

스마트항만 구축에 따른 탄소저감효과 연구 - 동력전환을 중심으로 -

A Study on Carbon Reduction Effects following the Smartization
of Maritime Ports
-Focusing on Power Conversion-

김가현 · 김찬호 · 김우선 · 서정용 · 김성아 · 김성기 · 최상균



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자 김가현, 김찬호, 김우선, 서정용, 김성아, 김성기, 최상균

내부연구진 연구책임자 김가현 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
공동연구원 김찬호 한국해양수산개발원 항만연구본부 연구위원
공동연구원 김우선 한국해양수산개발원 항만연구본부 연구위원
공동연구원 서정용 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
공동연구원 김성아 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
공동연구원 김성기 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
공동연구원 최상균 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원

연구기간 2021. 06. 21. ~ 2021. 12. 20.

보고서 집필내역

연구책임자 김가현 연구총괄, 제1장, 제2장, 제3장, 제4장

내부연구진 김찬호 제5장 제2절 일부
김우선 제3장 제2절 일부, 제4장 제2절 일부
서정용 제2장 제2절 일부, 제3장 제1절 일부
김성아 제3장 제3절
김성기 제2장 제1절 일부
최상균 제2장 제1절 일부, 제2장 제2절

**산·학·연·정
연구자문위원** 남형식 한국해양대학교 교수
이민규 부경대학교 교수
추윤식 해양수산부 사무관

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

전 세계적으로 기후변화에 대응하기 위한 탈탄소화의 중요성은 지속적으로 강조되고 있으며 2016년 파리협정 및 2019년 UN기후정상회의 이후 121개 국가가 기후목표 상향동맹에 가입하면서 '2050 탄소중립'이 본격적으로 글로벌 의제로 부상했다.

이러한 상황에서 우리나라 정부도 2020년 12월 '2050 탄소중립 추진전략'을 발표하고 세계의 기후변화 대응 전략 실행에 동참하고 있다. 이에 따라 항만분야는 '스마트 해상물류 체계 구축전략' 및 '2030 항만정책방향과 추진전략'과 같은 한국형 스마트항만 추진과 더불어 '2050 탄소중립 추진전략'에 따른 저탄소 친환경 항만 구현이 동시에 요구되고 있는 상황이다.

아직까지 정책적인 측면에서 스마트화 추진과제와 저탄소 관련 추진과제 간 연계성은 낮은 실정이나 향후 국내 탄소중립 정책에 부합하는 항만분야 스마트화 세부 추진과제 및 관련 정책 수립에 대한 요구는 높아질 가능성이 있다. 따라서 이러한 요구에 선제적으로 대응하기 위해서는 스마트항만이 탄소중립시대에 어떤 역할을 수행할 수 있을지에 대한 구체적이고 정량적인 근거자료가 수반되어야 한다.

그러한 점에서 본 연구는 항만의 특징을 장비 구동방식의 관점에서 비자동화, 반자동화, 그리고 스마트화로 일컬어지는 완전자동화로 구분하고, 각각에 대한 이산화탄소 배출량 원단위를 장비별로 도출한데 의의가 있다.

본 연구는 항만연구본부 김가현 전문연구원이 책임을 맡았고, 김찬호 연구위원, 김우선 연구위원, 서정용 전문연구원, 김성아 전문연구원, 김성기 전문연구원, 최상균 전문연구원이 공동으로 집필하였다. 연구진의 노고에 깊은 감사를 표하며, 더불어 본 연구에 대해 자문과 아낌없는 조언을 해준 한국해양대학교 남형식 교수와 부경대학교 이민규 교수, 그리고 연구의 발전에 도움을 주신 해양수산부 추윤식 사무관께 특별한 감사를 드린다. 마지막으로 이 보고서의 감리를 맡아 끝까지 조언을 아끼지 않으신 최상희 부원장과 항만연구본부 김근섭 본부장, 그리고 이 보고서가 출판되기까지 여러 방면에서 도움을 주신 모든 분들에게 깊은 감사를 드린다.

