neutral port technology**
 - The adoption of microgrids and the technological development of cranes capable of recovering energy are necessary to realize highly efficient ports in which indirect carbon emissions can be most effectively reduced resulting from ports' use of electric energy.
 - It is necessary to discover and demonstrate a variety of renewable energy sources taking advantage of the location of ports, such as tidal power, wave power, Blue and Green hydrogen, and thermal difference generation. Such efforts will expand the energy self-reliance of ports, reduce indirect carbon emissions and cut energy costs.

3) Expected benefits including policy contribution

- **Preparing the momentum for policy implementation by emphasizing the necessity for reducing carbon emissions in ports**
 - Forecasting carbon emissions in ports would highlight the necessity for the reduction and able to secure the imperativeness of implementing relevant port policies.
- **Contributing to the realization of a carbon-neutral nation**
 - The improvement of carbon-neutral port management system can contribute to achieving a goal of being a carbon-neutral

nation from a long-term perspective.

- **Developing carbon-neutral port technology**
 - As suggested in this study, technologies can be secured by carbon reduction, increasing energy efficiency and expanding R&D in renewable energy and then able to secure practicality by applying them to ports nation-wide.

01

서론

제1절 연구 배경 및 목적

1. 연구 배경

국제사회는 기후변화에 대응하기 위해 선진국 대상의 「교토의정서(1997)」¹⁾에 이어 개발도상국까지 참여 대상을 확대하고 지구의 평균온도 상승 제한 목표를 기존 2℃에서 1.5℃로 하향 조정한 「파리협정(2015)」을 채택하였다. 특히, 파리협정에서는 모든 당사국이 2020년까지 「장기저탄소발전전략(LEDs)」과 「국가 온실가스감축목표(NDC)」를 제출하기로 합의하였다.

또한, 최근 주요 국가에서는 탄소 다배출 산업에 탄소관세를 적용하는 방안을 논의하고 있다. 유럽연합(EU, European Union)의 탄소국경조정제도²⁾(CBAM: Carbon Border Adjustment Mechanism)가 대표적인

1) United Nations(1998), KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. 이하, 교토의정서.

2) 2021년 7월 2030년까지 탄소배출을 1990년대 대비 55%로 감축하는 것을 골자로 하는 Fit for 55의 실행패키지 성격의 법안임.

사례이다. 미국은 대선 과정에서 바이든 대통령이 제시한 주요 기후정책인 국경탄소조정(BCA: Border Carbon Adjustment)은 최근 법제화를 위한 절차³⁾를 진행하고 있으며, 2024년부터 화석연료, 알루미늄, 철강, 시멘트에 우선적으로 탄소국경세를 부과할 계획이다. 탄소에 관세를 부과하는 제도는 중국 등 다른 국가로 확대할 가능성이 크기 때문에, 우리나라 제조업과 항만 물동량에 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

세계 주요 선진항만은 이 같은 배경과 여건에 따라 탄소중립을 목표로 로드맵을 수립하거나 다양한 정책을 추진하고 있다. 로테르담항, 앤티워프항, 함부르크항, 포츠머스항, 헬싱키항 등 유럽 항만과 LA-LB항, 뉴욕-뉴저지항 등 미주 지역 항만이 선도적으로 추진하고 있다. 이처럼 선진 항만이 추진 중인 주요 정책을 종합해 보면 에너지의 효율적 사용, 신재생에너지 확대, 에너지 재활용 등 세 가지 분야로 요약할 수 있다.⁴⁾ 또한, 항만의 탄소중립을 위한 관리체계를 마련하고 실현 가능성을 높이기 위하여 다양한 구체적인 이행방안을 추진하고 있다. 대표적으로 탄소배출 인벤토리 구축, 이행력을 높이기 위한 장비 교체 보조금 등 예산 지원, 탄소저감 및 포집 기술개발을 위한 R&D 추진 등이다.

우리 정부도 「파리협정」 이행을 위한 「2050 탄소중립 추진전략」⁵⁾을 지난 2020년 12월 7일 확정하여 발표하였으며, 이어 2020년 12월 15일 「2050 LEDS」 정부안과 2030 NDC 정부안을 확정하였다. 이후 2021년 8월 「2050 탄소중립 시나리오」를 발표하면서 우리나라 탄소중립 실현을 위한 장기 계획을 완성하였다. 또한, 최근 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(이하, 탄소중립기본법)」을 제정하였으며, 2050 탄소중립

3) 2021년 3월 무역정책 의제에서 기본적인 방향 설정 후, 최근 법안이 발의되어 하원의원에 계류 중임.

4) 김근섭 외(2021), p. 2.

5) 「2050 탄소중립 추진전략」은 ① 경제구조의 저탄소화, ② 신유망 저탄소산업 생태계 조성, ③ 탄소중립 사회로의 공정전환 등 3대 정책방향과 ④ 탄소중립 제도적 기반 강화라는 지원 전략을 포함하는 3+1 전략으로 구성됨.

실행력 강화를 위하여 2030 NDC를 기존 24.4%에서 40%로 상향·발표하였다.

우리나라의 2050 탄소중립 목표를 달성하기 위해 다양한 분야의 감축목표와 감축 방안이 제시되었다. 해양수산부는 탄소중립을 넘어 탄소 네거티브를 실현할 계획을 담은 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」을 2021년 12월 16일에 발표하였다. 이를 통해, 해운, 수산·어촌, 해양에너지, 블루카본, 항만, CCS, 해양폐기물 등 7개의 분야에서 탄소배출을 줄이고, 배출 탄소 포집 및 흡수원을 대폭 확대하여 2050년까지 729.8만 톤을 감축함으로써 2018년 배출량 406.1만 톤 대비 -323.7만 톤의 해양수산분야 탄소 네거티브를 달성할 계획이다. 또한, 2022년 9월 15일에 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」의 이행 계획이자 비법정계획인 「제4차 해양수산부문 기후변화 종합계획」을 발표하였다.

「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」에서는 항만분야의 정확한 감축 방안 없이 2050년까지 탄소중립 항만을 실현하겠다는 비전만을 수립하였다. 또한, 「제4차 해양수산부문 기후변화 종합계획」은 대부분 해운과 수산 분야에 집중되어 있으며, 항만분야의 경우 LED 조명시설 지속 구축, AMP 지속 구축 등 단편적이고 파편적인 계획 수립에 그치고 있다. 항만분야에 대한 구체적인 탄소중립 실현계획이 마련되지 못한 가장 근본적인 문제는 항만분야의 탄소배출 인벤토리가 구축되지 못했기 때문이다. 또한, 인벤토리가 구축되지 못하는 원인은 기초적인 통계자료가 체계적으로 수집되지 못한 것에 기인한다.

이로 인해 「2050 탄소중립 시나리오」에서는 해운과 항공 분야는 친환경 선박 보급 및 운항 최적화 등 해운 에너지효율 개선, 항공기 운영효율 개선 등 감축 계획이 마련되었으나, 항만 부문에 대한 구체적인 감축 계획은 제시되지 못하였다.

항만분야의 탄소중립 실현을 위해서는 관리체계 마련과 이행이 매우 중요하다. 국내 항만분야의 탄소중립 관리체계를 살펴보면 「탄소중립기본법」 등 관련 법령과 지침에 따라 체계적으로 정비되어 있다. 다만, 일부 절차에 대한 이행 주체가 명확하게 지정되어 있지 않거나, 절차와 이행 주체가 지정되어 있음에도 인벤토리 구축 및 배출량 전망 등이 현실적인 제약 등으로 이행되지 못하거나, 이행이 되었더라도 그 수준이 미흡한 부분이 있다. 따라서 해외 주요 항만을 참고하여, 구체적인 국내 항만분야의 탄소중립 계획과 추진이 필요하다.

이상과 같이 국내 항만분야 탄소중립 실현의 중요성에도 불구하고 관련 연구, 제도 정비, 정책개발 등은 매우 부족한 실정이다. 따라서, 국내 항만의 탄소중립을 체계적으로 추진하기 위해서는 다양한 부문에 대한 검토가 필요하다. 다만, 우선순위와 시급성을 고려하면, 항만에서 발생하는 탄소배출을 전망하고 저감목표 설정하는 것이 선행되어야 한다. 또한, 현행 항만분야의 탄소중립 관리체계의 문제점을 분석하고 개선방안을 마련하는 것이 중요하다. 이러한 본 과제의 목적을 생각하면, 과제 수행 필요성도 매우 높다 할 수 있다.

2. 연구 목적

본 연구의 목적은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째, 항만분야에서 발생 가능한 장래 탄소 배출량을 전망하고, 전망 결과를 바탕으로 저감목표를 설정하는 것이다. 두 번째, 국내 항만의 탄소중립 관리체계의 문제점을 분석하고 대안을 제시하는 것이다.

다만, 본 연구는 항만의 탄소중립 관리체계 마련을 위해 가장 중요한 탄소 배출량 전망에 큰 비중을 두고 있으나, 모든 항만과 부두를 대상으로

전망하는 것은 현실적으로 많은 제약이 따른다. 이에 따라, 본 연구에서는 물동량 측면의 규모 및 중요성을 고려하여 컨테이너화물과 물동량 기준 상위 5개 비컨테이너 품목을 대상으로 한다. 이러한 탄소 배출량 전망 결과와 정부에서 제시하고 있는 시기별 탄소 배출량 저감 계획을 바탕으로, 항만 분야 탄소중립 실현을 위한 시기별 감축목표를 설정하였다. 또한, 국내 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안을 마련하고자 하였다. 이를 위해, 국내외 항만분야 및 타 분야의 탄소중립 관리와 이행체계를 살펴보고 국내 여건을 고려한 법·제도 개선방안, 지원 정책 등을 제안하였다. 세부적인 연구목적은 크게 네 가지로 구분할 수 있다.

첫째, 항만의 탄소 배출량 전망이다. 항만의 탄소중립 실현을 위한 첫 단계가 장래 배출량 전망이다. 하지만, 이에 관한 최근의 연구는 찾아보기 힘든 실정이다. 가장 큰 원인은 탄소배출 추정 및 전망과 관련된 항만 활동자료를 민간 운영 주체에서 관리하고 있어, 주기적으로 수집된 세부 자료가 부족하다는 점이다. 현재 참고할 만한 신뢰성을 갖춘 자료는 10여 년 전에 수집된 자료로 그간 항만시설 및 하역장비의 현대화가 고려되지 못한 자료이다. 이에, 본 연구에서는 대상 품목을 다루는 부두별 운영주체를 통하여 유류, 전력, 물동량 실적 등 활동자료를 최대한 수집하고, 분석하여 장래 탄소 배출량을 전망해보고자 한다. 다만, 현재 자료의 관리체계 및 수집 가능성 등을 고려하여 전망 대상은 하역장비와 선박으로 한정한다.

둘째, 탄소 배출량 전망과 국가 탄소 배출량 저감 계획과 연계한 항만분야의 저감목표를 설정하는 것이다. 현황 자료 기반의 탄소 배출량을 전망하고, 항만의 여건 등을 고려하여 BAU⁶⁾ 대비 저감목표를 설정하는 것이다. 본 연구의 성격과 범위상 세부적인 저감목표를 설정하는 것은 쉽지 않기 때문에, 국가 온실가스감축목표를 기준으로 하여 시기별 직·간접배출

6) BAU(Business As Usual) : 온실가스 감축 조치가 취해지지 않았을 때 예측되는 온실가스 배출량

량의 저감목표를 설정하였다. 특히, 향후 부산항 진해신항, 인천신항, 광양항 항만자동화 테스트베드 등 완전자동화로 개발되는 터미널은 완전자동화 장비 도입에 따른 저감량을 고려하여 검토하였다.

세 번째, 국내 항만분야 탄소중립 관리체계의 문제점을 분석하고, 개선 방안을 모색하는 것이다. 법·제도, 조직, 이행 주체 등 국내 탄소중립 관리체계 전반을 살펴보고, 이어 해양수산분야의 탄소중립 관리체계 구성, 이행·점검 체계, 관리 주체 역할 등이 마련되어 있는지를 검토하였다. 이를 바탕으로 항만분야의 탄소중립 관리체계가 잘 작동하지 않는 원인을 살펴보고 적절한 개선방안을 제시하고자 하였다.

네 번째, 항만의 탄소중립 관리체계 이행을 위한 법·제도 개선방안, 지원 방안 등 정부의 역할을 제안하는 것이다. 항만의 탄소중립은 특정 주체의 노력만으로 실현할 수 있는 것이 아니다. 관련 통계의 체계적인 수집, 관련 법·제도 정비, 정부 계획 반영 등 다양한 과제가 있다. 본 연구에서는 정부가 앞으로 관련 정책을 마련하는 과정에서 정부 관점에서 추진해야 할 부분과 이를 실현하기 위해 정비해야 할 부분을 제시하는 것이 목적이다.

제2절 연구 내용과 방법

1. 연구 내용

본 연구의 주요 목적은 국내 항만분야의 탄소 배출량 전망, 저감목표 설정과 저감방안 마련, 탄소중립 관리체계 마련을 위한 정책대안을 제시하는 것이다. 향후 탄소중립의 중요성은 증가할 것이고, 탄소중립은 항만의 관리

와 운영 측면에서 핵심적인 사항이 될 것이기 때문이다. 이러한 연구목적 달성을 위해 본 연구에서 검토할 주요 내용은 다음과 같다.

제1장에서는 연구 배경과 목적, 연구 내용과 방법, 선행연구와의 차별성을 제시한다. 특히, 본 연구의 핵심 목표인 항만의 탄소 배출량 전망과 항만분야 탄소중립 관리체계 관련 선행연구를 집중적으로 검토한다. 이를 통하여 선행연구에서 활용한 탄소 배출량 전망 방법론 중에서 본 연구에 적합한 방법론과 국내 항만의 여건에 부합되는 관리체계 마련 필요성을 도출하고 선행연구와 본 연구의 차이점을 도출한다.

제2장에서는 해외 주요 항만의 탄소중립 관리체계와 이행방안 관련한 주요 사례를 검토한다. 해외 선진항만의 탄소중립 관리체계의 절차, 이행주체, 구성요소 등을 살피고 종합하였다. 해외 항만의 사례 분석을 통해 시사점을 도출하고 국내 항만의 탄소중립 관리체계 개선방안 마련의 참고자료로 활용한다.

제3장에서는 국내 항만의 탄소 배출량을 전망하고 감축목표를 설정한다. 대상 품목은 컨테이너와 비컨테이너이며, 이를 처리하는 항만의 화물부두 운영사를 대상으로 유류와 전기 사용량을 조사한다. 조사된 활동자료를 바탕으로 IPCC 2006에서 제안하는 방법론을 활용하여 하역과정에서 발생하는 배출원별 탄소 배출량을 추정하고, 추정량과 품목별 처리물동량을 이용하여 품목별 원단위를 산정한다. 선박에서 배출되는 탄소는 AIS 데이터를 기반으로 추정한다. 컨테이너 선박의 경우 선행연구의 결과를 준용하며, 비컨테이너 선박은 본 연구에서 별도로 산정한다.

이를 바탕으로 항만의 탄소 배출량은 원단위와 물동량 전망치를 활용하여 전망하며, 선박의 경우 대상 항만의 평균 선형과 적당 평균 처리 화물량을 기준으로 시기별 선박 배출량을 전망한다. 또한, 국내 전체 항만을 대상으로 전수화하여 국가 온실가스 감축목표 등을 실현하기 위한 시기별 항만

분야 탄소배출 감축목표를 설정한다.

제4장에서는 국내 항만분야 탄소중립 관리체계의 개선방안을 마련한다. 이를 위하여 국내 탄소중립 관리체계, 해양수산분야 탄소중립 관리체계를 검토하고, 항만분야의 탄소중립 관리체계 마련을 위한 법체계, 절차, 이행 주체 등을 살펴본다. 이러한 일련의 분석 과정을 통하여 항만분야의 탄소중립 관리체계의 문제점과 그 원인을 분석하고 해외사례와 국내 법·제도를 종합적으로 고려하여 개선방안을 제시한다. 이를 통해 기초통계 확보 법제화, 항만분야 온실가스 감축 이행·점검체계 정비, 전담기관 역량 강화, 탄소중립 관련 기술개발 확대 등을 제시한다.

5장에서는 본 연구의 결과를 종합적으로 정리하고 항만분야 탄소중립 개선을 위한 정부의 역할과 정책을 제안한다.

2. 연구 방법

본 연구는 국내외 선행연구, 해외 선진 사례 조사, 기초자료수집, 장래 탄소 배출량 전망, 탄소배출 저감목표 설정, 항만분야 탄소중립 관리체계 마련 등을 중심으로 검토하였다. 해외사례 조사는 코로나19 확산에 따라 현지 조사가 여의치 않음을 고려하여 문헌 조사와 인터넷 조사 등으로 수행하였다.

본 연구의 핵심 주제인 항만분야 탄소 배출량 전망은 컨테이너 품목과 비컨테이너 품목 모두를 대상으로 하였다. (사)한국항만물류협회에 소속된 항만 하역사업자 338개를 대상으로 최근 10년간 장비 대수, 연료 및 전력 사용량, 엔진출력, 가동시간 등을 조사하였다. 조사기간 동안 37개 업체에서 자료를 회신하였으며, 자료의 수준을 고려하여 34개 업체에서 수집된

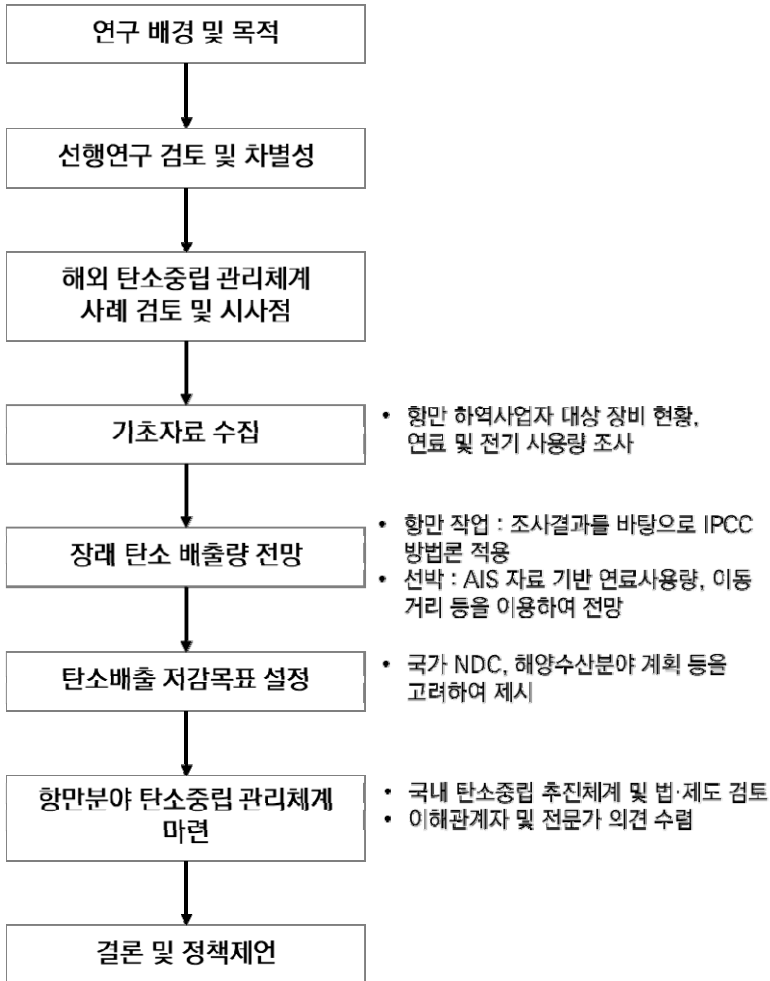
자료를 분석에 활용하였다. 전망 방법론은 국가 계획 수립 등에 활용된 IPCC 방법론을 준용하였으며, 수집한 자료의 수준을 고려하여 컨테이너 품목은 Tier 3 방식, 기타 비컨테이너 품목은 Tier 2 방식을 적용하였다. 항만분야 탄소 배출량 전망과 관련한 선행연구가 거의 없는 상황에서 본 연구에서는 가용한 자료를 수집하여 최적의 전망 결과를 도출하기 위하여 노력하였다.

또한 항만 구역 내 탄소 발생량 중 큰 비중을 차지하는 선박 기인 탄소 배출량은 AIS 자료를 활용하여 전망하였다. 다양한 선행연구에서 검증된 방법론을 준용하였으며, 선박의 주엔진 하루 연료사용량, 보조엔진 하루 연료사용량, 선박의 이동거리 등을 기반으로 탄소 배출량을 추정하는 방법론을 사용하였다. 다만, 비컨테이너는 품목 구분이 어려워 벌크와 유류 품목으로 나누어 전망하였다.

그리고 「2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안」, 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」 등의 국가 계획을 고려하여 시기별 저감목표를 제시하였다. 다만, 배출원별 저감방안 마련은 본 연구의 범위를 넘어서는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 항만분야 2050 탄소중립을 실현하기 위한 직접·간접배출량에 대한 시기별 저감목표를 제시하였다.

본 연구의 핵심이라 할 수 있는 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 마련을 위하여 국내·외 항만분야 탄소중립 정책, 추진 사례 등을 살펴보았으며, 국내 타 분야의 탄소중립 추진체계와 법·제도를 면밀하게 검토하였다. 분석 결과를 바탕으로 탄소중립 제도를 시행하는 국가 기관 관계자, 항만공사 및 민간 운영사 등 현장 전문가, 국가 기본계획을 수립하는 학계 전문가 등 다양한 전문가의 의견을 수렴하였다. 전문가 의견은 코로나19 상황을 고려하여 비대면 회의, 유선 인터뷰 등을 통해 수렴하였다. 본 연구 수행의 전체적인 흐름은 <그림 1-1>과 같다.

〈그림 1-1〉 본 연구의 흐름도



자료: 저자 작성

제3절 선행연구와 본 연구의 차별성 검토

1. 선행연구

1) 항만분야 탄소중립 관리체계 관련 선행연구

탄소중립 관리체계에 대한 연구를 살펴보면, 과거 선행연구에서는 탄소중립이라는 용어보다 친환경, 대기오염물질, 온실가스 등의 관리를 위한 방안으로 관리체계 구축을 제시하고 있다. 대표적인 연구를 살펴보면 김호석(2010)은 국가 차원에서 온실가스 배출정보를 작성하고 관리체계 개선방안을 제시하였는데, 대표적으로 인벤토리 작성 정례화 및 제도화, 관련 부처의 권한과 역할 명시, 국가 고유 배출개수 개발 강화 등이 필요하다고 언급하고 있다. 항만과 유사한 운송부분인 항공부분에서도 이주형(2019)은 관리체계에 있어 통계자료 구축의 중요성을 강조하면서 배출량 산정과 통계방법의 체계적 관리를 위해 항공통계관리시스템 구축과 운영, 이를 위한 전담부서 신설 등을 제안하였다. 많은 연구에서 탄소배출 관리 필요성과 관리체계 마련을 공통적인 대안으로 제시하고 있으며, 그 중 배출량 산정이 중요한 근간이 되고 있음을 알 수 있다. 이는 본 연구에서도 배출량 산정에 대한 관리체계 마련이 검토되어야 함을 시사한다.

한편 항만분야에서도 항만의 친환경 정책을 실현하기 위한 수단, 항만 및 해당 지역의 탄소 저감방안 마련, 친환경 항만정책 수립을 위한 방안으로 관리체계 필요성을 제시하였다. 즉 항만분야에서도 지속가능한 항만, 친환경 항만 실현을 위해 기후변화, 온실가스 저감을 위한 관리체계 수립, 관련 로드맵 작성 등의 필요성을 제시하였다. 조진행(2019)은 범정부 차원의 기후변화대응 관리체제로써 유관기관의 유기적 협력과 법제정 완비가 필요하고, 안용성 외(2019)는 관리체계 개선방안으로 일원화된 정책 마련, 부

처 간 관리 업무 명확화, 예산확보, 배출원별 기초자료 수집정보관리체계 구축이 필요함을 제시하고 있다.

탄소중립을 위한 관리체계 구축은 비교적 최근에 등장한 개념이므로 본 연구에서 다루고자 하는 항만의 탄소중립 실현을 위한 관리체계 관련 연구는 부족하다. 그러나 앞서 언급한 친환경 실현, 대기오염물질 저감 등을 위한 연구에서 제시하고 있는 것과 그 필요성, 내용은 유사하다고 할 수 있다. 최근에는 수자원, 정유산업 등 다양한 산업 분야에서 탄소중립 이행 필요성을 제시하는 연구가 진행되고 있으며, 이상엽 외(2022a), 이준서(2021)와 같이 탄소중립 실현을 위한 전략 및 활성화 방안, 이행체계 강화 등을 제시하는 연구도 진행되었다. 여기에서도 탄소중립 이행을 위한 제도적 기반 강화를 위해 에너지 관리체계 마련과 배출량 측정 및 분석 등이 체계적으로 이루어져야 함을 언급하고 있다.

특히, 과거와는 달리 탄소중립 실현을 위한 에너지 관리의 중요성을 강조하고 있다(박기선(2021), 이준서(2021)). 항만분야의 관리체계는 과거 선박, 하역장비에만 국한되어 있었으나, 최근에는 항만의 에너지 관리 필요성과 그 중요성도 점차 높아지고 있으며, 많은 선행연구에서도 이러한 주장을 찾아볼 수 있다. Sifakis & Tsoutsos(2021)는 항만은 그 기능과 역할을 위해 높은 에너지 수요가 발생하므로 항만의 에너지 관리가 중요하다는 점을 강조하였다. 그러나 항만의 에너지 관리 전략 및 기술이 충분히 활용되지 못하고 있는 점을 지적하였다. Iris et al.(2019) 또한 항만에서 에너지관리시스템 구축 필요성을 강조하였고, 특히 항만 에너지 분배 계획 설계를 통한 효율성 제고가 필요함을 주장하였다. Acciaro et al.(2014)는 항만의 에너지 관리 필요성을 언급하면서, 그 방안으로 항만-도시와의 연계를 통한 에너지 관리 전략 수립을 제시하였다. Bjerkan & Seter(2019)도 이와 같은 맥락으로 지속가능한 항만으로 전환하기 위한 기술과 수단을 검토하였으며, 오염물질 배출 완화를 위해 항만 계획과 정책 수립, 연료 등

의 에너지원 전환, 육해상 활동 방식 변경 등의 대안을 통해 관리체계를 마련해야 한다는 방안을 제시하기도 하였다. 이처럼 항만의 친환경 실현을 위해 다양한 방법의 관리체계 마련이 필요함을 확인할 수 있었다.

2) 탄소 배출량 전망 관련 선행연구

항만분야의 탄소 배출 관련 연구는 친환경 항만 구축과 온실가스 저감 연구에 포함되어 다루어져 왔다. 탄소 배출량 산정 방법과 인벤토리⁷⁾ 개발을 위한 연구는 항만 탄소 배출 현황과 감축 필요량에 대한 정확한 파악을 기반으로 최적의 탄소 저감 정책 수립을 수립하기 위해 활발하게 이루어졌다. 또한, IAPH, EPA, IMO 등에서는 선박과 항만분야의 대기오염물질 산출을 위한 공식적인 지침과 방법론을 개발하여 제공하고 있다. 하지만 탄소 배출량 전망의 경우, 선박은 IMO에서 전망치와 전망 방법론을 제공하고 있으나 항만의 배출원을 종합적으로 고려한 탄소 배출량 전망 관련해서는 공식적인 방법론과 연구가 미비한 상황이다.

항만의 종합적인 탄소배출 평가 관련 대표적인 지침은 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization)와 국제항만협회(IAPH: International Association of Ports and Harbors)가 공동으로 발간한 「Port Emission Toolkit」과 미국 환경보호청(EPA: Environmental Protection Agency)이 발간한 「Port Emissions Inventory Guidance」가 있다. 이 문서에서는 항만의 대기오염물질 배출 평가와 인벤토리 개발을 지원하기 위해 배출원별 대기오염물질 배출량 산정 방법과 배출계수, 사례 등을 제공한다. 선박 배출량 산정의 경우, IMO의 방법론과 EEA의 배출계수 등을 주로 준용하며, 국내의 「온실가스 배출권거래제의 배출량 보고 및 인증에 관한 지침」에서도 Tier 1, 2, 3 방법의 연료사용량 기반 탄소

7) 인벤토리는 사업장별, 공정별, 시간별로 탄소 배출원을 목록화하고 배출량을 통계화하는 것을 의미함.

배출량 산정 방법과 배출계수를 제공한다. 또한, 국립환경과학원의 「국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(IV)」에서는 여객, 화물, 어선, 레저 선박으로 선박 배출량을 구분하였으며, 화물선의 경우 정박, 접안, 운항 시의 연료소비량을 계산하여 EPA의 배출계수를 적용해 대기오염물질 배출량을 계산한다.

대부분의 선행연구에서도 이러한 공식적인 지침상의 배출원 분류와 방법론, 배출계수 등을 준용하여 배출량을 산정한다. 항만 기인 탄소 배출원은 주로 선박(외항선과 하버크래프트로 구분), 하역장비 및 시설, 트럭 등 육상 차량, 화물기관차, 기타 건물 등으로 구분하며, 대부분의 연구에서는 선박의 탄소 배출량이 가장 많은 것으로 분석된 바 있다(Muhammad, Muhammad & Simon, 2020; Lin Zhang, 2021; Yun et al, 2018). 탄소 배출량의 산출은 항만 배출원별로 연식, 엔진 출력, 부하율, 가동 시간 등의 배출원별 특징을 고려하여 연료 또는 전기 사용량을 추정하고 탄소 배출계수를 적용하여 산정한다. 특히 선박의 경우, 선박 AIS 데이터와 선박 제원 자료를 활용하여 입출항 선박의 엔진 제원, 운항 모드, 운항 시간 등으로 보다 정확한 탄소 배출량을 산정할 수 있다(해양수산부, 2018; Simon K.W.Ng et al., 2013; 강무홍 외, 2020).

이와 같이 산출한 항만의 탄소 배출량을 통해 배출원단위를 산정하고, 이를 바탕으로 국내 모든 항만의 탄소 배출량을 추정하는 연구도 수행하였다. 국토해양부(2008)는 저탄소 항만 구축방안 연구를 위해 국내 모든 항만의 탄소 배출량을 산정하고자 하였으며, 연료와 전기 배출계수를 이용하여 배출원별 연료 및 전기 사용량을 추정하여 배출량을 산정하였다. 또한, 부두별 기능별 비율을 고려하여 화물별 보정계수를 산출하였다. 부산광역시(2010)는 부산항 온실가스 감축 방안 검토를 위해 항만의 온실가스 배출원을 선박, 항만시설 및 장비, 화물 운송(트럭, 열차)으로 구분하여 배출량을 산정하였다. 선박은 운항시와 비운항시의 연료 소비량을 추정하고

IPCC 가이드라인 상의 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하였으며, 항만 시설 및 장비는 전력소비량과 유류사용량, 화물 트럭은 주행거리, 화물열차는 연료사용량에 배출계수를 적용하여 산정하였다. 해양수산부(2018)도 이와 유사하게 부산항과 인천항을 대상으로 선박 엔진 종류, 엔진 출력, 시간, 운전모드 등을 고려한 연료소비량에 배출계수를 적용하여 선박 배출량을 산정하고, 화물 장비, 항만 시설, 차량 등의 연료 및 전력 사용량, 주행거리 등을 이용해 배출량을 산정하였다. 또한, 노영훈·장영태(2015)는 인천항의 항만하역장비 현황을 조사하고 EPA의 NONROAD 모델의 항만 대기오염물질 배출량 산정방법에 근거하여 장비별, 부두별로 NO_x와 CO₂ 배출량을 산정하였다.

국외 연구에서도 특정 항만의 탄소 배출량 산정을 위한 연구가 수행되었다. Geerlings & Duin(2011)은 로테르담항의 델타 터미널과 RST의 실제 터미널 장비별 에너지 소비량 및 거리 변수 등을 이용해 탄소 배출량을 산정하였다. Yang & Lin(2013)은 가오슝 항만의 26개 컨테이너 터미널 운영사 내부자료와 2010년에 조사된 실사 자료 근간의 원단위와 배출계수를 이용하여 장비별 에너지 소비량과 CO₂ 배출량을 평가하였다. Muhammad, Muhammad & Simon(2020)은 인도네시아 벨라완 터미널의 탄소 배출량 계산을 위해 1년간의 port performance data를 수집하여 IPCC 배출계수와 인도네시아 발전소 배출계수를 적용하여 탄소 배출량을 산정하였다. Misra et al.(2017)은 항내 선박, 장비, 건물 등의 연료 및 전력사용량 자료를 이용해 IPCC와 WPCI 지침에 따라 인도 첸나이항의 2014, 2015년 탄소 배출량을 산정하였다.

한편, 탄소 배출량 전망은 BAU를 전망하고 탄소 배출 저감을 위한 전략 이행 시와 비교하여 감축 목표와 감축 필요량을 설정하는 데 필수적이다. 하지만 이러한 중요성에 비해 항만 기인 탄소 배출량을 전망하는 연구는 미비한 편이며, 공식화된 방법론이 없고 항만 탄소 배출량 산정 관련 지침

등에서도 전망 시 고려해야 하는 사항을 제시하는데 그치고 있다.

선행연구에서는 주로 과거 연료 및 전력 사용량과 물동량 예측치 등을 이용하여 회귀분석, 시계열 분석 등을 통해 항만의 탄소 배출량을 전망하였다. 국토해양부(2008)는 물동량 예측자료를 바탕으로 CO₂ 배출량을 추정했으며, 우리나라 전체 이산화탄소 배출량 저감목표와 동일하게 배출 저감목표를 수립하였다⁸⁾. 부산광역시(2010)는 선박, 항만시설 및 장비의 탄소 배출량 전망을 위해 물동량 예측치를 독립변수로 하는 회귀식을 사용하였으며, 트럭은 교통수요모형과 차량-주행거리 증가율을 적용, 열차는 수요 전망치를 이용하여 전망하였다. Ee, Chan & Kang(2021)은 말레이시아의 항만 부문 탄소 배출량을 예측하고 국가 정책 탄소 저감목표와 비교하고자 하였다. 현재 말레이시아 항만에서 실질적으로 추진되고 있는 친환경 정책을 LED 교체, 갠트리 크레인 및 프라임 무버 전기화로 설정하고, 과거 전력소비량 및 연료 소비량을 바탕으로 ARIMA 분석을 진행하여 2030년까지의 탄소 배출량을 예측하였다. Petzer(2020)은 호주의 ISCA Base Case approach 절차⁹⁾에 기반하여 항만분야의 에너지 사용량 및 탄소 배출량 장기 예측 모델을 개발하고 호주 프리맨틀항에 적용하여 에너지 소비량과 탄소 배출량을 예측하였다. 예측 모델은 선형 및 비선형 회귀 분석, 곡선 피팅(curve-fitting)을 통해 개발되었다. Sim(2018)은 부산항 컨테이너터미널의 2030년까지 탄소배출 저감목표 달성 및 감축량 제시를 위해 시스템다이내믹스를 이용한 탄소 배출량 산정 모델을 개발하였다. 컨테이너 터미널의 총 탄소 배출량은 선박 운항, 선박 접안, 컨테이너 하역, 컨테이너 운반, 컨테이너 이송 5개 과정의 탄소 배출량을 산정하여 합산한 양이며, 2030년까지 연평균 약 1억 8백만kg의 이산화탄소를 배출할 것으

8) 1990년 대비 2017년까지 8% 감축목표를 설정함.

9) ISCA(Infrastructure Sustainability Council of Australia)는 호주, 뉴질랜드 내 인프라시설의 지속 가능성에 대한 평가 체계 및 지침을 제공하는 기관으로, 특정 자산의 에너지, 탄소, 물, 재료 관련 지속가능성을 평가하고 예측할 수 있는 전략(Base Case Approach)을 개발하였다.

로 계산하였다.

선박 탄소 배출량 전망의 경우, IMO에서 개발한 방법론이 대표적이다. IMO(2021)에서는 2050까지의 선박 CO₂ 배출량 전망과 함께 GDP, 선박 크기 증가율, 화물 증가율 등을 반영하여 전망 방법론을 제공한다. 또한 선박 연료 소모 관련 기술진보 추이를 고려하여, 컨테이너선 기술진보계수를 개발하고 2050년까지의 컨테이너선 탄소 배출량을 전망한 연구도 수행되었다(최건우 외, 2021).

〈표 1-1〉 IMO의 해운 CO₂ 배출량 전망 방법 6단계

Step	내용
1	• 운송활동 전망 - 비에너지 화물(non-energy products : 단위 화물, 케미컬, 석탄을 제외한 드라이 벌크 화물 등) • 해운과 관련 경제 지표(세계 또는 국가 GDP, 인구 등) 간의 관계성 설정 • GDP, 인구 등의 장기 예측을 기반으로 운송량 전망
2	• 운송활동 전망 - 에너지 화물(energy products : 석탄, 유조선, 가스 운반선 등) • 에너지 소비의 발전 관련 IPCC의 공식 전망치 수집 • 에너지 소비 예측 변동을 고려하여 운송량 전망
3	• 기준연도인 2018년의 선대와 활동에 대한 상세 자료수집 • 선박 카테고리별로 운송량을 할당하고, 카테고리별 평균 배출량 산정
4	• 문헌 검토, 이해관계자 회의 등을 통해 장래 선대 구성 전망
5	• 한계저감비용 곡선(MACC)을 활용하여 규제 개발 및 시장 주도의 효율성 변수 등을 고려하여 선박 미래 에너지 효율 예측
6	• 3~5 결과를 취합하여 해운 배출량 전망

자료 : IMO(2021), p.217.

3) 선행연구 종합

선행연구 분석 결과, 탄소중립항만 실현을 위한 관리체계 마련에 우선시해야 할 것은 탄소 배출량 전망이다. 선행연구를 살펴보면 특히, 2000년대

들어 선박의 탄소 배출량 추정과 관련한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 이는 장기간에 걸쳐 축적된 유류 사용량, 엔진과 선박 제원 등 기초통계자료와 AIS 데이터 등 신뢰도 높은 자료가 방대하게 축적되어 있기 때문이다. 그러나 여전히 유류사용량을 이용한 연구가 대부분이며, 특히 국내에서 진행된 배출량 산정 연구는 tier 3 방식을 적용하되 하역장비관련 엔진출력과 배출계수가 부재로 해외 선행연구 자료를 활용하고 있으며, 이 역시 단연도 특정항만에 국한되어 있다. 또한 국가마다 항만의 운영특성, 에너지 생산특성이 달라 선행연구에서 제시된 배출계수를 적용하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서 제시할 관리체계 마련을 위해 배출량 산정을 위한 자료수집, 산정방식 표준화, 배출계수 개발 등이 필요함을 시사한다.

선행연구에서 탄소 배출량 전망에 활용된 방법론은 원단위법, 회귀모형, 시계열 모형, 시스템다이내믹스 등이다. 주로 전통적인 방법론을 활용하는 이유는 연속적이고 신뢰성 있는 기초 데이터, 즉 배출원별 활동자료의 부재에 기인하는 것으로 판단한다. 또한, 탄소배출의 규모를 결정하는 독립변수로 활용 가능한 자료가 매우 한정적이다. 예를 들어, 장래 선박의 탄소 배출량 전망을 위해서는 연료 소비량을 전망해야 한다. 따라서, 다양한 배출원에 대한 전망을 위해 다수의 독립변수를 설정하고, 독립변수에 대한 전망이 수반되어야 한다. 이러한 항만의 다양한 배출원의 활동을 대변할 수 있는 자료는 물동량이다. 이에 본 연구에서는 항만 내의 다양한 배출원에 대한 최신의 유류, 전기 사용량 자료를 바탕으로 한 원단위를 개발하고, 장래 항만물동량 전망치를 활용하여 탄소 배출량을 전망하고자 한다.

한편 관리체계에 대한 선행연구 검토 결과에서도 탄소중립 이행을 위한 관리체계 마련 필요성을 강조하고 있다. 구체적으로는 관련 법제도 제정 및 개선, 전담조직 마련, 배출량산정 및 관리 체계, 에너지 관리 체계 마련 등의 형태로 제시되었다. 이러한 방안은 본 연구에서 다루어질 항만의 탄소중립 관리체계 마련을 위해서도 그 필요성과 도입방안에 대해 검토되어

야 할 것으로 판단된다. 즉, 항만의 탄소중립 실현을 위한 법제도, 각 부처의 역할, 이행체계 등을 살펴볼 필요가 있다.

2. 본 연구의 차별성

선행연구 검토를 바탕으로 본 연구의 차별성을 네 가지로 정리하였다.

첫째, 대부분의 항만분야 탄소 배출량 추정 및 전망 관련 선행연구는 단연도, 하나 또는 일부 항만의 배출량 산정에 그치고 있으며, 이를 기준으로 원단위를 제시하고 있다. 본 연구는 과거 10년의 항만 실제 데이터를 직접 수집하여 그에 대한 물동량을 기반으로 배출량 원단위를 산정하고 전망하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 대기오염물질 중 하나인 탄소 배출량 산정에서는 유류기반의 장비, 선박의 배출량만을 고려하고 있으나, 탄소중립이라는 개념을 적용하기 위해서는 유류뿐 아니라 다양한 배출원 특히 전력을 통한 이산화탄소의 간접배출량도 고려해야 한다. 본 연구에서는 항만의 전기 사용량 자료수집을 통한 배출량 산정도 수행할 계획이며, 이는 과거 국내 선행연구에서는 진행된 바가 없기 때문에 큰 차별성이 될 수 있다.

둘째, 항만분야 탄소 배출량 추정과 관련한 대부분 선행연구는 항만 대기오염 물질 중 하나로 탄소 배출 저감을 강조하고, 최근 일부 항만분야 탄소중립과 관련한 연구에서는 장래 배출량 전망 결과에 근거한 관리체계 마련보다는 유류장비 교체, 에너지 관리 필요성 등을 방안으로 제시하는데 그치고 있다. 물론 전력 에너지 효율화 등 에너지 관리는 매우 중요한 실천 분야이다. 하지만, 2050년까지 항만분야 탄소중립을 실현하기 위해 정부가 이행해야 할 큰 틀의 관리체계를 마련하는 것이 더 시급하다. 이러한 관점에서 본 연구가 국내 항만분야 탄소중립 관리체계의 마련과 효과적 이행을 위한 첫 번째 정책연구라 생각된다.

셋째, 항만분야의 탄소중립 실현을 위한 종합적 관점의 연구이다. 기존 선행연구에서는 탄소를 대기오염물질 중 하나로써 배출 저감 필요성을 제시하는데 그치고 장기적인 대안을 제시하지 못하였다. 연구 대상과 범위 또한 포괄적이지 못하고, 일부 공간과 일부 시기만을 대상으로 제한적으로 수행되었고 수행 내용과 범위 내에서 대안을 제시하였다. 그러나 본 연구는 비록 가용한 자료의 수준이 제한적이긴 하지만, 실제 유류 및 전기소비량을 기초로 장래 탄소 배출량을 전망하였고, 이를 바탕으로 시기별 저감 목표를 설정하였다. 연구의 범위상 배출원별 세부 저감방안을 제시하지는 못하였으나, 개략적인 대안을 제시하였다. 또한, 항만분야 탄소중립 실현을 위한 현 관리체계의 문제점을 파악하고 이를 효과적으로 이행할 수 있는 방향성과 제도적 개선방안 등을 제안하였다.

넷째, 국가 정책을 추진함에 따른 매우 시의적절한 정책연구라는 점이다. 2050 탄소중립 로드맵, 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵이 제시되었음에도 불구하고 항만분야의 탄소중립 실현을 위한 구체적 방안은 현재까지 없는 실정이며, 이를 위한 정부의 정책이 요구되고 있다. 이러한 이유로 항만분야에 대한 관리체계는 다른 분야 대비하여 매우 미흡한 수준이며 실제 이행을 위한 구체적 방안 역시 부족하다. 이러한 문제의 근본적인 원인은 기초자료의 부족, 법·제도적 미비, 관심 부족 등이다. 본 연구에서는 실질적인 2050 항만분야 탄소중립 실현을 위한 구체적 이행방안을 제시한다는 점에서 큰 의의가 있다.

〈표 1-2〉 선행연구와의 차별성

구분	주요 선행연구		본 연구
	요약	문헌	
목표	• 대부분의 해외 선행연구는 선박 또는 항만장비의 탄소 배출량을 산정하고, 이를 통한 배출량 저감방안을 제시하는 것을 목표 • 국내연구 또한 다수가 탄소 배출량 산정 및 저감으로 발생하는 효과 분석을 연구목표로 하고 있음 • 또한 배출량 산정을 통해 대기질 개선 등의 효과를 제시하고 친환경 항만 구축을 위한 정책연구가 주를 이룸 • 과거에는 친환경항만구축을 위한 정책수단으로 탄소 배출량 감축에 대한 언급이 있었으나, 최근에는 실제 데이터를 통한 배출량 측정을 목표로 하는 연구가 수행됨	• 김호석(2010) • 이주형(2019) • 안용성 외(2019) • 이준서(2021) • 이상엽 외(2022a) • Iris & Lam(2019) • Simon et al(2013) • Muhammad, Muhammad & Simon(2020) • Acciaro, Ghiara & Cusano(2014) • 해양수산부(2018) • 국토해양부(2008)	• 탄소 배출량 원단위 최신회, 탄소 배출량 전망과 저감목표치를 정량적으로 제시(최초시도) • 정량적 데이터를 제시하여 탄소중립항만 정책방향 제시에 신뢰성 향상 가능 • 감축 목표치를 바탕으로 실현가능한 탄소중립 항만 관리체계 마련을 연구목표로 함 • 최근 대두되고 있는 탄소중립 항만 실현을 목표로 하는 연구는 현재 부재한 상황
대상	• 특정 항만을 대상으로 탄소 배출량 분석 연구가 수행되었으며, 대체로 탄소 배출량 저감 및 정책 개선방안을 제시하는 연구가 대다수 • 연구 대상을 선박으로 한정하여 선박의 연료소비량 전망에 기반한 탄소 배출량 추정 연구가 다수 수행되었으며, 이는 자료확보의 용이성 때문임	• Simon et al(2013) • Muhammad, Muhammad & Simon(2020) • 조진행(2019) • 강무홍 외(2020) • 부산광역시(2010) • 윤종상·한세현·정용원(2009) • 국토해양부(2008)	• 국내 주요 무역항을 분석 범위로 한정 • 선행연구와 달리 항만의 장비, 항계 내 선박을 포함하여 포괄적 범위에서 항만 내 탄소 배출원에 대한 배출량 전망

구분	주요 선행연구		본 연구
	요약	문헌	
범위	• 컨테이너터미널의 시설 및 운송장비 대수, 레이아웃 형태 등을 통해 탄소 배출량을 측정하고 이를 바탕으로 탄소 저감 필요성을 제시 • 특정 장비 또는 선박, 항만 내 활동으로 범위를 한정하여 배출량을 산정 • 그 외 에너지 소비량 측정 또는 에너지 절감 효과에 대해 국내 외 연구가 진행	• Harry & Ron(2011) • Yang & Lin(2013) • 강무홍 외(2020) • 부산광역시(2010) • 국토해양부(2008) • 노영훈·장영태(2015) • 박기선(2021)	• 주요국의 항만 탄소중립 정책 및 이행 체계 관련 사례 조사를 통해 국내 적용 가능한 정책 검토 • 특히 선행연구의 한계점인 탄소 배출량 산정에 그치는 것이 아니라 배출량 전망과 감축 목표치 제시하여 정부 정책인 탄소중립 항만 구축 실현 가능성을 높일 수 있음
방법	• 배출량 산정 연구는 주로 항만 내 장비, 시설 등 수집이 가능한 데이터를 바탕으로 산출하였으며, 선박의 경우 AIS의 선박자료를 활용함. 일부 연구는 문헌을 통해 획득한 자료를 이용하여 분석함 • 원단위를 활용하여 에너지 소비량 측정하거나, 시뮬레이션, 시나리오분석, 회귀분석 등의 방법을 활용하는 연구가 다수임 • 정책마련을 위한 연구 대부분은 문헌조사, 인터뷰 등의 정성적인 방법론을 활용하여 제도개선, 친환경 항만구축, 에너지사용 저감 조치 방안 등을 제시함 • 배출량 분석 관련해서는 실제 데이터를 기반으로 시계열 자료 분석, 회귀분석 등의 방법을 활용함	• Harry & Ron(2011) • Yang & Lin(2013) • Iris & Lam(2019) • Acciario, Ghiara & Cusano(2014) • Bjerkan & Setera(2019) • Sifakis & Tsoutsos(2021) • 부산광역시(2010) • 해양수산부(2018) • 국립환경과학원(2019a) • 안용성 외(2019) • 조진행(2019) • 강무홍 외(2020) • 윤종상·한세현·정용원(2009)	• 항만분야 탄소 배출량 전망을 위해 항만의 최신 장비 현황을 파악하고, AIS 자료를 활용하여 선박 기인 배출량을 산정 • 원단위 최신화 및 항만 탄소 배출량 전망 • 해외 선진사례를 조사하여 배출량 감축 목표치 설정과 탄소저감방안, 관리체계 구축 시사점 도출

자료: 저자 작성

02

해외 항만의 탄소중립 관리체계

본 장에서는 본 연구의 목표 달성을 위하여 해외 주요 선진항만에서는 탄소중립 관리체계가 마련되어 있는지를 조사하고, 관리체계의 조직구성, 절차, 이행 주체 등을 살펴본다. 또한, 해외 항만에서 탄소중립 실현을 위해 추진하고 있는 다양한 이행방안을 살펴본다. 이러한 사례 분석을 통하여 우리나라 항만의 탄소중립 관리체계 개선방안에 참고할 수 있는 시사점을 도출하고자 한다.