2022년 03월
한국해양수산개발원
원장 김 종 덕

목차

정책제안 _ i

요약 _ iii

Executive Summary _ ix

01

서론 _1

제1절 연구의 배경 및 목적	1
1. 연구의 배경 및 필요성	1
2. 연구의 목적	4
제2절 연구의 내용 및 방법	5
1. 연구내용	5
2. 연구방법	5
제3절 선행연구 고찰	8
1. 선행연구 검토	8
2. 선행연구와의 차별성	23

02

국내 스마트항만 및 탄소중립 정책 현황과 해외 사례 _25

제1절 탄소중립 및 스마트항만 관련 주요 정책	25
1. 탄소중립 관련 주요 정책 현황	25
2. 스마트항만 관련 주요 정책 현황	29
3. 소결	33
제2절 해외 주요 스마트항만의 탄소중립 추진동향	34
1. 해외 주요 항만의 친환경 차원의 스마트화 추진 동향	35

2. 해외 항만의 탄소 배출량 저감 사례	39
3. 소결	43

03 스마트항만 도입에 따른 탄소 저감효과 및 경제성 분석_45

제1절 이산화탄소 배출량 분석 개요	45
1. 스마트항만의 정의 및 유형별 도입 장비 검토	45
2. 이산화탄소 배출량 산정 개요	57
제2절 스마트항만 유형별 탄소배출량 원단위 산정	60
1. 스마트항만 유형별 탄소배출량 및 원단위 산정	61
2. 스마트항만 단계별 저감효과 종합	69
제3절 스마트항만 유형별 경제성 분석	71
1. 경제성 분석 방법의 선정	71
2. 비용효과 분석	74
제4절 소결	89

04 결론 및 정책제언_91

제1절 요약 및 결론	91
제2절 정책제언	93
1. 무탄소배출 에너지원 활용 관련	93
2. 체계적인 탄소배출원 목록 및 실시간 모니터링 시스템 구축	94
3. 스마트항만과 연계한 친환경항만 전문인력 양성 방안 마련 필요	95
제3절 연구의 한계 및 향후 연구과제 제안	96

참고문헌_99

표 목차

〈표 1-1〉 주요 선행연구 정리	14
〈표 2-1〉 탄소중립 관련 분야별 주요 정책	28
〈표 2-2〉 스마트항만 및 탄소중립 관련 분야별 주요 정책	32
〈표 2-3〉 로테르담항의 스마트에너지 및 산업 부문 프로젝트	37
〈표 2-4〉 세계 주요 항만의 온실가스 저감 정책 및 사례	39
〈표 2-5〉 항만의 스마트화에 따른 오염물질 배출량 감소 효과	42
〈표 3-1〉 스마트항만의 정의 요약	47
〈표 3-2〉 자동화항만과 스마트항만의 차이	48
〈표 3-3〉 세계 주요 반·완전자동화 터미널	56
〈표 3-4〉 본 연구에서 스마트항만 유형과 장비	56
〈표 3-5〉 이산화탄소 배출량 산정식	57
〈표 3-6〉 배출량 산정 등급	58
〈표 3-7〉 연료별 이산화탄소 배출계수	58
〈표 3-8〉 분석 대상 및 활용 데이터	59
〈표 3-9〉 비자동화터미널의 장비 대수	62
〈표 3-10〉 장비별 이산화탄소 배출량 산정식	63
〈표 3-11〉 장비별 이산화탄소 배출량 원단위 - 비자동화터미널	64
〈표 3-12〉 반자동화 터미널의 장비 대수	65
〈표 3-13〉 장비별 이산화탄소 배출량 원단위 - 반자동화 터미널	66
〈표 3-14〉 완전자동화(스마트) 터미널의 장비 대수	67
〈표 3-15〉 무인자동화 이송장비별 연료소비량, 이산화탄소 배출량	68
〈표 3-16〉 장비별 이산화탄소 배출량 원단위 - 완전자동화(스마트)터미널	69
〈표 3-17〉 스마트 유형별 이산화탄소 배출량 비교	70
〈표 3-18〉 비용편익 분석과 비용효과 분석의 비교	72
〈표 3-19〉 항만건설사업의 편익항목	73
〈표 3-20〉 고정효과 접근법을 채택한 R&D 예비타당성조사 사업	74
〈표 3-21〉 비용효과 분석 사례	76
〈표 3-22〉 대안별 장비 소요 규모	78
〈표 3-23〉 대안별 장비별 교체비 및 잔존가치	79
〈표 3-24〉 대안별 장비별 연간 에너지비	81