제1절 해외 항만의 탄소중립 관리체계

1. 미국

미국의 탄소중립 정책은 EPA를 중심으로 추진되고 있으며, EPA는 온실가스 보고 프로그램(GHGRP)을 운영하고 있다. GHGRP는 연방 규정 40 CFR Part 98에서 규정하며, 해당 규정에 따라 매년 25,000톤의 CO₂를 배출하는 시설, 공급하는 제품이 연소되거나 산화되는 경우 25,000톤 이

상의 이산화탄소를 배출하는 시설, 그리고 25,000톤 이상의 CO₂를 지중 저장하는 시설은 온실가스 배출 관련 연간보고서를 제출해야 한다. 매년 약 7,600개의 시설이 이에 해당되며, 해당 시설들의 배출량은 약 30억 톤으로, 미국 전체 온실가스 배출량의 약 50%를 차지한다. 또한, 별도로 주 정부와 부족 차원에서 온실가스 데이터를 제출하도록 하여 관리한다. 이는 GHGRP로 구축한 인벤토리와 일부 상이할 수 있으나 EPA의 통합 데이터 관리 및 예측 도구 개발, 정확한 배출량 평가가 어려운 부문에 대한 파악과 정책 관련 연구 및 도입을 위한 자료를 제공하기 위해 매년 취합하고 있다. 이러한 연방 정부 차원의 제도 하에 주정부 차원에서도 온실가스 배출량 의무 보고에 대한 규정을 마련하여 운영하고 있다. 특히 캘리포니아주의 경우 2022년 1월 통과된 「기후 기업 책임법(Climate Corporate Accountability Act)」에 따라 연매출 10억 달러 이상의 기업은 모든 범위의 온실가스 배출량을 캘리포니아주 국무장관실에 보고해야 한다.¹⁰⁾

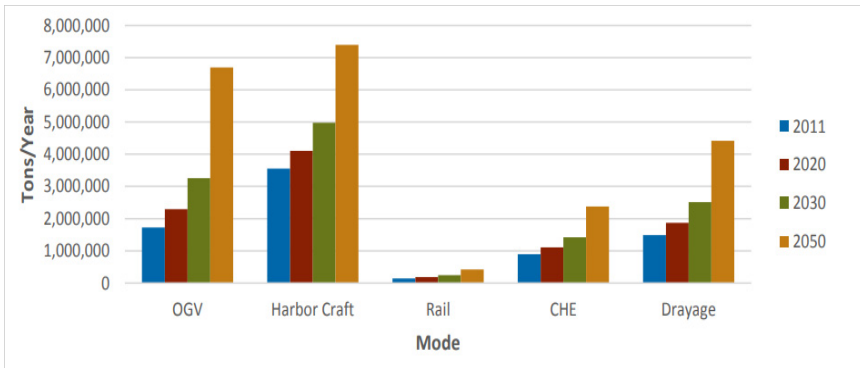
미국은 선박부문의 온실가스 인벤토리를 구축하고 온실가스 배출량을 산정하고 있으나, 항만부문의 온실가스 배출량은 별도로 산정하지 않는다. 다만, EPA는 항만 이해관계자들의 효과적인 탄소중립 정책 수립 및 이행 지원을 위해 지침과 가이드라인 등을 제공한다. 특히 기술적인 지원 차원에서는 「항만과 화물 이동에 따른 배출 인벤토리」, 「국가 항만 전략 평가」, 「육상 전력 기술」 등의 지침과 최신 자료를 발표하고, 부문별 효과적인 제도 사례와 종합적인 항만별 청정 대기 활동자료를 제공한다.¹¹⁾ 국가 항만 전략 평가는 미국 항만 전체 배출량을 추정 및 전망하고, 항만 배출 감소를 위한 정책 평가를 통한 효과 분석 결과를 제공하여 항만별 배출 감축 정책 수립을 지원한다.

10) EPA(검색일: 2022.08.10.)

11) EPA(검색일: 2022.6.15.)

EPA에서는 2016년 「국가 항만 전략 평가」에서 미국 항만의 배출원을 외항선박(OGV: Ocean-Going Vessel), 공공목적 선박(Harbor Craft), 철도(Rail), 하역장비(CHE: Cargo Handling Equipment), 트럭운송(Drayage) 등 총 4개로 구분하여 2050년까지 배출원별 CO₂ 배출량을 BAU 기준으로 전망하였다.

〈그림 2-1〉 미국 항만 배출원별 전체 CO₂ 배출량 BAU 전망(국가 항만 전력 평가)



자료: EPA(2016), p.38.

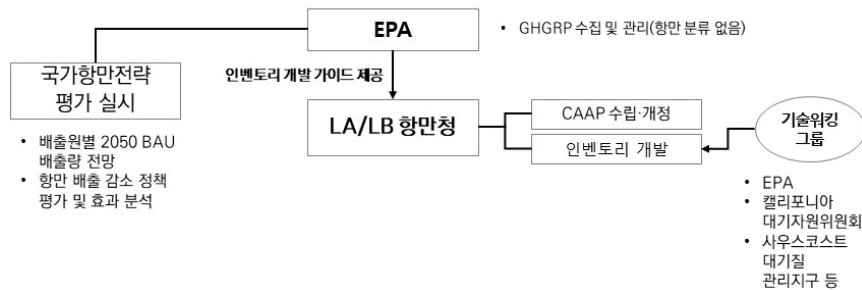
또한, EPA에서는 법·제도적으로 항만의 온실가스 인벤토리 구축이 강제화되지 않았음에도 불구하고 항만의 온실가스 인벤토리 구축 지침을 제시하고 있다. 동 지침에서는 정부, 항만당국 및 이해관계자들이 규제 준수, 연구목적 등으로 인벤토리를 마련할 수 있도록 방법론을 제공한다.

앞서 설명한 것처럼, 미국에서도 항만부문의 온실가스 인벤토리 구축은 법적 강제사항이 아니다. 하지만, 일부 항만당국에서는 인벤토리 구축의 필요성과 중요성을 인식하고, 직접 자료를 수집하여 인벤토리를 구축하고 갱신하고 있다. 대표적인 사례가 LA/LB항이다. LA/LB항에서는 CAAP 계획에 따라서 2005년부터 온실가스 인벤토리를 매년 구축하고 있으며, 인벤토리 갱신을 위한 서면 조사 등으로 터미널별 월별 장비별 활동자료를 수

집하고 있다. 조사 자료 항목은 장비 종류, 장비 식별 번호, 장비 제조사 및 모델, 엔진 제조사 및 모델, 정격 마력(또는 킬로와트), 장비 및 엔진 연식, 사용 연료 유형(ULSD, 가솔린 또는 프로판), 전기 장비, 연간 운영시간, 배기가스 저감 기술 탑재, 장비 구입 및 폐기 현황 등이다.

조사된 활동자료를 활용하여 인벤토리를 갱신하며, 갱신 결과와 방법론 보고서는 기술 워킹 그룹 (TWG: Technical Working Group)과 협력하여 발표한다. 기술워킹그룹은 EPA, 캘리포니아 대기자원위원회(CARB: California Air Resources Board), 사우스코스트 대기질 관리지구(SCAQMD: South Coast Air Quality Management District) 등의 항만 대기 규제 기관의 대표자로 구성된다.¹²⁾

〈그림 2-2〉 미국 항만의 탄소중립 관리체계의 도식화



자료: 저자 작성

12) THE PORT OF LOS ANGELES & Port of LONG BEACH(2021), p.1.

2. 일본

일본은 최근 기후변화에 대응하기 위해 법과 제도를 정비하고 있다. 일본의 탄소중립항만(CNP: Carbon Neutral Port) 구축은 이러한 기후변화 대응의 기조 속에서 항만의 탄소중립 실현을 위한 관리체계와 이행방안을 마련하도록 하는 기본계획 성격이다.

구체적으로 살펴보면, CNP 구축은 “경제재정 운영과 개혁의 기본방침 2021”, 「지구온난화 대책의 추진에 관한 법률」에 의거한 “지구온난화 대책 계획”, 「에너지정책기본법」에 따른 “에너지기본계획”에서 계획되었다. CNP 구축을 위해 제작된 국토교통성 항만국의 매뉴얼을 기반으로 국제 전략 항만, 국제 거점 항만 및 중요 항만은 CNP 구축계획을 필수로 수립해야 하며, 지방 항만에게는 권장 사항이다¹³⁾.

CNP 구축 매뉴얼은 CNP 구축계획 수립 절차, 탄소중립을 위한 항만시설의 규모와 배치 등의 검토 방법, 계획 수립 후 관리 방안 등의 내용을 포함한다. 또한 항만별 CNP 구축계획 수립을 위한 상세한 가이드라인을 제시하여 항만별로 일관성 있게 계획을 수립할 수 있도록 한다. CNP 구축 계획에 포함되어야 하는 사항은 <표 2-1>과 같으며, 온실가스 배출량 및 감축목표와 감축 계획도 수립하도록 되어있다. 또한 국가 전체적으로 수소, 암모니아 등 친환경 에너지 전환과 활용을 적극적으로 도모하고 있으므로, 항만 CNP에도 이를 반영하는 내용이 포함되어야 한다.

13)カーボンニュートラルポート (CNP) の形成に向けた検討会(2021), p. 2.

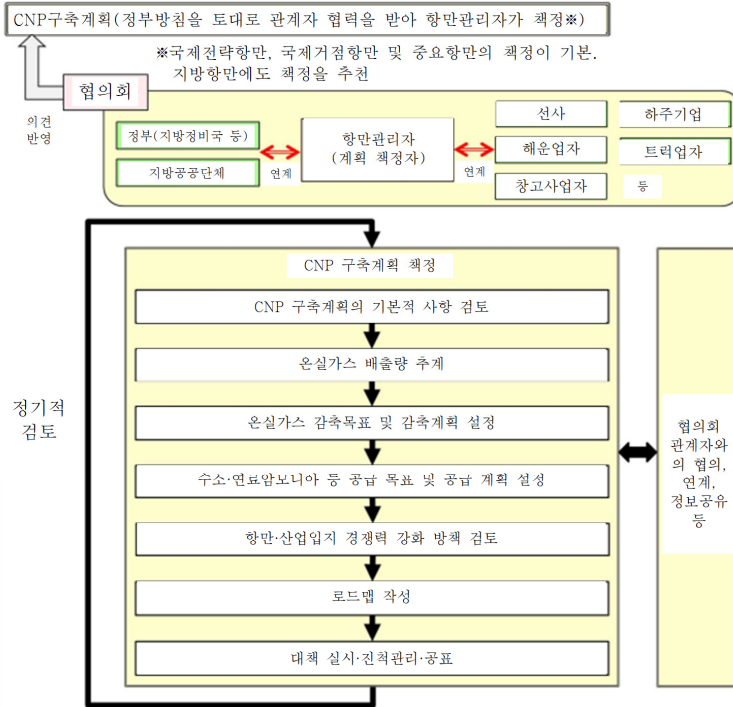
〈표 2-1〉 CNP 구축계획에 기재하는 사항

항목	CNP 구축계획에 기재하는 사항
대상 항만의 특징 등	• 지리적 위치, 항만의 이용 상황, 항만 구역·임항 지구 및 주변 지역의 산업 개황, 지역의 각종 계획에서의 위치 부여 등
CNP 구축계획의 기본적인 사항	• CNP 구축을 위한 방침 • 계획 기간, 목표 연차 • 대상범위 • 계획 책정 및 추진체제, 진척관리
온실가스 배출량 추계	• 온실가스 배출량 추계(계획 수립 시점·기준년(원칙적으로 2013년도 시점))
온실가스 감축 목표 및 감축 계획	• 온실가스 배출량 감축 목표 • 온실가스 감축 계획
수소·암모니아 연료 등 공급목표 및 공급계획	• 수소·암모니아 연료 등의 수요추계·공급목표 • 수소·암모니아 연료 등의 공급 계획 • 수소·암모니아 연료 등의 공급 등을 위해 필요한 시설 • 수소·암모니아 연료 등의 공급망 강인화에 관한 계획
항만·산업입지 경쟁력 강화를 위한 대책	• 환경면에서 항만 경쟁력 강화방안 • 산업 입지 경쟁력 강화 방안
로드맵	• 온실효과가스 저감계획, 시설정비계획 등과 관련한 로드맵
대책 실시·진척 관리·공표	• CNP 구축계획의 실시, 진척 관리, 공표의 방법

자료: 国土交通省 港湾局(2021), p.5

CNP 구축계획 수립 시, 항만관리자가 관계기관과 협의를 통해 진행하며, 항만 이용계획 변경 시 CNP 계획도 함께 변경해야 한다. 계획 수립의 방향은 지방정부 정책과 그 방향이 일치하도록 권고된다. 이에 항만별 CNP 구축계획은 항만 관리자가 정부, 지방공공단체, 해운선사, 화주, 해운선사, 트럭 운송업자, 창고 운전자 등의 항만 이해관계자 등으로 구성된 협의회를 마련하여 이해관계자들의 의견을 반영해 계획을 수립하여야 한다. 또한, 공표 이후에도 협의회를 통해 정기적으로 재검토를 진행하여 계획 이행 정도를 모니터링하고 주요 변경 사항 발생 시 계획 수정을 검토한다.

〈그림 2-3〉 CNP 구축계획 수립 절차



자료: 国土交通省 港湾局(2021), p.4.

CNP 구축계획 매뉴얼에서는 구체적인 항만 탄소 배출량 산정 방법과 원 단위를 제시한다. 탄소 배출량 조사 방법은 항만 및 인근의 에너지(연료, 전력 등)를 소비하는 사업체를 대상으로 설문조사나 청취조사를 진행하며, 조사한 에너지 사용량에 CO₂ 배출계수를 적용하여 CO₂ 배출량을 추산하고, 비에너지 유래 CO₂도 추가로 조사하여 가산한다. 조사되지 않은 사업 체에 대해서는 생산량, 물동량, 소각량 등의 활동량을 파악한 후, 단위 활 동량 당 에너지 사용 원단위를 곱하여 탄소 배출량을 추정한다. 이러한 탄 소 배출량 산정을 위해 매뉴얼에서는 배출계수, 시설별 에너지 사용 원단 위 등을 제공한다.

국토교통성은 이러한 CNP 구축을 위한 방침 제공과 함께, 항만별 CNP 구축 협의회에 참여 및 자문, 항만별 CNP 구축계획 수립을 지원하는 역할을 한다. 또한 국토교통성 외에도 경제산업성과 환경성을 CNP 구축을 위한 자금 지원 제도를 운영하고 있다. 특히, 국토교통성은 주요 항만의 국가 보조금을 통해 설치한 AMP의 고정 자산세에 대한 특례 조항을 추가하도록 항만법의 개정을 검토 중이다¹⁴⁾.

〈표 2-2〉 탄소중립항만(CNP) 구축을 위한 주요 지원 제도

구분	담당부처	지원 내용
체계 구축, 계획 수립	국토교통성	• CNP 구축을 위한 국가 기본방침 제시, CNP 구축계획 수립을 위한 매뉴얼 공표 및 주지 • 항만 관리자가 구성한 협의회에 참여 및 자문 • 항만 관리자의 CNP 구축계획 수립 예산 지원
항만 운영 탈탄소화	국토교통성	• AMP 정비 예산 지원 • 주요 국제 항만의 항만 운영사가 국가 보조금을 지원받아 설치한 AMP에 대한 고정 자산세에 대한 특례(항만법 개정 검토중) • 친환경 선박 연료 공급을 위한 민간 사업자의 LNG 벙커링 거점 구축 예산 지원 • 항만의 신기술 도입을 위해 실증을 위한 예산 지원
	환경성	• 하이브리드 트랜스퍼 크레인 등의 저탄소 하역장비 도입 예산 지원
	경제산업성	• 수소의 생산·수송·저장 및 활용 기술을 종합한 에너지 시스템의 실제 활용을 위한 조사·실증 예산 지원
흡수원 대책	국토교통성	• 항만 공사 관련 블루 카본 생태계 정비 예산 지원

자료 : 国土交通省港湾局(2022.3.3.), p.5.

14) 国土交通省港湾局(2022.3.3.), p.5.

제2절 해외 항만의 탄소중립 이행방안

미국과 일본 등은 항만의 탄소중립 관리체계가 비교적 잘 정비되어 있다. 본 절에서는 이러한 관리체계가 잘 작동할 수 있도록 하는 이행사례를 잘 살펴보고자 한다. 특히, 아직까지 항만분야의 관리체계가 없는 국가도 우리나라 항만의 탄소중립 관리체계에 적용 가능한 시사점을 도출하기 위해 조사 범위에 포함하였다.

1. 미국 항만의 탄소중립 이행방안

미국의 항만분야 탄소중립은 연방 정부 및 주정부의 규정·제도, EPA 항만 이니셔티브 등을 기반으로 추진되고 있다. 항만의 주요 배출원은 연방 정부 및 주정부 차원의 대기오염물질 배출 규제를 준수해야 한다. 하지만 항만에서 사용되는 장비나 차량 등 항만의 이동배출원에 대한 온실가스 배출 규제는 타 대기오염물질 대비 미비한 실정이다.¹⁵⁾

〈표 2-3〉 항만 관련 해양, 도로, 비도로 배출 규정

적용 대상	관련 규정	요약
비도로 디젤엔진 사용 중장비	40 CFR Part 1039, 1065, 1068	• Tier 4 배기가스 배출 표준 준수 • 초저유황 디젤연료(ULSD) 사용
기관차	40 CRF Part 1033, 1065, 1068	• 디젤기관차 배기가스 배출 규제 • 2015년 이후 제작된 엔진부터 적용 • 유희시간 단축 관련 규정
선박 디젤 엔진, 하버 크래프트	40 CRF Part 1042, 1043, 1065, 1068, 1090	• 선박용 디젤 엔진에 대한 배기가스 배출 표준 및 인증 요구 사항

15) EPA(2016), p. 8.

적용 대상	관련 규정	요약
외항선	Control of Emissions From New Marine Compression-Ignition Engines at or Above 30 Liters per Cylinder	• 실린더당 배기량 30리터 이상 신조선 디젤 엔진 황함유량을 1,000 ppm으로 규정
배출통제구역	MARPOL Annex VI Final Rule for Amendments Related to Global Marine Fuel	• 북미와 카리브 해 인근 배출통제 구역(ECA, Emission Control Areas)을 지정 • 해당 구역을 항해하는 선박은 연료 황 함유량 0.1% (1,000ppm)을 초과하는 연료를 사용 충족 필요
중장비엔진, 트럭	Control of Air Pollution From New Motor Vehicles: Heavy-Duty Engine and Vehicle Standards	• 대형 가솔린 및 디젤 엔진의 질소 산화물 배출 저감 및 온실가스 표준 설정

자료: EPA(검색일 : 2022.8.10.)를 바탕으로 저자 재작성.

또한 EPA는 배출 규제와 보조금 지원을 위한 규정을 운영한다. EPA는 2022년부터 3년동안 “Clean Truck Plan”을 통해 2027년식 대형 트럭부터 엄격한 온실가스 배출 표준 설정을 추진하고 있으며, 이에 따라 주요 항만들은 클린 트럭 프로그램을 운영하고 있다. 대표적으로 LA/LB항은 캘리포니아주의 운송 트럭 규제¹⁶⁾에 따라 클린 트럭 프로그램을 운영하며, 항만을 출입하는 모든 운송 트럭들이 이를 준수하도록 한다. LA/LB항의 클린 트럭 프로그램에 따라 모든 화물 운송 트럭은 등록부에 등록되어 있어야 하며, 인증된 운송업체(LMC: Licenced motor carrier) 등의 확인을 통해 정확한 데이터를 바탕으로 한 등록부를 유지한다.

디젤배출감축법(DERA: Diesel Emissions Reduction Act)에 따른 항만 보조금 지원 프로그램인 DERA 프로그램은 에너지 정책법에 근거하여 2005년 승인되었으며, 2020년부터 2024년까지 매년 1억 달러의 예산이 승인되었다. 에너지 정책법에 따라 DERA 예산의 70%는 EPA 또는 CARB

16) § 2027. In-Use On-Road Diesel-Fueled Heavy-Duty Drayage Trucks. 13 CA ADC § 2027, Barclays Official California Code of Regulations

가 검증·인증한 디젤 배출 감소 기술을 사용하는 프로젝트에 자금을 지원하며, 30%는 지역 차원의 디젤 배출 감소 프로젝트 지원에 사용된다. 항만 부문에는 2008년부터 총 180건, 1억 7,100만 달러의 보조금이 투입되었으며, 이러한 보조금 지원을 통해 디젤 엔진을 개조 또는 교체하여 배출량 감축, 경제 성장, 일자리 확대, 친환경 기술을 사용하는 차량 등으로 빠르게 교체될 수 있도록 한다. DERA 보조금 외에도 EPA는 항만당국과 이해관계자들이 지원받을 수 있는 보조금 제도 정보를 제공하고 있으며, 교통부의 경제 회복을 위한 교통부문 투자(TIGER)와 정체 완화 및 대기질 개선 프로그램(CMAQ), 에너지부의 청정 도시 프로그램 등이 포함된다.

EPA는 항만 대기환경 정책인 “항만 이니셔티브”를 통해 항만당국과 이해관계자들이 대기오염물질 배출 관련 규제를 준수할 수 있도록 지원하고 자발적으로 대기 관리 정책을 추진할 수 있도록 장려한다. 항만 이니셔티브는 2014년 청정대기행동자문위원회(CAAAC: Clean Air Act Advisory Committee)의 이동배출원기술검토소위원회(MSTRS: Mobile Sources Technical Review Subcommittee)가 구성한 워킹 그룹 작업을 통해 마련되었다. 워킹 그룹에는 주정부, 항만 관련 기관, 관련 업계 등 이해관계자와 전문가들이 포함되었으며, 2016년 EPA에 제출한 워킹그룹 보고서를 기반으로 현재 항만 이니셔티브를 추진하고 있다.

항만 이니셔티브는 항만의 차세대 친환경 기술과 관행을 발전시켜 각 항만들의 작업 효율성 개선, 에너지 보안 강화, 비용 절감, 유해 영향 저감을 지원하고 효과적인 인프라의 적시 개발을 위한 산업계, 지역사회와 정부 간 협력 촉진을 목표로 한다. 항만 이니셔티브는 청정 기술을 위한 자금 조달(Funding), 스마트 인프라 투자 식별을 위한 기술 지원(Technical Resources), 효과적인 계획 수립을 위한 항만 커뮤니티 협력 촉진(Collaboration), 연방정부 및 항만 운영의 효율성 증대(Coordination)와 정보 교환소 구축(Communications)을 수행한다.

각 항만들은 이러한 항만 이니셔티브를 기반으로 탄소를 포함한 대기오염물질 배출 저감 정책을 추진하고 있다. 대표적인 항만인 LA/LB항에서는 “청정대기행동계획(CAAP: Clean Air Action Plan)”을 수립하여 항만 대기오염 감축을 위한 전략을 수행하고 있다. CAAP는 2006년 수립된 미국 최초의 항만 부문 청정대기전략으로, 2017년 개정을 통해 이산화탄소를 관리대상에 포함하였다. 이를 통해 2030년까지 1990년 대비 온실가스 배출량을 40% 감축하고, 2050년까지는 80%까지 감축하는 것을 목표로 수립되었으며, 목표 달성을 위해 선박, 트럭, 기차, 화물 취급 장비, 하버 크래프트, 에너지 부문으로 구분된 세부전략을 추진하고 있다. 특히 LA/LB항에서는 항만 에너지 이용효율 향상 및 시스템 안정성 확보를 위한 항만형 마이크로그리드 시스템을 구축하고 있다. 또한 CAAP에서는 항만 이동원의 배출 저감 기술과 인프라 개발을 장려하기 위해 항만 기술 발전 프로그램(TAP: Port’s Technology Advancement Program)을 운영하여 TAP 프로그램에서는 화물 취급 장비, 하버 크래프트, 선박, 철도, 트럭 등 항만 이동원의 배출 저감을 위한 신기술 개발 및 실증을 위한 자금, 지침, 인력 등을 제공한다.¹⁷⁾

이 외에 뉴욕·뉴저지항, 오클랜드항, 시애틀항 등에서도 항만별로 탄소를 포함한 대기오염물질 배출을 감축하기 위해 청정 대기 정책을 추진하고 있다.

〈표 2-4〉 CAAP 부문별 이행전략

부문	세부전략
선박	• LA항 선박환경지수(Environmental Ship Index) 및 LB항 친환경 선박 인센티브 프로그램: 최신엔진이나 NOx 저감 기술이 적용된 선박에 인센티브 제공 • 선박 속도 저감: 항만 입항 시 선속을 12노트로 줄이는 선박에 인센티브 제공 • 육상 전력: 정박시 선박의 육상 전력 사용을 통해 배기가스 배출 감축

17) CAAP(검색일: 2022.06.15.)

부문	세부전략
트럭	• CTP(Clean Trucks Program): 2018년부터 항만운송트럭등록부(PDTR: Port Drayage Truck Registry)에 등록되는 신규 트럭은 2014년 이후 모델이어야 함
기차	• LA, LB항에서 친환경 연료로 운행하는 PHL(Pacific Harbor Line)을 이용하며, 유탄시간을 15분으로 제한
화물취급 장비	• 캘리포니아주 규정(Mobile Cargo Handling Equipment Regulation)에 따라 보조금 지원을 통해 노후 디젤장비 교체
하버 크래프트	• 하버크래프트 관련 캘리포니아주 규정(Commercial Harbour Craft Regulation)에 따른 엔진 요구사항 준수 • 미운항 시 육상 전력 사용
에너지	• LA항: 에너지 복원력, 가용성, 효율성, 신뢰성, 지속성 강화를 위한 에너지 관리 실행 계획 추진(EMAP) • LB항: 재생 에너지 기술, 자가 발전 시스템, 에너지 스토리지를 통해 비상 사태 또는 정전 시 역내 에너지 그리드에서 전력 운영을 분리할 수 있는 에너지 이니셔티브 운영

자료: CAAP(검색일: 2022.06.15.)

〈표 2-5〉 미국 항만별 청정 대기 정책

항만	추진 정책
LA/LB	• 청정대기행동계획(CAAP) • 항만형 마이크로그리드시스템 구축
뉴욕/뉴저지	• ISO 14001(환경경영시스템) 인증 • 트럭 교체 프로그램: 트럭 교체 보조금 제공, 화물 운송 트럭 등록 프로그램 운영 • 화물 취급 장비 현대화 프로그램: 신규 장비 교체 보조금 지원 • 친환경 선박 인센티브 프로그램: 선속 저감, 선박환경지수, Tier 3 엔진 등의 기준에 따라 점수 평가 및 인센티브 제공
오클랜드	• 항만 대기질 2020 및 이후 계획: 단기(~2023)·중기(2023~2030)·장기(2030~2050)별 계획 추진
시애틀	• 북서항만 청정대기전략 추진: 북서항만 얼라이언스, 타코마항, 밴쿠버항 등 북서부 항만간 협력을 통한 공동의 친환경 행동 장려

자료: CAAP; Port of Long Beach; Port of Oakland; Port of Seattle; PORT AUTHORITY NY NJ (검색일: 2022.6.15.)을 바탕으로 저자 재작성

2. 일본 항만의 탄소중립 이행방안

일본 항만의 탄소중립 관리체계와 이행방안 모두 CNP 구축계획에 담겨 있다. 이행계획 측면으로 살펴보면 CNP의 이행목표는 크게 두 가지로 볼 수 있다. 첫째는 수소, 암모니아, 바이오메스 등의 탈탄소 에너지 수입을 위한 항만 기능(시설) 정비, 둘째는 하역장비, 시설 등 항만 운영 과정에서 탈탄소를 위한 항만 기능 고도화 및 배후 산업과 연계를 통한 항만 인근 지역의 탄소 배출량 제로(zero) 실현이다.¹⁸⁾

이를 위해서는 개별 기업뿐만 아니라 항만 운영자, 배후산업단지 간의 협력, 해당 지역의 탈탄소 정책과 연계를 통한 시너지 효과가 중요하며, 이러한 CNP의 방향이 기항선사, 화주 등을 통해 긍정적인 평가를 받는 것을 목표로 한다. CNP 구축을 위해 항만 내 또는 배후지역의 다양한 영역에서 이행할 수 있으며, 대표적인 사례는 <표 2-6>에서 확인할 수 있다.

<표 2-6> 일본의 CNP 실현을 위한 구체적 이행사례

분야	추진과제 및 방향성
수소, 암모니아 시설	• 항만별로 수소, 기존 인프라 바탕으로 최적 허브항 검토 • 수소 및 CO₂ 운송을 위한 파이프라인 구축 필요
육상전력 공급	• 선박의 육상전력 공급 적극 활성화
친환경 연료 공급	• 선박 연료에 있어 현재는 LNG Bunkering 중심으로 대응하되, 향후 수소, 암모니아 연료 공급 체계 검토 필요
항만 하역장비 전환	• 현재 디젤엔진에서 수소, 암모니아 등 친환경 연료 전환을 위해 친환경 추진 하역장비 및 연료충전 기술개발 필요
리퍼 컨테이너	• 태양열 차양막 설치 도입 확대
LED 조명	• LED 조명 전환 확대, 태양광 패널 확대
컨테이너 운송장비 (로더, 트렉터, 트럭 등)	• 디젤엔진에서 수소 등의 연료 전환을 위한 기술개발, 실용화 필요

18) 国土交通省 港湾局(2021), p. 5

분야	추진과제 및 방향성
CO ₂ 재활용	• 공업단지에서 배출되는 CO ₂ 분리, 회수하여 타 기능으로 활용

자료: 카본뉴트럴포트 (CNP)의形成に向けた検討会(2021) p. 13-18을 바탕으로 저자 재작성.

국토교통성에서 발간한 ‘CNP 구축 매뉴얼’에 따라 항만별로 CNP 구축 계획 수립을 위해 연구를 진행 중이며, 최근에는 대표적으로 기타큐슈항의 CNP 구축계획 초안이 발표되었다.¹⁹⁾ 기타큐슈항의 CNP 구축의 기본방침은 크게 두 가지로 구분된다.

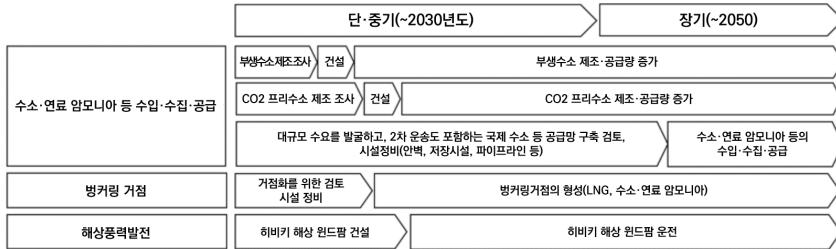
첫째, 수소·암모니아 등 수입 인프라를 구축하여 공급망 거점을 마련하는 것이다(〈그림 2-4〉 참조). 이를 위해서 현재 수소 생산, 활용 기술의 개발·실증·도입이 진행 중이다. 향후 2030년에는 메타네이션²⁰⁾ 등을 위한 수소 수요를 항만 수소 생산량으로 충족시키고, 히비키탄지구 수소·암모니아 수입 인프라 정비, 선박 LNG 병커링 거점 형성을 목표로 한다. 2050년에는 발전소, 철강업, 석유화학공업 등 산업으로 인한 대규모 수소·암모니아 수요가 예상되므로, 재생에너지 생산량을 감안하여 잉여 전력을 활용한 그린 수소 생산, 대량 에너지 수입을 위해 수입 인프라 정비와 국내 수출의 공급 거점, 선박 수소·암모니아 병커링 거점 형성을 목표로 한다.

두 번째, 항만 전반에 걸친 탈탄소화를 위한 로드맵 설정이다(〈그림 2-5〉 참조). 동 로드맵에서는 컨테이너 또는 페리터미널 등의 공공 터미널의 조명 시설을 100% 전력화, 항만 장비 탈탄소화, AMP 구축, 수소 전원 도입, 터미널 출입 차량 수소 연료 사용을 추진한다. 또한 임항지구의 기업이 항내 생산 수소·암모니아 사용과 에너지 절약 대책을 통해 지역 차원의 탈탄소화에 기여하도록 하며, 블루카본 생태계 조성·재생·보전을 계획하였다.

19) 北九州市(2022)

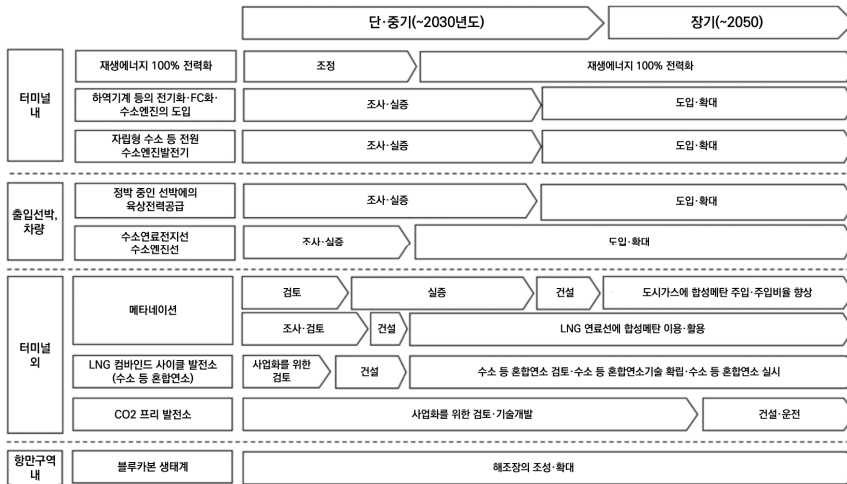
20) 수소와 CO₂를 합성하여 메탄을 생성하는 기술

〈그림 2-4〉 기타큐슈항 수소·암모니아 등 수입 인프라 로드맵



자료 : 北九州市(2022), p. 12

〈그림 2-5〉 기타큐슈항 탈탄소화 로드맵



자료 : 北九州市(2022), p. 12

기타큐슈항은 CNP 매뉴얼에 따라 2013년과 2020년의 온실가스 배출량을 추정한 결과를 바탕으로 2030년과 2050년의 CO₂ 배출량 목표를 수립하였다.²¹⁾ 목표 달성을 위해 온실가스 감축 계획을 수립하였으며, 항만 범위와 대상 시설 별로 온실가스 감축을 위한 세부 이행 계획, 이행 주체,

21) 2013년 대비 2030년 27%, 2050년 탄소중립 목표를 수립함.

이행 대상 장비 수량, 계획연도, 목표 배출량을 세부적으로 제시한 것이 특징이다. 또한 2030년과 2050년의 수소·암모니아 수요 및 공급량을 예측하였으며, 이러한 탄소 배출량 및 에너지 수요·공급량 추정 결과를 바탕으로 CNP 구축을 위한 이행방안을 마련하였다.

3. 유럽 항만의 탄소중립 이행방안

유럽의 주요 항만별 탄소중립 이행방안을 살펴보면, 네덜란드의 로테르담항은 2030년까지 'Port Vision 2030'에서 탄소 배출량을 1990년 대비 49% 감축, 2050년까지 95%를 감축할 것으로 목표를 설정하였다.²²⁾ 로테르담항은 이러한 항만 탄소 배출 목표와 EU의 2030년 55% 탄소 저감목표를 위해 '에너지 전환' 프로젝트를 추진하고 있다. 이는 네 가지 부문인 효율성 및 인프라, 새로운 에너지 시스템, 신소재 및 연료 시스템, 지속가능한 물류 공급망 구축으로 구성되며, CO₂ 포집·저장을 위한 파이프라인 및 케이블 설치, 신재생연료 대체 등이 포함된다.

앤티워프항은 화학 및 에너지 회사 컨소시엄을 설립하고 탄소포집 기술을 개발하여, 2030년까지 탄소 배출량을 절반으로 줄이는 목표를 설정했다. 해당 프로젝트는 'Antwerp@C'로 2030년까지 주도적으로 공동 탄소 인프라 구축을 위한 엔지니어링 연구를 수행하는 프로젝트이며 2019년 말부터 탄소 포집 인프라 기술 및 경제적 타당성에 대한 연구를 수행하고 있다. 컨소시엄은 장기적으로 탄소 포집 및 저장 기술을 항만의 다양한 영역에 원료로 사용하는 것이 항만에서 탄소중립 균형 달성의 핵심영역으로 강조했다²³⁾. 또한, 앤티워프항은 현재 최초의 수소 예인선을 건설 중이며,

22) Port of Rotterdam et al.(2019), p.74.

23) The Brussels Times(2020.5.28.)(검색일: 2022.6.29.)

‘Power-to-methanol’ 공장을 건설하기 위한 준비를 수행하고 있다. 최종적인 목표는 포집된 탄소를 수소와 함께 재사용하여 지속 가능한 메탄올을 생산하는 것이다²⁴⁾.

헬싱키항은 2019년 ‘Carbon Neutrality 2035’ 프로그램을 발표하였다. 본 프로그램은 2035년까지 완전 탄소중립을 목표로 항만 이해당사자들을 장려하고 지원할 계획이다. 헬싱키항은 9개의 선석에 새로운 OPS 기능을 도입할 예정이고 주변 발트해 항만들과 협력하여 EU의 지원금을 받아 주변국들에 OPS시스템을 확대할 예정이다. 바이오 연료로 전환하는 선주에 연료비를 지원하여 연료전환을 장려하고 있으며 탄소 저배출 선박에 대한 인센티브 프로그램을 지속운영·확대하고 있다. 또한, 항만구역 내 태양열 발전소를 건설하는 것 외에도 항만 이해당사자들의 에너지 전환 촉진을 위해 다른 패널 인프라 투자를 고려하고 있다. 헬싱키항만은 본 프로그램을 수행함으로써 항만지역의 탄소 배출량을 30%이상 줄일 것으로 기대²⁵⁾했다.

〈표 2-7〉 유럽 항만별 탄소중립 이행방안

항만	추진 정책
로테르담	- 에너지 전환 프로젝트 - 순철선 등 바이오 연료 전환, 물류 프로세스 최적화, 선박의 육상 전력 사용, 선박 친환경 연료 벙커링 기술 개발 - CO2 포집 및 해저 저장 기술, 수소 및 잔열용 파이프 건설, 수소 및 바이오 연료 생산 프로젝트 등
함부르크	100% 친환경 전력 공급 - 단계적 화석 연료 사용 폐지, 연료 전환, 운전 기술 최적화, 정박선 육상 전력 사용 등

24) Innovationsoftheworld(검색일: 2022.6.29)

25) World Ports Sustainability Program(검색일: 2022.6.27)

항만	추진 정책
앤티워프	• Antwerp@C : 탄소중립 인프라 구축을 위한 공동의 엔지니어링 연구 프로젝트 • 최초의 수소 예인선 건조 중 • 포집된 탄소와 수소를 재사용하여 메탄올 생산 추진, “Power-to-methanol” 공장 건설
헬싱키	• Carbon Neutrality 2035 : 육상전력공급 인프라 도입 및 확대, 선박 바이오 연료 보조금 지원, 항내 태양열 발전소 건설 등 인프라 투자

자료: Port of rotterdam(검색일: 2022.6.27.); HPA(2022), p. 54-62; Innovationsoftheworld (검색일: 2022.6.29.); World Ports Sustainability Program(검색일: 2022.6.27.)을 바탕으로 저자 재작성

4. 중국 항만의 탄소중립 이행사례

중국 항만의 탄소중립은 중국 정부의 3060목표²⁶⁾ 달성을 위해 추진되고 있으며, 이행방안으로 강조하고 있는 것은 에너지 사용구조의 개선을 통해 항만 오염물질 및 탄소배출을 저감하는 것이다. 에너지 전환 방법은 크게 친환경에너지 사용, 전력에너지 전환으로 구분한다.

중국 정부의 유개전(油改电, 유류 사용을 전력 사용으로 전환) 정책에 발 맞추어 기술 및 상업적 타당성이 확보된 항만 설비는 개조작업이 이루어졌다. 대표적으로 2020년 기준 상하이항 내 트레일러 LNG화 비율은 95%, 하이브리드 RTG 비율은 90%에 도달하였으며, 칭다오항에는 수소에너지 트레일러 및 야드크레인을 시범도입하고 ‘신재생에너지 마이크로그리드’ 시범사업도 진행 중이다. 한편 톈진항 제2컨테이너터미널에서는 중국 최초로 선급이 발행하는 ‘탄소중립 증명서(碳中和证书)’를 획득하기도 했다.

26) 탄소 배출량이 정점에 도달하는 2030년을 기점으로 2060년까지 탄소중립을 실현 목표(3060목표)(서울연구원(2021.12.23.))

현재 중국은 수소 연료로 작동되는 컨테이너 트럭 및 운송장비, 예선 등을 개발하고 있다. 이를 통하여 '14·5' 기간²⁷⁾ 동안 항만 장비의 에너지 전환을 추진하여, 전기, 수소 연료전지 등 친환경 에너지원으로 전환을 확대할 계획이다. 또한, 항만 내 자체 태양광 및 풍력발전, 지열 등을 활용한 열펌프 사용 여건을 조성하고 시범사업이 추진할 예정이다.

상해항은 상해시의 녹색 교통 추진과 항만 자체 계획에 따라 탄소 저감 정책을 추진하고 있다. '상해시 종합교통발전 14·5계획'에서는 교통부문 저탄소 전환 및 개발 가속화를 위한 계획을 수립하였으며, 항만 에너지 전환 및 효율 개선, 배출 규제 및 모니터링 강화 등을 포함한다. 이 외에 스마트 항만 시스템 구축, 항만 장비 자동화 촉진, 5G, IoT, 블록체인 등의 기술을 적용한 항만 운영 프로그램 개발 등에 대한 추진 계획을 포함하고 있다.²⁸⁾ 2022년 6월 20일 상해시 발전개혁위원회는 국가 수소 에너지 산업 발전과 수소 생태계 형성을 위한 '상해시 수소에너지 산업발전 중장기 계획(2022-2035)'을 통해 수소 항만 구축계획을 발표하였다. 이 계획에서는 수소 수출입을 위한 수소 운송 선박 터미널 건설, 수소 연료 전지 사용화를 위한 양산형 스마트 트럭 프로젝트, 항만 시설 및 장비의 동력원을 수소로 교체하는 국제 수소 시범 항만 구축을 추진하고자 한다.²⁹⁾ 또한, 상해시는 양산형 스마트 컨테이너 트럭 프로그램 시범 운영을 통해 트럭 기인 배출량 저감을 추진하고 있다.³⁰⁾

27) 2021년~2025, 중국 경제사회발전 제14차 5개년 계획

28) 上海市人民政府(2021), p. 9-11, p. 29-35.

29) 한국해양수산개발원 중국연구센터(2022), p. 9.

30) 한국해양수산개발원 중국연구센터(2022), p.5-7.

〈표 2-8〉 상해시 종합교통발전 14·5계획의 항만 관련 저탄소 정책 추진 계획

구분	항만 관련 계획
저탄소 교통체계 구축	• 종합 운송 시스템 구조 최적화 • 해상 및 항공 허브 수집 및 유통 시스템 개선
수송 에너지 전환 가속화	• 항만 비도로 오염원 에너지원 대체 가속화 • 내륙 운송 선박 에너지 전환 및 보급 • 청정 에너지를 사용하는 차량 사용 장려 및 진입 규제 • 수소 연료 전기차 시범 적용 추진 및 수소 충전소 건설 • 태양광 발전, 하이브리드 전원 공급 시스템, 바이오 연료 적용 등 재생 에너지 확대
수송 에너지 절약 및 탄소 저감	• 항로 최적화, 해운 기업 에너지 절약 기술의 지속적 전개 등을 통해 자동화 작업 효율 및 에너지 효율 개선 • 에너지 모니터링 시스템 구축, 탄소 배출권 거래 범위 확대
교통부문 오염물질 배출관리 강화	• 디젤 연료 화물차 배출 규제 강화, 자동 모니터링 시스템 보급을 통해 차량 배출 모니터링 강화 • 선박 배출 규제 강화 및 저유황유 적용 장려, LNG 및 저유황유 공급 체계 개선, AMP 지원 및 확대, 내륙 항만 AMP 표준 개발 촉진
녹색 교통 발전 생태계 확대	• 부두 개발로 인한 환경 영향 방지를 위해 제방 설치 등의 조치로 육지 및 수상 생태계 보전 • 교통 인프라 건설 시 재활용 자원 활용

자료: 上海市人民政府(2021), p. 32-35.

5. 싱가포르 항만의 탄소중립 이행방안

싱가포르는 글로벌 허브 항만으로서 항만의 탈탄소화를 위해 자발적인 친환경 정책을 추진하고 있다. 싱가포르 해운항만청(MPA: Maritime and Port Authority of Singapore)은 해운 및 관련 활동들의 환경적 영향을 줄이고 친환경 해운·항만활동 촉진을 위해 ‘Maritime Singapore Green Initiative(MSGI)’에 2011년부터 5년간 1억 달러를 투자했으며, 이는 해운의 탈탄소화 촉진을 목표로 2024년까지 연장되었다. MSGI는 Green Ship Programme(GSP), Green Port Programme(GPP), Green Energy

and Technology Programme, Green Awareness Programme으로 구성되어 있다. GSP는 싱가포르 국적 선박 선주들의 자발적인 IMO 환경 규제 표준 준수를 위해 일정 자격³¹⁾을 갖춘 선박에 친환경 선박 증서를 발급하고 초기 선박 등록비 할인 및 톤세를 환급받을 수 있도록 하여 온실가스를 저감하고자 한다. GPP는 싱가포르 항만에 기항하는 선박이 LNG 추진선이거나 IMO의 EEDI 요건을 충족하는 선박일 경우 항비의 25% 할인을 제공하며, 접안 기간 동안 LNG 추진 하버 크래프트(harbour craft) 서비스를 이용하는 경우 추가 10% 할인을 제공한다. Green Awareness Programme은 기업의 탄소 배출 보고 및 내부 탄소 가격 책정 관련 역량 강화를 위해 워크숍 및 교육을 실시하며, Green Energy & Technology Programme은 IMO 2030 목표 달성에 기여할 수 있는 녹색 기술에 대한 연구 및 실증을 장려하기 위한 프로그램이다.³²⁾

MPA는 올해 지속가능한 싱가포르 해사부문 구축을 위한 장기 전략인 ‘Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050(MSDB)’을 발표하였다. 이 전략은 항만 터미널, 국내 하버 크래프트, 연료, 등록 선박, IMO 및 국제 플랫폼 활동, 연구개발 및 인재 양성, 탄소 인식·회계 및 친환경 파이낸싱의 7가지 영역으로 구성된다. MPA는 MSGI와 더불어 탈탄소화의 본격적인 추진을 위해 MSDB를 위한 자금으로 최소 3억 달러 이상을 투입할 것으로 발표했다.³³⁾

31) 무탄소 연료 엔진 보유 선박, 저탄소 연료 엔진 보유 선박, IMO Phase 3 EEDI 요구사항 10% 이상 초과 준수 선박(MPA(검색일: 2022.5.20.))

32) MPA(검색일: 2022.5.20.)

33) MPA(2022), p. 5.

〈표 2-9〉 MSDB 세부 전략

항목	세부 전략
항만 터미널	• 청정에너지 사용, 자동화 및 디지털화를 통해 2030년까지 2005년 대비 배출량 60% 저감, 2050년까지 넷 제로(Net-zero) 목표 • 항만 장비의 전기화, 에너지 최적화 및 스마트 그리드 활용, 태양광 에너지 및 친환경 전기 에너지 활용, 항만 장비 및 운송수단의 저탄소/제로 탄소 연료 사용 • 주요 터미널 운영사들은 스마트 시스템 및 솔루션 활용, 에너지 관리 및 활용 개선을 위한 프로젝트 수행 • MPA는 항만운영사와 협력하여 시너지 산업 및 활동을 터미널 인근에 배치하고 터미널 주변 항만 중심 산업 생태계를 구축하여 공급망 단축 및 시설 공유를 통한 자원 최적화와 탄소 배출 저감을 추진
국내 하버 크래프트	• 하버 크래프트 연료 전환 • 에너지 솔루션 연구 및 시범 적용 추진 • 자금 조달 및 규제 프레임워크 검토
미래 해양 연료, 벙커링 표준 및 인프라	• 바이오 연료, 메탄올, 암모니아, 수소 등을 포함한 저탄소/제로 탄소 해양 연료를 공급할 수 있는 다중 연료 벙커링 전환에 대비 • 탄소 포집, 저장 및 활용 등의 친환경 기술을 개발
등록 선박	• MSGI의 GSP와 같이 싱가포르 등록 선박의 저탄소/제로 탄소 솔루션 채택 장려
IMO 및 국제 플랫폼 활동	• 싱가포르 국제 플랫폼의 포괄적인 기후 조치를 위한 적극적인 활동을 위해 노력
연구개발 및 인재 양성	• 해양 탈탄소화 R&D의 글로벌 허브 역할을 위한 연구개발 및 인재 양성에 초점 • 글로벌 해사 탈탄소화 센터(GCMD) 건립 : 해사 산업의 저탄소/제로 탄소 솔루션 개발, 프로젝트 자금 조달 및 관련 기관 간 협력 촉진
탄소 인식·탄소 회계 및 친환경 파이낸싱	• 탄소 회계 및 보고 역량 강화 및 해양 산업 내 친환경 파이낸싱 촉진

자료: MPA(2022), p.6-60을 바탕으로 저자 재작성.

제3절 시사점

해외 항만은 기후변화에 대응한 탄소중립 중요성이 커짐에 따라 단순한 탄소배출 저감을 추진하는 것을 넘어 탄소중립 관리체계를 마련하기 위해 노력하고 있다. 해외 주요 항만 사례를 종합 검토한 결과는 다음과 같다.

첫째, 해외 항만에서는 항만 탄소중립 관리체계 마련을 위해서 체계적으로 항만의 온실가스 인벤토리를 구축하고 있다는 점이다. 주요 항만의 사례 중 가장 우수한 사례는 미국이다. 미국은 EPA에서 개발한 항만 배출 인벤토리 개발 가이드라인에 따라 항만별로 인벤토리를 발표한다. 인벤토리 개발은 강제적인 사항은 아니나, 주요 항만은 국가와 지자체의 배출 규제 준수와 배출 저감 정책 추진을 위해 인벤토리를 개발하고, 항만의 탄소중립 이행 모니터링에 활용하고 있다. 일본 또한 탄소중립 항만 구축을 위한 매뉴얼을 통해 공통된 배출량 산정 방법과 계수 등을 공식적으로 제공한다. 일본의 주요 항만들은 필수적으로 CNP 구축계획을 수립하여야 하므로, 현재는 CNP 구축 초기 단계이지만 앞으로 공통된 방법론을 바탕으로 CNP 구축의 기반이 되는 항만별 배출량 자료가 축적될 것으로 예상된다. 반면, 현재 국내 항만의 탄소 배출량은 관리되지 않고 있어 항만 탄소중립 정책 추진과 이행점검을 위한 기초자료가 미비한 상황이다.

둘째, 항만 탄소중립 달성을 위한 상위계획 및 체계를 바탕으로 항만별로 세부 추진방안을 마련하여 이행점검 체계를 구축하고 있다는 점이다. 대표적으로 일본 국토교통성에서는 CNP 구축계획 매뉴얼과 방향성을 발표하였으며, 이에 따라 항만 관리자들은 항만별 CNP 구축계획을 수립하여야 한다. 매뉴얼에는 항만별 계획에 포함되어야 할 사항에 대해 매우 상세하게 설명하고 있으며, 계획 수립을 위한 협의회를 운영하여 항만 이해관계자뿐 아니라 정부 담당자도 참여하여 계획을 수립하고 지속적인 재검토

를 통해 탄소 감축 현황을 모니터링 해야 한다. 또한 미국 EPA는 항만 이니셔티브를 통해 보조금 지원, 지침 마련, 정보 공유의 중심적인 역할을 수행하여 항만별 탄소 저감 이행을 지원한다. 현재 우리나라는 유럽과 같이 해운 부문의 탄소중립에 초점을 맞추고 있어, 중점적으로 친환경 선박 연료 인프라 기능을 갖추기 위한 계획을 추진하고 있고, 그 외 노후 장비 교체, 운영 자동화 등이 파편적으로 추진되고 있는 실정이다. 종합적인 항만의 탄소 배출 관리를 위해서는 정부 차원의 항만 탄소중립 관리체계 개선이 필요하며, 일본과 같이 항만별 특성을 고려한 탄소 감축 계획을 수립할 수 있어야 한다.

셋째, 항만의 탄소중립 실현을 위해 신재생에너지 생산기술, 탄소포집 기술 등 다양한 기술개발을 추진하고 있다는 점이다. 항만 탄소배출 저감을 위한 에너지 사용의 효율화 목적으로 마이크로그리드 등 항만 에너지 관리시스템 도입 및 자동화를 통한 운영 시스템 개발, 태양광, 그린수소 등 친환경 에너지원 개발, 탄소 포집·저장 인프라와 메타네이션 기술 개발 등이 추진되고 있다. 반면, 우리나라는 항만 장비 자동화 기술 위주로 개발하고 있다.

이렇듯 해외 주요 항만에서는 탄소중립 실현을 위한 관리체계 마련, 항만별 세부 계획 수립, 관련 기술개발 등 다양한 방안을 추진하고 있다. 특히, 온실가스 배출량 산정을 통한 저감목표 설정, 이행·점검 등을 추진하고 있다는 점은 우리에게 시사하는 바가 크다. 따라서, 우리나라 항만분야 탄소중립 관리체계의 문제점을 살펴보고, 신속한 법·제도적 개선방안을 마련해야 한다. 또한, 항만 탄소중립 실현을 위해 필요한 탄소포집, 메타네이션 등 다양한 기술을 식별하고 국내 항만분야에 적합한 기술개발이 요구된다.

〈표 2-10〉 해외 항만 탄소중립 관리체계 및 이행방안 요약

국가	항만	탄소중립 관리체계 및 이행방안	목표
미국	LA/LB	• 청정대기행동계획(CAAP)	• 1990년 대비 2030년 40%, 2050년 80% 감축
	뉴욕/뉴저지	• 트럭 교체 프로그램, 화물 취급 장비 현대화 프로그램, 친환경 선박 인센티브 프로그램	• 2030년 직접배출량 50% 감축, 2050년 탄소중립
	오클랜드	• 항만 대기질 2020 및 이후 계획(단기, 중기, 장기)	• 1990년 대비 40% 감축, 2050년 대비 80% 감축(캘리포니아 주정부 목표)
	시애틀	• 북서항만 청정대기전략	• 2050년 탄소중립
유럽	로테르담	• 에너지 전환 • 순철선 연료 전환, 물류 프로세스 최적화, 선박 육상 전력 사용, 선박 친환경 연료 병커링 기술 개발 • CO2 포집 및 해저 저장 기술, 수소 및 잔열용 파이프 건설, 수소 및 바이오 연료 생산 프로젝트 등	• 1990년 대비 2030년 49% 감축, 2050년 95% 감축
	함부르크	• 100% 친환경 전력 공급 • 단계적 화석 연료 사용 폐지, 연료 전환, 운전 기술 최적화, 정박선 육상 전력 사용 등	• 2012년 대비 2025년 50% 저감, 2040년 탄소중립
	안트워프	• Antwerp@C • 수소 예인선 건조, 탄소 재사용을 통한 메탄올 생산	• 2050년 탄소중립
	헬싱키	• Carbon Neutrality 2035	• 2035년 탄소중립
중국	상해	• AMP 구축, 친환경 조명, 하역장비 에너지 전환, 항만 정보화 구축, 컨테이너 작업 최적화 및 회전율 향상, 에너지 및 탄소배출 관리체계 구축 • 수소항만 구축계획	• 2005년 대비 2030년 65% 감축, 2060년 탄소중립(중국 3060 목표)
일본	기타큐슈	• CNP 구축계획 • 탈탄소 에너지 수입을 위한 항만 기능 정비, 항만 기능 고도화 및 배후 산업과의 연계로 항만 인근 지역 탄소 배출 제로 실현	• 2013년 대비 2030년 27%, 2050년 탄소중립
싱가포르	싱가포르	• MSGI, MSDB • 항만 장비의 전기화, 에너지 최적화 및 스마트 그리드 활용, 태양광 에너지 및 친환경 전기 에너지 활용, 항만 장비 및 운송수단의 저탄소/제로 탄소 연료 사용, 운영 최적화 등	• 2005년 대비 2030년 60% 저감, 2050년 탄소중립

자료: 저자 작성

03

항만의 탄소 배출량 전망 및 감축목표 설정

2장에서는 해외 주요 항만의 탄소중립 정책과 추진 전력을 살펴보았다. 본 장에서는 우리나라 항만분야 탄소중립 관리체계 마련을 위해 2050년까지 중장기 탄소 배출량을 전망할 것이며, 전망 대상 품목은 컨테이너와 비컨테이너를 모두 포함하였다. 또한 항계 내 선박의 배출량을 전망하였다.

제1절 현황 분석

1. 분석 개요

본 절에서는 항만 탄소배출량 전망을 위해 전망 대상 품목에 대한 탄소 배출 현황을 분석하고자 한다. 분석을 위한 공간적 범위는 육상의 경우 안벽부터 장치장까지 항만구역을 포함한다. 먼저 대상 품목별로 최근 물동량 실적, 주요 처리 항만, 하역장비 유형 등을 살펴보고, 품목별 주요 운영사를 대상으로 운영 장비 정보, 연료사용량 등을 조사하여 현재 기준으로 화물 처리 과정에서 배출되는 탄소 배출량을 추정한다. 아울러, 항계 내 선박

이동 및 작업에 따른 탄소 배출량도 고려하였으며, 유류 사용에 따른 직접 배출량과 전기에너지 사용에 따른 간접배출량도 포함하여 종합적으로 배출량을 산정하였다.

1) 대상 항만 및 품목

국내 항만의 화물을 취급하는 단위는 부두 및 터미널을 기준으로 하며, 화물 부두는 주요 취급 화물에 따라 컨테이너 터미널과 비컨테이너 화물 부두로 구분할 수 있다. 컨테이너는 주로 전용터미널로 지정되어 터미널운영사가 임대 또는 민간개발 방식으로 하나의 터미널을 운영하고 있으며, 자체적으로 장비 및 시설의 소유 및 관리권을 가진다. 비컨테이너 역시 부두 단위로 항만당국과 운영사 간 계약을 통해 운영되며, 일부 부두는 선석별로 하역사 또는 부두 운영사가 하역작업을 수행하고 장비의 소유권 역시 부두 운영사(하역사)가 가진다. 또한 컨테이너 터미널과 유사하게 민간기업에 의해 개발·운영되기도 한다.

품목별 주요 처리항만을 살펴보면 컨테이너의 경우 부산항에서 75% 이상을, 유류는 울산항, 광양항, 석탄 및 철광석은 광양항과 포항항에서 많은 물량을 처리하고 있다. 그 외 철재는 광양항 및 평택·당진, 자동차는 평택·당진, 목포, 제주 등에서 처리한다. (<그림 3-1> 참조)

우리나라의 품목별 총 물동량은 RT(Revenue Ton) 기준으로 컨테이너가 가장 높은 비중을 차지해왔으며, 2030년에는 전체 물동량에 대해 38.5%까지 증가할 것으로 전망된다(<표 3-1> 참조). 컨테이너를 제외하고 2019년 기준 유류, 석탄, 철광석, 자동차, 철재 등의 순으로 물동량이 많으며, 상위 5개 품목이 총 비컨테이너 화물의 약 79.8%를 차지한다.

〈그림 3-1〉 2022년 5월 품목별, 항만별 물동량 순위



주: ()는 전년 동기 대비 증가율
 자료: 한국해양수산개발원 항만수요예측센터(2022), p. 23.

따라서 본 연구에서는 전국 항만을 기준으로 하되, 컨테이너를 처리하는 터미널을 포함하여 유류, 석탄, 철광석, 자동차 등을 취급하는 항만을 중심으로 탄소 배출량을 산정하고, 원단위를 개발하여 전체 항만물동량에 적용함으로써 전체 항만의 탄소 배출량을 추정하고자 하였다.

〈표 3-1〉 품목별 물동량 현황 및 전망

구분	2015		2019		2030	
	백만 톤(RT)	비율(%)	백만 톤(RT)	비율(%)	백만 톤(RT)	비율(%)
컨테이너	430	29.4	575	35.0	753	38.5
유류	408	27.9	473	28.8	550	28.1
석탄	134	9.2	143	8.7	157	8.0
철광석	80	5.5	80	4.9	83	4.2
자동차	69	4.7	79	4.8	76	3.9
철재	91	6.2	78	4.7	86	4.4
잡화	31	2.1	27	1.6	28	1.4
그 외	220	15.0	189	11.5	224	11.4
합계	1,463	100.0	1,644	100.0	1,957	100.0

자료: 해양수산부(2020d), p. 46.

2) 항만 장비 및 작업 프로세스

본 연구에서는 대상 항만에서 사용하는 장비와 입출항 선박의 탄소 배출량을 중심으로 항만 배출원의 종합적인 탄소 배출량을 산정한다. 항만 주요 탄소 배출원인 입출항 선박의 선종과 항만 장비 종류는 대상 부두의 품목별로 상이하며, 이에 따라 개별 배출계수가 적용된다.

항만 장비는 위치에 따라 선석영역, 이송영역, 야드영역에서 사용하는 장비로 구분할 수 있다. 선석영역에서는 선박과 육상에 하역작업이 이루어지며, 이송영역에서는 선석영역에서 화물 보관구역인 야드까지 화물의 이

동이 이루어진다. <표 3-2>는 크게 컨테이너와 비컨테이너 화물처리의 영역별 주요 장비 종류이며, <표 3-3>은 항만에서 활용하고 있는 개별 품목별 주요 하역 및 이송장비를 나타낸다.

〈표 3-2〉 영역별 주요 항만 장비

구분	영역	주요 장비
컨테이너	선석영역	겐트릭크레인, 모바일 크레인 등
	야드영역	리치스태커, 트랜스퍼 크레인, 탑핸들러 등
	이송영역	스트래들 캐리어, 야드 트랙터 등
비컨테이너	선석영역	쉽로더, 언로더, 로딩암, CSU, BTC 등
	야드영역	흡수기, 리크레이머 등
	이송영역	벌크트레일러, 트랜스포터, 모듈트레일러, 컨베이어벨트 등

자료: 이상엽 외(2022b), p. 399.

〈표 3-3〉 화물 품목별 주요 항만 장비

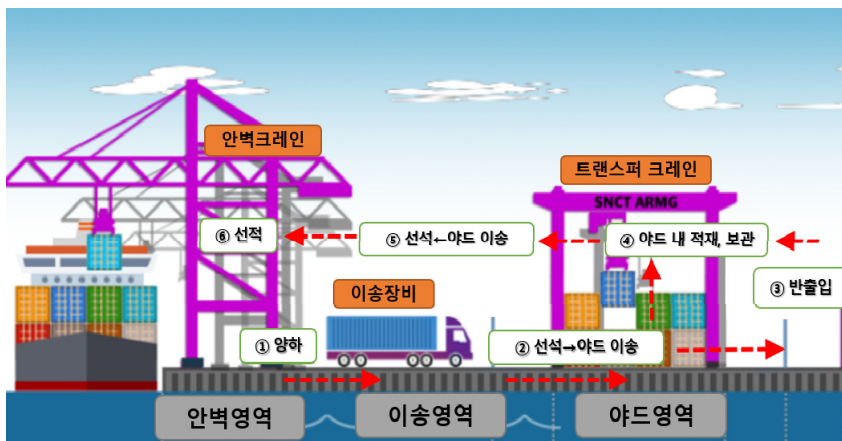
품목	장비
컨테이너	겐트릭크레인, 리치스태커, 야드 새시, 야드 트랙터, 모바일 하버 크레인, 스트래들 캐리어, 벨트 컨베이어, 트랜스퍼 크레인, 탑핸들러,
석탄	벨트 컨베이어, 쉽로더/쉽언로더, 로딩암, 스태커 리크레이머
철재	모빌 하버 크레인, 쉽로더/쉽언로더, 다목적 크레인
양곡	쉽로더/쉽언로더, 흡수기, 계근대, 심포터, 호퍼, 양하기, 바큐베이터, 체인 컨베이어, 그라브
원목	다목적 크레인, 리치스태커, 모빌 하버 크레인
유류, 석유화학제품	로딩암
잡화	모빌 하버 크레인, 쉽로더/쉽언로더, 다목적 크레인
시멘트	모빌 하버 크레인, 쉽로더/쉽언로더, 벨트 컨베이어

자료: 공공데이터포털(검색일: 2021.9.14.); 한국항만물류협회(검색일: 2022.7.2.)를 참고하여 저자 작성

각 품목별 하역장비 및 화물 처리 프로세스를 살펴보면, 컨테이너의 화물처리 과정은 모든 터미널에서 동일하고 규칙적으로 발생하고 있으며, 각

영역별 투입장비 역시 유사하다. 일반적으로 해측 작업에 안벽크레인(갠트리 크레인)으로 선적 및 양하를 하고, 야드 트랙터, 스트래들 캐리어 등으로 선적-야드 간 이송작업이 이루어지며, 야드에서는 트랜스퍼 크레인(RMGC, ARMG 등 다양한 형태) 등이 활용한다. 또한 개별 컨테이너 이동, 적재 등에는 탑핸들러, 포크리프트, 리치 스택터 등의 장비가 주로 활용되고 있다. 다목적부두의 컨테이너 하역작업은 갠트리 크레인이 없는 경우가 많아, 하버크레인 등의 장비를 이용하기도 한다. 최근 컨테이너 터미널에 자동화터미널이 보편화되면서 자동화 정도에 따라 각 영역별 장비의 형태와 동력원 등이 상이하지만³⁴⁾, 기본적으로 각 영역별 역할과 기능은 동일하다.

〈그림 3-2〉 컨테이너터미널 화물처리 프로세스

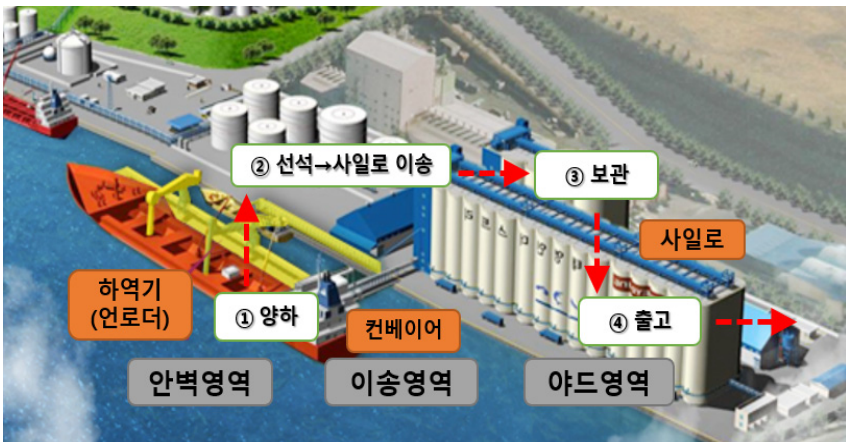


자료: SNCT(검색일: 2022.9.3.)를 바탕으로 저자 재작성

34) 예를 들어, 자동화터미널은 기존 야드트랙터 대신 무인으로 이송되는 AGV가 투입되고, 안벽크레인 역시 유인에서 무인으로 원격(Remote control)조정되는 안벽 크레인이 사용되기도 한다.

컨테이너 외 비컨테이너는 처리품목, 부두 기능, 운영형태 등에 따라 차이를 보인다. 석탄, 철광석, 양곡 등의 실물(bulk) 형태의 화물은 주로 수입되어 항만 배후에 보관하거나 작업장에서 활용하고 있다. 따라서 선박에서 언로더, 쉑로더 등의 하역기로 하역하여 컨베이어를 통해 배후 장치장 또는 창고(사일로 등)로 즉시 이송한다. 안벽작업을 제외하면 별도의 이송과 야드 영역에서 처리되는 작업이 없어서 컨테이너에 비해 항만에서 작업종료까지 비교적 단순한 과정으로 처리된다.

〈그림 3-3〉 양곡부두 화물처리 프로세스



자료: 태영인더스트리(검색일: 2022.9.3.)를 바탕으로 저자 재작성

〈그림 3-4〉 석탄부두 화물처리 프로세스



자료: 전자신문(2016.11.9.)을 바탕으로 저자 작성

반면, 목재, 철재, 잡화 등은 BTC(Bridge Type Crane), 모바일 하버크레인 등 다양한 종류의 크레인을 통해 선적과 하역작업이 이루어지고, 로더(스키드로더, 패이로더 등), 지게차, 그랩(Grab) 등을 통해 이송한다. 야드 영역에서는 굴삭기, 불도저, 로더, 크레인, 트레일러 등을 통해 적재, 이송 작업이 이루어진다. 반대로, 수출 시에는 야드에 보관 또는 적재하였다가, 이송작업을 통해 선적하는 프로세스를 가진다. 이처럼 다양한 화물을 처리하는 잡화 부두에서는 화물 종류에 따라 투입하는 장비와 가동시간 등이 다르므로 동일한 프로세스로 하역작업이 이루어지기는 어려우나, 일반적으로 〈그림 3-5〉와 같은 흐름에 따라 작업이 이루어진다.

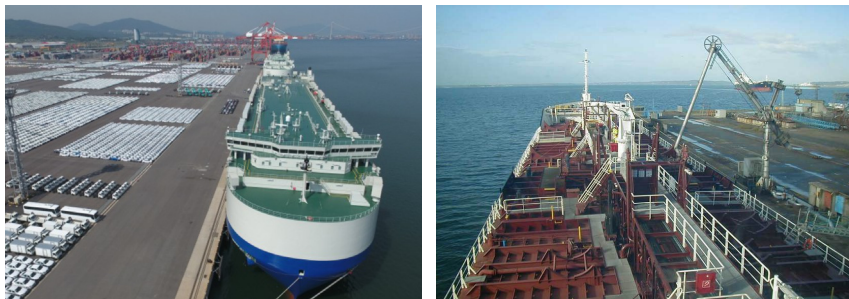
<그림 3-5> 잡화 부두 화물처리 프로세스



자료: 군산지방해양수산청(검색일: 2022.9.3.) 바탕으로 저자 작성

원유, LNG, 석유화학제품 등의 유류는 로딩암을 통해 선박에서 부두 배후의 저장장소까지 바로 이송되므로 로딩암(파이프라인 연결 후 펌핑 형태로 하역)을 제외하면 특별한 이송 장비는 투입되지 않는다. 즉, 안벽, 이송, 야드영역이 뚜렷하게 구분되지 않는다. 또한 자동차의 경우, 완성차 수출입에 Ro-Ro(Roll-on/roll-off)방식으로 하역작업이 이루어지므로, 자동차운반선의 램프(Ramp)를 통해 자동차가 가진 동력원으로 부두(야드)와 선박 간 자체적으로 운송되므로 별도의 하역장치가 필요하지 않다. 따라서 선적, 야드에 하역장비가 설치되어 있지 않다.

〈그림 3-6〉 자동차부두 및 유류부두 해측작업



자료: 여수·광양항만공사 홈페이지 및 인천항만공사 홈페이지 (검색일: 2022.9.3.)

항만장비의 동력원은 주로 유류(경유)를 많이 사용한다. 컨테이너 터미널의 경우는 전기로 활용률이 높으며, 안벽크레인, 트랜스퍼 크레인도 대부분 전기로 전환하였다. 또한 최근 친환경 기조에 따라 2017년부터 부산항 일부 터미널의 야드 트랙터는 경유에서 LNG로 전환되기도 하였다. 컨테이너를 제외한 비컨테이너 부두의 하역 및 이송장비는 대부분 경유가 사용되며, 컨베이어, 로더/언로더 등의 장비도 전기를 동력원으로 사용한다.

2. 자료 조사

1) 조사 대상

본 연구의 목적을 위해 정확하고 세밀한 탄소 배출량 분석이 필요하다. 현재 항만에서 사용 중인 장비의 종류, 사용연료 종류와 사용량 등에 대한 조사가 필요하며, 이를 위해 우리나라 전국 항만을 대상으로 현재 사용 중인 장비 현황을 파악해야 한다. 첫 번째로 본 연구에서 진행하고자 하는 미래 탄소 배출량 전망을 위해서는 과거 배출량 분석이 선행되어야 하므로 자료수집을 지난 10년(2012~2021년)을 자료수집 기간으로 설정하였다.

두 번째 장비 종류는 항만 하역 및 선적에 활용되는 장비를 주 대상으로 하여 장비별 대수, 사용연료, 엔진출력, 연 가동시간을 조사하였다. 이는 선행연구의 탄소 배출량 산정방식을 참고하여 가장 상세하고 정확한 Tier 3를 적용하기 위함이며, 장비의 엔진출력 또는 연평균 가동시간 파악이 어려운 경우 각 장비별 연간 총 유류사용량을 다시 조사하였다. Tier 3보다 낮은 Teir 2 산출방식은 각 장비별 대수와 유류사용량을 바탕으로 계산하기 때문이다.³⁵⁾ 장비는 운영사가 직접 소유하고 있는 장비와 리스(임차)도 함께 조사하여 최대한 운용 중인 장비가 포함될 수 있도록 하였다. 셋째, 최근 컨테이너 장비 중 안벽·야드 크레인과 하역장비 외의 건물 및 시설에는 전기를 주로 활용하고 있으며, 부산항 신항 등에는 야드 트랙터가 LNG로 운영되는 경우도 볼 수 있다. 이를 반영하여 자료수집이 가능하도록 부두(터미널) 전체의 전기, 유류 등의 총 사용량을 함께 조사하였다. 그 밖에 부두(터미널)의 개별 물동량 파악도 함께 진행하였으며, 이는 장비 투입 및 전기/유류 사용에 따른 물동량을 매칭하여 원단위를 구하도록 하기 위함이다. 또한 누락된 자료에 대해 유류/전기 사용량을 물동량을 기준으로 가정을 통해 추정하는데 활용 가능하다.

2) 자료수집 방법

(사)한국항만물류협회에서는 매년 항만 하역사업자를 대상으로 항만장비 조사를 진행하고 있으며, 이를 ‘항만하역요람’ 형태로 공시하고 있다. 해당 자료에는 지역별 항만의 장비 대수와 톤(ton)에 대한 자료가 포함되어 있으나 장비의 연료사용량, 운영시간 등 탄소 배출량을 산정할 수 있는 구체적 정보는 포함되어 있지 않다. 또한 장비별 사용연료 종류에 따라 배출량 산정방식이 다르게 적용되기 때문에 장비별 연료종류 역시 별도로 파악해

35) 산정방식에 대한 상세한 내용은 뒤에서 다시 언급할 예정임

야 한다. 결론적으로 신뢰성 있는 실제 자료를 확보하기 위해 연구목적에 맞는 기준으로 분류된 조사표를 직접 작성하여 항만 부두(터미널) 하역사를 대상으로 자료를 수집하는 방법을 활용하였다(〈그림 3-7〉 참조). 전국 항만 부두(터미널) 하역사는 (사)항만물류협회 회원사로 가입되어 있어 협회를 통해 일괄적으로 자료요청을 하였고, 2022년 5월~7월에 걸쳐 진행되었다.

〈그림 3-7〉 조사표 내용

- 항만명:
- 부두(터미널) 명:

1. 물동량

화물명	단위	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
예: 알곡	예: 톤										
예: 컨테이너	예: TEU										

필요 시 아래 칸 추가하여 계속 작성

* 주요 화물품이 두가지 이상일 경우, 구분해서 작성(소량의 화물품은 생략 가능)

2. 장비

장비명	구분	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
예: 리프트트럭	총 운영 대수	예: 5									
	사용연료종류	예: 경유									
	연진출력(kW)	예: 250									
	연평균 가동시간(hr)	예: 7.5									
예: 로더	총 운영 대수										
	사용연료종류										
	연진출력(kW)										
	연평균 가동시간(hr)										
	총 운영 대수										
	사용연료종류										
	연진출력(kW)										
	연평균 가동시간(hr)										
	총 운영 대수										
	사용연료종류										
	연진출력(kW)										
	연평균 가동시간(hr)										

필요 시 아래 칸 추가하여 계속 작성

* 장비 종류가 동일함에도 사용연료가 다르거나, 출력에 큰 차이가 있을 경우 분리해서 작성하고, 분류가 어려울 경우 한종류로 합쳐 평균값으로 작성 부탁드립니다.

* 해당장비는 장비/공사 소유 장비를 포함하여, 취득하여 운영 중인 장비 및 임대(리스포함) 장비도 포함시켜 주시기 바랍니다.

* 최대한 위 항목별로 작성해 주시고, 장비의 연진출력 또는 연평균가동시간 파악이 어려운 경우 각 장비별 연간 총유류사용량을 기재 부탁드립니다.

3. 유류 및 전기 사용량

구분	단위	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
전기	Liter										
유류	kW										

* 터미널 또는 부두 전체 전기 및 유류 사용량

4. 기타

* 본 연구 또는 배출량 산정에 필요하다고 생각하시는 외견 또는 가선장 등이 있으시면 자유롭게 작성 부탁드립니다.

자료: 저자 작성

협회 회원사는 총 338개이며 이는 전용부두(터미널) 운영사를 포함, 일반 하역업체 전체를 의미하며 지사 및 지점을 포함한 수치이다. 전국 항만을 포괄할 수 있도록 전국 항만의 전체 회원사를 대상으로 조사를 수행하는 것이 바람직하나, 이는 전용터미널을 운영하는 기업은 한정되어 있고, 지사 및 지점 형태로도 운영되고 있다. 따라서 개별 부두(터미널)과 개별 운영사(하역사)가 매칭되지 않는 등의 문제로 인해 현실적으로 어려움이 있을 것으로 예상된다. 특히 이러한 문제는 한 부두에 하역사가 많거나, 지점 형태로 운영되는 곳이 많은 비컨테이너에서 두드러지게 나타난다. 따라서 현실적으로 수집 가능한 대상 항만은 <그림 3-1>과 같이 주요 품목을 처리하는 부산항, 인천항, 울산항, 여수·광양항 등 12개 항만이다. 또한 하역사는 전용 부두(터미널)을 운영하는 형태가 아닌 사용료를 지불하고 자사 장비를 투입하여 하역만 진행하는 형태도 있으므로, 전체 회원사를 대상으로 하는 모집단은 실제 부두(터미널) 수보다 많을 수 있음을 감안해야 한다.

3) 조사 결과

조사 응답 현황은 <표 3-4>와 같이, 전국 항만 대상 총 37개 업체에서 자료를 수집하였으며 이 때, 자료의 정보가 현저히 부족한 3곳을 제외하고 34개를 분석에 활용하였다. 34개 운영사(터미널) 중 부산항이 10개, 인천항 8개, 평택·당진항 7개 등이 포함되었으며, 부산항 및 인천항의 컨테이너 전용터미널은 인천항 1곳을 제외하고 모두 수집하였다. 예상했던 것과 같이, 비컨테이너 부두는 컨테이너 터미널과 같이 개별 한 개의 운영사가 개별 터미널을 운영하지 않은 경우가 다수이며, 또한 전용부두를 운영하지 않고 일반 하역업무만 수행하는 업체가 많다. 따라서 개별 한 단위의 부두에서 처리하는 물동량에 매칭되는 하역장비, 유류 및 전기 사용량을 집계하는데 어려움이 있다. 따라서 본 조사의 응답률이 낮게 발생할 수 밖에 없으며, 개별 부두의 자료를 수집하는데 어려움이 있음을 의미한다.

〈표 3-4〉 조사 응답 현황

항만	회원사수	응답수	분석활용 대상 수		
			합계	컨	비컨
부산	44	10	10	8	2
인천	34	8	8	3	5
울산	27	3	2	0	2
여수광양	20	1	1	1	0
포항	17	0	0	0	0
마산	19	0	0	0	0
평택당진	24	7	7	2	5
보령	2	2	2	0	2
대산	4	0	0	0	0
군산	9	6	4	1	3
목포	20	0	0	0	0
동해묵호	35	0	0	0	0
그 외	83	0	0	0	0
총계	338	37	34	15	19

주: 그 외 항만은 진해, 통영, 장항, 태안, 제주 등을 포함함

자료: 한국항만물류협회(검색일: 2022.7.2.)를 바탕으로 저자 재작성

본 연구에서는 크게 컨테이너와 비컨테이너의 단위당 탄소 배출량을 산출하고, 이를 항만 전체 물동량에 대입하여 전체 항만의 탄소 배출량을 추정할 예정이다. 따라서 물동량 및 장비현황, 유류 및 전기 사용량 모두 컨테이너와 비컨테이너로 나누어서 살펴보았다.

회원사별 연간 유류 및 전기 사용량 조사 결과 2020년의 물동량이 소폭 줄어드는 일시적 감소를 제외하고는 계속 증가하고 있다.³⁶⁾ 항만별로는 부산항이 유류와 전기 사용량 모두 가장 높은 것으로 집계되었으며, 2017년

36) 2017년 유류사용량이 큰 폭으로 증가한 이유는 일부 터미널의 자료가 2017년 이전 자료가 집계되지 않았거나(부산항 허치슨터미널, DPCT 경우), 부산항 BPT는 2017년에 개장하여 그 시점부터 사용량이 집계되었기 때문이다.

도부터 부산항에서는 일부 야드 트랙터가 LNG로 개조되어 동력원이 전환됨에 따라 LNG를 사용한 것으로 집계되었다. 화물 단위당 유류 사용량은 컨테이너는 1TEU당 1.72L, 비컨테이너는 1톤당 0.03L, 전기 사용량은 컨테이너와 비컨테이너 각각 14.01kW, 0.03kW로 나타났다. LNG의 경우 컨테이너에만 해당되며 1TEU당 0.13KG 수준임을 알 수 있다.

〈표 3-5〉 수집된 전체 항만의 물동량, 유류, 전기, LNG 사용량

구분	물동량		유류(KL)		전기(MkW)		LNG (Ton)
	컨(천TEU)	비컨(천TON)	컨	비컨	컨	비컨	컨
2012	12,770	40,745	20,400	1,023	198,927	8,052	-
2013	14,422	46,205	23,126	1,433	215,170	10,124	-
2014	15,634	48,117	24,175	1,333	220,196	10,669	-
2015	16,456	51,882	26,069	1,276	228,543	11,325	-
2016	16,767	65,837	30,971	1,393	238,679	13,470	-
2017	23,420	76,556	44,595	1,615	298,626	21,653	2,729
2018	24,573	76,217	44,443	2,139	325,892	22,042	4,884
2019	24,968	89,864	45,910	3,357	341,453	31,024	7,024
2020	24,938	88,398	42,378	3,020	336,213	29,871	7,366
2021	26,044	89,084	45,299	3,462	371,254	31,496	7,878
단위당 사용량 평균 (L/kW, KG)			1.72	0.03	14.01	0.03	0.13

주: 수집된 34개 부두의 자료를 바탕으로 하여 실제 전국 항만 물동량과 전기/유류 사용량과는 상이함
자료: 저자 작성

한편 장비별 조사 결과를 살펴보면, 컨테이너의 경우 안벽크레인, 트랜스퍼크레인(야드크레인), 포크리프트, 탑핸들러(엠티핸들러), 야드 트랙터 등 대체적으로 유사한 장비가 사용된다. 안벽크레인 및 트랜스퍼크레인은 전기를 주로 이용하며, 그 외 이송장비는 대체적으로 유류(경유)를 동력원으로 사용하고, 야드 트랙터 등은 일부 LNG도 사용함을 알 수 있다. 비컨테이너는 하버크레인, 로더, 스킵로더, 지게차 등이 하역과 이송작업에

투입되며 주로 경유를 동력원으로 하는 장비들이 사용된다. 일부 컨베이어 벨트, 언로더 등은 전기를 활용하기도 하나 이는 대부분 이송장비가 아닌 부두에 고정된 시설물에 더 가까우며 최근에 도입된 장비들의 경우에도 유류보다는 전기를 동력원으로 활용하는 경우가 많다.³⁷⁾ 구체적인 사례로 유연탄과 철광석 등을 처리하는 전용부두는 선박에서 언로더를 이용하여 하역이 이루어지고, 이를 컨베이어를 통해 배후 창고 또는 사업장(발전소, 제철소 등)으로 이동시킨다.

연평균 가동시간을 비교해보면, 컨테이너 시설 및 장비들은 선박입항과 이송작업에서 선석-야드 간 컨테이너 이동이 계속 발생하므로 비컨테이너 부두에 비해 평균 가동시간이 길다. 특히 고정된 시설인 안벽크레인, 트랜스퍼크레인 등은 이송장비 대비 가동시간이 높음을 확인하였다. 컨테이너 터미널은 선석 및 야드 활용에 있어 효율적인 운영을 중요시하고 있는 특징이 반영된다. 비컨테이너의 경우도 최초 선박에서 선적과 하역 작업에 투입되는 하버크레인의 가동시간이 높게 나타난다. 비컨테이너의 이송장비는 컨테이너 터미널에 비해 지속적으로 화물이동이 발생하는 것이 아니라 필요에 따라 선석과 야드에서 배후지, 외부 트럭 간 이송이 발생하므로 장비의 가동시간이 고정 시설보다는 높지 않다.

37) 대표적인 예로, 민간투자 방식으로 개발된 군산의 (주)태영그레인터미널은 2011년에 개장, 2012년부터 작업을 개시한 양곡전용부두로, 로더와 컨베이어를 통해 하역 작업이 이루어지며 대부분 전기를 동력원으로 하고 있다. 그 외 인천남항부두운영(주) 도 석탄부두로 언로더, 컨베이어가 주요 하역시설이며 전기를 이용하고 있다.

〈표 3-6〉 주요 장비 연간 평균 가동시간

구분	장비명	연평균 가동시간(hr)			일평균 가동시간 (hr)	연간 투입 대수	주요 동력원
		LNG	경유	전기			
컨테이너	리치스테커		4,558		12.5	81	경유
	스트래들 캐리어		4,715		12.9	31	경유
	안벽크레인			4,736	13.0	117	전기
	트랜스퍼 크레인		4,593	4,338	12.2	276	전기, 경유
	야드 트랙터	5,810	3,880		13.3	579	LNG, 경유
	야드트럭	3,857	4,150		11.0	239	LNG, 경유
	엠티핸들러		3,201		8.8	55	경유
	포크리프트	516	1,361		2.6	45	경유
비컨테이너	굴삭기		304		0.8	29	경유
	로더		2,105		5.8	35	경유
	스테커			1,589	4.4	1	전기
	스키드로더		1,222		3.3	20	경유
	언로더			1,876	5.1	10	전기
	지게차		3,052		8.4	42	경유
	컨베이어		1,049	2,096	4.3	21	전기
	크레인		506	453	1.3	19	전기, 경유
	하버크레인		4,674	3,844	11.7	12	전기, 경유

주: 1) 투입대수는 연간 투입대수(최근 3년간 개별장비의 투입대수를 평균한 값임)

2) 일평균 가동시간은 조사된 연평균 가동시간을 365일로 나누어서 산출

3) 연간 투입대수는 조사된 34개 부두에 대한 값임

자료: 저자 작성

제2절 항만별 탄소 배출량 전망 및 저감목표 설정

1. 배출량 산정 및 전망 개요

본 연구는 원단위법을 활용하여 항만의 화물 처리 전 과정에서 발생하는 탄소 배출량 전망을 목표로 한다. 이를 위해 제1절의 항만 하역장비 활동자료와 AIS 기반 선박 활동자료를 활용하여 품목별 원단위를 산정한다. 품목별로 산정된 원단위를 제4차 항만 기본계획의 품목별 물동량 전망치에 적용하여 장래 탄소 배출량을 계산한다. 단, 컨테이너 품목의 경우 진해신항, 광양항 3-2단계, 인천신항 1-2단계 등 장래 완전자동화 터미널 개발계획을 반영하여 해당 터미널에서 처리하는 화물에 대해서는 완전자동화 터미널의 원단위를 적용하여 보정한다. 선박 기인 탄소 배출량은 품목별 선박당 평균 화물처리량 원단위를 계산하고 대상 품목의 전망치에 적용하여 계산한다. 또한, 화물당 사용하는 전력 원단위를 산출하고 품목별로 적용하여 간접배출량을 계산한다. 최종적으로 품목별 하역장비 활동에 배출량, 선박의 활동에 따른 배출량, 전기에너지 사용에 따른 간접배출량을 합산하여 목표연도의 BAU 개념의 탄소 배출량을 전망한다.

2. 항만 작업에 따른 배출량 산정 및 전망

1) 방법론

항만 하역장비에 대한 탄소 배출량 산정방식은 가장 공신력 있는 「IPCC 2006 guidelines」에 포함된 ‘Chapter 3: Mobile Combustion’의 비도로 운송(Off-road Transportation) 수식을 참고하였다. 이 자료는 IPC

C³⁸⁾가 발간한 가장 최신의 배출량 산정 방법 가이드라인으로 산업부문별로 온실가스 배출원을 구분하고 각 수준별로 산정방식을 다르게 제시하고 있다. 2019년 IPCC에서는 2006년 가이드라인 이후 신규 적용한 기술에 대한 설명, 새로운 온실가스 배출원 및 흡수원에 대한 정보를 추가하여 새로운 보고서³⁹⁾를 발간하였다. 그러나 2006년 가이드라인을 보완하는 것으로 본 연구와 관련 있는 비도로 운송에 대한 배출량 산정방식은 2006년 가이드라인에 명시된 방법을 그대로 적용할 수 있다. 배출량을 산정하기 위해서는 산정 대상 정보에 따라 산정방식을 3가지로 구분할 수 있는데, Tier 1은 단일 오염물질당 공통된 기본 배출계수를 활용, Tier 2는 특정 오염물질에 대해 장비 종류와 연료 종류로 구분하여 국가고유 배출계수와 국가고유의 통계를 적용하여 산출하는 방법이며, Tier 3는 실제 장비 대수, 출력, 부하율 등의 데이터 재원 활용으로 산정이 가능하다. 다만 「IPCC 2006 guidelines」은 신뢰할 수 있는 연료소비량 데이터가 있을 경우에 Tier 2 방식이 가장 효과적이라고 언급하고 있다.

유럽환경청(EEA)과 미국대기환경청(EPA)에서도 탄소 배출량 산정에 IPCC 가이드라인과 유사한 방법을 적용하고 있으며, 정확한 산정을 위해 가용할 수 있는 최대한의 데이터를 활용할 것을 권고하고 있다. 또한 비도로 운송장비의 연료사용에 대한 통계데이터 확보가 어려울 경우 추정의 방법도 허용되며, 다만 데이터의 확보가 가능할 경우에는 높은 단계의 방법을 채택하는 것이 바람직하다고 언급하고 있다.

38) 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)

39) IPCC 국가 온실가스 배출 목록(인벤토리) 2006 지침 2019 개선보고서(2019 Refinement: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories)

〈표 3-7〉 IPCC 2006 guidelines의 탄소 배출량 산정방식

구분	산정식	비고
Tier 1	$E = \sum_j (Fuel_j * EF_j)$	E = emissions (kg) Fuel _j = fuel consumed (as represented by fuel sold) (TJ) EF _j = emission factor (kg/TJ) j = fuel type
Tier 2	$E = \sum (Fuel_{ij} * EF_{ij})$	E = emissions (kg) Fuel _{i,j} = fuel consumed (as represented by fuel sold) (TJ) EF _{i,j} = emission factor (kg/TJ) i = vehicle/equipment type j = fuel type
Tier 3	$E = \sum_{ij} (N_{ij} * H_{ij} * P_{ij} * LF_{ij} * EF_{ij})$	E = emission in kg. N _{ij} = source population H _{ij} = annual hours of use of vehicle i (h) P _{ij} = average rated power of vehicle i (kW) LF _{ij} = typical load factor of vehicle i (fraction between 0 and 1) EF _{ij} = average emission factor for use of fuel j in vehicle i (kg/kWh) i = off-road vehicle type j = fuel type

자료: IPCC(2006), p. 3.33-3.35.

항만의 하역장비의 탄소 배출량 산정 사례를 살펴보면, 국립환경과학원(2019a)⁴⁰⁾, 국립환경과학원(2019b)⁴¹⁾, 해양수산부(2018)⁴²⁾ 등도 Tier 3 수준의 상향식 방법론(Bottom-up Approach)을 활용하였으며, 현장조사, 문헌 등을 통해 데이터를 수집하였다. 다만, 현재 국내에는 하역장비 부문에 권고하거나 공식적으로 지정한 배출량 산정 방식은 없는 실정이며, 하역장비를 대상으로 활용 가능한 배출계수와 장비에 적용되는 통일된 스펙 자료가 부재하여, 대부분의 연구에서는 해외 선행연구에 활용된 배출계수를 적용하였다. 유럽환경청(EEA)⁴³⁾에서 연식, 유종, 출력 등에 따라 제

40) 국립환경과학원(2019a)

41) 국립환경과학원(2019b)

42) 해양수산부(2018)

시된 오염물질별 배출계수가 대표적이며, 엔진 부하율 자료 역시 미국 대기환경청(EPA)⁴⁴⁾에서 제시한 하역장비별 부하율 자료를 적용함을 알 수 있다(〈표 3-8〉 및 〈표 3-9〉 참조). 따라서 본 장에서 수행하는 탄소 배출량 산정에는 기본적으로 2022년 기준으로 10년간 전국 항만의 부두(터미널)를 대상으로 조사된 연도별 장비 종류 및 대수, 사용 연료 종류, 연간 가동 시간 및 사용연료량 등의 데이터를 활용한다. 또한, 그 외 국내에서 개발된 데이터가 없는 부하율, 배출계수는 선행연구에서 활용한 해외 자료를 조사된 장비와 매칭하여 적용하고자 한다.

자료를 살펴보면, 컨테이너의 경우 장비별 가동시간 및 출력 정보가 수집되어 Tier 3를 적용할 수 있을 것으로 확인되며, 일부 장비는 가동시간과 출력 정보 대신 장비의 총 유류와 전기 사용량에 대한 정보가 수집되어 Tier 2 방식으로 배출량을 산출한 후 전체 물동량에 대한 총 배출량을 구할 계획이다. 또한 특정 연도의 장비 정보가 누락된 경우에는 동일한 동력원과 장비유형별 타 장비의 정보를 평균하여 추정하여 분석에 사용하였다. 반면, 비컨테이너는 조사를 완료한 집단이 적고, 조사된 정보 역시 투입장비 종류가 부두별로 상당한 차이를 보이고 있어 특정 부두의 물동량을 처리하는데 100% 해당 장비가 투입되었다고 판단하기 어려운 점이 있다. 또한 대체적으로 컨테이너와 같이 선석, 야드, 배후 보관시설 등의 구분과 투입 장비가 명확하지 않으며, 하역사가 지점과 분점을 통해 부두(혹은 선석 단위)를 운영하고 있는 경우가 많아 부두 별 물동량에 매칭되는 투입 장비와 유류 및 전기 사용량을 산정하기 쉽지 않다. 이는 비컨테이너 부두의 운영특성에서 비롯된 것이며, 부두별 하역장비에 대한 정확한 정보를 얻는데는 한계가 있음을 의미한다. 따라서 조사된 정보를 최대한 활용하여 컨테이너와 동일한 방식으로 산정하였다.

43) EEA(2017), p. 38-39.

44) EPA(2009), p. 4-7-4-8.

〈표 3-8〉 항만 하역장비의 배출량 산정 주요 변수

장비 종류	출력(HP)	평균 연식 (년)	평균 가동시간(hr)	내용 연수 (년)	부하율(%)
Car loader	150	20	500	16	0.51
Chassis rotator	156	21	1,102	16	0.51
Compressor	26	11	607	16	0.51
Crane	274	9	534	24	0.43
Empty container handler	247	7	1,864	16	0.59
Excavator	312	12	1,909	16	0.57
Forklift	127	10	1,029	16	0.3
Gantry crane	453	5	2,641	24	0.43
Generator	141	13	692	16	0.59
Light tower	4	1	57	16	0.51
Manlift	68	7	273	16	0.3
Nonroad vehicle	210	12	659	12	0.65
Rail pusher	214	8	962	16	0.51
Reach stacker	274	5	2,810	16	0.3
Roller	103	13	297	16	0.51
Side Handler	184	6	1,228	16	0.59
Skid Steer Loader	85	8	679	16	0.55
Specialized bulk handler	245	11	1,001	16	0.59
Sweeper	109	7	644	16	0.68
Top handler	282	7	1,955	16	0.59
Tractor	131	11	553	16	0.57
Welder	52	15	155	16	0.51
Yard tractor	206	5	1,861	12	0.65

주: 미국 주요 항만을 대상으로 조사된 평균값임
 자료: EPA(2009), p. 4-7-4-8.