〈표 3-25〉 안벽장비 저감목표에 따른 저감비	83
〈표 3-26〉 이송장비 저감목표에 따른 저감비	84
〈표 3-27〉 장치장비 저감목표에 따른 저감비	85
〈표 3-28〉 기준 대안(비자동화 터미널) 비용 분석 결과	85
〈표 3-29〉 대안 1(반자동화 터미널) 비용 분석 결과	87
〈표 3-30〉 대안 2(완전자동화 터미널) 비용 분석 결과	88
〈표 3-31〉 비용효과 분석 결과	89

그림 목차

〈그림 1-1〉 연구방법 및 기대효과	7
〈그림 3-1〉 컨테이너터미널 작업영역 구분	49
〈그림 3-2〉 싱글트롤리 안벽 크레인(위)과 듀얼트롤리 안벽 크레인(아래)	50
〈그림 3-3〉 ARMGC(좌측)와 ARTGC(우측)	52
〈그림 3-4〉 켄틸레버 타입(좌측)과 라멘 타입(우측)	53
〈그림 3-5〉 AGV(좌측)와 Lift-AGV(우측)	54
〈그림 3-6〉 자동화 스트래들 캐리어	55

정책제안

■ 분석 내용 및 방법

1. 기존 문헌 고찰 및 관련 정책 검토와 더불어 해외 유사사례 분석을 통한 탄소중립항만과 스마트항만의 연계성 고찰
2. 스마트항만 도입 시 동력전환에 따른 이산화탄소배출 저감 효과를 규명하기 위해 비자동화, 반자동화, 완전자동화 터미널별로 각 장비에 대한 배출량 원단위 분석
3. 스마트항만 유형별로 도출된 이산화탄소배출량을 바탕으로 각 대안별 배출 비용을 고려한 비용효과 분석

■ 정책제안

1. 항만 내 탄소배출 저감을 위한 실증 사업 추진
2. 체계적인 탄소배출원 목록 및 실시간 모니터링 시스템 구축
3. 항만 내 오염물질 배출 관련 빅데이터 수집 및 이를 활용한 예측과 대응을 위한 전문인력 양성 방안 마련

요약

1. 연구의 목적

- 본 연구의 가장 주된 목적은 국내 항만의 스마트화 추진과 항만부문의 탄소배출 저감 정책이 유기적으로 연계될 수 있는 정량적인 근거자료를 제시하는 것임
- 스마트항만은 항만의 자동화를 포함하는 동시에 친환경성, 안전성, 효율성 등의 요소를 달성하기 위해 지능화된 항만을 의미
- 그러나 현재 국내 항만의 탄소중립 관련 추진과제는 스마트항만의 관점에서 제시하고 있지는 않은 실정
- 따라서 친환경항만과 스마트항만의 연계를 위해서는 스마트항만의 탄소저감 효과에 대한 정량적 수치 제공부터 선제될 필요
- 또한 이산화탄소 저감을 위한 스마트항만 구축의 경제성을 분석하기 위해 비용효과 분석을 수행함으로써 동일 물동량 처리 시 가장 비용효율적인 대안을 제시함

2. 연구의 방법 및 특징

1) 연구의 방법

- 관련 문헌 및 유사사례 연구
 - 선행 연구 고찰과 더불어 탄소중립 관련 정책 및 스마트항만 관련 정책을 검토함으로써 탄소중립과 스마트항만의 연계성을 도출
 - 해외 주요 스마트항만 탄소중립 관련 동향 및 주요 어젠다와 스마트항만의 탄소배출 사례를 검토함으로써 본 연구에서 제시하고자 하는 스마트항만의 동력 전환에 따른 정량적인 배출량 감소 데이터 제시에 대한 당위성 확보
- 탄소배출량 원단위 분석 및 비용편익비율법 분석
 - 컨테이너 터미널을 기준으로 비자동화, 반자동화, 완전자동화로 구분하고, 준용 가능한 공신력 있는 기존 자료와 더불어 문헌 및 전문가 자문 등을 활용
 - 비용편익비율법을 적용하여 스마트항만 단계별 구축비용과 구축 시의 편익 분석 수행