〈표 3-9〉 경유사용 장비에 대한 출력별 탄소(Co) 배출계수(g/kWh)

엔진출력(kW)	연식수준	배출계수	엔진출력(kW)	연식수준	배출계수
p<8	<1981	7.00	56≤P<75	Stage II	2.20
	1981-1990	6.00		Stage III A	2.20
	1991-Stage I	5.00		Stage III B	2.20
	Stage V	4.80		Stage IV	2.20
8≤P<19	<1981	7.00	75≤P<130	Stage V	2.20
	1981-1990	6.00		<1981	5.00
	1991-Stage I	5.00		1981-1990	4.30
	Stage V	3.96		1991-Stage I	3.50
19≤P<37	<1981	6.50	130≤P<560	Stage I	1.50
	1981-1990	5.50		Stage II	1.50
	1991-Stage I	4.50		Stage III A	1.50
	Stage II	2.20		Stage III B	1.50
	Stage IIIA	2.20		Stage IV	1.50
	Stage V	2.20		Stage V	1.50
37≤P<56	<1981	6.00	P>560	<1981	2.50
	1981-1990	5.30		1981-1990	2.50
	1991-Stage I	4.50		1991-Stage I	2.50
	Stage II	2.20		Stage I	1.50
	Stage III A	2.20		Stage II	1.50
	Stage III B	2.20		Stage III A	1.50
	Stage V	2.20		Stage III B	1.50
56≤P<75	<1981	6.00		Stage IV	1.50
	1981-1990	5.30		Stage V	1.50
	1991-Stage I	4.50		Stage V	1.50
	Stage I	2.20			

주: 국립환경과학원(2019a)에 따르면, Stage I-II는 1996~2006년, Stage III는 2007~2014년, Stage IV는 2015~2018년, Stage V는 2019년 이후 도입된 장비로 설명하고 있음
 자료: EEA(2017), pp. 38-39.

조사 자료를 바탕으로 컨테이너와 비컨테이너로 구분하여 IPCC 가이드라인에 따라 Tier 3 방식으로 연도별 장비의 탄소 배출량을 산정하였다. 자료조사는 2012년부터 수집되었고, 탄소 배출량은 해당 시점부터 산정하였으며, LNG는 부산항 일부 컨테이너 터미널에 한해 2017년부터 야드 트랙터의 개조작업이 이루어졌기 때문에 2017년부터 수집된 자료를 바탕으로 배출량을 산정하였다. 산출방식은 아래 [식 3-1]과 같으며, 배출계수는 EEA(2017), 부하율은 EPA(2009)를 참고하였다. 장비의 연식은 선행연구의 평균 연식을 따른다고 가정하였으며, 대체적으로 Stage I 또는 II에 분포하고 있어, 해당 배출계수를 적용하였다.

$$E = \sum_{ij} (N_{ij} * H_{ij} * P_{ij} * LF_{ij} * EF_{ij}) * 10^{-6} \quad \dots\dots\dots [\text{식 3-1}]$$

E = 탄소 배출량(ton)
 N_{ij} = 장비대수
 H_{ij} = 장비 i 의 연간 가동시간(h)
 P_{ij} = 장비 i 의 출력(kW)
 LF_{ij} = 장비 i 의 부하율(0~1 사이값)
 EF_{ij} = 연료 j 에 대한 장비 i 의 배출계수(g/kWh)
 i = 장비 유형
 j = 연료 유형

선행연구에서 현재까지 개발한 각 장비의 출력별 배출계수는 탄소(Co)에 한정되어 있으며, 본 연구에서 산정하고자 하는 온실가스인 이산화탄소(CO₂)의 배출계수는 탄소의 배출계수에 이산화탄소 변환계수인 44/12를 곱하여 산출하였다. 과거 선행연구에서 Tier 3를 활용하여 항만장비 탄소 배출량을 산정한 사례는 대기오염물질 중 하나로 탄소(CO)에 대한 배출량을 다루었다. 현재까지 Tier 3를 적용하여 항만장비의 엔진출력별 이산화탄소 배출량 산정한 사례는 없으며, 이는 개발된 배출계수가 없기 때문이다. 다만, 강무홍 외(2020)는 선행연구를 종합하여 선박 엔진별 이산화탄

소 배출량을 산정하기 위해 Corbett, Hwang, & Winebrake(2009) 및 Chang, Song, & Roh(2013)과 같이 탄소-이산화탄소 변환계수인 44/12를 활용하였으며, 본 연구에서도 이를 차용하였다.

한편, 부득이하게 장비의 출력과 가동시간 자료가 부재한 경우는 조사된 장비의 연간 유류 사용량에 Tier 2 방식을 적용하여 탄소 배출량을 산정하였다. 그밖에 전기와 LNG는 Tier 3를 적용하기 위한 공식적인 출력별 배출계수가 부재하며, 특정 장비에 매칭하여 LNG와 전기 사용량을 파악하기 어려운 점을 고려하여 Tier 1 방식을 활용하였다. Tier 1 및 Tier 2를 계산하기 위해서는 국가고유 배출계수가 필요하기 때문에, 이는 「에너지법 시행규칙」 및 ‘국가 온실가스 배출량 종합정보시스템⁴⁵⁾’에 명시된 배출계수 및 산정방식을 활용하였으며, 수식은 <표 3-10>과 같다.

<표 3-10> 각 배출원별 이산화탄소 배출량 산정방식

구분	산정방식	순발열량	배출계수
액체 연료 (경유)	온실가스 배출량(tCO ₂ eq) = $\Sigma[\text{액체 화석연료사용량}(\ell) \times \text{순발열량}(\text{MJ}/\ell) \times \text{배출계수}(\text{kgGHG}(\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})/\text{TJ}) \times 10^{-9} \times \text{지구온난화지수}]$	35.2 MJ/L	74,100 (kgGHG/TJ)
기체 연료 (LNG)	온실가스 배출량(tCO ₂ eq) = $\Sigma[\text{기체 화석연료사용량}(\text{Nm}^3 \text{ 또는 kg}) \times \text{순발열량}(\text{MJ}/\text{Nm}^3 \text{ 또는 kg}) \times \text{배출계수}(\text{kgGHG}(\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})/\text{TJ}) \times 10^{-9} \times \text{지구온난화지수}]$	49.4 MJ/kg	56,100 (kgGHG/TJ)
전기	온실가스 배출량(tCO ₂ eq) = $\Sigma[\text{전력사용량}(\text{MWh}) \times \text{배출계수}(\text{tGHG}(\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O})/\text{MWh}) \times \text{지구온난화지수}]$	-	0.4567 (tGHG/MWh)

자료: 국가 온실가스 배출량 종합정보시스템(검색일: 2022.8.25.); 공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침 [별표 4] 바탕으로 저자 재작성

45) 국가온실가스 배출량 종합정보시스템(검색일: 2022.8.25.)

2) 배출량 산정 결과

(1) 항만별

전체적으로 연도별 물동량이 증가함에 따라 탄소 배출량도 연동하여 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 대부분의 자료가 수집된 부산항은 전체 조사된 15개 터미널에서 2021년 기준 연간 18만 6,855톤의 탄소배출이 발생했으며, 과거 10년간 탄소 배출량은 꾸준히 증가하였다. 다만, <표 3-11>과 <표 3-12>는 조사된 부두(터미널)의 자료에 대한 절대적 탄소 배출량을 나타내는 것으로, 각 항만의 전체 탄소 배출량을 대변한다고 보기는 어렵다. 따라서 화물 단위당 배출량을 비교하여 전체 화물량에 대해 추정하는 것이 바람직하다. <표 3-13>과 같이, 컨테이너의 경우 군산항, 부산항이 10년 평균 1TEU 당 각각 21.523kg, 7.476kg을 배출하여 비교적 높은 수치를 보였다. <표 3-14>와 같이 비컨테이너도 부산항과 군산항이 1톤을 처리하는데 각각 0.781kg, 0.944kg이 배출됨을 알 수 있다. 단위당 배출량은 연도에 따라 증감이 발생하지 않는다.

<표 3-11> 컨테이너의 전체 탄소 배출량(tCO₂)

연도	군산항	부산항	여수·광양항	인천항	평택·당진항
2012	529.6	87,552.2	3,064.4	4,583.2	207.5
2013	386.6	94,178.8	3,529.8	4,725.4	209.5
2014	350.8	96,237.0	3,695.2	4,968.3	235.0
2015	390.1	100,810.0	3,635.2	5,019.4	253.4
2016	426.2	109,158.6	3,771.4	5,350.9	294.4
2017	451.3	140,344.1	3,585.6	5,616.5	360.7
2018	535.1	158,336.8	3,912.2	5,553.9	445.9
2019	613.4	169,342.6	5,437.5	4,663.9	414.7
2020	636.3	169,810.0	3,610.2	4,916.9	414.0
2021	551.2	186,855.5	3,876.4	4,809.6	497.0

주: 조사된 34개 자료 중 15개 컨테이너 터미널을 대상으로 산정한 이산화탄소 배출량임
자료: 저자 작성

〈표 3-12〉 비컨테이너의 전체 탄소 배출량(tCO₂)

연도	군산항	보령항	부산항	울산항	인천항	평택·당진항
2012	-	-	-	572.7	1,425.8	8,513.8
2013	-	-	-	1,384.2	1,453.6	9,352.0
2014	-	-	-	1,302.5	1,329.0	10,171.9
2015	-	2.2	-	1,318.0	1,617.0	10,648.2
2016	-	127.4	860.7	1,152.7	1,713.2	11,525.5
2017	4,273.8	168.0	824.6	983.6	1,487.6	11,389.8
2018	4,446.0	191.5	1,884.7	914.6	1,467.3	11,354.6
2019	4,863.9	160.2	4,229.2	1,021.4	2,376.0	11,529.4
2020	4,697.8	138.9	3,401.9	1,016.1	2,072.9	11,609.8
2021	4,832.3	136.4	3,672.9	1,067.9	2,260.2	12,097.2

주: 조사된 34개 자료 중 19개 비컨테이너 부두를 대상으로 산정한 이산화탄소 배출량임

자료: 저자 작성

〈표 3-13〉 컨테이너의 단위 탄소 배출량(kgCO₂/TEU)

연도	군산항	부산항	여수·광양항	인천항	평택·당진항	평균
2012	13.979	7.889	4.481	6.091	1.052	6.699
2013	31.800	7.492	4.688	5.492	0.931	10.081
2014	23.116	7.064	4.792	5.030	0.995	8.199
2015	26.759	6.988	4.971	4.824	1.040	8.916
2016	20.991	7.616	4.375	4.146	1.128	7.651
2017	14.426	6.855	4.061	3.212	1.271	5.965
2018	14.683	7.327	4.410	3.256	1.342	6.204
2019	20.727	7.666	6.667	2.724	1.292	7.815
2020	22.216	7.718	4.908	2.660	1.278	7.756
2021	26.536	8.143	4.682	2.577	1.305	8.649
평균	21.523	7.476	4.804	4.001	1.163	7.793

주: 조사된 34개 자료 중 15개 컨테이너 터미널을 대상으로 조사된 물동량에 대해 기 산정한 배출량을 반영

자료: 저자 작성

〈표 3-14〉 비컨테이너의 단위 탄소 배출량(kgCO₂/톤)

연도	군산항	보령항	부산항	울산항	인천항	평택·당진항	평균
2012	-	-	-	0.146	0.431	0.254	0.277
2013	-	-	-	0.211	0.418	0.259	0.296
2014	-	-	-	0.200	0.424	0.265	0.296
2015	-	0.011	-	0.172	0.458	0.263	0.226
2016	-	0.011	1.127	0.192	0.451	0.265	0.409
2017	1.198	0.010	0.952	0.165	0.447	0.248	0.503
2018	0.686	0.013	0.615	0.192	0.539	0.253	0.383
2019	0.721	0.012	1.192	0.219	0.147	0.256	0.425
2020	0.650	0.010	0.758	0.218	0.148	0.262	0.341
2021	0.651	0.011	1.021	0.209	0.145	0.272	0.385
평균	0.781	0.011	0.944	0.192	0.361	0.260	0.354

주: 조사된 34개 자료 중 19개 비컨테이너 부두를 대상으로 조사된 물동량에 대해 기 산정한 배출량을 반영
자료: 저자 작성

항만의 연료별 단위 탄소 배출량을 살펴보면, 컨테이너 및 비컨테이너 모두 전기에 따른 배출량이 높게 나타났다(〈표 3-15〉 및 〈표 3-16〉 참조). 컨테이너의 경우, 군산항을 제외하면 유류는 항만별로 유사하나, 전기 사용량은 상당한 차이를 보이고 있다. 다만 인천항과 군산항의 경우, 단위당 배출량이 높게 나타남을 알 수 있는데, 일부 트랜스퍼크레인, 리치스태커 등 경유 장비 사용이 많은 데서 비롯되었다.

배출량 수준의 적정성은 선행연구를 통해 원단위 배출량(kg/TEU 또는 kg/Ton)으로 검증해 볼 수 있다. 대부분의 선행연구는 유류 및 전기 사용량을 추정 해당 배출계수를 곱하여 산정한 연구가 대부분이며, 이 경우 적게는 2.2kg/TEU에서 많게는 30.37kg/TEU 수준으로 파악하였다.⁴⁶⁾ 본 연구에서 제시된 컨테이너 터미널의 배출량은 평균 7.8kg/TEU로 선행연구

46) 대표적 선행연구인 Julián, Barbara, & Jose(2019), Muhammad, Muhammad, & Simon(2019), 김가현 외(2021), Muhammad et al(2021)을 대상으로 파악된 수치이다.

대비 낮은 수준이다. 본 연구 대비 선행연구의 경우는 실제 전기 및 유류 사용량이 아닌 점⁴⁷⁾, 국가마다 배출계수가 상이한 점⁴⁸⁾, 포함된 장비 또는 시설 범위⁴⁹⁾ 및 터미널 규모⁵⁰⁾ 등이 다르기 때문에 상당한 차이를 보이고 있다. 또한 선행연구에서는 Tier 3를 활용한 이산화탄소 배출량을 추정한 연구가 부재한 점을 고려할 때, 선행연구의 절대적인 수치를 직접 비교하는 데는 한계가 있을 것으로 예상된다.

〈표 3-15〉 컨테이너의 연료별 단위 탄소 배출량(kgCO₂/TEU)

구분	군산항		부산항			여수·광양항		인천항		평택·당진항	
	유류	전기	LNG	유류	전기	유류	전기	유류	전기	유류	전기
2012	5.93	8.05	-	0.17	7.72	0.12	4.36	3.86	2.24	0.15	0.90
2013	8.21	23.59	-	0.13	7.36	0.11	4.57	3.32	2.17	0.13	0.80
2014	4.21	18.91	-	0.14	6.93	0.12	4.68	2.92	2.11	0.14	0.85
2015	5.71	21.05	-	0.18	6.81	0.12	4.85	2.79	2.03	0.13	0.91
2016	5.57	15.42	0.30	0.16	7.16	0.12	4.26	2.44	1.70	0.13	1.00
2017	4.48	9.94	0.37	0.15	6.34	0.13	3.93	1.76	1.45	0.14	1.13
2018	4.42	10.26	0.63	0.14	6.56	0.17	4.24	1.77	1.48	0.14	1.20

선행연구	Julián, Barbara, & Jose(2019)	Muhammad, Muhammad, & Simon(2019)	Muhammad et al(2021)		Duin & Geerlings(2011)			
	발렌시아항 NCTV	인도네시아 벨라완항	인도네시아 2개 터미널	인도네시아 2개 터미널	ECT Delta	AMP	UNI PORT	BCT
배출량 원단위 (kgCO ₂ /TEU)	11.58	11.27	16.4 (수직)	18.7 (수평)	24.21	30.37	27.84	2.2

- 47) 대표적으로 제시된 선행연구는 대부분의 연구는 모델링 또는 표준화된 투입장비를 통해 배출량을 추정하였다.
- 48) 예를 들어, Muhammad, Muhammad, & Simon(2019)는 인도네시아 벨라완항의 BICT를 대상으로 배출량을 추정하였고, 여기에 사용된 전기 배출계수는 인도네시아 국가 고유 배출계수인 0.832kg/kWh를 적용, 우리나라 전기 고유배출계수는 0.4567t/MWh(kg/kWh로 환산하면 동일)를 적용하였다. 또한 Julián, Barbara, & Jose(2011)는 0.335를 사용하였다.
- 49) Julián, Barbara, & Jose(2019)의 배출량 산정에서는 전기 대비 유류로 기인하는 배출량이 2.5배 이상 높게 나타나고 있는데, 이는 유류기반의 RTG 장비를 사용하고 있기 때문(RTG가 유류배출량의 63% 이상을 차지), 전기 사용량 역시 하역장비 뿐 아니라 터미널 조명, 사무실, 리퍼컨테이너 시설에 대한 사용 까지 포함하는 등 범위가 상이하기 때문이다.
- 50) Duin & Geerlings 외(2011)는 로테르담항의 9개 터미널을 대상으로 이산화탄소 배출량의 원단위를 추정하였으며, 터미널 특성, 규모 등에 따라 상당한 차이가 있음을 도출하였다.

구분	군산항		부산항			여수·광양항		인천항		평택·당진항	
	유류	전기	LNG	유류	전기	유류	전기	유류	전기	유류	전기
2019	4.95	15.78	0.88	0.12	6.66	0.15	6.52	1.18	1.55	0.13	1.16
2020	4.71	17.51	0.93	0.11	6.68	0.13	4.77	1.42	1.24	0.13	1.15
2021	5.79	20.74	0.95	0.11	7.08	0.14	4.55	1.30	1.28	0.13	1.18
평균	5.40	16.13	0.41	0.14	6.93	0.13	4.67	2.28	1.73	0.14	1.03

주: 조사된 34개 자료 중 15개 컨테이너 터미널을 대상으로 조사된 물동량에 대해 기 산정한 배출량을 반영
자료: 저자 작성

〈표 3-16〉 비컨테이너의 연료별 단위 탄소 배출량(kgCO₂/TEU)

구분	군산항		보령항		부산항		울산항		인천항		평택·당진항	
	유류	전기	유류	전기	유류	전기	유류	전기	유류	전기	유류	전기
2012	.	.	.	.	.	.	0.000	0.146	0.003	0.428	0.008	0.246
2013	.	.	.	.	.	.	0.108	0.103	0.003	0.415	0.011	0.248
2014	.	.	.	.	.	.	0.105	0.094	0.003	0.421	0.010	0.254
2015	.	.	0.008	0.003	.	.	0.086	0.087	0.003	0.455	0.011	0.252
2016	.	.	0.009	0.001	0.531	0.595	0.082	0.110	0.002	0.449	0.012	0.254
2017	0.054	1.144	0.008	0.002	0.426	0.526	0.054	0.110	0.003	0.445	0.011	0.237
2018	0.032	0.654	0.009	0.004	0.463	0.152	0.057	0.135	0.003	0.536	0.011	0.243
2019	0.025	0.696	0.009	0.003	0.315	0.878	0.089	0.130	0.008	0.139	0.010	0.247
2020	0.022	0.629	0.008	0.002	0.118	0.640	0.077	0.141	0.008	0.140	0.009	0.253
2021	0.019	0.632	0.008	0.003	0.214	0.807	0.082	0.127	0.007	0.138	0.010	0.262
평균	0.030	0.751	0.008	0.003	0.344	0.600	0.074	0.118	0.004	0.357	0.010	0.249

주: 조사된 34개 자료 중 19개 비컨테이너 부두를 대상으로 조사된 물동량에 대해 기 산정한 배출량을 반영
자료: 저자 작성

(2) 품목별

품목별 부두의 단위당 탄소 배출량을 파악하기 위해 품목별 부두를 구분할 필요가 있다. 컨테이너와 같이 전용부두는 한 가지 품목만 처리되므로 품목별 부두를 구분하고 배출량을 산정하기 용이하다. 그러나 비컨 중 양곡, 석탄 및 철광석, 유류 등 일부 품목을 제외하면 전용부두가 아닌 잡화

부두, 일반부두, 다목적부두 등에서 혼재되어 선적 및 하역작업이 이루어지고 있다. 그러므로 특정화물을 전용부두로 구분하여 원단위를 구하는 것에 무리가 있으므로 잡화 또는 다목적(컨테이너 하역 포함) 품목으로 원단위를 구하는 것이 바람직하다고 판단하였다. 실제로 조사된 결과를 살펴보면, 양곡, 석탄, 철광석, 컨테이너를 제외하면 대부분의 부두에서는 액체화물, 코일, 철재류, 목재, 양곡 등 다양한 화물을 처리하고 있으며, 화물별 하역장비를 구분하지 않았다. 또한 품목별 연도별 처리량의 비중도 다양하게 나타나므로 부두별 주요품목을 결정하기 어렵다. 따라서 잡화 등으로 통칭하여 원단위를 산출하고자 한다.⁵¹⁾

〈표 3-17〉 및 〈표 3-18〉과 같이 컨테이너 및 양곡을 처리하는 부두가 타 품목 대비 단위당 배출량이 높게 나타나고 있다. 이는 타 품목에 비해 양곡이나 컨테이너 터미널이 실제 전기로 구동되는 장비를 많이 보유하고 있어 전기 사용량이 높기 때문이다. 품목별 단위배출량의 또 다른 특징은 컨테이너의 경우 과거 대비 유류의 단위당 배출량이 점차 감소한다. 점차 전기 또는 LNG 등의 동력원을 이용한 장비로 전환이 진행됨에 따라 유류에서 발생하는 탄소 배출량이 물동량에 비례하여 크게 늘어나지 않았기 때문이라고 추정한다.

석탄, 철광석, 양곡 등의 산화물은 타 품목 대비 유류 사용에 의한 배출량은 미미하게 나타나고 있는데, 이는 대부분의 하역장비가 전기로 구동되는 경우가 많고, 선박에서 쇠로더 등과 컨베이어를 통해 배후 보관 및 작업장까지 이동하는 단순한 프로세스 때문이라고 판단한다. 특히 석탄, 철광석 등의 중량화물은 물동량이 다른 화물에 비해 많아 톤당 배출량이 비교적 낮게 도출되는 것으로 보인다.

51) 품목 중 유류(액체석유화학) 및 자동차는 주요품목에 포함되어 있으나, 자료수집이 이루어지지 않아 원단위를 산출하기 어려워 분석에서 제외하였다.

반면, 컨테이너 및 잡화의 유류 사용으로 인해 상대적으로 탄소 배출량이 높다. 이는 유류를 동력원으로 하는 장비 사용량이 높기 때문이며, 특히 잡화를 처리하는 부두는 타 부두대비 전기에 의한 배출량이 적기 때문에 대부분 유류 사용 장비에서 발생하는 현상이다. 한편, 컨테이너 외 타 품목에서는 연도, 연료별 큰 특징이 확인되지 않았다.

〈표 3-17〉 연료별 품목별 단위 배출량(1)

연도	컨테이너(kgCO ₂ /TEU)			양곡(kgCO ₂ /톤)	
	LNG	유류	전기	유류	전기
2012	-	0.398	7.115	0.032	1.025
2013	-	0.330	6.814	0.030	1.054
2014	-	0.315	6.432	0.024	1.081
2015	-	0.348	6.343	0.023	1.125
2016	0.259	0.337	6.501	0.021	1.101
2017	0.323	0.274	5.823	0.040	1.108
2018	0.551	0.261	6.057	0.040	1.105
2019	0.780	0.203	6.246	0.026	1.143
2020	0.819	0.218	6.157	0.025	1.113
2021	0.838	0.200	6.510	0.023	1.089
평균	0.357	0.288	6.400	0.029	1.094

자료: 저자 작성

〈표 3-18〉 연료별 품목별 단위 배출량(2)

연도	다목적(kgCO ₂ /톤)		잡화(kgCO ₂ /톤)		석탄, 철광석 등(kgCO ₂ /톤)	
	유류	전기	유류	전기	유류	전기
2012	0.001	0.305	0.023	0.146	0.001	0.215
2013	0.001	0.330	0.096	0.107	0.001	0.211
2014	0.001	0.336	0.096	0.113	0.001	0.210
2015	0.001	0.337	0.087	0.105	0.001	0.212
2016	0.127	0.418	0.086	0.124	0.003	0.161

연도	다목적(kgCO ₂ /톤)		잡화(kgCO ₂ /톤)		석탄, 철광석 등(kgCO ₂ /톤)	
	유류	전기	유류	전기	유류	전기
2017	0.123	0.421	0.055	0.109	0.004	0.144
2018	0.293	0.269	0.048	0.106	0.004	0.151
2019	0.266	0.518	0.033	0.075	0.004	0.154
2020	0.099	0.328	0.031	0.082	0.003	0.153
2021	0.160	0.446	0.034	0.080	0.003	0.154
평균	0.107	0.371	0.059	0.105	0.003	0.176

자료: 저자 작성

3) 배출량 전망

도출된 TEU와 톤 단위당 배출량을 2040년까지 물동량 전망치에 대입하여 전체 항만의 배출량을 전망하였다. 과거 10년간 전체 배출량의 증감에 따라 총 배출량을 전망할 수 있다. 그러나 연도별 단위당 물동량에 큰 차이를 보이지 않으며, 처리 물동량이 증가함에 따라 배출량 증가에 영향을 주기 때문에 단위당 배출량을 먼저 산정하여 물동량 전망치에 대입하는 것이 바람직하다고 판단하였다. 2040년까지 물동량 전망치는 「제4차 전국무역항 기본계획」에 고시된 자료를 활용하였으며, 2050년 물동량은 현재까지 공식적으로 공개된 자료가 없기 때문에, 2040년 물동량 전망치를 바탕으로 2030년-2040년의 연평균증가율을 적용하여 품목별 2050년의 물동량을 예측하여 활용하였다. 또한 유사한 하역작업으로 인해 원단위가 유사하게 도출될 수 있는 품목을 종류별로 구분하여 동일한 원단위를 적용한다.

실질제 선행연구에서 살펴보면 해양수산부(2013)는 품목별 하역장비를 크게 컨테이너, 석탄, 고철, 원목, 양곡으로 구분하였고, 국립환경과학원(2019a)은 컨테이너, 일반부두, 산화물, 유류와 케미칼 등 네 가지로 나누어 부두 특성을 구분하였다. 본 연구에서 최근 조사된 부두별 처리 물동량을 파악하면, 석탄, 양곡을 제외하고, 원목, 고철 등을 전용으로 처리하는

부두보다는 주로 다목적부두와 일반부두 등에서 혼재하여 처리하는 경우가 많다. 따라서 선행연구와 본 조사에 파악된 부두별 처리화물과 장비유형, 품목별 원단위 등을 전체적으로 고려하여, 컨테이너, 양곡, 철광석 등, 잡화 등, 유류 다섯 가지로 구분하고 품목별 각 항만에 대해 배출량을 산출하였다.

〈표 3-19〉 배출량 전망을 위한 물동량 예측치(전국 기준)

품목	품목					포함 품목
	2020	2025	2030	2040	2050	
컨테이너 (천 TEU)	29,101	34,819	39,728	49,042	60,539	컨테이너
양곡 (천 톤)	17,102	16,248	16,220	16,024	15,830	양곡
철광석 등 (천 톤)	295,927	346,211	337,442	344,265	351,225	석탄, 철광석, 기타 광석, 시멘트
잡화 등 (천 톤)	198,156	223,753	229,651	236,244	243,025	모래, 목재, 고철, 철재, 자동차, 잡화
유류 (천 톤)	488,301	577,886	618,529	716,202	829,298	유류, 화공생산물

주: 예측보고서에 구분된 14개 품목을 대상으로 함

자료: 한국해양수산개발원 수요예측센터(2021) 바탕으로 저자 재작성

(1) 컨테이너

컨테이너의 경우 <표 3-20>과 같이, 전국 컨테이너 항만에서는 2050년 42만 6천 톤, 즉 2020년 이산화탄소 배출량을 기준으로 할 때 이산화탄소가 두 배 이상 배출될 것으로 전망한다. 전기를 동력원으로 하는 대형장비들이 많이 사용됨에 따라 전기에서 기인한 간접배출량이 압도적으로 높다. 향후 유류를 동력원으로 하는 장비를 전기로 교체할 경우, 직접적으로는 2050년까지 4천 톤 이상의 배출량을 감축할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이는 전국 컨테이너 터미널의 2050년 배출량(11.6만 톤)의 5%에도 미치지 못하는 수준이다. 또한 유류장비를 교체하더라도 전력사용량 증가로 이어져 간접배출량을 높일 수밖에 없다. 따라서 컨테이너터미널에서의 전기 사용은 불가피할 것으로 보이나, 김가현 외(2021)의 연구에서는 컨테이너터미널의 유형별로 탄소 배출량 원단위가 다름을 증명한다. 또한 재래식 또는 반자동화보다 완전자동화 터미널의 배출량 원단위가 적고, 온실가스 배출량 저감 효과도 있음을 언급하고 있다.⁵²⁾

52) 본 연구의 이산화탄소 배출량 산정은 실제 부산항의 터미널을 비자동, 반자동으로 구분하고, 각 유형별 투입되는 장비의 평균 대수, 선행연구에서 제시한 장비별 에너지 사용량, 국내 온실가스 배출계수 등을 활용하여 산정하였다.(완전자동화터미널의 장비는 해외 주요항만의 장비 현황자료를 활용) 이를 종합하여 연간 195만 TEU를 처리하는 컨테이너 터미널을 기준으로 하여, 안벽-이송-야드 작업에서 투입되는 장비를 대상으로 원단위(TEU당 배출량)를 산정하였다. 자세한 원단위 및 효과는 아래 표와 같다.

유형	영역별 배출량 원단위(tCO2/TEU)			배출량 합계		저감 효과
	안벽	이송	장차장	원단위	195만 TEU	
비자동 (수평)	0.0058 (싱글 트롤리)	0.0053 (유류식YT)	0.0055 (유류식 RTG)	0.0166	32,308	-
반자동 (수평)	0.0058 (싱글 트롤리)	0.0053 (유류식YT)	0.0029 (전기식 ARMGC) 켄털레버타입	0.0140	27,238	16%(비→반)
완전자동 (수직)	0.0055 (듀얼 트롤리)	0.0019 (전기식AGV)	0.0035 (전기식 ARMGC) 라멘 타입	0.0109	21,278	22%(반→완) 34%(비→완)

〈표 3-20〉 컨테이너 이산화탄소 배출량 전망(tCO₂)

구분	기준 (합계)	전기			유류			LNG			합계		
	2020	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
부산항	153,750	192,363	237,249	292,609	8,656	10,676	13,167	10,730	13,234	16,322	211,749	261,159	322,099
인천항	23,048	27,814	35,072	44,223	1,252	1,578	1,990	1,551	1,956	2,467	30,617	38,606	48,680
광양항	15,208	18,828	22,948	27,970	847	1,033	1,259	1,050	1,280	1,560	20,726	25,261	30,788
평택·당진항	5,584	6,904	8,679	10,910	311	391	491	385	484	609	7,600	9,554	12,010
울산항	3,774	4,340	5,262	6,379	195	237	287	242	293	356	4,778	5,792	7,021
포항항	765	961	1,183	1,457	43	53	66	54	66	81	1,058	1,303	1,604
대산항	849	851	1,035	1,258	38	47	57	47	58	70	937	1,139	1,385
목포항	4	8	10	12	0	0	1	0	1	1	9	11	13
동해·묵호항	552	575	581	588	26	26	26	32	32	33	633	640	647
그 외 항만	1,478	1,617	1,849	2,042	73	83	92	90	103	114	1,780	2,035	2,248
전국	205,013	254,260	313,867	387,448	11,442	14,124	17,435	14,183	17,508	21,612	279,885	345,499	426,496

자료: 저자 작성

즉, 수동(재래식) 터미널을 반자동화로 전환할 경우 16%, 반자동화에서 완전자동화 형태로 전환하면 22%, 수동터미널에서 완전자동화로 전환될 경우 34%의 이산화탄소 배출량 저감이 가능하다고 하였다. 이에 따라 향후 부산항, 광양항, 인천신항에 신규 개장하는 터미널은 완전자동화 터미널로 운영된다는 점을 고려하여 해당 터미널에서 처리되는 물동량은 배출량이 저감이 가능하다는 가정 하에 이산화탄소 배출량을 재산정하였다. 부산항, 광양항, 인천항 모두 현재 평균적으로 반자동화⁵³⁾로 운영되고 있으므로 김가현 외(2021)에서 제시한 바와 같이 반자동화에서 완전자동화로 전환될 경우 22% 저감율을 적용하였으며, 실제 처리물동량은 각 터미널 하역능력의 100%를 처리한다고 가정하였다. 또한 개장(운영)연도를 고려하여 2030년, 2040년의 배출량에 반영하였다.

〈표 3-21〉 완전자동화 터미널 개장 개발 규모

구분		개발 규모	하역능력	운영시기
부산항	부산항 신항 2-5단계	4천 TEU급x3선석(1,050m)	355만 TEU	2029년
	부산항 신항 2-6단계	4천 TEU급x2선석(700m)		
	진해신항 1-1단계	8천 TEU급x3선석(1,390m)	267만 TEU	2032년
	진해신항 1-2단계	8천 TEU급x3선석(1,200m)	267만 TEU	
	진해신항 1-3단계	8천 TEU급x3선석(1,250m)	267만 TEU	
광양항 3-2단계		1,300m	136만 TEU	2027년
인천 신항 1-2단계		4천 TEU급x3선석(1,050m)	138만 TEU	2026년

주: 1) 모든 개장되는 터미널은 완전자동화터미널로 운영 가정

2) 진해신항 2단계는 개발이 예상되나, 개장시기 및 하역능력 미정으로 제외

자료: 해양수산부(2020a), 해양수산부(2020b), 해양수산부(2020c) 바탕으로 저자 재작성

53) 여기서 의미하는 반자동화는 안벽은 싱글트롤리, 야드는 수평배치 및 전기식 ARMGC 형태, 이송장비는 유류동력원의 YT를 사용함을 의미한다. 부산항을 포함하여, 인천항의 경우에도 비장화로 운영되는 터미널이 있지만, 반자동화로 운영된다고 가정하였다. 이는 배출량 저감을 재산정할 때 보수적으로 계산이 가능하기도 하다.

재산정 결과, 부산항은 2030년에서 2050년까지 9,640톤, 10,468톤 (2040년, 2050년 동일) 감축이 가능하며, 해당 감축량은 각각 전체 배출량의 4.6%, 4.0%, 3.2%를 차지한다. 광양항과 인천항 역시 완전자동화터미널로 개장할 경우 2030년부터 2,108톤, 2,139톤의 이산화탄소 배출량을 저감할 수 있으며, 이는 전체 배출량의 10.2%(광양항, 2030년 기준), 7.0%(인천항, 2030년 기준)에 해당한다(〈표 3-22〉 참조).

〈표 3-22〉 완전자동화터미널 개장을 반영한 이산화탄소 배출량 저감 예측

구분	부산항			광양항			인천항		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
장래 총 물동량	30,057	37,070	45,720	2,942	3,586	4,370	4,346	5,480	6,910
총 배출량 (a)	211,749	261,159	322,099	20,726	25,261	30,788	30,617	38,606	48,680
완전자동화 터미널 처 리 물동량	6,220	6,754	6,754	1,360	1,360	1,360	1,380	1,380	1,380
저감된 배출량(b)	43,820	47,582	47,582	9,581	9,581	9,581	9,722	9,722	9,722
22%저감 량(c)	9,640	10,468	10,468	2,108	2,108	2,108	2,139	2,139	2,139
저감 시 배출량 (d=b-c)	34,180	37,114	37,114	7,473	7,473	7,473	7,583	7,583	7,583
총 배출량 재산정 (e=a-d)	177,570	224,045	284,985	13,253	17,788	23,315	23,034	31,023	41,097
저감율 (f=c/a)	4.6%	4.0%	3.2%	10.2%	8.3%	6.8%	7.0%	5.5%	4.4%

주: 완전자동화 터미널에서 처리되는 물량에 대해 컨테이너 원단위 적용하여 배출된 저감량을 산정
자료: 저자 작성

(2) 양곡

양곡의 경우, 선박에서 쉼로더 및 컨베이어를 통해 배후 사일로로 저장하는 시스템이므로 전기 사용량이 높으며, 전국평균 97.4%의 배출량이 전기에서 비롯된다. 특히 인천항과 평택·당진항에서 많은 물량을 처리하기 때문에 절대적인 배출량이 높게 나타난다. 다만 2050년까지 양곡 물량이 소폭 감소할 것으로 보여 배출량 역시 점차 감소할 것으로 전망된다.

〈표 3-23〉 양곡 이산화탄소 배출량 전망(tCO₂)

구분	기준 (합계)	전기			유류			합계		
	2020	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
부산항	1,436	1,441	1,415	1,389	38	38	37	1,479	1,452	1,426
인천항	6,337	6,110	5,990	5,872	162	159	156	6,272	6,149	6,028
광양항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
평택·당진항	4,171	3,700	3,667	3,635	98	97	96	3,798	3,764	3,731
울산항	1,770	1,603	1,594	1,585	42	42	42	1,646	1,636	1,627
포항항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
대산항	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
목포항	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-
동해·묵호항	453	195	196	196	5	5	5	201	201	201
그 외 항만	5,019	4,696	4,669	4,642	124	124	123	4,820	4,793	4,766
전국	19,205	17,745	17,530	17,318	470	465	459	18,215	17,995	17,777

자료: 저자 작성

(3) 철광석 등

철광석, 석탄, 기타 광석, 시멘트 등의 벌크형태의 화물은 쉼로더를 통해 배후 작업장 및 야적장에 보관되는 프로세스를 가진다. 전국적으로 톤 단위 기준 물동량이 상당히 높아 배출량이 많이 나올 것으로 예상되지만, 배출 원단위가 가장 낮기 때문에 실제 유류나 잡화 등의 화물보다 전체 배출

량은 높지 않다. 광양항, 포항항의 제철소 등에서 철광석 등의 화물 처리가 많이 발생하므로 해당 항만의 배출량이 높음을 알 수 있다. 그 외 보령, 태안 등에 입지하는 발전소에서 석탄 처리량이 많고, 옥계항, 삼척항 등에서는 시멘트 처리량이 많아 해당 항만의 이산화탄소 배출량이 높게 도출되고 있다. 하역장비가 전기로 구동되는 쉼로더, 컨베이어 벨트 등을 이용하기 때문에 배출원은 98% 이상이 전기사용으로 발생하고 있다.

〈표 3-24〉 철광석 등 이산화탄소 배출량 전망(tCO₂)

구분	기준 (합계)	전기			유류			합계		
	2020	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
부산항	381	439	456	474	7	8	8	447	464	482
인천항	3,760	4,329	3,650	3,078	74	62	52	4,403	3,712	3,130
광양항	13,703	15,794	16,594	17,435	269	283	297	16,063	16,877	17,732
평택·당진항	6,227	7,176	7,650	8,156	122	130	139	7,298	7,781	8,295
울산항	1,548	1,730	1,872	2,026	29	32	35	1,760	1,904	2,061
포항항	8,132	9,113	9,635	10,187	155	164	174	9,268	9,799	10,361
대산항	2,175	1,666	1,666	1,666	28	28	28	1,694	1,694	1,694
목포항	5,234	6,854	7,020	7,190	117	120	123	6,971	7,140	7,312
동해·목호항	296	318	331	344	5	6	6	323	336	350
그 외 항만	11,516	11,970	11,716	11,467	204	200	195	12,174	11,915	11,662
전국	52,971	59,390	60,591	61,816	1,012	1,033	1,054	60,402	61,623	62,869

자료: 저자 작성

(4) 잡화 등

잡화 등의 항목에는 품목 구분 중 컨테이너, 양곡, 철광석, 석탄 등을 제외한 품목 전체에 대해 동일한 원단위를 적용하였다. 여기에서 분류된 화물은 철재, 목재, 고철, 자동차 등의 화물을 포함하였다.

우선 잡화, 철재 등의 처리량이 많은 인천항, 광양항, 평택·당진항, 울산항 등에서 배출량이 높게 발생하고 있다. 해당 품목들은 형태가 동일하지 않고, 품목에 따라 하역방식과 투입장비가 다르지만, 주로 유류를 동력원으로 하는 크레인, 스킵로더, 지게차 등의 장비를 활용한다는 측면에서는 유사한 하역방식이다. 특히, 디젤엔진 기반의 장비 활용 빈도가 높아 전기와 유류에서 배출량이 유사한 비율(59%:41%)로 도출되고 있다. 이는 다른 화물과는 구별되는 특징이라 할 수 있으므로 해당 품목들의 탄소 배출량 감축을 위해서는 유류장비를 전기로 전환하는 방안을 고려해 볼 수 있다. 최근에는 선적·양하 작업에 사용되는 하버크레인 등도 전기를 사용하는 장비가 투입하고 있으나 선적작업 일부분에 해당하며, 여전히 이송 및 야드에서 작업은 재래식으로 운영되는 경우가 많다.

〈표 3-25〉 잡화 등 이산화탄소 배출량 전망(tCO₂)

구분	기준 (합계)	전기			유류			합계		
	2020	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
부산항	3,061	2,432	2,494	2,559	848	870	882	3,280	3,364	3,451
인천항	7,633	6,107	6,132	6,156	2,130	2,138	2,147	8,237	8,270	8,303
광양항	8,390	7,288	7,457	7,630	2,541	2,600	2,661	9,829	10,057	10,290
평택·당진항	9,592	8,442	9,002	9,599	2,944	3,139	3,347	11,386	12,141	12,946
울산항	6,010	5,024	4,981	4,939	1,752	1,737	1,723	6,776	6,719	6,662
포항항	3,539	3,047	3,245	3,457	1,062	1,132	1,206	4,109	4,377	4,663
대산항	61	151	156	162	53	54	56	204	211	218
목포항	265	524	529	535	183	185	186	706	714	721
동해·묵호항	6,116	5,026	4,968	4,910	1,753	1,732	1,712	6,779	6,700	6,622
그 외 항만	18,943	16,618	17,261	17,930	5,795	6,020	6,253	22,413	23,281	24,183
전국	63,608	54,657	56,226	57,840	19,061	19,608	20,171	73,718	75,834	78,011

자료: 저자 작성

(5) 유류

물동량 품목 구분 중 유류에 해당되는 품목은 유류와 화학공업생산물으로 구분할 수 있다. 유류는 조사된 자료가 없어 유류부두에 대한 원단위는 산출이 불가능하다. 유류부두는 일반적으로 야드 활용 또는 이송작업이 수반되지 않고 부두에서 로딩암으로 배후 저장시설 또는 작업장으로 이송되므로, 특별한 하역장비가 요구되지 않는다. 따라서 철광석 등의 품목과 동일한 원단위(가장 낮은 원단위)를 적용하여 물동량에 대한 전망치를 산출하였다. 그 결과, 전기에 의한 배출량이 대부분을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 유류의 경우 원유의 수입 물량이 많아 전체적으로 물동량(톤 기준) 전망치도 높게 도출되어 하역작업이 단순함에도 불구하고 컨테이너 다음으로 배출량이 높게 도출되었다. 특히 울산항의 경우 원유 및 석유화학제품 처리량으로 인해 배출량이 압도적으로 높다. 유류의 경우, 다수의 선행연구에서도 하역장비에 의한 배출량을 산출하지 않으며, 실제 로딩암 등의 하역기기가 항만의 하역장비로 판단하는데 논란의 여지가 있을 수 있다. 따라서 향후 개선된 방식의 배출량 산정이 필요할 것으로 판단된다.

〈표 3-26〉 집화 등 이산화탄소 배출량 전망(tCO₂)

구분	기준 (합계)	전기				유류			합계		
	2020	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050	
부산항	1,379	1,247	1,236	1,225	21	21	21	1,268	1,257	1,246	
인천항	9,154	9,975	11,313	12,831	170	193	219	10,145	11,506	13,049	
광양항	24,431	28,298	31,072	34,118	482	530	582	28,781	31,602	34,699	
평택·당진항	4,739	6,550	8,125	10,078	112	138	172	6,662	8,263	10,250	
울산항	27,274	39,675	46,428	54,330	676	791	926	40,351	47,219	55,256	
포항항	53	46	45	43	1	1	1	46	45	44	
대산항	12,676	15,305	17,968	21,094	261	306	360	15,566	18,274	21,453	
목포항	166	172	181	191	3	3	3	175	184	194	
동해·묵호항	238	217	212	208	4	4	4	221	216	211	
그 외 항만	7,297	7,376	9,472	12,164	126	161	207	7,502	9,634	12,372	
전국	87,406	108,861	126,051	145,956	1,856	2,149	2,488	110,717	128,200	148,444	

자료: 저자 작성

(6) 배출량 전망 종합정리

전국 예측물동량을 기준으로 배출량을 산정하고 원단위를 도출하였으며, 이를 통해 전국 주요 항만에 대해 부두의 하역특성별로 구분하여 2050년까지 배출량을 전망하였다. 전국 항만에 대해 탄소 배출량을 산정한 결과, 전체 화물은 2030년에는 42.8만 톤, 2040년 54.2만 톤, 2050년 62.9만 톤이 배출될 것으로 전망된다. 품목별 배출량을 살펴보면, 2030년을 기준으로 컨테이너 화물에 대한 배출량이 전체 배출량의 51.6%로 가장 높은 비중을 차지하고 있고, 그 뒤 유류(20.4%), 잡화 등(13.6%), 철광석 등(11.1%), 양곡(3.4%) 순으로 나타났다. 이산화탄소 배출량은 2050년까지 컨테이너에서 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 그 비율은 점차 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 컨테이너 터미널을 기준으로 배출량 감축이 집중적으로 이루어져야 할 것으로 보인다.

〈표 3-27〉 전국 물동량 기준 이산화탄소 배출량(tCO₂)

품목	2020	2030	2040	2050	비중(%)		연평균 증가율	
					2030	2050	'20-'30	'30-'40
컨테이너	205,013	279,885	345,499	426,496	51.6	58.1	3.2%	2.1%
유류	87,406	110,717	128,200	148,444	20.4	20.2	-0.5%	-0.1%
양곡	19,205	18,215	17,995	17,777	3.4	2.4	1.3%	0.2%
철광석 등	52,971	60,402	61,623	62,869	11.1	8.6	1.5%	0.3%
잡화 등	63,608	73,718	75,834	78,011	13.6	10.6	2.4%	1.5%
합계	428,203	542,937	629,152	733,598	100	100	2.4%	1.4%

주: 2040년-2050년의 연평균 증가율은 2030년-2040년과 동일함

자료: 저자 작성

한편, 부산항, 광양항, 인천항에서 일부 컨테이너 터미널이 완전자동화터미널로 개장될 경우에 저감되는 이산화탄소 배출량을 적용한 전망 결과는 〈표 3-28〉과 같다. 대부분의 완전자동화 터미널은 2030년까지 개장-운영될

예정이므로 <표 3-27>에서 도출한 배출량 전망치와 비교해서 2020~2030년 이산화탄소 배출량 증감율이 낮아지고 전체 배출량에서 차지하는 비중이 낮아짐을 알 수 있다(기존 51.6%→47.9%, 2030년 기준). 완전자동화터미널 도입으로 감축될 수 있는 배출량은 전국 항만의 컨테이너 품목에 대해 5.0%(2030년 기준), 3.5%(2050년 기준) 수준이고, 전국 항만의 전체 품목의 경우 약 2.6%(2030년 기준), 2.01%(2050년 기준)으로 크지 않다. 이는 향후 개장될 완전자동화 터미널의 일부에만 한정되며, 하역능력 비중(여기서는 물동량 비율과 동일하다고 가정)이 전체 물동량 대비 크지 않기 때문이다. 그러나 향후 기존 컨테이너 터미널의 전기 장비 교체, 완전자동화로 개조 등이 진행된다면, 감축량은 증가할 것으로 전망한다.

<표 3-28> 완전자동화터미널 감축량 반영 시 전국 물동량 기준 이산화탄소 배출량(tCO₂)

품목	2020	2030	2040	2050	비중(%)		연평균 증가율	
					2030	2050	'20-'30	'30-'40
컨테이너	205,013	265,998	330,784	411,781	47.9	50.3	2.64%	2.20%
유류	87,406	110,717	128,200	148,444	20.4	20.9	2.39%	1.48%
양곡	19,205	18,215	17,995	17,777	4.5	3.4	-0.53%	-0.12%
철광석 등	52,971	60,402	61,623	62,869	12.4	11.4	1.32%	0.20%
잡화 등	63,608	73,718	75,834	78,011	14.9	13.9	1.49%	0.28%
합계	428,203	529,050	614,436	718,882	100.0	100.0	2.14%	1.51%
비중(1)	100%	97.4%	97.7%	98.0%	전국 항만의 전체 품목 배출량 대비			
비중(2)	100%	95.0%	95.7%	96.5%	전국 항만의 컨테이너 품목 배출량 대비			

주: 2040년~2050년의 연평균 증가율은 2030년~2040년과 동일함

자료: 저자 작성

저감 배출량 산정 시 유류와 전기에 대한 상세 배출 감축비율은 제시되지 않아 동력원별 감축량을 개별적으로 산출하기는 어려웠다. 그러나 완전 자동화터미널은 대부분의 시설 및 장비 운영이 전기로 구동되는 점을 감안할 때, 전기에 대한 비율이 높을 것이라고 추정이 가능하며, 전기에 대한 간접배출량 감축이 중요하게 작용할 것으로 판단한다.

본 장의 물동량을 기준으로 원단위를 산출하여 전망하였기 때문에, 물동량이 높을수록 탄소 배출량이 많이 발생한다. 또한 컨테이너, 잡화 등 다수의 하역장비가 투입되고, 항만구역 내에서 하역작업 단계별 복잡하게 이루어지는 품목의 부두일수록 탄소 배출량이 높음을 알 수 있다. 이러한 부두는 유류에 의한 탄소 배출량도 비교적 높으나, 그렇지 않은 품목 부두의 탄소 배출량은 대부분 전기에서 비롯한다. 따라서 품목별 배출량 결과와 같이(유류 제외), 컨테이너 터미널의 유류사용 장비 전환, 에너지원 전환으로 전기 간접배출량 감축 등을 통해 배출량을 감축할 수 있다.

잡화 등의 처리 부두에서는 먼저 장비 전환을 통한 유류에서 기인하는 이산화탄소 배출량 감축이 이루어져야 할 것으로 보인다. 잡화 등을 처리하는 부두에는 선척작업에 투입되는 하버크레인, 쇠로더 등의 장비도 전기로 구동하는 시설을 사용한다. 또한 현재 투입되는 유류장비 역시 내용연수가 초과할 경우 전기 및 친환경 연료를 사용하는 장비로 교체가 이루어질 수 있다. 이러한 점을 감안할 때 장기적으로는 비컨테이너 부분에서도 전기사용에 의한 간접배출량이 증가할 것으로 예상되며, 이에 대한 감축 방향을 마련해야 한다.

3. 선박에 의한 배출량 산정 및 전망

1) 방법론

본 연구에서는 선박에 의해 발생하는 배기가스 배출량 산정을 위해 AIS(Automated Identification System) 데이터를 사용했다. AIS는 선박의 위치 정보를 알려주는 시스템으로, 1998년 국제해사기구(IMO: International Maritime Organization) 해사안전위원회에서 관련 표준을 채택한 후, 2002년 7월부터 총톤수 300톤 이상의 신조선에 장착이 의무화되었다.⁵⁴⁾ AIS를 기반으로 선박들의 이동 상태를 분석함으로써 항만관제 업무 및 충돌과 같은 사고를 방지하는 데 활용되고 있으며⁵⁵⁾, 최근에는 선박들이 사용하고 있는 연료량과 이에 따른 배기가스 배출량을 분석하는 연구에 많이 활용되고 있다.⁵⁶⁾

AIS 데이터는 선박 제원처럼 변경이 드문 정적 정보, 목적지, 도착예정 시간 등 운항과 관련한 항해 정보, 마지막으로 선박의 현재 위치 및 상태를 나타내는 위·경도, 속도 등을 담은 동적 정보 등 총 세 가지로 구성되어 있다.⁵⁷⁾ 본 연구에서는 VesselsValue의 AIS 데이터를 사용했으며, 2021년 기준으로 컨테이너선은 4,969척(31.6백만 건), 벌크선은 11,579척(114.5백만 건), 유조선은 10,881척(68.6백만 건)의 데이터를 분석했다.

AIS 동적 정보는 짧게는 2초에서 길게는 3분 주기로 전송하는 것으로 규정되어 있으나 VesselsValue, IHS Markit 등의 AIS 데이터 판매자들은 미수신을 및 데이터 오류 필터링 등의 한계로 인해 약 1시간 주기의 데이터만을 제공하고 있었다. 이로 인해 각 지점 사이가 멀어져 연료사용량이

54) 해양수산부(2016), p. 3.

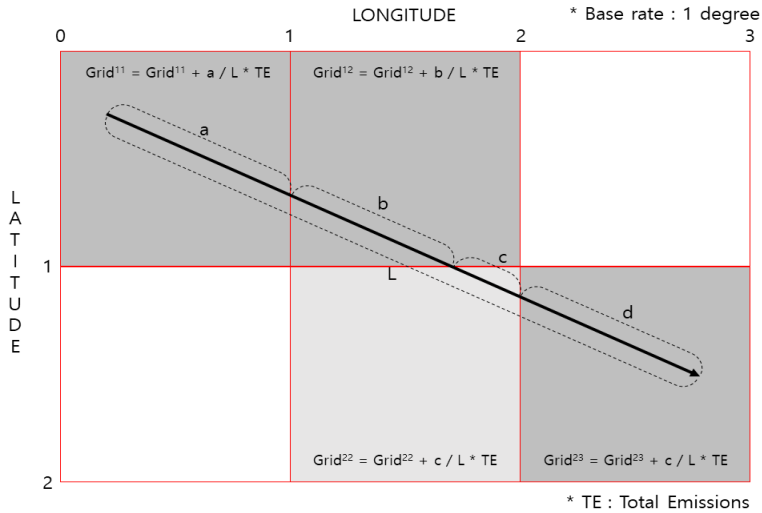
55) 강무홍 외(2020), p. 20.

56) 강무홍 외, 위의 책, p. 10.

57) 강무홍 외, 위의 책, p. 21.

계산되지 않는 구간이 발생한다는 문제점이 있으며, 강무홍 외(2020)의 연구에서는 이를 해결하기 위해 <그림 3-9>와 같이 각 지점을 연결하여 격자무늬(Grid) 형태의 지역에 지나는 거리 비율만큼 배분하는 새로운 모형을 개발했다⁵⁸⁾.

<그림 3-8> 연료소모량 지역 배분 방식(위경도 1도)



자료: 강무홍 외(2020), p. 35.

동 연구에서는 연료소모량 계산을 위해 Corbett *et al.*(2009) 등이 적용한 식을 사용했다. 이 식은 지점 i 부터 j 까지 k 선박이 이동하면서 사용한 연료량을 계산하는 식으로, k 선박의 주엔진 하루 연료사용량(MF_k)과 보조엔진 하루 연료사용량(AF_k)에 실제 이동거리(D_{ij})를 이동속도(S_{1k})로 나눈 값을 곱하여 계산하며, 주엔진 하루 연료사용량에는 엔진부하를 계산하여 적용하기 위해 이동속도(S_{1k})를 설계속도(S_{0k})로 나눈 값의 세제곱 값을 곱하는 식이다.⁵⁹⁾

58) 강무홍 외, 앞의 책, p. 31.

59) 강무홍 외, 위의 책, p. 32.

$$F_{ijk} = [MF_k (\frac{S_{1k}}{S_{0k}})^3 + AF_k] \frac{D_{ij}}{24 S_{1k}} \dots\dots\dots [\text{식 3-2}]$$

본 연구에서는 동 연구의 모형과 식을 사용하여 선박이 우리나라 주요 항만에
서 사용하고 있는 연료량을 추정했으며, CO₂의 배출량의 경우는 Corbett *et al.*(2009) 및 Chang *et al.*(2013)의 연구에서 사용한 것처럼 86.45%로 정의된
연료의 탄소 배출계수와 탄소-이산화탄소 변환 계수인 44/12를 곱해 계산했다.⁶⁰⁾

2) 탄소 배출량 산정 결과

본 연구에서는 부산항, 인천항, 광양항 등 총 9개 항만의 선박 연료사용
량과 탄소 배출량을 계산했으며, 이를 컨테이너선, 벌크선, 유조선 등 선박
유형별로 구분하여 분석하였다. 9개 항만의 항계는 항만법 시행령 별표1
(항만의 구분, 명칭, 위치 및 구역)에 있는 항계 정보를 이용했으며, 미포항
과 묵호항은 별도의 항계로 계산하여 각각 울산항과 동해항에 포함하여 계
산하였다.

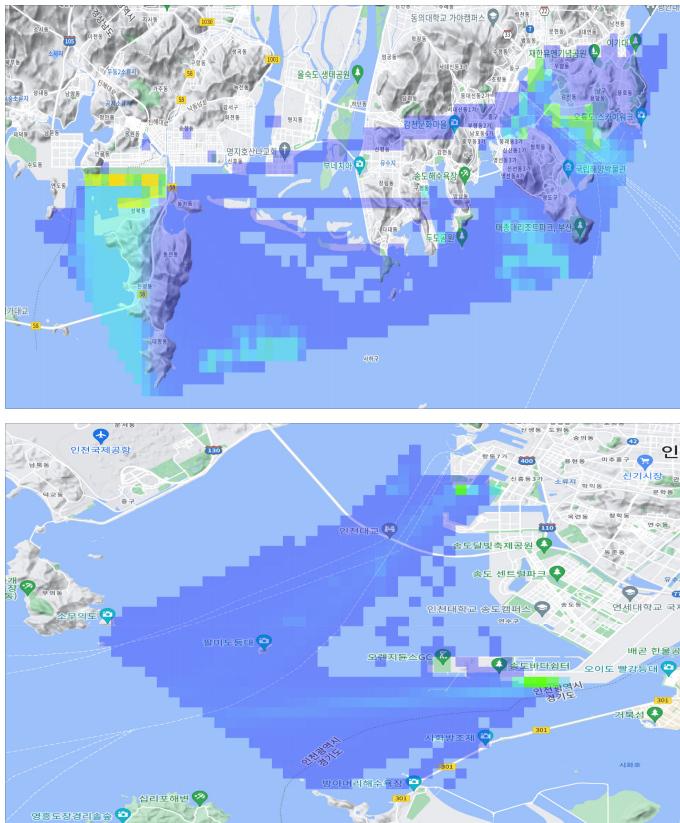
(1) 컨테이너선

컨테이너선은 총 4,969척(2021년 기준)의 선박을 대상으로 분석했다.
가장 많은 컨테이너선이 입출항하고 있는 부산항 내에서는 2019년부터
연평균 9.55%씩 증가해 2021년 기준 18.7만 톤의 연료가 사용된 것으로
분석되었으며, 이로 인해 59.3만 톤의 이산화탄소가 발생한 것으로 추정
하였다. 인천항 또한 연평균 4.5만 톤 이상의 이산화탄소를 배출하고 있으
며, 광양항도 연평균 7만여 톤을 배출하는 것으로 분석되었다. 특히 광양
항의 경우 2019년에는 인천항과 비슷한 수준으로 배출되었으나 2021년

60) 강무홍 외, 앞의 책, p. 60.

79% 증가하여 부산항 다음으로 많은 배기가스가 배출된 것으로 분석되었다. 이는 아래 <그림 3-10>과 같이 2020년부터 주요 터미널에 선박들의 정박시간이 증가한 이유도 있지만, 오리엔트조선에서의 선박 수리 등으로 인한 울춘부두(<그림 3-10> 좌상단)로의 이동이 많아졌기 때문이다⁶¹⁾.

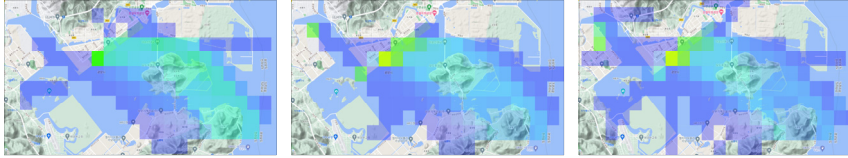
<그림 3-9> 주요 항만별 컨테이너선 연료사용량 비교



주: (상) 부산항, (하) 인천항
자료: 저자 작성

61) 여수·광양항만공사 전문가 인터뷰(인터뷰일: 2022.10.10.)

〈그림 3-10〉 광양항 구역별 컨테이너선 연료사용량 비교



주: (좌) 2019년, (중) 2020년, (우) 2021년
자료: 저자 작성

〈표 3-29〉 주요 항만별 컨테이너선 연료소모량 및 이산화탄소 배출량

(단위: 톤)

구분	연료소모량			이산화탄소 배출량			연평균 증가율
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	
부산항	155,979.3	178,710.6	187,193.7	494,428.0	566,482.3	593,372.2	9.55%
인천항	13,728.6	15,196.2	14,364.0	43,517.5	48,169.4	45,531.4	2.29%
광양항	13,543.6	27,737.9	24,221.3	42,930.8	87,924.4	76,777.3	33.73%
평택·당진항	2,340.7	3,177.0	3,602.7	7,419.6	10,070.6	11,420.0	24.06%
울산·미포항	6,556.7	15,643.3	6,323.7	20,783.6	49,586.6	20,045.1	-1.79%
포항항	232.6	188.9	721.8	737.2	598.9	2,287.9	76.16%
대산항	878.7	1,165.3	787.1	2,785.4	3,693.8	2,495.0	-5.36%
동해·목호항	-	-	-	-	-	-	-
목포항	127.4	2,628.9	125.1	403.8	8,333.0	396.7	-0.88%

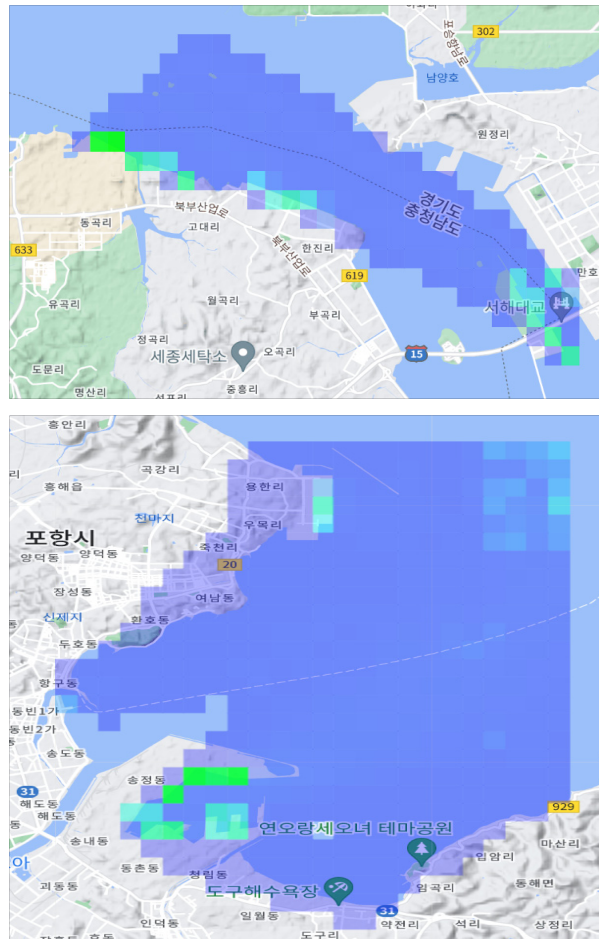
자료: 저자 작성

(2) 벌크선

전 세계적으로 벌크선은 총 11,579척을 운항하고 있는 것으로 조사되었으며, 2021년 기준 광양항이 3.7만 톤의 이산화탄소를 배출하고 있어 가장 많은 벌크선 기인 배기가스를 배출하고 있는 것으로 조사되었다. 다음으로는 평택·당진항, 인천항, 포항항 순이었으며, 이 중 포항항은 2019년 0.7만 톤 대비 2021년 3배 이상 증가하여 2.4만 톤을 배출한 것으로 조사되었다. 광양항은 주로 포항제철부두에서 많은 이산화탄소가 배출되

고 있는 것으로 확인되었고, 평택·당진항은 현대제철부두(송악부두)에서 많이 배출되고 있었다. 그리고 인천항은 잡화, 철재, 양곡 등의 화물을 많이 처리하고 있는 내항에서, 포항항은 포항신항에서 많은 배기가스를 배출하고 있었다.

〈그림 3-11〉 주요 항만별 벌크선 연료사용량 비교



주: (상) 평택·당진항, (하) 포항항
자료: 저자 작성

〈표 3-30〉 주요 항만별 벌크선 연료소모량 및 이산화탄소 배출량

(단위: 톤)

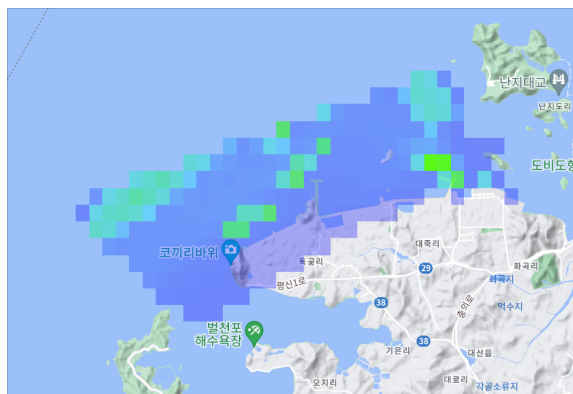
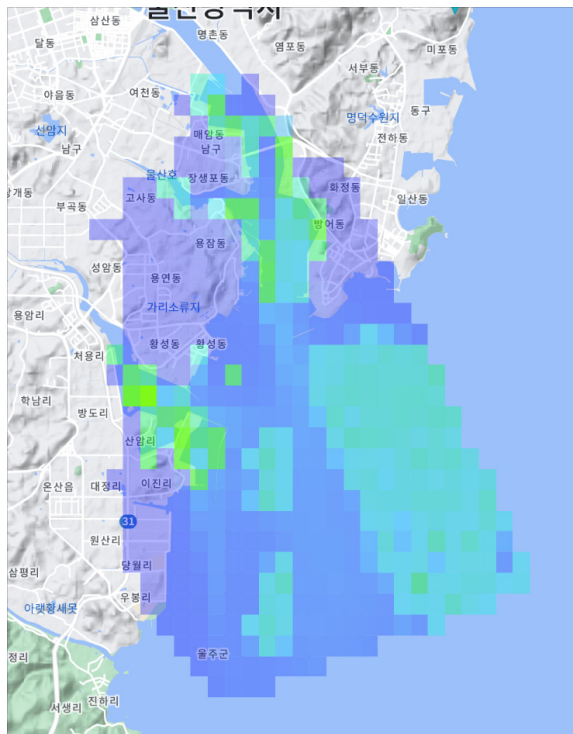
구분	연료소모량			이산화탄소 배출량			연평균 증가율
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	
부산항	1,922.8	4,022.0	3,620.9	6,095.0	12,749.2	11,477.7	37.23%
인천항	6,565.7	6,668.1	6,390.1	20,812.2	21,136.6	20,255.4	-1.35%
광양항	10,048.5	10,393.1	11,825.5	31,852.0	32,944.3	37,484.7	8.48%
평택·당진항	6,800.5	6,600.4	6,738.7	21,556.4	20,922.1	21,360.5	-0.46%
울산·미포항	5,129.1	6,689.1	5,927.4	16,258.3	21,203.4	18,788.9	7.50%
포항항	2,125.3	1,945.3	7,712.2	6,736.9	6,166.3	24,446.3	90.49%
대산항	103.7	115.2	293.7	328.7	365.2	931.0	68.30%
동해·묵호항	3,670.2	4,525.7	4,957.0	11,634.0	14,345.7	15,712.9	16.22%
목포항	629.5	570.2	488.1	1,995.3	1,807.5	1,547.1	-11.94%

자료: 저자 작성

(3) 유조선

마지막으로 유조선은 전 세계적으로 10,881척을 운항하고 있는 것으로 조사되었으며, 2021년을 기준으로 울산·미포항에서 가장 많은 31.7만 톤의 이산화탄소를 배출하고 있는 것으로 확인하였다. 다음으로는 광양항, 대산항, 부산항 순이었으며, 네 개의 항만 모두 유류를 포함한 액체화물을 처리하는 부두에서 가장 많은 연료를 사용하고 이로 인해 이산화탄소 배출이 많은 것으로 분석하였다.

〈그림 3-12〉 주요 항만별 유조선 연료사용량 비교



주: (상) 울산·미포항, (하) 대산항
자료: 저자 작성

〈표 3-31〉 주요 항만별 유조선 연료소모량 및 이산화탄소 배출량

(단위: 톤)

구분	연료소모량			이산화탄소 배출량			연평균 증가율
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	
부산항	13,074.4	16,475.4	15,160.6	41,443.5	52,224.3	48,056.4	7.68%
인천항	12,482.9	12,023.0	8,696.8	39,568.6	38,111.0	27,567.3	-16.53%
광양항	25,758.1	25,129.0	26,455.6	81,648.8	79,654.6	83,859.8	1.34%
평택·당진항	3,261.9	5,250.9	6,457.6	10,339.8	16,644.6	20,469.6	40.70%
울산·미포항	94,094.1	101,759.8	99,894.4	298,262.4	322,561.3	316,648.4	3.04%
포항항	117.3	137.7	693.8	372.0	436.5	2,199.1	143.15%
대산항	19,734.7	25,482.9	29,887.2	62,555.6	80,776.5	94,737.4	23.06%
동해·목호항	113.6	135.1	122.2	360.1	428.1	387.5	3.73%
목포항	13,556.4	3,601.8	3,654.9	42,971.4	11,416.9	11,585.3	-48.08%

자료: 저자 작성

3) 배출량 전망

선박 기인 이산화탄소 배출량 전망은 항만 작업에 따른 배출량 전망과 같이 물동량 증가와 비례한다고 가정했으며, 2040년까지는 「제4차 전국 무역항 기본계획」에 고시한 물동량 전망치를, 2050년까지는 공시된 자료가 없으므로 2030년부터 2040년까지의 연평균증가율을 그대로 적용하였다. 〈표 3-34〉와 같이 기준연도는 2020년이며, 이를 기반으로 2025년, 2030년, 2040년, 2050년의 물동량 증가율을 배출량에 곱해 연도별 이산화탄소 배출량을 추정하였다.

〈표 3-32〉 주요 항만별 물동량 예측

구분	품목	실적	예측			
		2020	2025	2030	2040	2050
부산항	컨테이너(천 TEU)	21,824	26,286	30,057	37,070	45,720
	벌크(천 톤)	12,944	40,021	14,030	14,367	14,712
	유류(천 톤)	7,703	7,128	7,084	7,022	6,961
인천항	컨테이너(천 TEU)	3,272	3,788	4,346	5,480	6,910
	벌크(천 톤)	53,008	59,328	59,447	54,718	50,365
	유류(천 톤)	51,139	55,646	56,677	64,279	72,901
광양항	컨테이너(천 TEU)	2,159	2,612	2,942	3,586	4,370
	벌크(천 톤)	102,838	121,060	122,080	127,319	132,783
	유류(천 톤)	136,488	154,183	160,785	176,545	193,850
평택·당진항	컨테이너(천 TEU)	793	943	1,079	1,356	1,705
	벌크(천 톤)	68,871	77,090	80,531	85,308	90,368
	유류(천 톤)	26,473	36,986	37,218	46,164	57,260
울산·미포항	컨테이너(천 TEU)	536	612	678	822	997
	벌크(천 톤)	28,947	31,903	32,405	33,025	33,657
	유류(천 톤)	152,368	200,157	225,425	263,793	308,691
포항항	컨테이너(천 TEU)	109	134	150	185	228
	벌크(천 톤)	56,451	61,886	64,577	68,380	72,407
	유류(천 톤)	294	262	259	253	247
대산항	컨테이너(천 TEU)	121	120	133	162	197
	벌크(천 톤)	12,342	14,523	10,099	10,121	10,143
	유류(천 톤)	70,813	79,307	86,960	102,089	119,850
동해·묵호항	컨테이너(천 TEU)	1	1	1	2	2
	벌크(천 톤)	30,082	38,603	41,147	42,111	43,098
	유류(천 톤)	927	949	977	1,030	1,086
목포항	컨테이너(천 TEU)	78	89	90	91	92
	벌크(천 톤)	21,108	22,798	23,103	22,930	22,758
	유류(천 톤)	1,328	1,249	1,233	1,206	1,180

자료: 한국해양수산개발원(2021)을 바탕으로 저자 재작성

(1) 컨테이너선

컨테이너선 물동량은 2050년에는 2020년 대비 약 2배 수준이 될 것으로 예상되고 있으며, 이산화탄소 배출량 또한 함께 증가할 것으로 보인다. 이산화탄소 감축 노력 없이 선박을 운항한다면, 2050년 부산항의 이산화탄소 배출량은 100만 톤이 넘을 것으로 예상하고 있으며, 인천항, 광양항, 평택·당진항 등 다른 항만도 2배 이상 이산화탄소 배출이 증가할 것으로 보여 이에 대한 대책 마련이 필요하다.

〈표 3-33〉 주요 항만별 컨테이너선 이산화탄소 배출량 전망

(단위: 톤)

구분	기준	이산화탄소 배출량 전망			
	2020	2025	2030	2040	2050
부산항	566,482.3 (1.00)	679,778.8 (1.2)	781,745.6 (1.38)	963,019.9 (1.7)	1,183,948.1 (2.09)
인천항	48,169.4 (1.00)	55,876.5 (1.16)	64,065.3 (1.33)	80,924.5 (1.68)	101,637.4 (2.11)
광양항	87,924.4 (1.00)	106,388.5 (1.21)	119,577.1 (1.36)	145,954.4 (1.66)	177,607.2 (2.02)
평택·당진항	10,070.6 (1.00)	11,984.1 (1.19)	13,696.1 (1.36)	17,220.8 (1.71)	21,651.9 (2.15)
울산·미포항	49,586.6 (1.00)	56,528.7 (1.14)	62,974.9 (1.27)	75,867.4 (1.53)	92,231.0 (1.86)
포항항	598.9 (1.00)	736.6 (1.23)	826.4 (1.38)	1,018 (1.7)	1,257.6 (2.1)
대산항	3,693.8 (1.00)	3,656.8 (0.99)	4,063.1 (1.1)	4,949.6 (1.34)	6,020.8 (1.63)
동해·묵호항	-				
목포항	8,333.0 (1.00)	9,499.6 (1.14)	9,583 (1.15)	9,666.3 (1.16)	9,749.6 (1.17)
합계	774,858.9 (1.00)	924,449.6 (1.19)	1,056,531.5 (1.36)	1,298,620.9 (1.68)	1,594,103.6 (2.06)

자료: 저자 작성

(2) 벌크선

벌크선의 예측 결과를 컨테이너선과 비교하였을 때 2050년 물동량의 수치는 높지 않을 것으로 예상된다. 9개 항만의 2020년 이산화탄소 배출량은 13.2만 톤으로 추정하고 있으며, 2050년에는 21% 증가한 16.0만 톤이 될 것으로 예상된다. 특히 광양항이나 평택·당진항, 포항항, 동해·묵호항 등 4개 항만만 30% 전후로 증가할 것이며, 인천항과 대산항의 배출량은 오히려 감소할 것으로 전망하고 있다.

〈표 3-34〉 주요 항만별 벌크선 이산화탄소 배출량 전망

(단위: 톤)

구분	기준	이산화탄소 배출량 전망			
	2020	2025	2030	2040	2050
부산항	12,749.2 (1.00)	39,395.1 (3.09)	13,769.1 (1.08)	14,151.6 (1.11)	14,534.1 (1.14)
인천항	21,136.6 (1.00)	23,673 (1.12)	23,673 (1.12)	21,770.7 (1.03)	20,079.8 (0.95)
광양항	32,944.3 (1.00)	38,874.2 (1.18)	39,203.7 (1.19)	40,850.9 (1.24)	42,498.1 (1.29)
평택·당진항	20,922.1 (1.00)	23,432.8 (1.12)	24,478.9 (1.17)	25,943.4 (1.24)	27,408.0 (1.31)
울산·미포항	21,203.4 (1.00)	23,323.7 (1.1)	23,747.8 (1.12)	24,171.9 (1.14)	24,595.9 (1.16)
포항항	6,166.3 (1.00)	6,782.9 (1.1)	7,029.6 (1.14)	7,461.2 (1.21)	7,892.9 (1.28)
대산항	365.2 (1.00)	431.0 (1.18)	299.5 (0.82)	299.5 (0.82)	299.5 (0.82)
동해·묵호항	14,345.7 (1.00)	18,362.4 (1.28)	19,653.6 (1.37)	20,083.9 (1.4)	20,514.3 (1.43)
묵포항	1,807.5 (1.00)	1,952.1 (1.08)	1,970.2 (1.09)	1,970.2 (1.09)	1,952.1 (1.08)
합계	131,640.3 (1.00)	176,227.2 (1.34)	153,825.4 (1.17)	156,703.3 (1.19)	159,774.7 (1.21)

자료: 저자 작성

(3) 유조선

유조선의 경우는 2020년 기준 60.2만 톤의 이산화탄소를 배출하는 것으로 추정되었고, 2050년에는 75% 증가하여 100만 톤을 넘길 것으로 전망하고 있다. 우리나라에서 가장 많은 액체화물을 처리하고 있는 울산항은 2050년 2배 증가하여 65만 톤을 넘길 것으로 예상하고 있으며, 평택·당진항 또한 2배 이상 증가한 3.6만 톤의 이산화탄소를 배출할 것으로 추정한다. 반대로 부산항과 포항항, 목포항 등은 2025년부터 조금씩 감소할 것으로 전망한다.

〈표 3-35〉 주요 항만별 유조선 이산화탄소 배출량 전망

(단위: 톤)

구분	기준	이산화탄소 배출량 전망			
	2020	2025	2030	2040	2050
부산항	52,224.3 (1.00)	48,568.6 (0.93)	48,046.4 (0.92)	47,524.1 (0.91)	47,001.9 (0.9)
인천항	38,111.0 (1.00)	41,540.9 (1.09)	42,303.2 (1.11)	48,019.8 (1.26)	54,498.7 (1.43)
광양항	79,654.6 (1.00)	90,009.7 (1.13)	93,992.4 (1.18)	102,754.4 (1.29)	113,109.5 (1.42)
평택·당진항	16,644.6 (1.00)	23,302.4 (1.4)	23,468.8 (1.41)	28,961.6 (1.74)	35,952.3 (2.16)
울산·미포항	322,561.3 (1.00)	422,555.4 (1.31)	477,390.8 (1.48)	558,031.1 (1.73)	654,799.5 (2.03)
포항항	436.5 (1.00)	388.4 (0.89)	384.1 (0.88)	375.4 (0.86)	366.6 (0.84)
대산항	80,776.5 (1.00)	90,469.7 (1.12)	99,355.1 (1.23)	116,318.2 (1.44)	136,512.3 (1.69)
동해·묵호항	428.1 (1.00)	436.7 (1.02)	449.6 (1.05)	475.2 (1.11)	500.9 (1.17)
목포항	11,416.9 (1.00)	10,731.9 (0.94)	10,617.8 (0.93)	10,389.4 (0.91)	10,161.1 (0.89)
합계	602,253.9 (1.00)	728,003.7 (1.21)	796,008.2 (1.32)	912,849.2 (1.52)	1,052,902.8 (1.75)

자료: 저자 작성

(4) 소결

컨테이너선, 벌크선, 유조선 등 앞에서 분석한 3가지 선박 유형별 이산화탄소 배출량을 요약하면 다음 <표 3-36>, <그림 3-13>와 같다. 종합적으로 컨테이너선과 유조선은 점차 물동량이 증가하여 2050년 이산화탄소 배출량 또한 각각 106%, 75% 크게 증가할 것으로 전망되지만, 벌크선은 21% 정도로 비교적 소폭 증가할 것으로 예상된다. 따라서, 컨테이너선과 유조선의 이산화탄소 배출을 감축할 수 있는 기술 개발이 필요하며, 더불어 AMP, 선박감속운항 등의 정책을 우선 적용해야 할 것으로 보인다.

이와 관련하여 2021년 12월 발표한 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」에서는 선박 기인 배출량이 101.9만 톤으로 추정하고 있으며 이는 우리나라 선박이 전 세계를 운항하며 배출한 추정치로 국제 해운은 제외하였다. 본 연구는 국적 선사뿐만 아니라 국내 9개 항만을 입출항하는 외국적 선박도 모두 포함하고 있기 때문에 다른 결과가 도출되었다.

<표 3-36> 주요 선박 유형별 이산화탄소 배출량 전망

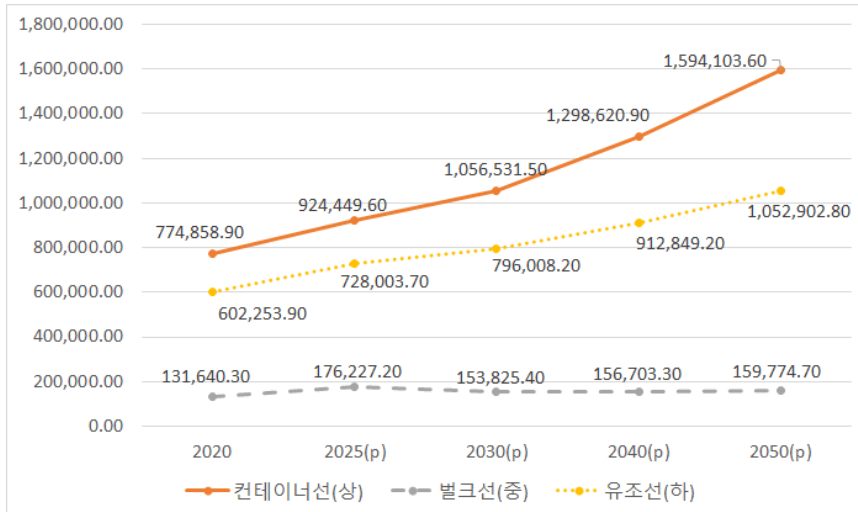
(단위: 톤)

구분	기준	이산화탄소 배출량 전망			
	2020	2025	2030	2040	2050
컨테이너선	774,858.9 (1.00)	924,449.6 (1.19)	1,056,531.5 (1.36)	1,298,620.9 (1.68)	1,594,103.6 (2.06)
벌크선	131,640.3 (1.00)	176,227.2 (1.34)	153,825.4 (1.17)	156,703.3 (1.19)	159,774.7 (1.21)
유조선	602,253.9 (1.00)	728,003.7 (1.21)	796,008.2 (1.32)	912,849.2 (1.52)	1,052,902.8 (1.75)

자료: 저자 작성

〈그림 3-13〉 주요 선박 유형별 이산화탄소 배출량 전망 추이

(단위: 톤)



자료: 저자 작성

4. 전체 항만 배출량 산정 및 전망 결과

항만 작업과 선박에 의한 배출량 산정 및 전망 결과를 종합한 국내 항만의 이산화탄소 배출량은 〈표 3-37〉, 〈표 3-38〉과 같다. 전체 이산화탄소 배출량에서 평균적으로 항만 장비는 약 20%, 선박은 약 80%를 차지하며, 탄소배출 감축이 이루어지지 않을 경우 물동량 증가에 따라 국내 항만의 이산화탄소 배출량은 2020년의 약 1.8배인 약 370만 톤까지 크게 증가할 것으로 전망한다.

〈표 3-37〉 국내 항만 이산화탄소 배출량 전망(완전자동화터미널 감축량 미반영)

(단위: 톤)

품목 ¹	배출원 ²	기준	이산화탄소 배출량 전망			
		2020	2030	2040	2050	
컨테이너	항만 작업	205,013	279,885	345,499	426,496	
	선박	780,437	1,064,137	1,307,970	1,605,580	
	총합	985,450	1,330,135	1,638,754	2,017,361	
벌크	항만 작업	135,784	152,335	155,452	158,657	
	선박	174,067	203,402	207,207	211,268	
	총합	309,851	355,737	362,659	369,925	
유류	항만 작업	87,406	110,717	128,200	148,444	
	선박	657,116	868,521	996,005	1,148,817	
	총합	744,522	979,238	1,124,205	1,297,261	
총합	항만 작업	428,203	542,937	629,152	733,598	
	선박	1,611,620	2,136,060	2,511,182	2,965,665	
	총합	2,039,823	2,678,997	3,140,333	3,699,262	

주: 1) 벌크 품목은 항만 작업으로 인한 배출량 중 컨테이너와 유류를 제외한 배출량, 선박은 벌크선의 배출량을 총합한 것을 의미함

2) 국내 전체 항만의 이산화탄소 배출량 전망을 위해 앞서 선박 배출량을 산정한 항만(9개 항만) 외의 항만의 물동량 비율을 고려하여 전체 항만의 선박 배출량을 추정하여 종합함

자료: 저자 작성

〈표 3-38〉 국내 항만 이산화탄소 배출량 전망(완전자동화터미널 감축량 반영)

(단위: 톤)

품목 ¹	배출원 ²	기준	이산화탄소 배출량 전망			
		2020	2030	2040	2050	
컨테이너	항만 작업	205,013	265,998	330,784	411,781	
	선박	780,437	1,064,137	1,307,970	1,605,580	
	총합	985,450	1,330,135	1,638,754	2,017,361	
벌크	항만 작업	135,784	152,335	155,452	158,657	
	선박	174,067	203,402	207,207	211,268	
	총합	309,851	355,737	362,659	369,925	
유류	항만 작업	87,406	110,717	128,200	148,444	
	선박	657,116	868,521	996,005	1,148,817	
	총합	744,522	979,238	1,124,205	1,297,261	

품목 ¹	배출원 ²	기준	이산화탄소 배출량 전망			
		2020	2030	2040	2050	
총합	항만 작업	428,203	529,050	614,436	718,882	
	선박	1,611,620	2,136,060	2,511,182	2,965,665	
	총합	2,039,823	2,665,110	3,125,618	3,684,547	

주: 1) 벌크 품목은 항만 작업으로 인한 배출량 중 컨테이너와 유류를 제외한 배출량, 선박은 벌크선의 배출량을 종합한 것을 의미함

2) 국내 전체 항만의 이산화탄소 배출량 전망을 위해 앞서 선박 배출량을 산정한 항만(9개 항만) 외의 항만의 물동량 비율을 고려하여 전체 항만의 선박 배출량을 추정하여 종합함

자료: 저자 작성

5. 감축목표 설정

항만부문의 2050년 탄소중립을 위한 온실가스 감축목표 설정에 참고할 수 있는 지표는 국가 온실가스 감축목표(NDC)와 해양수산부문 온실가스 감축목표가 있다. 국가 온실가스 감축목표는 2015년에 2030년 BAU 대비 37%로 수립하였으나, 2021년에 상향안이 의결되어 2030년 40%, 2050 순배출량 0(net-zero)를 목표로 한다. 특히 수송 부문은 기존 28.1%에서 37.8%로 감축 목표를 상향하였다⁶²⁾.

2022년 9월 해양수산부가 발표한 「제4차 기후변화대응 해양수산부문 종합계획(2022년-2026년)」에서는 2030년 해양수산분야 온실가스 배출량 70%(2018년 대비) 저감을 목표로 한다. 이는 2018년의 배출량인 약 406만 톤에서 약 280만 톤을 감축하는 것이며, 블루카본 부문의 탄소흡수력 강화를 통해 106만 톤, 수산·어촌 부문 88만 톤, 해운 부문 19만 톤 저감을 추진하고 있다⁶³⁾.

이처럼 해양수산부는 국가 온실가스 감축목표 대비 더욱 강화된 목표를 수립하였으나, 이는 블루카본 부문의 탄소 흡수력 강화가 큰 비중을 차지

62) 관계부처합동(2021), p. 6, 8.

63) 대한민국 정책브리핑(2022.9.15.)(검색일: 2022.9.3.)

한다. 또한, 2021년에 발표된 「해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵」과 마찬가지로 항만의 온실가스 배출량이 포함되지 않아, 해양수산부의 2030년 온실가스 감축 목표를 항만 부문에 동일하게 적용하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 항만분야의 탄소배출 감축목표를 2030년에는 2018년 대비 40% 감축으로 2050년 탄소중립을, 2030년과 2050년의 BAU 대비 감축 필요량을 평균하여 2040년의 감축목표를 설정하였다. 완전자동화터미널 도입 여부와 시나리오별로 목표에 따른 감축량과 총 배출량이 다르며, 자동화터미널의 도입 시 직접배출량은 감소하고 간접배출량은 크게 증가할 것으로 예상되지만 현재는 정확히 파악할 수 없다. 따라서 선행연구의 탄소저감율을 반영하여 자동화터미널 도입 시 직·간접배출량과 감축량이 동일한 비율로 감소하는 것으로 가정하여 산정하였다. 또한, 유류 및 LNG 사용에 기인한 직접배출량을 우선적으로 줄일 필요가 있지만 현실적으로 단기간 내 모든 항만의 장비 연료 전환은 불가능하기 때문에 단계적인 항만 장비의 전기, 수소 등으로 연료 전환을 가정하여 직·간접배출량을 감축 목표의 감축비율로 적용하여 산정하였다.

〈표 3-39〉 항만분야 탄소배출 감축목표 및 감축량(완전자동화터미널 감축량 미반영)
(단위: 톤)

구분	2018*	2030	2040	2050
BAU 배출량 전망(a)	375,289	542,937	629,152	733,598
직접	-	48,024	54,886	63,219
간접	-	494,913	574,266	670,378
감축 목표 (2018 대비)	-	40%	72%	탄소중립 (Net-zero)
BAU 대비 감축량(b)	-	317,764	525,681	733,598
직접	-	28,107	45,859	63,219
간접	-	289,657	479,822	670,378
총 배출량 (a-b)	375,289	225,173	103,471	0

주 : 2018년의 배출량은 2018년 물동량(한국해양수산개발원 항만수요예측센터(2019) p. 101.)과 앞서 산정된 컨/비컨 단위 탄소 배출량을 적용하여 산정
자료: 저자 작성

〈표 3-40〉 항만분야 탄소배출 감축목표 및 감축량(완전자동화터미널 감축량 반영)
(단위: 톤)

구분	2018*	2030	2040	2050
BAU 배출량 전망(a)	375,289	529,050	614,436	718,882
직접	-	46,796	53,602	61,951
간접	-	482,254	560,834	656,930
감축 목표	-	40%	73%	탄소중립 (Net-zero)
BAU 대비 감축량(b)	-	303,877	511,379	718,882
직접	-	26,879	44,612	61,951
간접	-	276,998	466,768	656,930
총 배출량 (a-b)	375,289	225,173	103,057	0

주: 2018년의 배출량은 2018년 물동량(한국해양수산개발원 항만수요예측센터(2019) p. 101.)과 앞서 산정된 컨/비컨 단위 탄소 배출량을 적용하여 산정
자료: 저자 작성

선박의 탄소배출 감축목표는 IMO가 2018년 채택한 ‘선박 온실가스 감축을 위한 초기전략’에서 2050년에 2008년 대비 국제해운 부문 온실가스 50% 감축 목표를 수립하였다. 또한 IMO는 에너지효율설계지수(EEDI: Energy Efficient Design Index), 에너지효율지수(EEXI: Energy Efficiency Existing Ship Index)와 탄소집약도지수(CII: Carbon Intensity Indicator) 등의 기준을 운영하여 온실가스 배출과 함께 에너지 효율을 개선하며, 특히 CII를 2030년까지 2008년 대비 40%, 2050년 70%까지 감축하기 위한 목표를 수립하였다. IMO는 5년 주기로 온실가스 배출 보고서(GHG Study)를 발표하고 2023년까지 초기전략을 수정할 계획이며 온실가스 감축목표 상향을 검토하고 있다. 현재 덴마크, 미국 등의 주요 국가들이 2050년 넷-제로를 주장하고 있어, 향후 선박 부문의 온실가스 감축 목표가 상향될 가능성이 클 것으로 판단한다.⁶⁴⁾

64) 김은미(2022), p. 20.

또한, 지난 2020년 12월 발표한 「제1차 친환경선박 개발·보급 기본계획(2021년-2030년)」에서는 온실가스 감축기술 개발 목표와 친환경 선박 보급 및 항만 인프라 확충 계획을 발표했다. 이를 통해 2030년까지 기존 유류선박 대비 온실가스 배출량을 70% 이상 저감할 수 있는 기술 확보를 목표로 하며, 2030년까지 관공선, 내항선 및 외항선 등에 대한 친환경 선박 전환율 15% 달성 목표를 수립하였다. 또한 친환경 선박 연료 인프라 마련을 위해 친환경 연료 공급 목표를 2025년 70만 톤, 2030년 140만 톤으로 설정하였으며, 전국 13개 주요 항만에 AMP 설치를 확대하기 위해 2025년 174개소, 2030년까지 248개소 설치를 계획하였다.⁶⁵⁾

선박은 항만의 온실가스 배출량 중 많은 비중을 차지하고 있으나, 선박의 온실가스 감축을 위한 항만의 역할은 직접적인 감축 조치보다는 친환경 선박 전환에 따른 인프라 공급 역할이 요구된다. 따라서 항만의 탄소중립 관리 측면에서 IMO 감축목표와 정부의 친환경 선박 정책에 발맞춘 연료 공급 인프라 측면의 탄소중립 정책 추진이 필요하다.

제3절 종합

3장에서는 최신 자료를 이용하여 항만의 탄소 배출량을 전망하고, 항만의 2050년 탄소중립을 위한 목표와 감축량 및 감축 방안을 제시하였다. 항만의 탄소 배출량은 항만 작업과 항만에 입출항하는 선박의 탄소 배출량으로 구분하여 산정하였으며, 물동량 예측치를 적용하여 배출량을 전망한 결과 2050년에 370만 톤까지 증가할 것으로 분석하였다. 이는 2020년에 비해

65) 해양수산부 보도자료(2020.12.23.)(검색일: 2022.9.3.)

약 1.8배 증가한 수치이다. 또한, 컨테이너에 비해 비컨테이너를 처리하는 업체의 조사 응답이 적었지만, 국내 항만 전체에 대한 배출량 추정 시 비컨테이너 품목의 이산화탄소 배출량이 2020년 보다 많은 것으로 분석된 바 있어, 비컨테이너의 탄소 배출량이 본 연구 산정 결과보다 많을 수 있다.

이에 항만 탄소중립 달성을 위해 배출량 전망치와 NDC를 바탕으로 선박을 제외한 항만분야의 감축 목표를 2018년 대비 2030년 40%, 2040년 72%(완전자동화터미널 도입 시 2040년 73%)를, 2050년 탄소중립으로 설정하였다. 목표 달성을 위해서는 항만의 직·간접배출량 감축이 필요하다. 우선 유류 사용에서 비롯된 직접배출량의 단계적 감축을 위해 항만 장비의 연료를 전기, 수소 등으로 전환해야 한다. 또한, 간접배출량의 경우 항만 작업으로 인한 간접배출량이 직접배출량보다 약 10배 정도 많은 것으로 분석되었으며, 직접배출량 감축을 위한 연료 전환 시 간접배출량은 더욱 증가할 것이다. 국가 전력수급계획에 따라 친환경에너지 사용으로 발전량이 단계적으로 증가할 것이지만, 항만의 탄소중립을 위해서는 항만 에너지 효율화를 위한 방안 도입과 항만 자체 발전, 보급을 장기적으로 검토해야 한다.

현재 항만 탄소 배출량의 80%를 차지하는 선박의 경우에는 IMO의 국제해운 온실가스 저감목표에 따라 2050년까지 2018년 대비 50%를 감축해야 하며, 국내 친환경 선박 정책을 통해 LNG, 수소 등으로의 연료 전환을 추진하고 있다. 이에 따라 항만은 인프라 측면에서 LNG 및 수소 연료 공급을 위한 연구개발을 진행하고 있으며, 정박 중인 선박에 육상전력을 공급하기 위한 AMP를 확대할 예정이다. 한편, 이러한 친환경 선박 연료 공급 인프라를 확충하면 전력 사용량 증가 등으로 인해 항만의 자체적인 온실가스 배출량은 더욱 증가할 것이다. 따라서 이러한 친환경 선박, 물동량 증가 등으로 인한 항만 탄소 배출량의 변동성을 파악하고, 탄소중립을 위한 탄소배출 감축 방안을 추진하기 위해 항만 탄소 배출량에 대한 지속적인 모니터링과 감축 목표 달성을 위한 관리체계 정비가 시급하다.

04

항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안

3장에서는 국내 항만의 탄소 인벤토리 구축에 필요한 탄소 배출량 전망을 수행하였다. 또한, 국가 온실가스 감축목표, 2050 탄소중립 시나리오 등 국가 계획에 따른 항만분야의 시기별 탄소 감축목표를 제시하였다. 본 장에서는 법·제도, 조직, 이행 주체 등 국내 탄소중립 관리체계 전반을 살펴보고, 국내 항만분야의 탄소중립 관리체계 상의 문제점과 개선방안을 제시하고자 한다.

제1절 국내 탄소중립 관리체계

1. 관리체계 구성

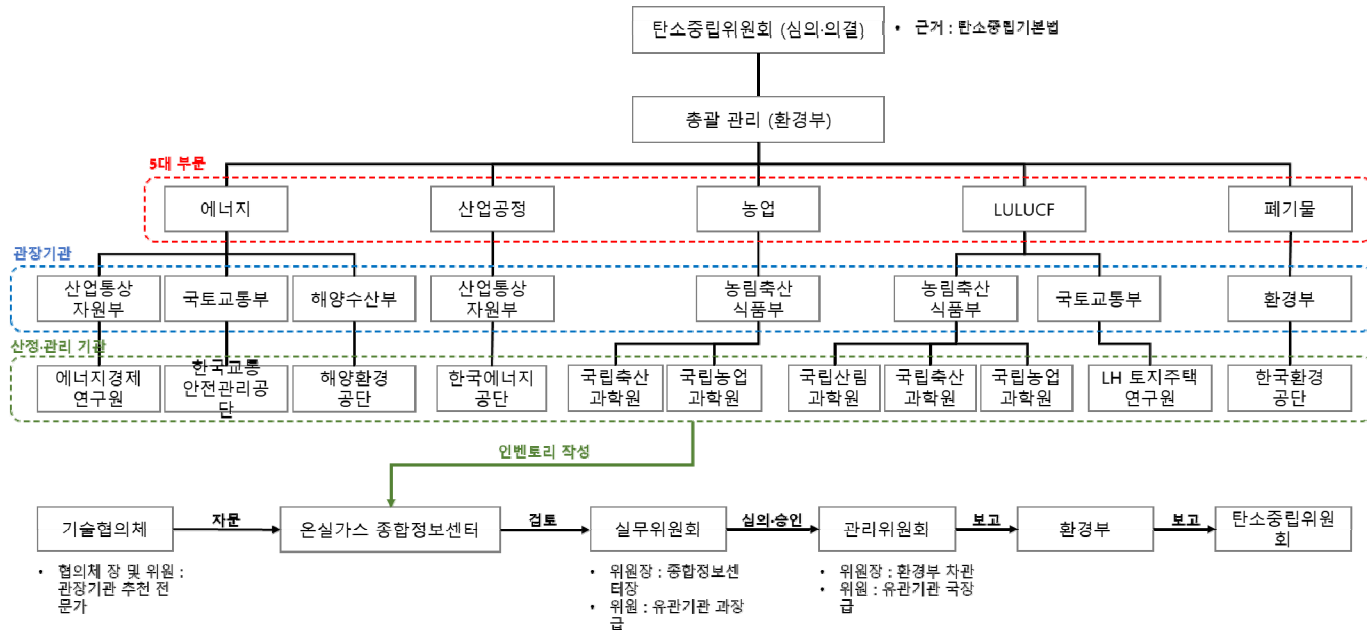
국내 탄소중립 관리체계는 최상위 법률인 「탄소중립기본법」에 따라서 구성되며, 최상위 심의·의결기구로 「2050 탄소중립녹색성장위원회」를 두고 있다. 「탄소중립기본법」에 따라서 국가 온실가스 인벤토리 작성, 부문별 감축목표 이행현황 등을 점검하고 있으며, 효율적으로 관리하기 위하여 국내

경제·산업을 다섯 가지 분야로 구분하여 환경부가 총괄·관리하도록 하고 있다.

5대 분야는 ①에너지 분야, ②산업공정 분야, ③농업 분야, ④LULUCF⁶⁶⁾, ⑤폐기물 분야 등으로 구성되며, 분야별로 관장기관(행정청)과 전담 관리기관이 지정되어 있다. 전담관리기관에서는 해당 분야의 온실가스 배출량 추정, 감축목표 설정, 이행점검 등을 수행하며, 관장기관에서 종합적으로 관리하고 있다. 국내 탄소중립 관리체계를 도식화하면 <그림 4-1>과 같이 구성되어 있으며, 이후 관리체계를 절차, 이행 주체 등 세부적으로 설명하고자 한다.

66) LULUCF(Land Use: Land Use Change and Forestry)는 「탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률」에 따라 국토를 토지이용 목적과 형태를 고려하여 산림, 농지, 초지, 습지, 주거지, 그 밖의 범주로 구분하고 인위적인 활동에 따른 온실가스 흡수·배출량과 토지이용 변화에 따른 온실가스 흡수·배출량을 산출하기 위한 정의·방식·규칙을 말함

〈그림 4-1〉 국내 탄소중립 관리체계



자료: 저자 작성

1) 최상위 법 및 기구

국내 관련 법·제도를 살펴보면 국가 탄소중립 실현을 위한 관리체계는 체계적으로 마련되어 있다. 「저탄소 녹색성장 기본법(이하, 녹색성장법)」을 근거로 「기후변화대응기본계획», 「녹색성장 5개년계획」 등을 수립하였으며, 「대통령 직속 녹색성장위원회」를 설치·운영하여 우리나라 경제구조의 저탄소화를 추진해왔다. 또한, 2020년 12월 「장기저탄소발전전략」을 발표하며, 국가 탄소중립 5대 기본방향을 수립하였다.

〈표 4-1〉 「장기저탄소발전전략」(2020.12) 탄소중립 5대 기본방향

구분	세부 내용
① 깨끗하게 생산된 전기·수소의 활용 확대	• (산업) 화석연료→전기·수소 • (수송) 내연기관→친환경차·친환경선박 • (건물) 도시가스→전기화
② 디지털 기술과 연계한 혁신적인 에너지 효율 향상	• (산업) 고효율기기 보급 확대, 공장 에너지관리시스템 보급, 스마트 그린산단 조성 • (수송) 지능형 교통시스템(C-ITS), 자율주행차 (교통사고↓, 효율↑), 드론택시 • (건물) 기존건물→그린리모델링, 신규건물→제로에너지 건축물, LED조명, 고효율 가전기기
③ 탈탄소 미래기술 개발 및 상용화 촉진	• (미래기술) 철강→수소환원제철 / 석유화학→혁신소재, 바이오플라스틱 / 전력→CCUS
④ 순환경제(원료·연료투입↓)로 지속가능한 산업 혁신 촉진	• 원료의 재활용·재사용(철스크랩, 폐플라스틱, 폐콘크리트) 극대화, 에너지 투입 최소화
⑤ 산림, 갯벌, 습지 등 자연·생태의 탄소 흡수 기능 강화	• 유휴토지(갯벌, 습지, 도시 숲) 신규조림 확대, 산림경영 촉진(산림 연령↓, 목재 이용↑)

자료: 대한민국정부(2022), p.16.

2021년 5월 산업·경제·사회 등 전 영역에서 탄소중립 사회 전환을 추진하기 위한 컨트롤타워로 18개 중앙행정기관장과 산업계·학계·시민사회 대표 등이 포함된 8개의 민관합동위원회로 이루어진 「2050 탄소중립위원회」가 설치되었다.

이처럼 「녹색성장법」추진으로 우리나라 탄소중립 추진을 위한 기틀을 마련하였지만, 지속가능한 탄소중립 추진과 실현을 위해서는 「녹색성장법」만으로는 한계가 있다. 이에 따라, 기후위기 대응과 2050년 탄소중립 달성을 위한 법적 기반 마련을 위해 지난 2021년 8월 「탄소중립기본법」이 제정하였다. 이 법령은 2050년 탄소중립을 국가의 비전으로 명시하고 있으며, 이를 위해 국가전략, 중장기 온실가스 감축목표, 기본계획 수립 및 이행점검 등의 법정 절차를 체계화하였다. 이러한 노력을 바탕으로 우리나라는 전 세계 14번째로 2050 탄소중립 비전과 이행체계를 법제화하였다⁶⁷⁾.

또한, 「탄소중립기본법」 제15조에 따라 「녹색성장법」과 「2050 탄소중립위원회의 설치 및 운영에 관한 규정」으로 별도 설치·운영되던 「녹색성장위원회」와 「2050 탄소중립위원회」를 「2050 탄소중립녹색성장위원회」로 통합하여 운영하고 있다.

〈그림 4-2〉 2050 탄소중립녹색성장위원회 연혁



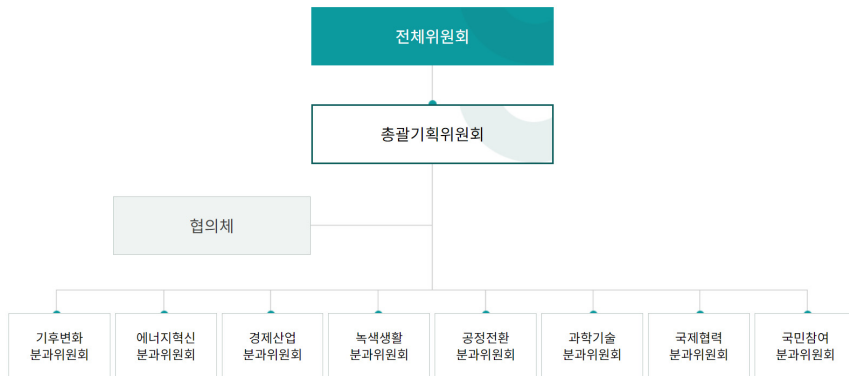
자료: 2050 탄소중립녹색성장위원회(검색일: 2022.8.10.)

67) 대한민국정부(2022), p.15-17.

「2050 탄소중립녹색성장위원회」의 설치 목적은 정부의 탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장의 추진을 위한 주요 정책 및 그 계획과 시행에 관한 사항을 심의하고 의결하는 것이다. 「탄소중립기본법」에 규정된 위원회의 기능을 요약하면, ①탄소중립 사회로의 이행과 녹색성장의 추진을 위한 기본방향 수립, ②국가 비전 및 중장기 감축목표, 국가기본계획 등의 설정 및 이행현황 점검, ③국가 기후위기 적응대책의 수립·변경 및 점검, ④탄소중립 관련 국민 이해 증진 및 홍보·소통, 국제협력 등으로 요약할 수 있다⁶⁸⁾.

「2050 탄소중립녹색성장위원회」의 장은 국무총리와 민간 공동위원장이 맡고 있으며, 위원은 당연직 정부위원(18명)과 대통령 위촉 민간위원(75명)으로 구성되어있다. 또한 효율적인 업무 처리를 위해 8개의 세부 분과로 조직하였다.

〈그림 4-3〉 2050 탄소중립녹색성장위원회 조직도



자료: 2050 탄소중립녹색성장위원회(검색일: 2022.8.10.)

68) 「탄소중립기본법」과 2050 탄소중립녹색성장위원회(검색일: 2022.8.10.)을 바탕으로 작성함.

〈표 4-2〉 2050 탄소중립녹색성장위원회 분과

분과위원회	주요 업무
기후변화위원회	국가 온실가스 감축목표 설정, 부문별 온실가스 감축목표 설정·평가
에너지혁신위원회	에너지전환, 재생에너지보급, 에너지 수요관리
경제산업위원회	고탄소 산업전환, 저탄소 산업 육성, 재정·세제금융 지원
녹색생활위원회	녹색 국토·도시 건축 조성, 교통·수송 혁신, 순환경제
공정전환위원회	취약산업, 근로자, 지역 보호, 기후위기적응, 지자체 탄소중립
과학기술위원회	탄소저감 기술개발·적용, R&D 전략, CCUS 로드맵
국제협력위원회	국제협력, P4G 등 국제회의 지원, 그린 ODA
국민참여위원회	대국민 소통·교육·홍보, 국민캠페인, 지역·미래세대 참여

자료: 2050 탄소중립녹색성장위원회(검색일: 2022.8.10.)

2) 분야별 구성체계

국내 탄소중립을 효율적으로 추진하기 위하여 환경부가 총괄하고 5대 분야로 구분하여 관리하고 있다. 분야별 관리체계는 큰 틀에서 배출량 산정을 위한 인벤토리 구축, 저감목표 설정, 이행점검 등 크게 세 가지로 구분할 수 있다.

5대 분야를 세부적으로 살펴보면, ①에너지 분야는 산업통상자원부(연료 연소(발전, 산업) 및 탈루), 국토교통부(항공, 도로, 철도), 해양수산부(수산, 해운, 항만), ②산업공정 분야는 산업통상자원부, ③농업 분야는 농림축산식품부, ④LULUCF 분야는 농림축산식품부(산림지, 습지, 초지, 농지), 국토교통부(정주지, 기타 토지), ⑤폐기물 분야는 환경부에서 관장하고 있다. 세부 분야별로 온실가스 인벤토리 구축, 이행점검 등을 수행하기 위하여 전문성을 갖춘 전담기관을 지정하고 있다.

〈표 4-3〉 분야별 관장기관 및 전담기관

분야	세부 분야	관장기관	전담기관
에너지	연료연료(발전 · 산업) 및 탈루	산업통상자원부	• 에너지경제연구원
	항공 · 도로 · 철도	국토교통부	• 한국교통안전공단
	수산 · 해운 · 항만	해양수산부	• 해양환경공단
농업	-	농림축산식품부	• 국립축산과학원 • 국립농업과학원
LULUCF	산림지 · 습지 · 초지 · 농지	농림축산식품부	• 국립축산과학원 • 국립농업과학원 • 국립산림과학원
	정주지, 기타 토지	국토교통부	• LH 토지주택연구원
폐기물	-	환경부	• 한국환경공단

자료: 저자 작성

2. 온실가스 인벤토리 구축

국내 온실가스 인벤토리 구축체계를 살펴보면, 앞서 설명한 5대 분야별로 지정된 전담기관에서 배출량을 산정한다. 전담기관에서 분야별로 산정한 온실가스 인벤토리의 체계적인 관리를 위하여 온실가스종합정보센터(이하, 종합정보센터)⁶⁹⁾를 설치 · 운영하고 있다. 종합정보센터는 「국가 온실가스 통계의 총괄관리에 관한 규정」에 따라 국가 온실가스 인벤토리⁷⁰⁾ 산정을 위한 「국가 온실가스 통계 산정 · 보고 · 검증 지침」을 제공하고 있다. 또한, 국가 온실가스 통계 관리위원회, 국가 온실가스 통계 실무협의회, 국

69) 온실가스종합정보센터는 「탄소중립기본법」 제정에 따라 폐지된 「녹색성장법」 제45조 및 동 법 시행령 제36조에 따라 환경부 소속 온실가스종합정보센터가 설치 운영되었으며, 현재는 「탄소중립기본법」 제36조 및 동 법 시행령 제39조에 따라서 온실가스종합정보센터가 운영되고 있음

70) 온실가스 인벤토리는 배출원과 배출량을 체계적으로 구성한 일종의 리스트를 의미하며, 온실가스 인벤토리 작성 대상은 교토의정서의 6대 온실가스로 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 등이며, 대상 온실가스별 배출량을 산정하고 지구온난화지수를 곱하여 CO₂ 기준으로 환산하며, 주로 tonCO₂ eq.로 표기함

가 온실가스 기술협의체의 구성 및 운영, 국가 온실가스 인벤토리 취합 및 작성, 자료 관리를 위한 시스템 구축 및 운영 등의 업무를 담당하고 있다.

국가 온실가스 인벤토리 작성의 신뢰성을 확보하기 위하여 인벤토리 작성의 적절성과 배출·흡수계수 산정 및 검증과 관련한 기술 자문 기구로서 대학과 관련 연구소 등 외부 기관의 전문가로 구성된 기술협의체를 운영하고 있다. 또한, 5개 분야의 인벤토리 작성 관장기관과 유관기관과의 협의, 관련 지침의 재·개정 등을 위하여 실무협의회가 구성되어 있으며, 위원장은 종합정보센터의 센터장으로, 분과위원은 온실가스 인벤토리 작성 관장기관과 통계청 및 산림청 등 유관기관의 과장급 공무원으로 구성하였다. 실무협의회를 거쳐 제출된 국가 온실가스 인벤토리, 배출·흡수계수 등을 최종적으로 확정하고 의결하기 위하여 관리위원회를 두고 있다. 관리위원회의 위원장은 환경부 차관이며, 위원은 분야별 관장기관 및 통계청의 과장급 당연직 위원과 학계 등 위촉직 위원 15인 이내로 구성하였다.

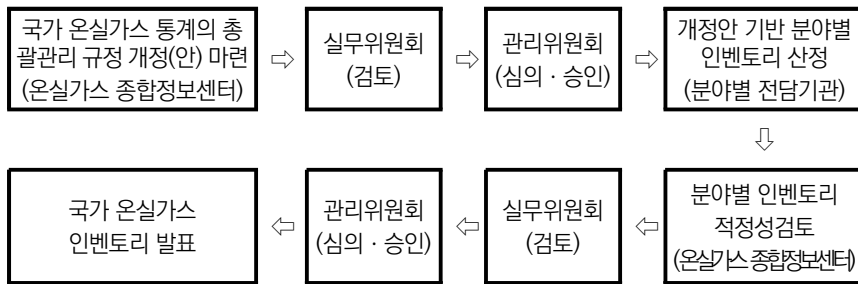
국가 온실가스 통계의 투명성, 신뢰성 및 정확성을 확보하기 위하여 인벤토리 작성과 검증을 이원화하여 수행하고 있으며, 배출량 확정을 위해 실무협의회와 관리위원회의 단계별 심의를 거치고 있다.

종합정보센터는 국가 온실가스 인벤토리를 품질 향상을 위해 매년 초에 전년도 통계 검증 과정에서 도출된 개선 필요 요소 등을 반영하여 「국가 온실가스 통계의 총괄관리에 관한 규정」의 개정안을 마련한다. 지침 개정안은 실무협의회 검토와 관리위원회 심의·승인 절차를 거쳐 확정된다. 종합정보센터는 매년 3월 확정된 지침을 발표하며, 이후 분야별 온실가스 인벤토리 관장기관은 개정 지침에 따라 인벤토리를 산정하여 매년 6월 30일까지 종합정보센터에 제출한다.

종합정보센터에서는 분야별 관장기관에서 제출한 인벤토리 초안이 적절하게 산정되었는지 검토하는데, 활용한 방법론이 타당한지 여부와, 배출·

흡수계수는 적절하게 적용하였는지 등을 점검하여 항목별 배출량 계산 오류 등을 확인한다. 검증 과정에서 확인한 오류는 관장기관에 통보하여 수정·보완을 요청하고 관장기관에서 이를 반영하여 다시 계산한 자료를 제출하면 다시 검토 절차를 거쳐 최종안을 마련한다. 최종안이 마련되면 종합정보센터에서는 실무협의회를 통해 검토하고, 관리위원회에서 최종 승인하여 매년 12월까지 확정안을 마련·공표한다.

〈그림 4-4〉 온실가스 인벤토리 산정 절차



자료: 대한민국정부(2022)내용을 참고하여 저자 재작성

3. 온실가스 감축·이행점검

1) 온실가스목표관리제

「탄소중립기본법」에서는 부문별 감축목표 달성을 위해 연도별 감축목표 이행현황을 점검하고 결과 보고서를 공개하도록 하고 있다. 이러한 점검과정을 통해, 온실가스배출량이 연도별 감축목표에 부합하지 않는 경우에는 해당 행정기관에서 개선사항을 제출해야 한다.

또한, 국가 온실가스감축 목표를 달성하기 위하여 「탄소중립기본법」 제 27조(관리업체의 온실가스 목표관리)를 근거로 하여 일정 수준 이상의 온

실가스를 배출하는 업체⁷¹⁾를 관리업체로 지정하고 온실가스 감축목표, 에너지 절약목표를 설정하고 이행을 점검하는 「온실가스 목표관리제」를 운영하고 있다. 이에 따라, 정부는 관리업체에 온실가스 배출량 산정을 위한 자료를 요청할 수 있으며, 관리업체는 특별한 사유가 없을 경우 자료를 제출해야 한다. 최근 관리업체 고시⁷²⁾(2022년 6월 30일) 기준 온실가스 목표관리 대상은 총 360개이며, 관장기관별로 국토교통부 80개, 산업통상자원부 177개, 농림축산식품부 25개, 해양수산부 9개, 환경부 69개이다. 관장기관은 관리업체의 신설 및 증설 계획, 감축 잠재량 등을 고려하여 국가 온실가스 감축 목표를 달성할 수 있도록 관리업체별 연간 감축목표를 설정하며, 이행계획 및 이행실적에 대한 평가⁷³⁾를 통하여 감축목표를 관리하고 있다.⁷⁴⁾ 또한, 「온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」에 근거하여 목표이행을 위한 개선명령, 과태료 부과 등을 하고 있다.

〈표 4-4〉 관리업체 지정 기준

구분	2011.12.31 까지		2012.1.1 부터		2014.1.1 부터		2022.3.25. 부터 현재까지	
	업체 기준	사업장 기준	업체 기준	사업장 기준	업체 기준	사업장 기준	업체 기준	사업장 기준
온실가스 배출량 (tCO ₂ -eq)	125,000	25,000	87,500	20,000	50,000	15,000	50,000	15,000
에너지소비(TJ)	500	100	350	90	200	80	-	-

주: 관리업체 지정 기준은 지금은 폐지된 「녹색성장법 시행령」 제29조에 따라 확대되었으며, 「탄소중립기본법 시행령」에서는 지정 기준 확대 관련 규정은 없는 상황임

자료: 한국환경공단(검색일: 2022.8.12.)

71) 최근 3년간 연평균 온실가스 배출총량이 5만 톤CO₂-eq 이상이거나, 연평균 온실가스 배출량이 1만 5천 톤CO₂-eq 이상인 사업장을 하나 이상 보유하고 있는 업체임

72) 산업통상자원부(검색일: 2022.8.12.)

73) 만일 관리업체의 감축 실적이 설정 목표에 미달하는 경우 1년 이내의 범위에서 기간을 정하여 개선을 명할 수 있고 관리업체는 개선 계획을 작성하여 이행하여야 한다.

74) 한국환경공단(검색일: 2022.8.12.)

2) 배출권거래제도

배출권거래제도는 교토의정서 제17조(배출권 거래)에 규정된 온실가스 감축방안이다. 교토의정서는 온실가스를 배출하는 사업장을 대상으로 연단위 배출권을 할당하고 범위 내에서 배출행위를 하고 여분 또는 부족분의 배출권을 사업장 간 거래를 허용하는 제도이다. 우리나라에서는 「탄소중립기본법」제25조(온실가스 배출권거래제)와 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」에 따라서 운영⁷⁵⁾하고 있다.

배출권거래제도는 사업장별 여건에 따라 운영이 가능하다. 즉, 감축 여력이 높은 사업장은 할당된 배출권 중 초과감축량을 판매하여 수익을 창출할 수 있고, 감축 여력이 낮은 사업장은 직접 감축 대신 배출권을 구매하여 비용을 절감할 수 있다. 배출권거래제도는 국내 산업의 여건을 고려하여 단계별로 계획 하에 운영하고 있으며, 현재는 제3차(2021년~2025년)체제로 운영 중이다. 제3차 체계를 통해 적극적인 온실가스 감축을 목표로 제3자 거래제 참여 등 유동성을 확대하고 유상할당 비율도 기존 3%에서 10%로 상향하였다.

〈표 4-5〉 배출권거래제 계획 기간별 운영 개요

구분	제1차 (2015년~2017년)	제2차 (2018년~2020년)	제3차 (2021년~2025년)
주요 목표	경험축적 및 거래제 안착	상당 수준의 온실가스 감축	적극적인 온실가스 감축
제도 운영	- 상쇄인정범위 등 제도의 유연성 제고 - 정확한 MRV 집행을 위한 인프라 구축	- 거래제 범위 확대 및 목표 상향 조정 - 배출량 보고·검증 등 각종 기준 고도화	- 신기후체제 대비 자발적 감축 유도 - 제3자 거래제 참여 등 유동성 공급 확대

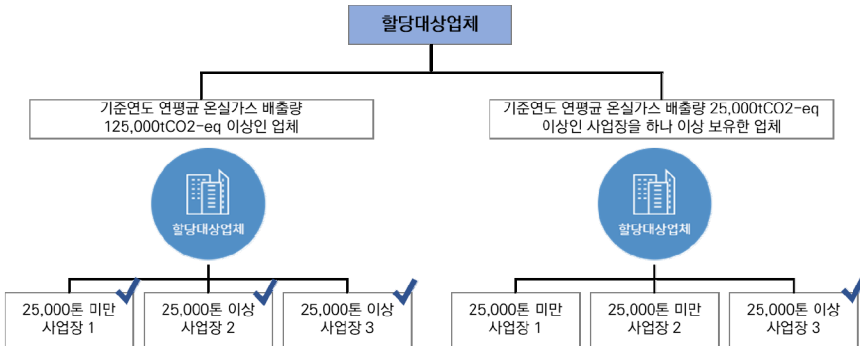
75) 우리나라 배출권거래제도는 「녹색성장법」 제46조에 의거하여 「온실가스 배출권 할당 및 거래에 관한 법률」이 제정되어 2015년 1월 1일부터 시행하고 있으며, 최근 법률 개정에 따라 「탄소중립기본법」제25조에 의거하여 운영 중임.

구분	제1차 (2015년~2017년)	제2차 (2018년~2020년)	제3차 (2021년~2025년)
할당	전량 무상할당 목표관리제 경험 활용	유상할당 개시 * 무상 : 97%, 유상 : 3% 벤치마크 할당 등 할당 방식 선진화	유상할당 비율 확대 * 무상 : 90%, 유상 : 10% 선진적 할당 방식 정착

자료: 한국환경공단(검색일: 2022.8.10.)

배출권거래제도 적용대상은 최근 3년간 온실가스 배출량 연평균 총량이 125,000톤 이상 업체 또는 25,000톤 이상 사업장을 하나 이상 보유한 업체, 자발적으로 할당 대상업체로 신청을 한 업체이며, 관리대상물질은 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆) 6가지 항목이다. 할당방식은 과거배출량 기반 할당(GF: Grandfathering)과 과거활동자료 기반 할당(BM: Benchmark)으로 구분한다. 제1차 계획기간에는 할당량의 100%를 무상으로 할당하였다. 이후 정부는 국가 온실가스 감축목표를 효과적으로 달성하고자 제2차 계획기간에는 유상할당 대상 업종 내 기업에 할당되는 배출권의 3%를 유상으로 할당하였고, 제3차 계획기간에는 유상할당 비율을 10%로 확대⁷⁶⁾하였다.⁷⁷⁾

〈그림 4-5〉 배출권 할당 대상업체 지정 기준



자료: 저자 작성

76) 비용발생도와 무역집약도를 곱한 값이 0.2% 이상인 업종으로 제2차 계획기간에는 36개 업종이었으나, 제3차 계획기간에는 자동차, 섬유, 항공기 제조업 등 5개 업종이 유상할당 대상으로 추가되어 총 41개 업종임

77) 한국환경공단(검색일: 2022.8.10.)

또한, 감축목표 달성의 유연성 확보를 위해 온실가스 의무감축량을 할당 받은 사업장(또는 대상사업체)이 해당 영역 외에 수행한 감축활동을 환경부로부터 인증을 받을 경우, 해당 사업장의 온실가스 감축량을 인정하는 배출권거래제 상쇄제도를 운영하고 있다. 대상업체에서 온실가스 감축량 또는 흡수량을 계산하고 모니터링을 하기 위한 방법론을 개발하고, 이를 바탕으로 사업계획서 제출하면 환경부에서 타당성 평가를 통하여 사업을 승인하게 된다. 이후 사업자에서 감축량 또는 흡수량을 제시한 방법론을 활용하여 제출하면, 검증기관⁷⁸⁾에서 평가하여 인증하는 과정을 거치게 된다.

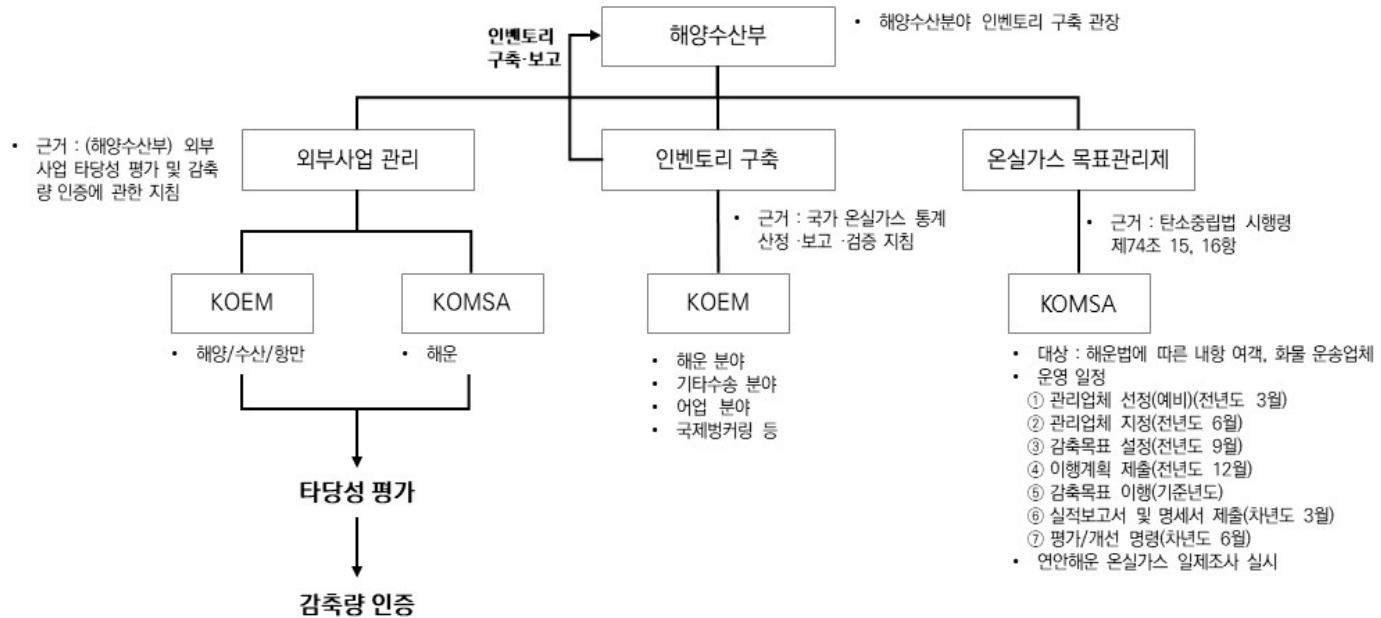
제2절 해양수산분야 탄소중립 관리체계

1. 해양수산분야 탄소중립 관리체계 구성

해양수산분야는 국가 관리체계상 에너지 분야의 일부로 포함되어 있으며, 온실가스 인벤토리 구축, 온실가스 감축·이행점검 등은 동일한 체계와 절차를 준용하여 관리되고 있다. 관리체계의 관장기관은 해양수산부이며, 전담기관은 해양환경공단(KOEM)이다. 다만, 해운분야의 경우 특수성을 감안하여 일부 업무를 한국해양교통안전공단(KOMSA)에서 수행하고 있다.

78) 현재 검증기관은 (재)한국품질재단, (주)한국품질보증원, (주)디엔비비즈니스어슈어런스코리아, 한국표준협회, (주)비에스아이그룹코리아, 로이드인증원(주), 이큐에이(주), (주)신화엔지니어링종합건축사사무소, 한국생산성본부 인증원(주), (재)한국화학융합시험연구원, (주)한국경영인증원, 한국가스안전공사, 한국산업기술시험원, 대일이엔씨기술(주), 지속가능인증원(주) 등 15개 업·단체임(국립환경과학원 (2022.8.1.) (검색일: 2022.8.10.))

〈그림 4-6〉 해양수산분야 탄소중립 관리체계



자료: 저자 작성

2. 해양수산분야 온실가스 인벤토리 구축

우리나라 탄소중립 실현을 위해 「탄소중립기본법」과 「국가 온실가스 통계 총괄관리계획」 등에 따라 국가 온실가스 인벤토리를 체계적으로 관리하고 있으며, 해양수산분야는 2016년 해양수산부 관장분야(수산·해운·항만)를 신설⁷⁹⁾하면서 법적 관리체계에 포함되었다.

해양수산분야의 온실가스 인벤토리 구축 관장기관은 해양수산부이며, KOEM이 산정기관으로 지정되어 있다. 이에, KOEM은 관련 지침에 따라 매년 해양수산분야의 인벤토리를 구축하고 보고하고 있다. 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침⁸⁰⁾의 내용을 구체적으로 살펴보면, 해양수산부에서 관장하는 분야는 크게 해운(1A3d), 기타 수송(1A3e), 어업(1A4c), 국제병커링 및 다국적 작전(1C) 등이며, 모두 KOEM에서 배출원을 산정한다.

〈표 4-6〉 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침의 해양수산부 관장분야

CRF코드	배출원 및 흡수원	관장기관	산정기관
1A3d	• 해운	• 해양수산부	• 해양환경공단
1A3e	• 기타 수송	• 국토교통부 • 해양수산부	• 한국교통안전공단 • 해양환경공단
1A4c	• 농업/임업 • 어업	• 농림축산식품부 • 해양수산부	• 국립농업과학원/ 국립산림과학원 • 해양환경공단
1C	• 국제병커링 및 다국적 작전	• 국토교통부 • 해양수산부	• 한국교통안전공단 • 해양환경공단

자료: 온실가스종합정보센터(2021a), p. 6-7을 바탕으로 저자 재작성

79) 현재는 「탄소중립기본법」으로 대체된 「녹색성장법」에 따라 해양수산부 관장분야가 2016년 5월 24일 신설됨

80) 온실가스종합정보센터(2021a)

항만 부문이 포함되어 있지 않은 것처럼 보이지만, 실제로는 일부 자료가 포함되어 인벤토리 구축에 사용하고 있다. 온실가스 종합정보센터(2021b)는 석유류 수급통계의 국내수급현황(해운)⁸¹⁾ 중 내국적 연안과 내륙항로 수송업, 수상운수 보조 서비스업에 대한 연료소비량을 해운 활동자료로 활용하고 있다. 그리고 수상운수 보조 서비스업의 연료소비는 예인선 등과 같은 선박에 의하여 발생하므로 기타 수송(1.A.3.e)로 분류하지 않고 해운으로 포함하여 산정하고 있다⁸²⁾.

수상운송 보조 서비스업은 항구 및 기타 해상 터미널 운영업과 기타 수송 운송 지원 서비스업으로 구분한다. 즉, 항만 내의 터미널에서 활용하는 유류소비량이 집계하여 온실가스 인벤토리 구축에 활용하고 있다는 의미이다. KOEM에 따르면, 해양수산분야 온실가스 인벤토리의 항만에서 사용하는 유류는 해운 부문으로 포함하여 관리되고 있음을 확인하였다.⁸³⁾

또한, 온실가스 종합정보센터(2021b)는 기타 수송(1.A.3.e)을 파이프라인 수송, 공항 내 지상운송수단, 그리고 그 밖에 터미널이나 유료도로 및 주차장 등의 운영을 위한 보조운송수단과 같이 다른 배출원에 포함되지 않은 비도로 수송에 의한 온실가스 배출량을 포함한다고 정의하고 있다. 따라서, 해양수산부에서 관장하는 기타 수송 부분에 비도로원이 포함되어 있다는 것을 의미한다. 다만, 이 부분에 대해서는 KOEM에서도 파악을 하지 못하고 있었으며, 통계를 관리하는 한국석유공사에서도 개인정보보호법을 사유로 명확한 답을 구하지 못하였다.

81) 석유공사에서 관리하는 석유류 수급통계에서 해운 부문은 내국적연안과 내륙항로 수송업, 내국적 외항 수송업, 외국적 수상 수송업, 수상운수 보조 서비스업으로 구분됨

82) 온실가스종합정보센터(2021b), p.127을 바탕으로 저자 재작성.

83) 해양환경공단 온실가스 인벤토리 구축 담당자(2022.9.21., 전화 인터뷰).

〈표 4-7〉 해운분야 연료별 소비량 추이(2010~2019)

단위: 천 TOE

연료	2010	2011	2015	2016	2017	2018	2019
경유	210	199	242	212	220	151	172
B-A 유	109	123	85	98	92	88	90
B-B 유	24	21	31	30	28	27	16
B-C 유	428	425	197	134	99	66	122
기타 석유제품	0	1	6	9	14	13	9
합계	771	769	562	483	454	346	409

주: 기타 석유제품에는 휘발유, LPG, 부생연료유 등이 포함됨
 자료: 온실가스 종합정보센터(2021b), p. 128.

현재 해양수산분야 온실가스 인벤토리에 항만분야가 포함되어 있지만 통계자료의 한계로 명확하게 구분할 수 없는 상황으로 파악하였다. 이에 대한 원인과 문제점, 개선방안 등은 이후에 상세하게 설명하도록 하겠다.

3. 해양수산분야 온실가스 감축 · 이행점검

1) 개요

해양수산분야에서도 온실가스 목표관리제와 배출권거래제 등을 통한 온실가스 감축 및 이행점검 체계가 마련되어 있다. 「탄소중립기본법」 시행령 제74조 제14항에 따라 해양 · 수산 · 항만분야의 온실가스 감축목표 설정 · 관리 등은 KOEM에서 수행하여야 하며, 제15항에 따라 해운 분야의 온실가스 감축목표의 설정 · 관리 등은 KOMSA에서 수행하고 있다.

〈표 4-8〉 해양수산분야 온실가스 감축 · 이행점검 기관 지정

법령	내용
「탄소중립기본법」 시행령 제 74조 14항	⑭ 해양수산부장관은 법 제81조제2항에 따라 다음 각 호의 업무를 「해양환경관리법」 제96조제1항에 따른 해양환경공단에 위탁한다. 1. 제18조제1항제5호에 따른 해양 · 수산 · 항만분야의 온실가스 감축목표의 설정 · 관리와 권리와 의무의 승계에 관한 업무 2. 제32조제2항에 따른 사전 승인을 위한 조사 · 분석 및 검토 3. 제34조제1항에 따른 국제감축사업 보고내용의 검토 4. 제36조제1항에 따른 국제감축실적 취득신고내용의 검토 5. 제37조제2항에 따른 사전 승인을 위한 조사 · 분석 및 검토
「탄소중립기본법」 시행령 제 74조 15항	⑮ 해양수산부장관은 법 제81조제2항에 따라 제18조제1항제5호에 따른 해양수산분야의 온실가스 감축목표의 설정 · 관리와 권리와 의무의 승계에 관한 업무를 「한국해양교통안전공단법」에 따른 한국해양교통안전공단에 위탁한다.

자료: 기후위기 대응을 위한 탄소중립 · 녹색성장 기본법 시행령 제74조 제14항, 제15항

1) 온실가스목표관리제

해양수산부에서는 「탄소중립기본법」 제27조(관리업체의 온실가스 목표관리)에 따라 기준량 이상의 온실가스를 배출하는 업체를 지정하고 온실가스 감축목표를 관리업체와 협의하여 설정 · 관리하여야 한다.

KOMSA는 해양수산부로부터 연안해운 분야의 온실가스 목표관리제도 운영을 위탁받아 대행 관리하고 있으며, 해운 분야 목표관리 대상은 「해운법」 제3조와 제23조 따른 내항 여객 및 화물 운송업체로 2018년 기준 약 800여 개 업체이며 대상 선박은 2,000여 척에 이른다.⁸⁴⁾

지정 기준은 최근 3년간 온실가스 배출 총량이 5만 톤 CO₂eq이거나, 연평균 온실가스 배출량이 1만 5천 톤 CO₂eq인 사업장을 하나 이상 보유하고 있는 업체이다 (〈표 4-4〉 관리업체 지정 기준 참조). 해양수산부 고시 제2021-130호에 따라 2021년도 해양·수산·해운·항만 부문 온실가스에너지 관리업체는 삼표해운주식회사, 상지해운(주), 금진해운(주), (주)남해고

84) 한국해양교통안전공단(검색일: 2022.8.25.)

속, (주)제주케이라인, (주)에이치해운, 일신로지스틱주식회사, 고려고속훼리(주) 등 8개 업체이다.

관리업체는 관장기관의 지정·고시에 이의가 있는 경우 고시된 날부터 30일 이내 지정된 서식에 따라 소명자료와 함께 이의신청을 할 수 있다. 관장기관은 이의신청 기한이 만료된 날부터 30일 이내 결과를 통보하고 변경이 있을 경우 변경 고시하여야 한다.

〈표 4-9〉 국내 연안해운 부문의 온실가스 목표관리제도 운영 일정

전년도	기준년도	차년도
• (~3월) 관리업체 선정(예비) • (~6월) 관리업체 지정 • (~9월) 감축목표 설정 • (~12월) 이행계획 제출	• (~12월) 감축목표 이행 • (9월~차년도 3월) 실적보고서 및 명세서 제출	• (~3월) 실적보고서 및 명세서 제출 • (6월) 평가/개선 명령

자료: 한국해양교통안전공단(검색일: 2022.8.25.)

지정 기준에 따라 전년도 3월에 예비 관리업체를 선정하고 6월에 관리업체를 확정한다. 이후 9월에 감축목표를 설정하고 12월에 이행계획을 제출한다. 기준연도에 감축목표 이행, 실적보고서 및 명세서를 제출하고, 이를 바탕으로 다음 연도에 평가한다. 평가 결과를 바탕으로 하여 「온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」을 근거로 보완 및 개선을 명령할 수 있으며 개선이 제대로 이루어지지 않을 경우 과태료 부과 등을 하고 있다.

2) 배출권거래제

KOEM는 해양수산분야 온실가스 인벤토리 작성뿐 아니라, 해양수산부문 온실가스 감축 수단 발굴을 위한 온실가스감축 외부사업 관리체계 구축, 온실가스감축 외부사업 활성화 등을 해양수산부로부터 위탁받아 수행 중이

다. 해운 부문의 경우 KOMSA가 해운 부문의 온실가스 감축 외부사업에 대한 방법론 개발, 외부사업 타당성 평가, 온실가스 감축량 인증 등 위탁받아 수행하고 있다. 즉, 해양수산분야의 해운 부문의 외부사업은 KOMSA, 해양·수산·항만분야의 외부사업은 KOEM에서 수행하고 있다.

〈표 4-10〉 KOEM의 해양기후변화 대응 사업

사업 부문	내용
국가 온실가스 통계 생산 및 관리	• 매년 해양수산부문 국가 온실가스 인벤토리 산정·보고 * 산정기간/분야 : 1990년~N-2년 / 국내해운, 어업 및 국제해운 • 통계 품질 제고를 위한 개선사항 발굴 및 추진
해양수산부문 온실가스 감축 수단 발굴	• 온실가스 감축 외부사업 관리체계 구축(외부사업 타당성 평가 등 위탁 업무) • 온실가스감축 외부사업 활성화(방법론 개발 및 사업 등록 지원 등)
기후변화 국제규범 대응 및 정책지원	• UNFCCC, IPCC 등 국제기구 해양수산부문 의제 분석 및 대응 • 해양수산부문 기후변화 주요 시책 수립 및 관련 법령 제·개정 지원
블루카본 연구개발 사업	• 항공·다중위성 영상 기반의 블루카본 식별 및 공간분포 매핑 등 블루카본 정보시스템 구축 • 권역별, 매체별(갯벌·염생식물·잡피) 현장 조사·분석을 통한 탄소순환 프로세스 규명 및 국가 고유 배출·흡수계수 개발 • 국내 블루카본 온실가스 산정·보고(MRV) 체계 마련 및 국가 온실가스 인벤토리 진입 기반 마련

주: 블루카본은 염생식물, 잡피 등 연안에 서식하는 식물생태계, 갯벌 등이 저장하고 있는 탄소를 의미함
 자료: 해양환경공단(검색일: 2022. 8.25.)

〈표 4-11〉 KOMSA의 온실가스감축 외부사업 주요 업무

사업 부문	내용
방법론 개발	외부사업 활성화를 위하여 위탁기관(공단)이 방법론 개발·직권등록 추진 및 외부사업자의 방법론 개발 컨설팅
외부사업 타당성 평가	적용된 방법론 적절성, 배출량 산정방식의 적합성 및 타 외부사업과의 중복 등록 여부 등 확인 * 외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침 제13조
온실가스 감축량 인증	방법론에 따른 감축량 산정 여부 확인 등 외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침 제31조

자료: 한국해양교통안전공단(검색일: 2022.8.25.)

KOEM과 KOMSA에서 수행하고 있는 외부사업의 절차는 크게 방법론 개발, 사업계획서 제출, 환경부 심의 및 인증, 사업실적 검증 단계로 구분한다. 구체적으로 살펴보면 외부사업 대상자가 온실가스 감축량 또는 흡수량을 계산하고 모니터링을 위한 방법론을 개발하여, 이를 바탕으로 사업계획서를 작성한다. 환경부에서는 사업자가 제출한 사업계획서를 검토하여 승인한다. 이후 사업자가 개발한 방법론에 따라 온실가스의 감축량과 흡수량을 계산하여 제출하면, 검증기관에서 평가하여 인증하게 된다.

KOEM과 KOMSA는 사업승인 및 타당성 평가 절차에서 환경부에 사업계획서를 제출하기 전에 적용된 방법론의 적절성, 배출량 산정방식의 타당성, 다른 외부사업과의 중복성 등을 검토하여야 한다. 이후 해양수산부에서 협의요청서를 작성하여 환경부에 제출하면, 환경부에서 심의요청서를 작성하여 인증위원회⁸⁵⁾에 제출한다. 최종적으로 인증위원회에서 승인을 심의하고 결과를 통보한다.

외부사업 감축량 인증과정을 살펴보면 개발한 방법론에 따라 외부사업자가 온실가스 감축 또는 흡수량 인증을 신청하면, KOEM과 KOMSA가 인증량의 적절성과 타당성을 검토하고 해양수산부는 온실가스 감축량 인증을 위해 환경부와 협의한다. 환경부가 외부사업 검증 전문기관의 검증을 받고 인증위원회에 인증심의를 요청하면, 인증위원회에서 승인 여부를 결정하여 통보한다.

외부사업 승인 및 인증 절차는 상위 법령에 따라 체계적으로 갖추어져 있다. 다만, 해양수산분야의 온실가스 감축을 위한 외부사업 추진 실적은 다른 분야에 비해 매우 부족하다.

85) 인증위원회는 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」 제26조에 따라 상해에 관한 전문적인 사항을 심의·조정하기 위하여 환경부장관이 구성하는 위원회를 말함

제3절 항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안

1. 관리체계 문제점 분석

1) 항만분야 온실가스 인벤토리 구축 미흡

(1) 기초자료수집 문제

항만분야의 탄소중립 실현을 위한 첫걸음은 온실가스 인벤토리 구축이다. 그러므로 구축된 인벤토리를 바탕으로 장래 배출량을 전망하고 그에 맞는 저감방안을 추진해야 한다. 4장에서 살펴본 것처럼, 항만분야도 국가 온실가스 인벤토리에 포함되어 있다. 하지만, 그 수준이 매우 미흡하여 세부적인 정책 마련에 활용되지 못하고 있다.

국가 온실가스 인벤토리 관리체계를 살펴보면 항만분야는 해양수산분야 중 해운분야에 포함되며, 해양수산분야의 온실가스 인벤토리 작성 산정기관인 KOEM에서는 한국석유공사에서 집계하는 석유류 수급통계와 「국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침」에 제시된 방법론을 이용하여 배출량을 추정하고 있다. 이러한 절차는 국가라는 큰 단위의 온실가스 인벤토리를 구축함에 있어서는 타당해보이나, 항만분야 그리고 더 나아가서 해양수산분야를 국한하여 바라보면 매우 부족한 것이 사실이다.

한국석유공사에서 집계하는 석유류 수급통계자료를 확보하여 더 세부적인 자료를 수집할 수 있다면 항만분야 온실가스 인벤토리 작성에 큰 도움이 될 것이다. 또한, 해운분야는 국가 온실가스 인벤토리 구축에 간접배출량 즉, 전력소비에 따른 온실가스 배출량은 포함하지 않지만, 전력소비량도 에너지 사용량 신고제도에 따라 한국에너지공단에서 별도로 관리하고 있다. 다만, 자료를 관리하는 한국석유공사와 한국에너지공단은 「개인정보

보호법」에 따라 세부적인 통계자료 제공이 불가능하며, 자료수집을 위해서도 공개하기 어렵다는 입장이다. 결과적으로 항만분야는 법률에 따라 탄소 배출 저감을 위해 관리가 필요한 산업⁸⁶⁾임에도 불구하고 현재 제도 안에서는 구체적인 항만분야 온실가스 인벤토리 작성 자체가 쉽지 않다.

이와 같은 문제의 근본적인 원인은 항만분야 관장기관인 해양수산부와 산정기관인 KOEM이 자료수집의 법적 강제성을 확보하지 못하는 것이다. 본 연구도 배출량 전망을 위하여 부두별 운영사별 유류사용량과 전기 사용량을 조사하였지만, 회신율은 저조하였다. 따라서, 이러한 근본적인 문제 해결을 위해 법적인 강제성을 확보할 필요가 있으며, 이어서 구체적인 개선방안을 제시하고자 한다.

(2) 항만분야 인벤토리 구축 방법론 부재

해외 선진항만들은 탄소중립을 위하여 인벤토리 구축에 힘쓰고 있다. 특히, LA/LB항은 지난 2017년부터 탄소를 CAAP 계획 수립 대상에 포함하였으며, 온실가스 인벤토리 구축을 위한 방법론을 개발, 고도화하고 있다. 다만, 기초자료의 경우는 법적 근거를 갖추고 수집하고 있지 못해, 운영사의 협조를 통하여 수집하고 있다⁸⁷⁾.

국내 항만분야 온실가스 인벤토리 작성에 활용되는 방법론은 연료연소에 대한 배출량 산정방식을 그대로 준용하고 있다. 온실가스종합정보센터(2021a)에 따르면 해운분야의 배출량은 에너지 소비 활동에서 열 및 기계적 작업을 위해 소비되는 연료에 의한 배출로 연료 연소 방법론으로 계산

86) 해양수산부 소관 부문 해양·수산·해운·항만 등 4개 부분임

87) 배출량 인벤토리 업데이트 시 서면조사 등을 통하여 터미널별 월별 장비별 활동자료를 수집하고 있으며, 조사하는 자료의 항목은 장비 종류·장비 식별 번호·장비 제조사 및 모델·엔진 제조사 및 모델·정격 마력(또는 킬로와트)·장비 및 엔진 연식·사용 연료 유형(ULSD, 가솔린 또는 프로판)·전기 장비·연간 운영시간(일부 터미널은 아워미터 사용)·배기가스 저감 기술 탑재·새로운 장비 구입·폐기되거나 서비스에서 제거된 장비 등임(THE PORT OF LOS ANGELES & Port of LONG BEACH(2021), p. 38.)

한다. 그리고 바이오매스 연료 연소에 의한 온실가스는 산정 후 국가 온실가스 인벤토리에 포함하지 않고 별도로 구분하여 보고하고 있음을 설명하고 있다.⁸⁸⁾

$$E = \sum_{ij} \left[(TA_{ij} - NA_{ij} \times FCS_{ij}) \times 41.868 \right. \\ \left. \times CF_i \times EF_i \times OF_i \times 44/12 \times 10^{-3} \right] \quad \dots\dots\dots [\text{식 4-1}]$$

- | | |
|--------|---|
| E | • CO2 배출량(천 톤 CO2) |
| TA | • 총 연료사용량(천TOE) |
| NA | • 비연료사용량(천TOE) |
| FCS | • 탄소물입률 |
| 41.868 | • Joule-TOE 환산계수(TJ/천TOE) |
| CF | • 전환계수(순발열량/총발열량) |
| EF | • 배출계수(t C/TJ) |
| OF | • 산화율 |
| 44/12 | • 탄소 기준 배출량을 이산화탄소 기준으로 전환(kg CO2/kg C) |
| i | • 연료 유형 |
| j | • 부문 |

자료: 온실가스종합정보센터(2021a), p.14.

항만 내에서 활동하는 다양한 장비에서 발생하는 탄소를 추정하기 위해 서는 「IPCC 2006 guidelines」에서 제시한 Tier 3 수준의 상향식 방법론을 활용하는 것이 바람직하다. 또한 국립환경과학원(2019a), 국립환경과학원(2019b), 해양수산부(2018) 등도 Tier 3 수준의 상향식 방법론을 활용하였다. 따라서, 정확한 항만분야 탄소 배출량 산정을 위한 방법론 개발하고 지속적으로 고도화해야 한다.

88) 온실가스종합정보센터(2021a), p.13-14의 내용을 바탕으로 저자 작성

2) 항만분야 온실가스 감축 이행·점검 체계 미흡

(1) 온실가스 목표관리제도 미시행

「탄소중립기본법」과 「온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」에 따라 연료소비량과 전력소비량 등을 수집하고 규정된 방법론에 따라 직접배출량과 간접배출량을 산정한 후 일정 수준 이상을 배출하는 사업체 및 사업장은 목표관리 대상에 포함하여 관리하여야 한다.

관리 대상업체는 「온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침」에서 정하는 방법론을 준용하여 온실가스 배출 명세서를 관장기관에 제출하고 관장기관은 검증기관의 검증을 환경부 장관에 제출해야 한다. 또한, 명세서의 배출량을 기준으로 다음 연도를 기준으로 5년 단위의 저감목표와 이행계획을 포함하는 이행계획서를 작성하여 제출하여야 한다. 부문별 관장기관은 관리 대상업체에서 제출한 이행실적을 검토하여 목표 달성 여부를 평가하고 저감목표를 달성하지 못한 경우 개선을 명령할 수 있다. 관장기관은 개선 명령 이행 여부를 검토하여 개선하지 못한 경우에 과태료 등을 부과하는 등 조치를 취해야 한다.

2022년도 해양·수산·해운·항만 부문 온실가스 관리업체(해양수산부 고시 제2022-97호)는 모두 9곳이며, 업종은 교통(해운)업이다. 본 연구에서 수집된 34개의 업체 중 5개의 컨테이너터미널 운영사가 목표관리 대상 기준인 3년 평균 1만 5천 톤 CO₂-eq 이상의 탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 해양·수산·해운·항만 부문 온실가스 관리업체가 모두 9곳에 불과한데, 본 연구에서 조사된 일부 항만 운영사 중 목표관리제도 편입 대상이 5곳에 달하는 것은 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

또한, 목표관리 대상업체 선정 기준은 사업장과 사업체 기준으로 나눈다. 사업체 기준으로 고려했을 때 관리대상이 대폭 확대될 가능성이 크다.

본 연구에서 확보한 자료의 한계로 목표관리 대상에 비컨테이너 사업체와 사업장은 포함되지 않았다. 다만, 사업체가 여러 개의 사업장을 운영하는 비컨테이너 품목 등을 감안하면 항만분야에서 온실가스 목표관리 대상이 더욱 늘어날 것으로 예상된다.

〈표 4-12〉 항만분야 온실가스 목표관리제도 편입 대상업체 현황(2022년 기준)

단위: 톤

구분	탄소 배출량			
	2019	2020	2021	3년 평균
A 터미널	20,561	21,985	26,635	23,060
B 터미널	25,693	28,540	31,238	28,491
C 터미널	20,491	18,876	20,657	20,008
D 터미널	50,450	50,233	53,446	51,376
E 터미널	19,321	21,320	22,384	21,008

주: 목표관리대상업체 선정 기준은 연평균 배출량이 업체 기준으로 5만 톤 CO₂-eq, 사업장 기준으로는 1만 5천 톤 CO₂-eq임

자료: 저자 작성

항만분야의 온실가스목표관리제는 「탄소중립기본법」 시행령 제74조 14항에 따라 KOEM이이행해야 하지만, 기초자료수집의 한계 등으로 인해 목표관리제도로 관리되지 못하고 있다.

(2) 항만분야 온실가스 배출권거래제도 미활용

교토의정서 제17조에는 국가의 온실가스 감축 의무이행의 효율성 제고를 위해 3대 시장 메커니즘(교토 메커니즘)을 제시하고 있으며, 그중 하나가 배출권거래제도이다. 국내 온실가스 배출권거래제도는 교토의정서의 배출권거래제의 국내판이며, 대상업체 간 자유로운 거래를 통하여 온실가스 감축활동을 활성화하기 위한 제도이다.

〈표 4-13〉 교토 메커니즘 요약

구분	세부 내용
배출권거래제 (ETS: Emission Trading Scheme)	온실가스 감축의무가 있는 국가 상호 간에 남거나 부족한 배출권을 사고팔 수 있도록 하는 제도
공동이행제 (JI: Joint Implementation)	감축대상 국가 간 온실가스 감축사업에 투자로 인한 감축분을 자국의 감축분으로 인정하는 제도
청정개발체제 (CDM: Clean Development Mechanism)	감축 대상 국가들이 비대상 국가의 온실가스 감축사업을 통한 의무감축분 일부 상쇄제도

자료: United Nations(1998)을 바탕으로 저자 재작성

「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」에 따라 2015년 국내 시행되었으며, 현재는 「제3차 계획기간 국가 배출권 할당계획」에 따라서 운영 중이다. 할당 부문은 전환, 산업, 수송, 건물, 폐기물, 공공·기타 등 6개 부문으로 구분된다. 할당 대상의 기준은 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」 제5조에 따라서 국가 온실가스 배출량에 미치는 영향, ETS 적용·이행 가능성, 객관적 배출량 측정·보고·검증 여부 등을 종합적으로 고려하여 선정하고 있다.

항만분야의 경우 「한국표준산업분류(KSIC: Korean Standard Industrial Classification)」 중 「기타 운송 관련 서비스업(529)」 중 「항구 및 기타 해상 터미널 운영업(52921)」에 포함되고, 「기타 운송 관련 서비스업」은 배출권 할당 부문에서는 건물 분야로 분류되고 있다.⁸⁹⁾⁹⁰⁾

하지만 실제 항만분야 업체가 온실가스 배출권을 할당받지 못하는 이유는 객관적 배출량 측정·검증 여부, 즉 온실가스 배출량 명세서 작성이 어렵기 때문이다. 터미널 운영 주체는 자체적으로 사용하는 유류 및 전기소비량에 대한 기초통계를 갖추고 있지만, 명세서 작성을 위한 방법론 개발, 검증 등이 쉽지 않고 온실가스 배출권 할당 이후에 실제적인 이익에 대한

89) 해운 분야는 수송부문으로 구분됨

90) 통계청(검색일: 2022.9.9.)

확신이 부족하여 자발적인 참여가 어려웠던 것으로 추측한다.

본 연구에서 수집한 자료를 바탕으로 분석한 결과, 항만분야에서 온실가스 배출권 할당 기준을 초과하는 업체는 2022년 기준 3곳이다. 다만, 이들은 단일 사업장 기준(연간 2만 5천 톤 CO₂-eq)을 초과하는 곳으로 여러 개의 사업장을 운영하는 업체 등을 고려하면 확대될 가능성이 높다.

〈표 4-14〉 항만분야 온실가스 배출권할당 대상업체 현황(2022년 기준)

단위: 톤

구분	탄소 배출량			
	2019	2020	2021	3년 평균
A 터미널	20,561	21,985	26,635	23,060
B 터미널	25,693	28,540	31,238	28,491
D 터미널	50,450	50,233	53,446	51,376

주: 온실가스 배출권은 기준 연도의 연평균 배출량이 2만 5천 톤 CO₂-eq인 사업장 또는 12만 5천 톤 CO₂-eq 이상 배출하는 업체를 대상으로 할당됨

자료: 저자 작성

이러한 현실적인 여건의 한계로 배출권거래제도의 외부사업을 활용하기 어렵다. 현재 배출권등록부시스템 기준 685건의 국내 사업이 추진되고 있으며, 이중 해운·항만 관련 외부사업은 총 3건에 불과하다. 또한 3건 중 1건은 항만 LED 교체 사업으로, 도로조명 설치 관련 방법론이 적용되어 울산항만공사의 사업이지만 KOEM 외 기관에서 관리하고 있다. 외부사업 방법론 현황을 살펴보면 현재 총 282개의 방법론이 등록되어 있으며 해운·항만 관련 방법론은 총 4개이다.⁹¹⁾ 사업자는 외부사업을 통하여 할당받은 온실가스 배출권을 보다 유연하게 운용할 수 있다. 또한, 배출권거래제도를 활용하여 경제적 편익을 창출할 수 있기 때문에 외부사업을 더욱 활성화해야 한다.

91) 배출권등록부시스템(검색일: 2022.9.9.)

〈표 4-15〉 해운항만 부문 외부사업 현황

단위:톤

사업명	사업자	온실가스 감축량(연평균)	유효기간	방법론
울산항 하역시설 LED 조명기기 교체를 통한 온실가스 배출 극소규모 감축사업	울산항만공사	391	2016.7.25. - 2023.7.24	고효율 도로조명 설치 사업의 방법론
동원부산컨테이너터미널(주)의 트랜스퍼 크레인 동력을 전기로 교체함에 따른 온실가스 배출 감축사업	동원부산컨테이너터미널(주), 부산항만공사	586	2022.6.30. - 2032.3.31	화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감사업의 방법론
एको누리호의 선박육상 전원 전환을 통한 온실가스 배출 감축사업	한국전력공사		2013.4.19. - 2023.4.18	선박의 유류발전을 선박육상전원으로 전환하는 사업의 방법론

자료 : 배출권등록부시스템(검색일 : 2022.9.9.)

〈표 4-16〉 해운항만 부문 외부사업 방법론 현황(2021년 10월 기준)

방법론명	신규/개정	방법론 분야	방법론 유효시작일	최초방법론 유효시작일
국내 선박의 저탄소 연료전환 사업의 방법론	신규	수송 - 수송	2021.12.30	-
선박의 유류발전을 선박육상전원으로 전환하는 사업의 방법론	개정	수송 - 수송	2020.10.22	2018.08.03
화석연료를 사용하던 항만 화물운송장비가 전력을 사용함에 따른 화석연료 절감사업의 방법론	신규	에너지 수요 - 에너지 수요	2020.10.22	-
항만 화물 운송장비 연료 전환 사업의 방법론	개정	에너지 수요 - 에너지 수요	2020.10.22	2020.03.26

자료 : 배출권등록부시스템(검색일 : 2022.9.9.)

3) 이행체계의 강건성 부족

(1) 관리기관의 전문성 부족

국내 항만분야 탄소중립 관리체계는 비교적 잘 정비 되어있으나, 잘 이행되지 못하는 원인 중 하나로 지정된 기관의 전문성이 다소 부족한 것으로 판단된다. 미국과 비교하면, 미국의 항만 탄소중립을 관리하는 최상위 기관은 EPA로 우리나라 조직체계로 보면 환경부이다. 하지만, EPA는 항만의 특성을 고려하기 위하여 항만공사로 구성된 이니셔티브를 조직하고 다양한 활동을 정책적·제도적으로 지원하고 있다.

우리나라 항만분야의 총괄 관장기관은 해양수산부이다. 다만, 분야별 제도별 전담기관 지정 현황은 정비가 시급하다. 해양수산분야 온실가스 인벤토리 작성은 KOEM에서 전담하고 있다. 해운분야의 온실가스 목표관리제, 배출권거래제는 KOMSA에서 관리하고 있다. 해양, 수산, 항만분야의 온실가스 목표관리제, 배출권거래제는 KOEM에서 담당하고 있다. 하지만, 항만분야의 기초자료의 부족 등으로 인해 온실가스 목표관리제는 시행하지 못하고 있다. 항만분야 인벤토리 작성, 목표관리제도 운영을 통한 이행점검 등 전반적 관리를 위하여 전담기관의 역량 강화에 대한 고민이 필요하다.

(2) 항만별 세부 이행계획 부재

일본에서는 최근 「지구온난화 대책의 추진에 관한 법률」, 「에너지정책기본법」에 따라 CNP 구축계획을 마련하였다. 국제전략 항만, 국제거점항만은 필수적으로 CNP 계획을 수립하여야 하며, 지방 관리항만은 권장 사항이다. CNP 계획은 배출량 추정, 감축목표 및 감축 계획 설정, 수소 중심의 신재생에너지 공급 목표 및 계획, 항만경쟁력 강화 방화 검토, 로드맵 작성, 이행관리 등 세부적인 이행계획까지 포함하고 있다.

우리나라도 올해 상반기 「탄소중립 항만 구축 기본계획 수립 용역」을 시작하였으며, 이를 바탕으로 앞으로를 준비하고 있다. 항만은 주요 품목이 컨테이너인지 비컨테이너인지에 따라서 장비 구성이 다르다. 또한, 관리주체에 따라 예산 확보, 사업 추진 등에서 차이가 발생할 수 있다. 이러한 특성을 반영하여 탄소 배출량 저감을 위한 세부적인 이행계획 마련을 위해서는 일본의 CNP처럼, 항만별 특성을 살펴 탄소 배출량 저감을 위한 세부적인 이행계획과 탄소 저감 전략 수립이 필요하다.

(3) 관련 연구개발 부족

미국, 네덜란드 등 해외 주요 항만은 탄소 포집 및 저장 기술 개발, 탄소 배출 최소화를 위한 하역장비 최적화 기술 개발 등 다양한 분야에서 항만의 탄소배출 저감을 위한 연구, 개발을 진행하고 있다.

광양항 항만자동화 테스트베드 구축 사업을 시작으로 앞으로 개발하는 모든 터미널은 완전 자동화 터미널로 도입할 예정이며 더 나아가 진해신항 등은 자동화 항만을 넘어 스마트항만으로 육성할 계획이다. 이러한 우리나라 항만 정책의 방향성을 고려하면 항만에서 사용하는 유류는 자연스럽게 소비가 감소할 것이며, 전기, 수소, 암모니아 등 새로운 에너지를 활용하는 장비로 전환될 것이다.

수소, 암모니아 등은 장기적 관점의 대체 에너지원으로, 즉각적인 활용이 가능한 전력기반 장비 도입이 추진될 것이다. 전력소비량이 많아짐에 따라 증가하는 간접 배출을 발전 부문에서만 해결해야 하는 것으로 남겨둔다면 큰 문제가 발생할 수 있다. 이러한 여건 변화에도 불구하고 우리나라의 항만분야의 기술 개발은 대부분은 자동화 하역장비 위주로 수행되고 있으므로 항만분야 탄소중립 관련 기술 개발을 대폭 확대해야 한다.

4) 상위법 대응 노력 부재

「탄소중립기본법」에 따라 지난 2021년 9월 25일부터 ‘기후변화영향평가’ 제도가 도입되었다. ‘기후변화영향평가’는 국가의 주요 계획 및 대규모 개발사업에 앞서 기후변화 영향을 검토하여 기후 위기에 적극적으로 사전 대응하고 온실가스 감축을 유도하기 위한 평가제도이다. 1년의 유예기간을 거쳐 2022년 9월 25일부터 시행하였다.. 평가 대상은 기존 전략 및 환경영향평가 대상 중 온실가스를 다량으로 배출하거나 기후 위기에 취약한 10개 분야⁹²⁾를 대상으로 하며 항만 건설사업도 포함된다.

‘기후변화영향평가’ 제도가 항만 개발사업에 미치는 영향이 상당할 것으로 예상되지만 현재까지 “기후변화영향평가” 제도에 대한 대응 노력이 부재하다. 항만 개발은 대규모의 인프라가 구축되는 사업으로 다양한 배출원에서 탄소가 발생된다. 대표적으로 건설장비, 선박 등에서 배출되는 탄소가 있으며, 간접적인 배출까지 고려하면 콘크리트와 시멘트 제조 과정에서 발생하는 탄소, 트럭을 통하여 각종 건설 자재를 운반할 때 발생하는 탄소까지 포함될 수 있다. 따라서, 「제2차 신항만건설기본계획 타당성 재검토」, 「제4차 항만기본계획 수정계획」, 진해신항 개발 등 해양수산부에서 준비하는 대규모 항만 개발사업의 원활한 추진을 위해 항만 개발사업의 특성을 고려하여 ‘기후변화영향평가’ 가이드를 서둘러 준비해야 한다.

92) 10개 분야는 에너지 개발, 산업입지 및 산업단지 조성, 도시 개발, 수자원 개발, 항만 건설, 산지 개발, 하천의 이용 및 개발, 도로 건설, 공항 건설, 폐기물·가축분뇨 처리시설 설치 등임(환경부 보도자료 (2022.9.22.)(검색일: 2022.9.25.)

2. 관리체계 개선방안

1) 항만분야 온실가스 인벤토리 구축 체계 개선

(1) 에너지소비량 통계 구축방안 법제화

항만분야의 탄소중립 추진을 위해서는 인벤토리 구축이 선행되어야 한다. 즉, 에너지 소비자료에 근거한 배출량 전망과 전망 결과를 바탕으로 저감목표와 방안 등을 설정, 추진해야 한다. 본 연구의 수행 과정에서 가장 어려웠던 부분은 에너지 소비자료의 확보였다. 터미널별 유류 및 전력소비량을 수집함에 있어서 장비별 사용 시간, 가동률, 연료량 등 세부 실적을 집계하는 것이 매우 어려웠으며, 신뢰성 있는 자료를 지속적으로 수집할 수 있는 통계 구축과 제도적 정비가 매우 중요하다.

발전 부문 등 다른 분야에서는 「탄소중립기본법」 등 관련 법에 근거하여 에너지소비량 등 기초자료를 수집하여 관리하고 있다. 미국의 LA/LB는 이미 탄소배출 인벤토리를 구축하였으며, 일본에서는 「지구온난화 대책의 추진에 관한 법률」, 「에너지정책기본법」 등에 따라 항만구역에서 탄소배출 인벤토리를 구축하고 관리하도록 하고 있다.

우리 항만에서 소비되는 유류 및 전력소비량은 터미널 운영사와 하역사에서 관리하고 있다. 유류와 전력의 경우 석유류 수급통계, 에너지사용량 통계 등이 존재하나, 세부적인 에너지 소비의 구조는 터미널 운영사와 하역사만 보유하고 있다. 따라서 항만의 에너지소비량 통계 시스템을 구축하기 위해서는 운영사와 하역사의 자료 협조가 필수적이지만, 현재 제도에서는 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 개인정보와 영업에 밀접하게 관련이 있는 정보를 제외하고 에너지 소비량 자료 제공을 터미널 계약사항에 포함하거나 「항만법」 등 관련 법 개선을 통해 자료의 수집 방안을 정비해야 한다.

(2) 항만분야 인벤토리 작성 계수 개발

2050 항만분야 탄소중립 실현을 위해서는 현실성 있는 저감목표설정 및 방안 마련이 무엇보다 중요하다. 이를 위해서 인벤토리 작성 방법론을 개발하고 고도화해야 한다. 현재 국가 온실가스 인벤토리의 작성 방법론은 국가 단위에서는 적용이 가능할 것으로 보이지만, 세부적인 산업의 경우 불확실성이 상당하다. 특히, 항만분야의 경우 장비 구성의 특성과 사용현황 등을 고려할 수 없고 단순 사용 연료 연소로 발생하는 탄소 배출량을 추정하고 있다.

교통, 철도 분야에서는 Tier 3 수준의 세부적인 방법론을 활용하도록 온실가스종합정보센터(2021a) 등 관련 지침에서 규정하고 있다. 또한 국립환경과학원(2019a) 연구에서도 국가 배출원 산정에 항만 부분이 누락된 주된 원인으로 방법론 부재를 지적하고 있다. 따라서, IPCC에서 제시하고 있는 Tier 3 수준으로 세부적인 방법론을 준용하여 항만분야 온실가스 인벤토리를 구축하여 관리할 필요가 있다.

또한, 장비별로 단위 연료소비량별 탄소 배출량에 차이가 있음에도 불구하고 방법론에 적용하고 있는 계수 역시 해외에서 제시하는 수치를 그대로 방법론에 적용하고 있다. 현재 장비의 구성과 향후 항만 장비에서 소비되는 에너지원의 변화 등을 고려하면 국내 항만분야의 고유 배출계수를 개발이 필요하다. 모든 항만 장비를 고려하여 계수를 개발하고 정비하는 것이 쉽지 않지만, 우선순위를 설정하여 대표적인 컨테이너 터미널을 시작으로 국내 실정에 적합한 계수를 개발해야 한다.

2) 항만분야 온실가스 감축 이행·점검 체계 개선

(1) 항만분야 온실가스 목표관리제도 시행

우리나라는 「탄소중립기본법」에서 따라 국가 온실가스 통계를 관리하고, 온실가스 다배출 산업에 대한 저감목표를 부과하여 이행을 점검하는 등 온실가스 관리제도를 체계화하였다.

본 연구의 분석 결과 2022년 기준으로 항만분야에서 온실가스 목표관리제도 대상 기준을 초과하는 사업장은 5개 터미널이며, 자료수집의 한계로 인해 분석 대상이 전체 조사 대상의 약 10%에 불과하다는 점, 사업장별 검토로 사업체 단위의 검토가 쉽지 않았던 것을 고려하였을 때, 더 많은 대상이 있을 것으로 예상된다.

특히, 온실가스 목표관리제도는 저감목표 제시, 이행점검, 점검 결과에 따른 행정명령 등이 가능하여 국내 탄소중립 관리체계에서 가장 효과적인 이행방안이라 할 수 있다. 따라서, 항만분야의 탄소중립 관리체계 효과적인 작동을 위해 항만분야 온실가스 목표관리제도의 활성화가 필요하다.

(2) 항만분야 온실가스 배출권거래제도 활성화

항만분야 업체의 온실가스 감축 의무이행의 효율성을 제고하기 위하여 온실가스 배출권거래제도에 포함해야 한다. 항만분야는 「온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」 등에 따라 온실가스 배출권을 할당받을 수 있다. 하지만, 자료의 한계로 배출량 측정·검증, 명세서 작성 등이 어려우며 사업체 입장에서는 일종의 규제에 가깝기 때문에 자발적인 참여 또한 기대하기 어렵다. 앞서 제시한 항만분야 온실가스 목표관리제도가 실제로 운용된다면 항만분야의 사업체에서는 온실가스 배출량을 신고해야 하며, 기준을 초과할 경우 온실가스 배출권을 할당받아야 한다. 그리고 할당받은

배출권 범위 내에서 배출해야 한다. 실제 본 연구의 분석 결과 2022년 기준 3개의 업체가 배출권 할당 기준을 초과하고 있으며, 앞서 설명한 자료수집 제약 등을 고려하면 실제 할당 대상은 확대될 가능성이 크다.

항만분야 업체들이 배출권거래제도에 편입되면 규제와 동시에 적절한 저감 실천을 통하여 경제적인 이익과 운영의 탄력성을 확보할 수 있다. 또한, 배출권 상쇄제도와 타 분야의 사업을 연계하여 탄소배출을 저감하고 확보한 배출권을 활용하여 경제적 이익을 창출할 수 있다. 해양수산분야의 외부사업 실적은 다른 분야에 대비해 미미한 수준이다. 따라서, 해양수산부, 항만공사, KOEM 등 관계기관은 항만분야 외부사업 방법론 개발 및 컨설팅 등을 지원함으로써 제도의 활성화를 모색하고 이를 통해 항만분야의 탄소를 적극적으로 저감할 수 있는 제도적 기반을 마련해야 한다.

3) 이행체계의 강건성 강화

(1) 관리기관의 역량 강화

현재 관리체계를 살펴보면 온실가스 인벤토리 구축은 KOEM에서 총괄하고 있고, 해운분야의 온실가스 목표관리제도, 배출권거래제도 등은 KOMSA에서 담당하고 있다. 반면, 해양, 수산, 항만분야의 온실가스 목표관리제, 배출권거래제도는 KOEM에서 담당하고 있다. 해양수산분야의 세부 분야별 특성을 고려하면 KOEM과 KOMSA의 관리체계는 적절하다.

다만, 항만분야 탄소중립 이행체계 개선을 위한 KOEM의 역량강화가 필요하다. KOEM에서 항만분야의 온실가스 감축 및 이행점검을 하기 위해서는 전담조직을 신설하는 등 역량을 강화해야 한다. 그리고 초기에는 KMI 등 관련 연구기관과 항만공사, 운영사 등 운영 전문기관과 협력을 통하여 항만분야의 특성을 고려한 관리·이행방안 정비가 필요할 것이다.

(2) 항만별 탄소배출 저감계획 수립

우리나라 항만의 2050 탄소중립 실현을 위해서는 일본의 CNP처럼 항만별 세부적인 탄소 저감계획 수립이 필요하다. 하지만 국내 항만분야 최상위 법정기본계획인 「항만기본계획」에서조차 탄소배출 저감계획을 마련하지 못하고 있다. 앞으로 항만의 물동량 증가, 스마트화·친환경화에 따른 전력 소비 급격 등에 따라 직·간접적 탄소배출 또한 급격하게 증가할 가능성이 매우 크므로 항만별 탄소배출 저감계획을 수립해야 한다.

별도의 항만별 탄소배출 저감계획을 검토하는 것보다는 「항만기본계획」에서 항만별 특성을 고려하여 탄소배출 저감계획을 수립하는 것이 적절하다. 이를 위해서 「항만법」을 개정하여 「항만기본계획」 수립 시 탄소 저감계획 수립을 검토하도록 규정할 필요가 있다.

(3) 탄소중립 관련 기술 개발 확대

현재 우리나라 항만 현황을 고려한 탄소중립 실현을 위해서는 에너지효율화와 신재생에너지 부문의 연구개발이 시급하다. 국내 항만 정책은 자동화, 스마트화, 친환경화로 요약할 수 있다. 이에 따른 적절하게 대응하지 못한다면 직·간접 탄소배출은 급격하게 증가할 것이다.

앞으로 항만 장비는 전력, 수소 등 새로운 에너지원을 활용하게 될 것이며, 수소 등 새로운 에너지원의 기술 개발 속도를 고려하였을 때, 당분간 전력 소비가 급격하게 증가할 것으로 예상된다. 따라서 단기적으로는 전력 소비를 최적화할 수 있는 마이크로그리드, 전력에너지관리시스템 등을 개발해야 한다. 그리고 장기적으로 수소 기반의 연료전지 등을 활용하는 무탄소 항만장비 개발을 위한 연구도 지속적으로 추진해야 한다.

본 연구의 분석 결과에서도 확인하였듯이 현재 항만 탄소 배출량의 대부분

분은 간접배출이며, 이 비중은 유류소비량 감소 및 전력소비량 증가에 따라 확대될 것으로 예상한다. 따라서, 항만 내에서 신재생에너지를 통하여 자체 전력을 생산하는 간접배출 저감 노력이 필요하다. 우리나라는 지리적 여건으로 재생에너지 생산 효율이 높지 않은 것으로 알려져 있다. 효율이 가장 높은 태양광을 활발하게 이용하고 있으며, 인천항, 부산항, 광양항 등 주요 항만에서는 태양광을 적극 도입하고 있다. 하지만 태양광의 면적 대비 부족한 생산성과 제한적인 항만 공간을 고려하면 지속적인 확대는 쉽지 않다.

지금까지 파력, 조력 등 해양 재생에너지 생산 기술에 투입된 예산과 기간 대비 성과가 부족하였으나, 이는 생산 효율 확보 기술력이 부족했고, 전력 운송을 위한 해저 케이블 매설 비용 등에 따른 경제성 확보에 어려움을 겪었기 때문이다. 최근 다양한 기술이 개발되어 재생에너지 생산 효율이 높아지고 있으며, ESS 등을 활용한 전력의 보관·운송이 가능하다. 또한, 항만의 탄소중립, 그리고 수소 경제로의 전환 등을 고려하여 항만을 거점으로 한 재생에너지 생산기술에 지속적인 투자가 요구된다.

4) 항만분야 기후변화영향평가 가이드 마련

「탄소중립기본법」에 따라 항만건설사업을 시행할 때 필수적으로 ‘기후변화영향평가’를 받아야 한다. ‘기후변화영향평가’의 계획수립기관 또는 사업자는 감축 측면에서의 온실가스 배출량 전망치, 중장기 감축목표, 기술 수준 등을 고려하여 감축목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 감축 방안을 제시해야 한다. 환경부는 ‘기후변화영향평가’를 환경영향평가의 틀에서 운영하되, 기후 분야 전문기관과 함께 평가서에 제시된 감축목표, 저감방안 및 적응방안 등의 적정성을 검토하여 환경영향평가의 협의 기간 내에 의견을 제시해야 한다⁹³⁾.

「탄소중립기본법 시행령」에서는 개발사업을 주관하는 행정기관의 장은 ①기후변화 관련 법령, 제도 및 주요 시책 등의 현황, ②기후변화 관련 국제 협약 및 국가비전과의 정합성, ③기후변화에 미치는 영향 및 온실가스 감축 방안, ④기후변화로부터 받게 되는 영향과 적응방안 등을 고려하여 “기후변화영향평가”를 시행하도록 하고 있다. 또한, 개발사업을 시행하는 사업자는 ①기후변화 관련 법령, 제도 및 주요 시책 등의 현황, ②탄소중립 시·도계획, 탄소중립시·군·구계획 등 관련 계획과의 정합성, ③개발사업 실시예 따라 예상되는 온실가스 배출량 및 감축 방안, ④개발사업이 기후변화로부터 받게 되는 영향과 위험성 평가, ⑤온실가스 배출원·흡수원, ⑥기후 위기 적응 방안과 개발사업의 사후관리 계획 등을 고려하여 ‘기후변화영향평가’를 실시해야 한다.

이에 따라, 환경영향평가와 동일한 시기, 절차를 갖는 ‘기후변화영향평가’에 대한 가이드를 마련하고 「항만기본계획」 수립과정에서 항만별 탄소저감계획 수립과 연계하여 검토해야 한다.

제4절 소결

본 장에서는 국내 탄소중립 관리체계를 살펴보았다. 결과적으로 국내 탄소중립 관리체계는 적절하게 정비되어 운영되고 있는 것으로 판단한다. 관련 법을 제정하여, 법적 근거를 갖추고 있으며 법에 근거한 최상위 정책심의 위원회도 마련되어 있다. 또한, 절차에 따른 주체별 역할, 관리기관의 역할도 비교적 명확하게 제시되어있다.

93) 환경부 보도자료(2022.9.22.)(검색일: 2022.9.25.)의 내용을 바탕으로 저자 재작성

또한, 항만분야 탄소중립 이행체계의 문제점을 살펴보고 그에 대한 개선 방안을 제시하였다. 항만분야 탄소중립 이행체계의 문제점은 크게 ①항만분야 온실가스 인벤토리 구축 미흡, ②항만분야 온실가스 감축 이행·점검 체계 미흡, ③이행체계의 강건성 부족, ④상위법 대응 노력 부재 등으로 나타났다.

해외사례, 관련 법·제도 등을 종합적으로 검토하여 개선방안을 마련하였다. ①항만분야 온실가스 인벤토리 구축 체계 개선을 위한 에너지소비량 통계 구축 및 계수 개발, ②항만분야 온실가스 목표관리제도 시행과 항만분야 사업체의 배출권할당 추진, ③ 항만분야 탄소중립 이행체계 강화를 위한 전담관리기관 역량 강화, 항만별 탄소배출 저감계획 수립, 탄소중립 관련 기술 개발, ④항만분야 사업의 원활한 추진을 위하여 항만분야 기후변화영향평가 가이드 마련을 제시하였다.

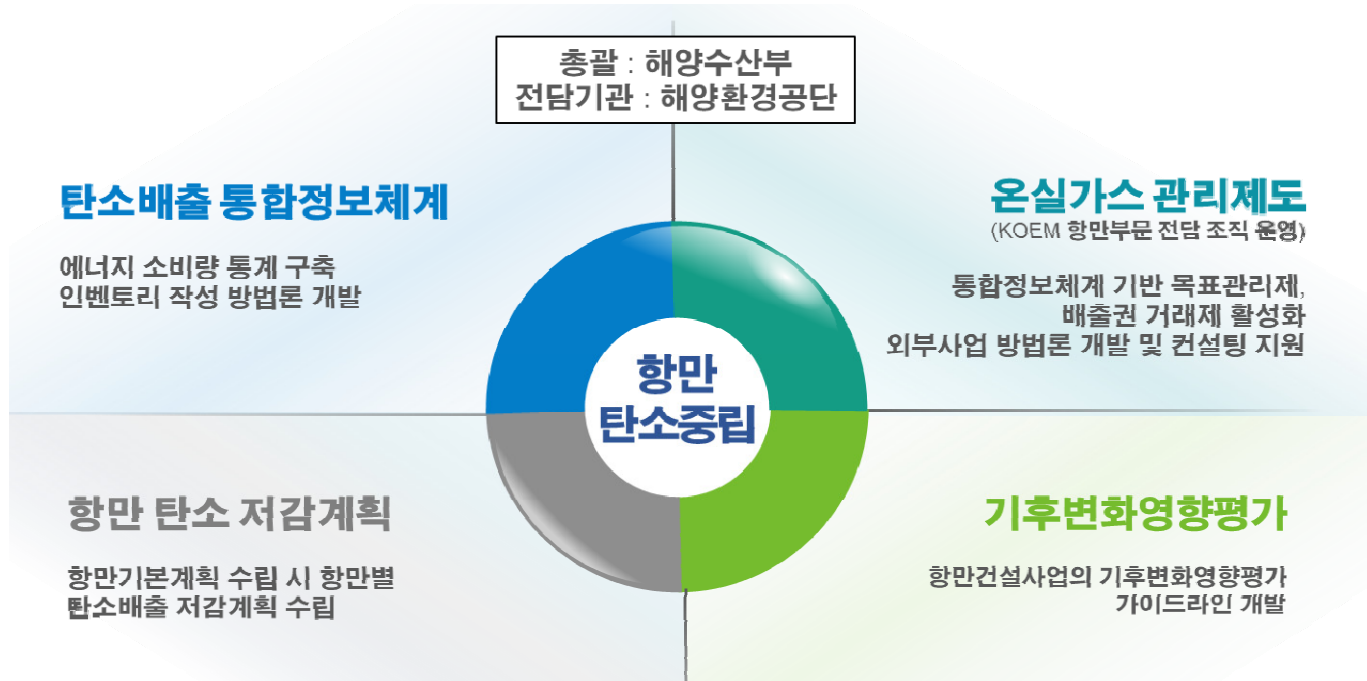
체계적으로 잘 갖추어진 항만분야의 탄소중립 관리체계를 유기적으로 작동시키기 위해서는 다양한 법·제도적 개선이 수반되어야 하며, 그에 따라 다양한 주체별 역할이 추가될 수 있다는 점이다. 다만, 본 연구에서 항만 터미널 내에서의 활동에 국한하여 대안을 제시하고 있어 선박, 항만배후단지, 육상물류망 등과의 연계한 탄소중립 실현에 대한 고려가 부족하다. 이에 본 연구의 한계점을 바탕으로 해운~항만~육상을 연계하는 탄소중립 실현 방안 관련 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

〈표 4-17〉 항만 탄소중립 관리체계 현황 및 이행 개선방안

구분	현황	문제점	개선방안
탄소배출 통합정보 체계 구축	• 국가 온실가스 인벤토리 해운 부문에 포함되어 산정(KOEM)	• 항만의 배출량을 파악할 수 없음 • 기초자료수집이 어려움 • 인벤토리 구축 방법론 부재	• 항만 에너지소비량 통계 구축 • 항만 인벤토리 작성 방법론 개발
온실가스 관리제도 활성화	• 목표관리제(KOMSA) - 연안해운 온실가스 일제조사 결과를 바탕으로 연안해운 대상으로만 운영(현재 8개 업체 지정) • 배출권거래제도(KOEM, KOMSA) - 현재 해운·항만 외부사업 3건 진행	• 기초자료수집 한계로 항만분야 목표관리 담당기관 부재 및 배출권거래제 운영 미비 • 외부사업 참여 저조	• 항만분야 목표관리제 담당기관 지정(KOEM) • 통합정보체계를 기반으로 목표관리제 및 배출권거래제 활성화 • 항만분야 외부사업 방법론 개발 및 컨설팅 지원
탄소중립 이행체계 강화	• KOMSA와 KOEM이 해양수산분야 온실가스 관리 제도를 분담하여 운영 - 온실가스 인벤토리: KOEM - 배출권거래제: KOEM, KOMSA(해운) - 목표관리제: KOEM, KOMSA(연안해운)	• 전담기관 지정에도 불구하고 항만분야 온실가스 목표관리제 미시행 • 탄소중립 이행 관련 계획 부재	• 항만분야 온실가스 목표관리제 시행 강제화 • 항만분야 온실가스 관리 전담조직 신설 및 역량 강화 • 항만기본계획 내 항만별 탄소 저감계획 수립 • 항만 탄소중립 기술 개발
기후변화영 향평가 가 이드 마련	• 「탄소중립기본법」에 따라 항만건설 사업은 기후변화영향평가를 받아야 함	• 기후변화영향평가 대응 노력 부재	• 항만분야 기후변화영향평가 가이드 마련 - 항만별 탄소저감 계획과 연계 검토

자료: 저자 작성

〈그림 4-7〉 항만 탄소중립 관리체계 이행방안



자료: 저자 작성

05

결론 및 정책제언

본 연구는 해외 항만과 국내 다른 분야에 비해 부족한 국내 항만분야 탄소중립 추진체계의 중요성을 강조하고 대안을 제시하며 탄소 배출량 전망, 탄소중립 관리체계 마련 중심으로 수행하였다. 그러나, 부족한 기초자료, 자료의 통일성 부족 등 어려움으로 연구 수행에서 많은 한계점이 있었다. 그럼에도 불구하고 실제 에너지 소비량 기반의 터미널 탄소 배출량, AIS 자료 기반의 선박 배출량 등 2050년까지 항만 구역에서 발생할 탄소 배출량 전망, 탄소중립을 달성하기 위해 시기별 직접·간접배출량 저감목표 설정하는 등의 연구성과를 얻었다. 특히, 국내 항만분야 탄소중립 관리체계가 제대로 작동하지 않는 문제점을 분석하고 이에 대한 개선방안을 제시한 것은 매우 중요한 성과로 생각한다. 본 장에서는 연구 내용을 요약하여 핵심 결론을 제시하고, 본 연구의 한계점과 후속 연구 방향을 제시하였다. 또한, 정책제언에서는 항만분야 탄소중립 관리체계 구축을 위한 법·제도 개선안, 향후 추진이 필요한 정부와 관련 기관의 정책을 제안하고자 한다.

제1절 결론 및 연구의 한계점

1. 결론

본 연구의 핵심 결론은 여섯 가지로 정리할 수 있다.

첫 번째, 탄소 배출량 저감이 우리 항만의 당면 핵심과제라는 점이다. 해외 선진 항만에서는 탄소중립 실현을 최우선 정책 중 하나로 추진하고 있다. 대표적으로, 항만 물동량 증가에 따른 항만의 탄소 배출량 증가에 대비하여 유류장비를 전력 장비로 교체하고, 전력 에너지 소비를 효율화하기 위한 다양한 노력을 기울이고 있다. 국내의 에너지, 해운, 도로 등 타 분야에서 체계적으로 탄소중립을 이행하고 있다. 법·제도에 근거하여 수집된 기초자료를 활용하여 온실가스 인벤토리를 구축하고, 시기별 저감목표를 설정하여 추진하고 있다. 반면 국내 항만의 탄소중립 실현을 위한 정책은 미흡한 상황이다. 국내 항만의 물동량이 지속적으로 증가할 것이고, 스마트 항만의 본격 도입에 따라 전력소비량도 급격히 증가할 것이다. 따라서 국내 항만의 탄소 배출량도 지속적으로 증가될 것이기 때문에 문제를 정확하게 인지하고 탄소 배출량 저감을 우리 항만의 핵심 과제로 다루어야 한다.

두 번째, 항만분야 온실가스 인벤토리를 구축하고 이를 바탕으로 한 배출량 전망 연구가 필요하다. 탄소 배출량 저감을 위해서는 배출원을 식별하고 배출량을 추정하는 것이 첫걸음이다. 이를 위해 배출원별로 사용하는 유류, 전기 등 에너지 사용량을 조사하고, 적절한 방법론을 개발하여 배출량을 추정하는 것이 매우 중요하다. 즉, 국내 항만분야 탄소 인벤토리 구축이 매우 시급하다. 또한, 인벤토리를 구축하고 이를 바탕으로 미래 탄소 배출량을 전망, 전략을 수립하고 수정한다면 탄소중립 실현에 큰 도움이 될 것이다.

세 번째, 항만의 탄소배출은 간접배출 중심으로 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 본 연구의 전망 결과를 참고하면, 항만에서 처리하는 화물이 증가함에 따라 항만에서 배출되는 탄소 역시 증가할 것이다. 특히, 주목해야 할 점은 친환경 항만 구축을 위해 최근 유류장비에서 전력 장비로 교체함에 따라 단위 화물을 처리할 때 발생하는 유류의 탄소배출 원단위가 감소하고 전력의 원단위는 증가하고 있다는 점이다. 즉, 직접배출이 감소하는 만큼 반대급부로 간접배출은 증가할 것이다. 이에 따라, 이어질 연구에서는 유류에서 전력으로의 에너지 전환에 따른 배출량 증감에 대한 검토가 필요하다.

네 번째, 항만의 탄소중립 실현을 위해서는 간접배출량 저감이 매우 중요하다. 현재 항만에서 배출되는 탄소 대부분은 전력 소비에 따른 간접배출이다. 이는 과거 유류 중심 장비에서 전력 중심 장비로 교체가 되고, 생활 여건 변화와 콜드체인 시장 확대에 따른 리퍼컨테이너 물량 증가, AMP 및 LED 조명시설 등 전력 기반의 친환경 장비 도입 등에서 비롯된 것으로 파악하였다. 문제는 앞으로 항만 자동화의 가속화, 그리고 본격적인 스마트화에 따른 전력 소비의 급격한 증가로 간접배출 역시 급격하게 증가할 것이라는 점이다. 즉, 향후 항만에서 배출되는 탄소 대부분은 간접배출로 전환될 것이다. 따라서, 항만에서 직접적으로 배출하는 일부 탄소만을 줄여서는 탄소중립 항만을 실현하였다고 하기 어렵다. 우리나라 에너지 정책에 따라 신재생에너지와 무탄소에너지가 확대되면 간접배출량도 자연스럽게 감소하겠지만, 외부에서 공급받는 무탄소전력으로 항만의 전력소비량을 충당하기는 매우 어려울 것이다. 본 연구에서는 현실적인 제약으로 인해 AMP 확대에 따른 전력소비량 증가에 비롯한 간접배출량을 전망할 수 없었지만, AMP 확대에 따라 매우 큰 전력이 필요한 것은 분명하다. 또한 향후 전기 추진 선박 등이 상용화되면 전력 병커링 수요도 증가할 것이다. 진정한 의미의 항만 탄소중립 실현을 위해서는 간접배출 저감을 위한 노력이

필요하다.

다섯 번째, 본 연구에서는 국내 항만 운영사 및 하역업체들을 대상으로 상세 조사를 진행하여 장래 탄소 배출량을 전망하였다. 또한, 국내 탄소중립 정책, 법·제도 등을 면밀하게 검토하여 항만분야 탄소중립 관리체계가 제대로 작동하기 위한 이행방안을 제시하였다. 종합하면 항만분야 탄소중립 이행체계의 중요성을 인식하고 관련 정책 마련을 서둘러야 한다는 것이다. 또한, 진정한 의미의 탄소중립 실현을 위해서는 간접배출을 효과적으로 줄이기 위한 방안을 고민해야 한다. 직접배출은 단순히 에너지를 전환하면 대부분 해결이 가능한 문제이나, 간접배출은 쉽지 않다. 또한, 항만분야 탄소중립 실현에서 간접배출의 중요성에 대한 인식의 수준은 높지 못한 실정이다.

2. 연구의 한계점과 향후 연구 과제

본 연구는 항만분야 탄소중립 관리체계의 문제점과 개선방안에 대하여 다각적으로 검토하고자 했으나, 연구 과정에서 몇 가지 한계점도 있었다. 가장 큰 어려움은 탄소 배출량 전망을 위한 기초통계의 절대적 부족이었다. 기초통계가 체계적으로 축척이 되지 않았다. 이러한 문제를 극복하며 조사를 진행하였으나, 단순 협조에 그치며 당초 계획 대비 충분한 자료를 수집하지 못하였다. 다음으로 자동화 수준에 따라 직·간접 배출이 달라질 것이라는 것은 쉽게 예상이 가능하지만, 추정하기 위한 자료가 부족하여 반영하기가 어려웠다는 점이다. 본 연구에서는 수집된 자료를 분석하여 유류의 탄소배출 원단위는 감소하고, 이에 따라 전기의 탄소배출 원단위는 증가하는 것을 밝혀냈으나 상관관계를 밝히기에는 자료의 한계가 많았다. 적절한 자료수집 절차가 만들어지기 전까지 이와 같은 한계가 한동안 지속될 것으

로 예상된다. 본 연구를 수행하는 과정에서 마주한 어려움을 바탕으로 다양한 향후 연구주제도 도출할 수 있었다. 첫째, 본 연구에서 컨테이너 터미널은 Tier 2 방법론을 활용할 수 있을 정도로 세부적인 자료를 수집할 수 있었으나, 비컨테이너 터미널은 자료의 한계로 Tier 3 방법론을 적용할 수밖에 없었다. 따라서, 비컨테이너 터미널을 대상으로 배출원별 상세 자료를 바탕으로 연구를 수행한다면 더욱 현실적이고 합리적인 연구결과를 도출할 수 있을 것이다. 둘째, 항만분야의 간접배출량 전망 및 저감 방안에 대한 연구가 필요하다. 실효적인 탄소중립 실현을 위해서는 간접배출을 줄이는 것이 매우 중요하다. 하지만 현재까지 관련 연구가 부족하기 때문에 국내 여건을 감안하여 항만에서 간접배출을 줄일 수 있는 방안과 효과 분석을 폭넓게 수행하면 효과적인 정책적 방향성을 확보할 수 있을 것이다.

또한 항만에서 선박 예인을 위해 사용하고 있는 예선의 배출량 분석이 이루어지지 않았다. 이 또한 항만과 마찬가지로 예선이 사용하고 있는 연료사용량이 체계적으로 조사되고 있지 않기 때문이다. 본 연구에서 개략적으로 예선으로 인한 이산화탄소 배출량을 추정한 결과, 연간 13.3만 톤이라는 절대 적지 않은 결과를 도출하였다. 이는 2020년 기준 우리나라 9개 주요 벌크항만에서 하역작업 시 배출한 13.6만 톤과 거의 유사한 수준으로 예선에 대한 탄소중립 모니터링 또한 필요하다는 것을 방증하고 있다. 다만, 이는 정확한 데이터가 아닌 추정치이기 때문에 예선과 관련된 연료사용량 조사를 위한 체계 마련이 필요할 것이며, 또한 예선사들이 환경친화적으로 예선을 운영할 수 있도록 LNG선 도입 유도, MGO 사용 장려 등의 법·제도적인 지원책을 마련해야 한다.

〈표 5-1〉 전국 예선업체 현황 및 이산화탄소 배출량 추정

지역	업체 수	선박 보유수 ¹⁾	연료사용량 ²⁾	탄소 배출량 ³⁾
부산	13	39	5,460	17,307.3
인천	8	24	3,360	10,650.6
평택	12	36	5,040	15,976.0
대산	14	42	5,880	18,638.6
군산	1	3	420	1,331.3
목포	3	9	1,260	3,994.0
여수·광양	19	57	7,980	25,295.3
마산	6	18	2,520	7,988.0
울산	7	21	2,940	9,319.3
포항	5	15	2,100	6,656.7
제주	1	3	420	1,331.3
동해	5	15	2,100	6,656.7
기타	6	18	2,520	7,988.0
합계	100	300	42,000	133,133.1

주: 1) 업체수 × 3척(업체당 평균 예선수, A 예선사 인터뷰)

2) 선박보유수 × 140톤(1척당 연료사용량 추정, A 예선사 실사용량)

3) 연료사용량 × 3.17(이산화탄소 배출계수)

자료: 한국예선업협동조합(검색일 : 2022.10.04.)의 조합원현황을 바탕으로 저자 추정하여 재작성

제2절 정책제언

본 연구의 종합적인 결론에 근거하여 향후 정부와 항만공사 등에서 추진할 필요가 있는 과제와 이에 따른 제언을 하고자 한다.

1. 항만분야 탄소배출 통합정보체계 마련

항만분야 탄소중립 관리체계 구축을 위해서는 무엇보다 에너지 소비자료에 근거한 배출량 전망이 선행되어야 하고, 전망 결과를 바탕으로 저감목표와 방안 등을 설정하여 추진해야 한다. 본 연구의 수행 과정에서 가장 어려운 부분이 에너지 소비 자료의 확보였으며 특히, 터미널별 유류 및 전력소비량을 수집함에 있어서 장비별 사용 시간, 가동률, 연료량 등 세부 실적을 집계하는 것이 매우 어려웠다. 따라서, 신뢰성 있는 자료를 지속적으로 수집할 수 있는 통계 구축이 필요하다.

발전 부문 등 타 분야에서는 「탄소중립기본법」 등 관련 법에 의거하여 기초자료를 수집하여 관리하고 있다. 일본에서는 「지구온난화 대책의 추진에 관한 법률」, 「에너지정책기본법」 등에 따라 항만구역에서 탄소배출 인벤토리를 구축하고 관리하도록 하고 있다. 우리 항만분야에서도 「항만법」 제29조(환경실태조사)를 통하여 환경실태조사를 실시하도록 하고 있다. 본 연구에서는 <표 5-2>와 같이 같은 법 시행령을 개정하여 온실가스를 조사 대상에 포함할 것을 제안한다.

〈표 5-2〉 「항만법 시행령」 제36조(환경실태조사의 대상지역 등) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	① 법 제29조제1항에 따른 항만구역에 대한 환경실태조사(이하 “환경실태조사”라 한다)의 대상지역은 항만구역 중 「군사기지 및 군사시설 보호법」 제2조제3호가목에 따른 군항의 육상구역과 수역을 제외한 구역으로 한다. ② 환경실태조사는 제1항에 따른 대상지역에서 발생하는 「소음·진동관리법」 제2조제1호에 따른 소음 및 「대기환경보전법」 제2조제1호에 따른 대기오염물질을 대상으로 실시한다.	(현행과 같음) ② 환경실태조사는 제1항에 따른 대상지역에서 발생하는 「소음·진동관리법」 제2조제1호에 따른 소음, 「대기환경보전법」 제2조제1호에 따른 대기오염물질 및 「탄소중립기본법」 제2조제5호에 따른 온실가스를 대상으로 실시한다.

자료: 항만법 시행령 제36조

유류 및 전기소비량은 터미널 운영사 또는 하역사에서 제공하여야 한다. 또한, 자료의 형식이 표준화되어야 하며 법적으로 규정화하지 않으면 체계적으로 수집하기가 쉽지 않다. 따라서, 본 연구에서는 <표 5-3>과 같이 「항만법」에 ‘항만분야 탄소배출 통합정보체계 구축과 운영’의 신설을 제안한다.

<표 5-3> 「항만법」 제00조(항만 탄소배출 통합정보체계의 구축·운영) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	신설	① 해양수산부 장관은 항만의 탄소중립 실현을 위하여 필요한 경우에는 항만 탄소배출 통합정보체계를 구축·운영할 수 있다. ② 해양수산부 장관은 제1항에 따라 항만 탄소배출 통합정보체계를 구축·운영하기 위하여 다른 중앙행정기관, 지방자치단체 및 「공공기관의 운영에 관한 법률」에 따른 공공기관(이하 “공공기관”이라 한다)의 장 및 항만시설 운영자에게 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다. ③ 해양수산부 장관은 항만탄소배출통합정보체계를 적절하게 관리할 수 있는 인력 및 조직과 시설·장비를 갖춘 자를 전담기관으로 지정하여 항만건설통합정보체계를 관리·운영하게 할 수 있다.

자료: 저자 작성

이러한 법 개정을 통한 자료수집 절차가 자료를 제공하는 주체에게도 이로움이 있어야 할 것이다. 다만, 금전적인 인센티브를 제공하는 것은 타당하지 않다. 본 연구에서는 이후 제언할 항만분야 온실가스 목표관리제도와 온실가스 배출권거래제도를 연계한 인센티브를 제안하고자 한다. 터미널 운영 주체에서 제공하는 자료를 이용하여 운영 주체가 탄소배출량을 실질적으로 줄이고, 관련 제도를 활용한 직·간접적 경제적 이익을 취할 수 있도록 지원하는 것이 가능하다. 온실가스 목표관리제도의 저감목표 설정, 이행과 관련한 방법론 개발 등 일종의 컨설팅 지원, 온실가스 배출권거래제도 활용방안 마련, 외부사업 방법론 및 검증방법 개발 지원 등을 제공할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 항만 탄소 저감계획 수립 및 평가 가이드 마련

우리나라의 2050 탄소중립 실현이라는 측면에서 보면 앞으로 증가가 예상되는 항만의 탄소배출은 중장기적으로 항만을 운영하고 개발하는 주체 전반에 부담으로 작용할 것이다. 특히, 광양항 항만자동화 테스트베드, 진해신항, 인천신항 등 항만 자동화 및 스마트화의 가속, 기존 터미널의 장비 에너지원 전환, AMP 등 친환경 설비 확대 등에 따라 전력소비량이 급증할 것이고, 이에 따른 간접배출량도 급격하게 증가할 것이다.

그러나 항만분야는 탄소 저감계획이 부족하다. 항만기본계획도 중장기 개발과 운영계획만을 수립하고 있으며, 개발 및 운영에 따른 에너지 수급 문제와 탄소배출 저감방안 등을 검토하지 않고 있다. 지금까지 항만분야뿐 아니라 국내의 개발사업에서 탄소 저감계획을 수립했던 분야는 없다. 다만, 「탄소중립기본법」에 따라 지난 2021년 9월 25일부터 ‘기후변화영향평가’ 제도 도입하면서 앞으로 항만 개발사업 수립에는 개발사업 실시에 따라 예상되는 온실가스 배출량 및 감축 방안, 기후변화 위험성 평가, 온실가스 배출원 도출 및 흡수원 마련, 사후관리 계획, 검토해야 한다.

따라서 ‘기후변화영향평가’에 대응하기 위한 항만의 탄소 저감계획 수립 계획 마련이 필요하다. 그러나, 새로운 제도를 신설하는 것보다는 항만분야 법정 최상위 계획인 국가 항만기본계획에서 다루는 것이 바람직할 것이다. 이에, 본 연구에서는 「항만법」 제6조 제1항을 개정하여 항만 기본계획 수립 시 항만별 개발계획에 따른 탄소 배출량 전망과 저감방안을 기본계획에 포함하여 수립할 것을 제안한다.

〈표 5-4〉 「항만법」 제6조(항만기본계획의 내용) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	① 항만기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.	(현행과 같음)
	1.~8. (생략)	(현행과 같음)
	9. 그 밖에 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항	9. 그 밖에 항만의 탄소 저감계획 수립 등 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항

자료: 항만법 제6조 제1항

3. 항만분야 온실가스 관리제도 활성화

우리나라는 「탄소중립기본법」에서 따라 국가 온실가스 통계를 관리하고, 온실가스 다배출 산업에 대한 저감목표를 부과하여 이행을 점검하는 등 온실가스 관리제도를 체계적으로 구축하였다. 다만, 항만분야의 경우 제도의 틀 안에서 관리되지 못하고 있다. 항만분야가 다른 분야에 비하여 탄소배출이 적어서 관리의 필요성이 작은 것도 아니다. 본 연구의 분석 결과 2022년 기준으로 항만분야에서 온실가스 목표관리제도에 대상 기준을 초과하는 사업장은 5개 터미널이며, 자료수집의 한계로 분석 대상이 전체 조사 대상의 약 10%에 불과하다는 점, 사업장별 검토로 사업체 단위의 검토가 쉽지 않았던 점을 고려하면 대상은 더욱 확대될 것이다. 해운 분야는 이미 온실가스 목표관리제도를 운영하고 있으며 2022년 기준 9개 업체이다. 또한 항만분야도 관련 법률에 따라서 온실가스 목표관리제도를 운영해야 함에도 이행되지 못하고 있다. 이에 따라, 항만분야 온실가스 목표관리제도 관리기관을 지정하여 조속히 시행, 관리하여야 한다.

또한, 항만분야 업체의 온실가스 감축 의무이행의 효율성을 제고하기 위해서 온실가스 배출권거래제도에 포함할 필요가 있다. 항만분야는 관련 법률에 따라서 온실가스 배출권을 할당받을 수 있도록 되어있다. 하지만, 자

료의 한계로 배출량 측정·검증, 명세서 작성 등이 어렵고 사업체 입장에서 일종의 규제에 해당하기 때문에 자발적인 참여 또한 기대하기 쉽지 않았다. 항만분야 온실가스 목표관리제도가 실제로 운영된다면 항만분야의 사업체에서는 온실가스 배출량을 신고해야 하며, 기준을 초과할 경우 온실가스 배출권을 할당받아야 하며, 할당받은 배출권 범위 내에서 배출해야 한다. 실제 본 연구의 분석 결과 2022년 기준 3개의 업체가 배출권 할당 기준을 초과하고 있으며, 자료수집 제약 등을 고려하면 실제 할당 대상은 확대될 것이다.

항만분야 업체들이 배출권거래제도에 편입되면 규제와 동시에 적절한 저감 실천으로 경제적인 이익과 운영의 탄력성을 확보할 수 있다. 또한, 배출권 상쇄제도와 연계하여 타 분야의 사업과 연계하여 탄소배출을 저감하고 확보한 배출권을 활용하여 경제적 이익도 창출할 수 있다. 해양수산부, 항만공사, KOEM 등 관계기관은 항만분야의 온실가스 배출권 활용을 위한 배출량 검증 방법론, 저감방안 마련 등을 지원함으로써 제도의 활성화를 모색하고 이를 통해 항만분야의 탄소를 적극적으로 저감할 수 있는 제도적 기반을 마련할 필요가 있다.

4. 탄소중립 항만 기술개발 확대

항만에서 전력 에너지 사용에 따른 간접배출을 가장 효과적으로 줄일 수 있는 방법은 고효율 항만을 실현하는 것이다. 가장 효과적인 수단은 에너지 소비를 효율화하고 최적화하는 것이다. 이에 해외 항만에서는 마이크로 그리드를 적극적으로 개발하고 도입하고 있다. 마이크로그리드는 에너지 최적화를 통한 전력 비용 감소 효과 이외에 무정전 시스템 구현을 통해 항만 운영의 강건성 또한 확보할 수 있는 장점이 있으므로 항만에서 적극적

으로 도입해야 한다. 또한, 항만에서 소비하는 대부분의 전력을 활용하여 항만 장비의 고효율화를 위한 연구개발사업의 필요할 것이다. 해외에서는 에너지 효율을 높이기 위하여 에너지 회수 크레인 등을 개발하여 상용화하고 있다. 반면, 우리나라에서 추진하는 항만 장비 연구개발 사업은 대부분은 자동화를 중심으로 이루어지고 있다. 에너지 효율화를 위한 기술 발굴 및 실증사업을 통하여 에너지 효율을 극대화하여 간접배출을 저감하고 부수적으로 에너지 비용도 절약할 수 있을 것으로 기대한다.

항만분야에서 진정한 의미의 탄소중립을 실현하기 위해서는 간접배출을 저감하는 것이 중요하다. 다만, 외부에서 생산하여 공급되는 전기는 항만 입장에서는 수용할 수밖에 없다. 2050년까지 항만에서 사용하는 모든 유류 에너지가 전력 에너지로 전환된다고 가정해보자. 국가 에너지정책에 따라서 2050년까지 신재생에너지와 무탄소전원의 비율을 93.6%로 확대할 예정이고, 항만에서 사용하는 전기의 약 94%는 저탄소 전력이 될 것이다. 따라서, 항만분야에서 남은 6%가량의 전력을 신재생에너지를 통하여 자체 생산하여 활용한다면 간접배출을 저감하는 데 기여할 수 있을 것이다. 여건에 따라서 자체 생산 전력의 비율을 높이고 종국에 에너지 자립항만을 실현할 수만 있다면 항만분야의 탄소중립 실현에 있어서 최적의 시나리오가 될 것이다.

지금까지 연구된 결과를 참고해 보면 신재생에너지만으로 에너지 자립항만을 구축은 매우 어려운 과제이다. 항만은 육지에 비하여 다양한 에너지원을 보유하고 있고, 이를 활용하기 위한 다양한 연구 개발사업을 추진하고 있다. 다만, 해상풍력, 해상태양광 등 어느 정도 안정적인 전력 생산을 담보할 수 있는 에너지원에 집중하고 있다. 물론 국가 예산을 활용함에 있어 기술력이 상대적으로 뛰어나고 경제적으로 타당성이 더 확보되는 에너지원을 우선적으로 도입하는 것이 합리적이다.

그러나 항만은 바다에 인접해 있어 풍력과 태양광 이외에 조력, 파력, 블루·그린수소, 해수온도차발전 등 다양한 신재생에너지원을 발굴하고 실증할 수 있는 입지적 장점이 있다. 이러한 점을 충분히 활용하여 도전적인 연구개발 사업을 추진하면 다양한 신재생에너지원을 발굴하고 발전 효율을 높여갈 수 있을 것이다. 이를 통해 항만의 에너지 자립률을 확대하여 간접 배출 저감, 에너지 비용 절약 등을 기대할 수 있을 것이다.

참고문헌

국내 문헌

- 강무홍 외(2020), AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구, 한국해양수산개발원.
- 관계기관합동(2020), 제2차 국가 온실가스 통계 총괄관리계획(2020년-2024년).
- 관계부처합동(2020), 2050 탄소중립 추진전략.
- 관계부처합동(2021), 2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안.
- 국립미세먼지정보센터(2021), 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(IV), 국가미세먼지정보센터.
- 국립환경과학원(2019a), 국가 대기오염물질 배출량 통계(CAPASS)검증 및 개선.
- 국립환경과학원(2019b), 비도료이동오염원 대기오염물질 배출량 산정현황 및 개선 방안 연구.
- 국토해양부(2008), 저탄소 항만 구축방안에 관한 연구.
- 김가현 외(2021), 스마트항만 구축에 따른 탄소저감효과 연구: 동력전환을 중심으로, 한국해양수산개발원.
- 김근섭 외(2021), 항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구, 한국해양수산개발원.
- 김은미(2022), 글로벌 수송 부문의 온실가스 감축 현황과 시사점: 해운 분야를 중심으로, 대외경제정책연구원.
- 김호석(2010), 국가 온실가스 배출정보 작성 및 관리체계 개선방안, 한국환경정책평가연구원.

-
- 노영훈·장영태(2015), 인천항 육상하역 작업에 따른 온실가스 및 유해가스 발생 추정, 한국항만경제학회지, 31(4), pp. 133-150.
- 대한민국정부(2022), 유엔기후변화협약(UNFCCC)에 따른 제4차 대한민국 격년갱신 보고서.
- 박기선(2021), 탄소중립 시대의 에너지 수요관리에 관한 법적 고찰, 환경법연구, 43(3), pp. 95-128.
- 부산광역시(2010), 항만물류시설, 선박, 컨테이너 수송차량 등에 대한 온실가스 감축 방안 연구.
- 안용성 외(2019), 국내 항만의 대기오염물질 관리정책 및 제도 개선방안, 한국해양수산개발원.
- 에너지경제연구원(2021), EU 'Fit for 55' 패키지 초안의 주요 내용, 세계 에너지시장 인사이트, 제21-15호, pp. 1-19.
- 온실가스종합정보센터(2021a), 국가 온실가스 통계 산정·보고·검증 지침.
- 온실가스종합정보센터(2021b), 2021 국가 온실가스 인벤토리보고서.
- 외교부(2020), 우리나라 국가 온실가스감축목표(NDC) 및 장기저탄소발전전략(LEDs).
- 윤종상·한세현·정용원(2009), 국내 항만하역장비에서의 대기오염물질 배출량 산정, 한국대기환경학회 제49회 학술대회논문집, pp. 520-521.
- 이상엽 외(2022a), 국가 탄소중립 추진전략 이행기반 강화 및 활성화 방안, 한국환경연구원.
- 이상엽 외(2022b), 탄소중립 정책연구, 경제·인문사회연구회.
- 이주형(2019), 항공부문 온실가스 배출현황 및 정책방향, 항공진흥, 67, pp. 55-69.
- 이준서(2021), 기후위기 대응을 위한 탄소중립, 녹색성장 기본법의 제정 의의와 그 이행을 위한 향후 과제, 환경법연구, 43(3), pp. 243-277.
- 정귀희·문영석(2021), 2050 탄소중립 달성을 위한 미국의 장기 전략, 세계 에너지시장 인사이트, 제21-23호, 에너지경제연구원.
- 조진행(2019), 울산항의 녹색물류체계 구축 방안, 한국항만경제학회지, 35(4), pp. 187-206.
- 최건우 외(2021), 선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구, 한국해양수산개발원.
- 한국석유공사(2020), 2019 석유류 수급통계.

- 한국해양수산개발원 중국연구센터(2022), 중국 해양수산 위클리 제22-23호.
- 한국해양수산개발원 항만수요예측센터(2019), 항만과 산업 제19-1호.
- 한국해양수산개발원 항만수요예측센터(2021), 2021년 품목별 항만물동량 예측보고서.
- 한국해양수산개발원 항만수요예측센터(2022), 항만과 산업(통계) 6월호.
- 해양수산부(2013), 항만하역장비 현대화 기본계획 수립연구, 2013.12.
- 해양수산부(2016), 선박자동식별시스템 수신율 향상을 위한 개선방안 마련 연구.
- 해양수산부(2018), 항만 대기오염물질 배출 현황 및 배출규제해역(ECA) 지정 타당성 조사 연구.
- 해양수산부(2020a), 제4차 전국무역항 기본계획 광양항 기본계획
- 해양수산부(2020b), 제4차 전국무역항 기본계획 부산항 기본계획
- 해양수산부(2020c), 제4차 전국무역항 기본계획 인천항 기본계획
- 해양수산부(2020d), 제4차(2021~2030) 전국 항만기본계획
- 해양수산부(2021), 해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵.
- 환경부(2020), 온실가스 배출권거래제 제3차 계획기간(2021~2025년) 국가 배출권 할당계획(안).

국외 문헌

- Atulya Misra et al.(2017), GHG emission accounting and mitigation strategies to reduce the carbon footprint in conventional port activities - a case of the Port of Chennai, Carbon Management, 8(1), pp. 45-56.
- Chang, Y.T., Y. Song, & Y. Roh(2013), Assessing greenhouse gas emissions from port vessel operations at the Port of Incheon, Transportation Research Part D, 25, pp. 1-4.
- Corbett, J.J., H. Wang, & J.J. Winebrake(2009), The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping", Transportation Research Part D, 14(8), pp. 593-598.

-
- Duin R.V., & Geerling H.(2011), A new method for assessing CO₂-emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam, *Journal of Cleaner Production* 19(6-7) pp. 657-666
- EEA(2017), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 – Update May 2017, Non-road mobile sources and machinery
- EEA(2019), EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, 2019. 11. 13.
- EPA(2009), Current Methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventory, Final report
- EPA(2016), National Port Strategy Assessment, 2016.
- EPA(2022), Port Emissions Inventory Guidance, EPA.
- European parliament(2022), European ports becoming 'fit for 55'.
- Harry Geerlings & Ron van Duin(2011), A new method for assessing CO₂ -emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam, *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), pp. 657-666.
- HPA(2022), HPA sustainability report 2019/2020.
- IMO & IAPH(2018), Port Emissions Toolkit, IMO & IAPH.
- IMO(2021), Fourth IMO Greenhouse Gas Study, IMO.
- IPCC(2006), 'IPCC 2006 guidelines', Chapter 3: Mobile Combustion.
- Iris, Çağatay & Lam, Jasmine Siu Le(2019), A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems, *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 112. pp. 170-182.
- Jaehun Sim(2018), A carbon emission evaluation model for a container terminal, *Journal of Cleaner Production*, 186, pp. 526-533.
- Jonathan Yong Chung Ee, Jin Yuan Chan & Gan Lik Kang(2021), Carbon reduction analysis of Malaysian green port operation, *Prog. Energy Environ.*, 15, pp. 1-7.
- Jordan Petzer(2020), Developing long-term energy and carbon emission modelling for the operational activities of ports: A case study of Fremantle Ports(Masters by Coursework thesis, Murdoch University).

- Julián Martínez-Moya, Barbara Vazquez-Paja & Jose Andrés Gimenez Maldonado(2019), Energy efficiency and CO₂ emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia, *Energy Policy*, 131, pp. 312-319.
- Kristin Ystmark Bjerkan & Hanne Seter(2019), Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports? *Transportation Research Part D*, 72, pp. 243-260.
- Lin Zhang(2021), Shanghai Port Carbon Emission Measurement Study, *Frontiers in Business, Economics and Management*, 2(1), pp. 21-29.
- Michele Acciaro, Hilda Ghiara & Maria Inés Cusano(2014), Energy management in seaports: A new role for port authorities, *Energy Policy*, 71, pp. 4-12.
- MPA(2022), Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050, MPA.
- Muhammad A. B., Muhammad H. H., & Simon J. S.(2021), Estimating CO₂ Emissions in a Container Port based on Modality Movement in the Terminal Area, *International Journal of Technology* 10(8), pp. 1618-1625.
- Muhammad A.B et al(2021), Evaluation of - CO₂ emissions and energy use with different container terminal layouts, *Scientific Report* 11, 5476, pp. 1-14.
- Nikolaos Sifakis & Theocharis Tsoutsos(2021), Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept, *Journal of Cleaner Production*, 286, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125448>.
- P.E.N.G. Yun et al(2018), A simulation-based research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals, *Ocean Engineering*, 163, pp. 288-298.
- Port of Rotterdam et al.(2019), PORT VISION ROTTERDAM.
- Simon K.W. Ng et al.(2013), Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta, 76, pp. 102-112.
- THE PORT OF LOS ANGELES & Port of LONG BEACH(2021), SAN PEDRO BAY PORTS EMISSIONS INVENTORY METHODOLOGY REPORT.
- United Nations(1998), KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE.

United Nations(2015), PARIS AGREEMENT.

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

カーボンニュートラルポート（CNP）の形成に向けた検討会(2021), カーボンニュートラルポート（CNP）の形成に向けた施策の方向性.

国土交通省 港湾局(2021), 「カーボンニュートラルポート（CNP）形成計画」策定マニュアル.

国土交通省港湾局(2022.3.3.), 「カーボンニュートラルポート（CNP）の形成について」, 交通政策審議会第84回港湾分科会, 国土交通省.

北九州市(2022), 北九州港カーボンニュートラルポート（CNP）形成計画.

上海市人民政府(2021), 上海市综合交通发展“十四五”规划.

인터넷 자료

2050 탄소중립녹색성장위원회, <https://www.2050cnc.go.kr/>(검색일: 2022.8.10.)

공공데이터포털, 해양수산부 항만시설장비목록, <https://www.data.go.kr/data/15088595/fileData.do>(검색일: 2022.06.23.)

국가온실가스 배출량 종합정보시스템, <https://netis.kemco.or.kr/netis/hp/main#>(검색일: 2022.8.25.)

국립환경과학원(2022.8.1.), 온실가스 검증기관 지정현황. 공공데이터포털, <https://www.data.go.kr/data/15082976/fileData.do>(검색일: 2022.8.10)

군산지방해양수산청, 군·장항 건설, <https://gunsan.mof.go.kr/ko/page.do?menuIdx=1033>(검색일: 2022.9.3.)

대한민국 정책브리핑(2022.9.15.), 기후변화대응 해양수산부문 종합계획 수립, <http://www.korea.kr/news/policyBriefingView.do?newsId=156525802>(검색일: 2022.9.3.)

배출권등록부시스템, 정보공개, <https://etrs.gir.go.kr/home/index.do?menuId=12>

- (검색일: 2022.9.9.)
- 산업통상자원부 고시 제2022-112호(2022.6.30.), 2022년도 산업발전부문 온실가스 목표관리업체 지정고시(2022-112)(검색일: 2022.8.12)
- 서울연구원(2021.12.23.), '수소에너지 생태계의 메카' 꿈꿔 (중국 충칭시), <http://www.si.re.kr/node/65449>(검색일: 2022.6.15.)
- 여수광양항만공사, <https://www.ygpa.or.kr/kr/>(검색일: 2022.9.3.)
- 인천항만공사, <https://www.icpa.or.kr/index.do>(검색일: 2022.9.3.)
- 전자신문(2016.11.9.), 현대로템, 890억원 규모 보령화력 3부두 석탄취급설비 수주, <https://www.etnews.com/201611090000096>(검색일: 2022.9.3.)
- 태영인더스트리, 선박접안시설, <http://www.taeyoung.co.kr/tank/tank04.asp>(검색일: 2022.9.3.)
- 통계청 통계분류포털, 한국표준산업분류, https://kssc.kostat.go.kr:8443/ksscNew_web/index.jsp#(검색일: 2022.9.9.)
- 한국예산업협동조합, 조합원현황, http://www.e-tug.org/?module=Shop&action=SiteShop&sMode=SELECT_FORM&iShopNo=2&iNo=1(검색일: 2022.10.4.)
- 한국항만물류협회, <http://www.kopla.or.kr/default.asp>(검색일: 2022.7.2.)
- 한국해양교통안전공단, 해양환경사업, https://www.komsa.or.kr/kor/sub02_0401.do;jsessionid=05FF50AABF74219593B1065D9DECAAE(검색일: 2022.8.25)
- 한국환경공단, 온실가스 목표관리제 운영, <https://www.keco.or.kr/kr/business/climate/contentsid/1516/index.do>(검색일: 2022.8.12.)
- 한국환경공단, 온실가스 배출권거래제, <https://www.keco.or.kr/kr/business/climate/contentsid/1520/index.do>(검색일: 2022.8.10.)
- 해양수산부 보도자료(2020.12.23.), 그린뉴딜, 탄소중립을 위한 친환경선박 증장기 계획 수립, <https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=36748&boardKey=10&menuKey=971¤tPageNo=1>(검색일: 2022.9.3.)
- 해양환경공단, 해양기후변화대응, <https://www.koem.or.kr/site/koem/04/10401050000002019051004.jsp>(검색일: 2022.8.25)
- 환경부 보도자료(2022.9.22.), 탄소중립의 길잡이, 기후변화영향평가 제도 시행, <http://www.mae.go.kr/mae/04/10401050000002019051004.jsp>

-
- p://me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1550520&menuId=10525(검색일: 2022.9.25.)
- CAAP, Strategies, <https://cleanairactionplan.org/strategies/>(검색일: 2022.6.15.)
- EPA, About EPA Ports Initiative, <https://www.epa.gov/ports-initiative/about-epa-ports-initiative>(검색일: 2022.6.15.)
- EPA, Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP), <https://www.epa.gov/ghgreporting>(검색일: 2022.8.10.)
- Innovationsoftheworld, <https://innovationsoftheworld.com/port-of-antwerp-the-port-of-the-future/>(검색일: 2022.6.29.)
- MPA, Maritime Singapore Green Initiative, <https://www.mpa.gov.sg/maritime-singapore/sustainability/maritime-singapore-green-initiative>(검색일: 2022.5.20.)
- PORT AUTHORITY NY NJ, Sustainability, <https://www.panynj.gov/port/en/our-port/sustainability.html>(검색일: 2022.6.15.)
- Port of Long Beach, <https://polb.com/>(검색일: 2022.6.15.)
- Port of Oakland, <https://www.portofoakland.com/>(검색일: 2022.6.15.)
- Port of rotterdam, Energy Transition, <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition>(검색일: 2022.6.27.)
- Port of Seattle, Northwest Ports Clean Air Strategy, <https://www.portseattle.org/page/northwest-ports-clean-air-strategy>(검색일: 2022.6.15.)
- SNCT, 운영시스템, <https://snct.sun-kwang.co.kr/>(검색일: 2022.9.3.)
- The Brussels Times(2020.5.28.), Port of Antwerp moves to halve CO₂ emissions by 2030, <https://www.brusselstimes.com/113981/port-of-antwerp-moves-to-halve-co2-emissions-by-2030>(검색일: 2022.6.29.)
- THE PORT OF LOS ANGELES, <https://www.portoflosangeles.org/>(검색일: 2022.6.15.)
- World Ports Sustainability Program, Port of Helsinki – Carbon Neutral Port 2035, <https://sustainableworldports.org/project/port-of-helsinki-carbon-neutral-port-2035/>(검색일: 2022.6.27)

법령 자료

공공부문 온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침(2020.12.30., 환경부 고시 제2020-304호), [별표4] 온실가스 배출량 등의 산정방법

국가 온실가스 통계의 총괄관리에 관한 규정(2022.8.24., 환경부훈령 제1563호).

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법(2021.9.24., 법률 제18469호).

기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법 시행령(2022.12.30., 대통령령 제33192호).

온실가스 목표관리 운영 등에 관한 지침(2022.3.25., 환경부고시 제2022-54호).

온실가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률(2022.3.25. 법률 제18469호).

외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침(2021.5.21., 산업통상자원부고시 제2021-88호)

저탄소 녹색성장 기본법(2021.9.24., 법률 제18469호).

탄소흡수원 유지 및 증진에 관한 법률(2022.3.25., 법률 제18469호).

항만법(2022.11.30., 법률 제18522호).

항만법 시행령(2022.7.4., 대통령령 제32763호).

§ 2027. In-Use On-Road Diesel-Fueled Heavy-Duty Drayage Trucks. 13 CA ADC
§ 2027, Barclays Official California Code of Regulations

인터뷰 자료

여수·광양항만공사, 전문가 인터뷰(인터뷰일: 2022.10.10.).

해양환경공단 온실가스 인벤토리 구축 담당자(2022.9.21., 전화 인터뷰).

부 록

1. 탄소저감 방안 관련 선행연구

연구명/저자/연구목적	연구방법	주요 연구내용
• 울산항의 녹색물류체계 구축 방안 • 조진행(2019)	• 문헌조사 • 선진항만 벤치마킹	• 국내외 녹색항만의 정책 동향 분석 • 울산항 녹색항만 실태 및 정책 분석 • 우리나라 녹색항만정책의 문제점 및 개선방안 • 지속가능한 울산항 녹색물류체계 구축 방안 제시
• 국내 항만의 대기오염물질 관리정책 및 제도 개선방안 • 안용성 외(2019)	• 문헌조사 • 현장조사 • FGI • AHP 분석 • 전문가 세미나 및 자문회의	• 국내 기존 정책 및 제도, 운영상의 문제점 도출 • 감독·관리의 법적 근거 미비, 예산 및 자원 부족, 정책 기초자료 미비(배출 실태, 영향 등), 검증된 저감 조치 도입 부진 등 • 문제점 개선·보완을 위한 정책적 대안 도출 및 상대적 중요도 분석
• 국가 온실가스 배출정보 작성 및 관리체계 개선방안 • 김호석(2010)	• 문헌조사 • 사례검토	• 국내 온실가스 배출정보 작성현황 파악 • 국내외 여건변화를 반영한 온실가스 배출정보 작성 및 관리체계 개선방안 제시
• 항공부문 온실가스 배출현황 및 정책방향 • 이주형(2019)	• 문헌조사 • 사례검토	• 우리나라 및 전세계 항공온실가스 배출량 파악 • 국내 정책 도입을 위한 대안 제시(체계적 통계 필요성, 전담부서 신설, CORSIA 제도 도입 대응, 실질적 감축방안, 대체연료 상용화 필요성 및 항공환경센터 설립의 필요성 등)
• 국가 탄소중립 추진전략 이행기반 강화 및 활성화 방안 • 이상엽 외(2022a)	• 문헌조사 • 사례검토 • 설문조사	• 국가의 탄소중립 추진전략 활성화를 목적 • 탄소중립 추진전략 마련을 위한 평가지표 선정 및 평가를 수행 • 기후변화와 탄소중립 등에 관한 인식과 의지 등에 대한 대국민 인식조사 수행 • 국가 탄소중립 전략 및 이행강화 방안 제시

연구명/저자/연구목적	연구방법	주요 연구내용
- 탄소중립 시대의 에너지 수요관리에 관한 법적 고찰 - 박기선(2021)	- 문헌조사 - 사례검토	- 에너지 수요관리 개념 정의 및 범위 고찰 - 에너지 수요관리 제도 구현 당위성 및 법체계 마련 필요성 제시
- 기후위기 대응을 위한 탄소중립, 녹색성장 기본법의 제정 의의와 그 이행을 위한 향후 과제 - 이준서(2021)	- 문헌조사 - 사례검토	「탄소중립기본법」 제정 이후 개선사항 제시 - 탄소중립 관련 법제도 실현을 위해서는 온실가스 감축과 기후변화 시책의 이행체계 강화, 에너지 관련 기술 확보 및 관련 법령 제편도 필요함을 제시
- A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems - Çağatay Iris et al(2019)	문헌연구	- 탄소 배출량 저감, 에너지 비용 절약 등을 위한 에너지효율성 제고 필요성 제시 - 각 기술 및 전략, 대체 연료 및 에너지관리 시스템 구축 등을 통한 항만에너지의 분배 계획설계로 효율성 제고 필요성 제시
- Energy management in seaports: A new role for port authorities - Acciaro et al(2014)	- 문헌연구 - 사례연구	- Hamburg, Genoa항의 항만 에너지 수요·공급 관리 전략 제시 - 대기오염원 최소화로 도시와 항만의 상생을 위한 항만 에너지관리 전략 수립 및 도시전략과의 연계 필요성 제시
- Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports? - Bjerkar & Seter(2019)	문헌연구	항만관리 및 계획, 전력 및 연료, 해상 활동, 육상 활동 등 4가지 주요 범주에 대한 26개의 수단 및 기술 검토
- Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept - Sifakis & Tsoutsos(2021)	- 문헌 연구 - IPA 분석 - SWOT 분석	- 에너지 소비 절감, 친환경 관련 문헌 검토 결과 도출된 요인을 경제적, 기술적 성숙도 관점의 IPA 분석을 통해 평가 - SWOT 분석을 통해 'nZEP'으로 전환 시 장단점 평가

자료: 저자 작성

2. 항만 탄소 배출량 산정 및 전망 관련 선행연구

연구명/저자/연구목적	연구방법	주요 연구내용
• Port Emissions Toolkit • IMO & IAPH(2018)	• 연료 또는 에너지 기반 추정 • 연료사용량, 연료 보정계수, 부하율 등 고려	• 대기오염물질 및 온실가스 배출 평가 시 활용할 수 있는 배출 인벤토리, 배출량 추정 방법, 예측 및 사례 등을 제공
• Port Emissions Inventory Guidance • EPA(2022)	• 엔진 마력, 연식, 부하율, 가동시간 등과 배출계수 적용	• 항만과 화물 운송 관련 인벤토리 개발 방법 제공 • 원양선, 하버 크래프트, 유람선, 화물 취급 장비, 차량 및 철도 등의 이동수단에 기인한 배출량 산정 방법론
• Performance analysis of cargo-handling equipment from a green container terminal perspective • Yang & Lin(2013)	• 2010년 실사 자료 근간의 원단위(평균 소비량)과 배출계수 이용하여 평가	• 가오송항만의 26개 컨 터미널 운영사의 내부자료를 이용 장비별 에너지 소비량, CO₂ 배출량 등을 정량적으로 평가
• Study on the Carbon Emission Evaluation in a Container Port Based on Energy Consumption Data • Muhammad, Muhammad & Simon(2020)	• 1년간 port performance data 수집 • IPCC, 국내 발전소 배출계수 적용	• 벨라완 터미널의 접안, 하역, 적재를 포함한 항만의 전 작업에 걸친 배출량 계산
• Developing long-term energy and carbon emission modelling for the operational activities of ports: A case study of Fremantle Ports • Jordan Petzer(2020)	• ISCA Base Case 접근법 • 회귀분석, 곡선 피팅	• 호주 ISCA Base Case approach 절차에 기반하여 항만분야의 에너지 사용량 및 탄소 배출량 장기 예측 모델을 개발하고 호주 프리맨틀항에 적용
• Carbon reduction analysis of Malaysian green port operation • Ee, Chan & Kang(2021)	• ARIMA 분석	• 말레이시아의 항만 부문 탄소 배출량을 예측하고 국가 정책상 탄소 저감목표와 비교

연구명/저자/연구목적	연구방법	주요 연구내용
• A carbon emission evaluation model for a container terminal • Jaehun Sim(2018)	• 시스템 다이내믹스	• 부산항 컨테이너터미널의 2030년까지의 탄소 배출 저감목표 달성을 위한 감축량 제시
• Fourth IMO Greenhouse Gas Study • IMO(2021)	• IPCC guideline 준용 • Top-down, Bottom-up 방식	• 국내/국외 운송으로 구분하여 온실가스 배출량 산정 • 2012년-2018년 탄소 집약도 분석 • 2018년-2050년 탄소 배출량 전망
• Shanghai Port Carbon Emission Measurement Study」 • Lin Zhang(2021)	• 항만 전력 사용량, 연료사용량, 선박 연료사용량에 문헌조사를 통해 도출한 탄소 배출계수를 적용하여 탄소 배출량 산정	• 전력 사용 기반, 연료 사용 기반, 선박 기반 탄소 배출량 산정 • 선박에 의한 탄소배출이 가장 많으며, 화물처리량 증가와 함께 항만의 탄소 배출량도 증가 • 풍력, 조력 에너지 사용 증가 등의 전력 구조 전환 필요
• A simulation-based research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals • Yun et al(2018)	• 탄소배출 저감 전략을 입력 변수로 하여 탄소배출 시뮬레이션 수행	• 선박속도 저감, 접안 시간 단축, 육상 전원사용 및 대체연료 사용, 항만 장비 작업 효율 증가의 4가지 전략에 대한 시뮬레이션을 통해 각 전략의 탄소 배출 저감 효과 정량화
• Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta • Simon K.W.Ng et al.(2013)	• AIS데이터 및 항만 통계자료를 활용하여 SOx, Nox, CO₂ 배출량 분석	• 홍콩항 및 주강삼각주 지역을 대상으로 AIS를 이용하여 선박 배기가스 배출 인벤토리 수집 • 선종별 선박 오염물질 배출량 정도 및 항만 구역별 배출량 비교분석
• 항만 대기오염물질 배출 현황 및 배출규제해역(ECA) 지정 타당성 조사 연구 • 해양수산부(2018)	• AIS 분석 • 실제 사용량과 비교·검증(연간)	• 선박 및 항만 활동에 의한 대기오염물질 배출량 산정 • 배출규제해역 지정에 따른 경제적 타당성 분석

연구명/저자/연구목적	연구방법	주요 연구내용
- 인천항 육상하역 작업에 따른 온실가스 및 유해가스 발생 추정 - 노영훈·장영태(2015)	하역장비 현황 및 자원과 배출계수를 적용	- 인천항의 하역장비 기인 온실가스 및 유해가스 배출량은 일반화물 하역장비가 컨테이너 하역장비보다 9배 이상 많음 - 여러 종류 화물을 취급하는 내항부두와 산업원자재 화물을 취급하는 북항부두가 하역 작업량에 비해 높은 배출량이 계산됨
- AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구 - 강무홍 외(2020)	- AIS 데이터를 바탕으로 연료소모량 추정 - EEA 배출계수 적용 - 회귀분석	- AIS 데이터 수신주기 보정 모형 개발, 연료소모량 추정 및 배기가스 배출량 분석 - 선박 배기가스 감축 정책 효과 분석
- 선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구 - 최건우 외(2021)	- 회귀분석 - 규제선형모델 - 분위회귀모형 - 시뮬레이션	- 컨테이너선 기술진보계수 개발 - 기술 진보, 선박 운영, 신조 선박 발주량을 고려한 시나리오별로 2050까지의 탄소 배출량을 전망하여 IMO 2050 탄소배출 저감목표 달성 가능성 검증

자료: 저자 작성

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 2022년

01	선박투자 가치평가 및 위험관리 모형 연구	박성화
02	항만 컨테이너 반출입 예약시스템 가격결정 모형 연구	서정용
03	연안재해 대응을 위한 그린인프라 구축방안 연구	정지호
04	탄소중립이 해양수산업에 미치는 경제적 영향분석 연구	권장한
05	수산물 안전성 관리체계 개선방안 연구	조현주
06	준해양사고 통보제도 개선방안 연구	박상원
07	MZ세대 소비트렌드를 반영한 해양관광 추진방안 연구	최일선
08	연근해 어종별 어획쿼터제도 도입방안 연구	심성현
09	행위자기반 해양공간계획 시뮬레이션 개발 연구	조성진
10	항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구	안승현
11	탄소중립 시대 양식산업 대응전략 연구 - 육상 어류양식을 중심으로 -	마창모
12	수산물식품산업의 탄소중립 대응방안 연구 - 가공업을 중심으로 -	김지연
13	해양환경보전정책 도입방안 연구	박수진
14	포스트 코로나 시대의 컨테이너 해운산업 대응방안 연구 - 디지털 플랫폼을 중심으로 -	최건우
15	항만분야 공공갈등 관리방안 연구	김세원
16	글로벌 가치사슬 변화와 국제물류 분야 대응방안 연구 - 전기자동차 산업을 중심으로 -	권보배
17	항만개발제도 개선방안 연구	이수영
18	클러스터 혁신을 통한 선박관리업 발전방안 연구	허성례
19	수입수산물 예방적 관리체계 도입방안 연구 - IUU 수산물을 중심으로 -	안지은
20	양식수산물 유통 빅데이터 구축방안 연구	이기영
21	글로벌 혁신성장을 위한 신남방·신북방 정책 연구 - 신남방 지역 ICT산업 가치사슬 변화에 따른 물류 공급사슬 대응방안	최나영환

2021년

01	시민참여형 해안돌봄 정책 도입방안 연구	정치호
02	해양 플라스틱 쓰레기가 선박 운항에 미치는 영향분석 연구	김보람
03	여성어업인 노동정책 방향 연구	홍혜수
04	순환경제 시스템을 활용한 어업폐기물의 자원화 방안 연구	고동훈
05	1conomy 시대, HMR 시장 확대에 따른 수산부문 대응전략 수립 연구	마창모
06	AIS 데이터 기반 해상교통 안전 평가모델 개발 연구	황선일
07	항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구 - 부산항 신항 전기에너지 소비를 중심으로 -	김근섭
08	해양분야 리빙랩 활성화 방안 연구	좌미라
09	빅데이터의 연계·활용을 통한 선박의 배출량 산정체계 고도화 방안 연구	안용성
10	해양공간계획 집행체계 고도화 방안 연구	최희정
11	수산식품산업 푸드테크 환경분석 및 적용전략 연구	이상건
12	AIS데이터기반 해상물동량 추정 연구	황수진
13	항만부문 정책의사결정 지원 빅데이터 플랫폼 구축 방안 연구	이기열
14	항만 컨테이너 물류 프로세스 디지털화 모형 연구	서정용
15	해양수산 분야 국제산업연관표 구축기반 연구	정수빈
16	해양수산 과학기술 정책평가모형 연구 - 해양수산 R&D를 중심으로 -	전형모
17	글로벌 경제위기와 해운산업 대응체계 연구	박성화
18	항만산업 경기진단체계 구축 연구 - 경기동행지수 개발을 중심으로 -	김성아
19	전국 무역항 부두 분류 체계 개선방안 연구	이수영
20	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해사산업의 육성 및 지원을 위한 법제화 연구(5차년도) -	박한선
21	수소에너지 거점 구축을 위한 항만의 대응방안 연구	신수용

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2022년

01	항만의 탄소중립 이행·관리 표준안 연구	안용성
02	매립지 소유권 분리 제도화의 이해관계 분석과 관리방안	윤성순
03	글로벌 공급망 리스크별 영향분석 및 대응방안 연구 - 에너지·곡물을 중심으로	조지성
04	대북제재 강화와 코로나 팬데믹 이후 북한 해양수산 이슈와 대응 방안	윤인주
05	남북환경보호협정서 제6부속서의 국내 이행을 위한 법제 정비방안 연구	박예나
06	해양바이오산업 활성화를 위한 해양수산생명자원 법령 정비 방안 연구	좌미라
07	우리나라 수산종자 관리체계 개선방안 연구	조현주
08	2050 신해양강국 미래비전 수립 연구	김민수

Ⅰ 2021년

01	해양환경산업 육성 방안 연구	한기원
02	선원의 인권 및 근로여건 향상을 위한 선원근로감독관 제도 개선 방안 연구	허성례
03	포스트 코로나 시대를 대비하는 지역 해양축제 활성화 연구	최일선
04	회복탄력성 개념을 적용한 항만 위기관리 시스템 구축 연구	김성기
05	중대재해처벌법 시행에 따른 항만에서의 대응방안 연구	최상균
06	크루즈산업 COVID-19 방역체계 구축방안 연구	황진희
07	한국형 선주사의 최적 운영방안 연구	고병욱
08	어촌형 생활서비스 전달체계 개선 연구	이호림
09	원양산업의 ESG 도입 기초 연구	윤미경
10	수상레저활동 관리체계 개선방안 연구	홍장원
11	연안지역 자연성 회복을 위한 정책 방향_간척지·담수호 중심으로	정지호
12	스마트항만 구축에 따른 탄소저감 효과 연구 - 동력전환을 중심으로 -	김가현

일반연구보고서 발간목록

Ⅰ 2022년

01	건화물선 시장 비용분석을 통한 해운시장 위험관리지표체계 구축	류희영
02	해상운임 예측모형 고도화 연구(Ⅰ)	황수진
03	IMO 시장기반조치 도입이 국내 해운기업에 미치는 영향	김한나
04	연안지역발전지수(CoDI) 개발 연구	황재희
05	CGE 기반 국제통상환경 변화의 해양수산업 부문 파급효과 분석	임병호
06	글로벌 수산업 이머징 이슈 분석 모델 개발 연구	한기욱
07	양식 수산물 중장기 수급전망모형 구축 연구 - 굴을 중심으로 -	김철현
08	Network DEA를 이용한 물류기업 경쟁력 비교 분석 연구	황선일
09	해양수산 사업체 성과 및 효율성 분석 연구	김주현
10	베이지안 방법을 이용한 양식 명계 단수 추정방안 연구	천성훈
11	수입수산물과 국산 간의 대체관계 분석 연구 - 활·신선냉장품을 중심으로 -	박혜진
12	국내 컨테이너 해운기업의 디지털 전환 활성화 방안 연구	전서연
13	비컨테이너 항만물동량 예측모형 고도화 방안 연구(Ⅰ) - 자동차, 석탄, 고철, 시멘트를 중심으로 -	최석우
14	동중국해 해양경계획정 방안 기초 연구	박영길
15	해양수산 분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구(Ⅱ)	김찬호
16	항만개발사업의 정책효과 적용방안 연구	이종필
17	국가 해양전략 기본구상 연구	정현욱
18	선박대기시간 예측모형 개발을 위한 방법론 연구	조아현
19	안전항만 구축을 위한 비용 산정 및 지원체계 마련을 위한 연구	최상균

Ⅰ 2021년

01	해양수산 정책영향평가를 위한 기초 연구	김주현
02	해양교육의 사회·경제적 가치 평가 연구	이슬기
03	해양수산업 경기진단체계 기초연구 - 해운업을 중심으로 -	권장한
04	선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구	최건우
05	서포트벡터머신(SVM) 기법을 활용한 해운시황 예측 연구	김병주
06	크루즈 여객 수요 전망 모형 구축 연구	안승현
07	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅲ)	서정용
08	수출용 전복의 유통경로 분석 연구	이정필
09	인공지능기반 해상운임 예측 연구(3차년도)	황수진
10	인공신경망모형을 이용한 양식수산물 단수 전망에 관한 연구 - 김 양식을 중심으로 -	천성훈
11	해양수산분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구	박광서

기본연구 2022-10

항만분야 탄소중립 관리체계 개선방안 연구

인쇄 2022년 12월 29일

발행 2022년 12월 31일

발행인 김 종 덕

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 애드원플러스(070-4390-3850)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원