2) 연구의 특징

- 스마트항만의 친환경성에 초점을 두고 장비의 스마트화에 따른 동력 전환에 기반한 탄소 저감 효과를 분석
- 운송장비(구동방식 및 종류 등) 관점에서 스마트항만을 정의하고, 해당 장비별 배출량 원단위 분석을 통해 스마트항만 구축 시 탄소 저감 효과에 대한 정량적 수치를 제공하고 있는 연구는 미미함

- 본 연구는 스마트화 단계별 도입 장비 특징에 따른 이산화탄소배출량 원단위를 산정함으로써 비자동화, 반자동화, 완전자동화 터미널의 탄소배출량을 비교하고 저감효과를 규명함
- 장비의 동력전환에 따른 탄소 저감효과를 가장 비용효율적으로 달성할 수 있는 대안을 제시
- 산정된 배출량 결과에 따라 탄소배출량이 가장 적은 완전자동화터미널의 배출량을 비용효과 분석의 목표로 설정하고, 비자동화 및 반자동화 터미널의 장비 설치 및 운영비용을 현재가치로 환산

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- 터미널의 스마트화 도입 단계에 따른 장비별 이산화탄소 배출량 원단위를 산정
- 완전자동화터미널은 비자동화 대비 34%, 반자동화 대비 22%의 배출량 감축효과가 있는 것으로 나타남

〈요약 표-1〉 스마트 유형별 이산화탄소 배출량 비교

단위: tCO₂

스마트 항만 유형	영역별 배출량 원단위(tCO ₂ /TEU)			배출량 합계		저감 효과
	안벽	이송	장치	원단위	195만 TEU	
비자동화 (수평)	0.0058 (싱글 트롤리)	0.0053 (유류식 YT)	0.0055 (유류식 RTG)	0.0166	32,308	-
반자동화 (수평)	0.0058 (싱글 트롤리)	0.0053 (유류식YT)	0.0029 (전기식 ARMGC) 켄틸레버 타입	0.0140	27,238	16% (비→반)
완전 자동화 (수직)	0.0055 (듀얼 트롤리)	0.0019 (전기식 AGV)	0.0035 (전기식 ARMGC) 라멘 타입	0.0109	21,278	22% (반→완) 34% (비→완)

주: 안벽 크레인온 모두 전기식 구동

자료: Wilmsmeier, Gordon – Spengler, Thomas(2016), p. 6, Muhammad A.B. *et al.*(2021), p. 3, Y. Saanen(2016) p. 32. 해양수산부(2019a), pp. 233-234를 바탕으로 저자 재작성

- 장비 설치 및 30년간 운영비용을 현재가치로 환산한 결과, 동일한 탄소배출량을 기준으로 가장 적은 비용이 드는 터미널은 완전자동화 터미널로 도출
- 비자동화 터미널은 3,985억 원, 반자동화 터미널은 3,531억 원, 완전자동화 터미널은 3,458억 원으로 분석됨

〈요약 표-2〉 비용효과 분석 결과

단위: 억 원

구분	비자동화 터미널(A)	반자동화 터미널(B)	완전자동화 터미널(C)
장비비 (명목가치)	6,310	5,371	4,977
비용 (현재가치)	3,985	3,531	3,458
비용절감액 (현재가치)	(A-B)	(A-C)	(B-C)
	455	527	73

자료: 저자 작성

2) 정책대안 제시

- **항만 내 탄소배출 저감을 위한 실증 사업 추진**
 - 장비의 자동화뿐만 아니라 운영 측면의 최적화를 통한 에너지 효율성 제고와 그에 따른 탄소배출량 최소화를 달성하기 위해서는 시뮬레이션을 통한 실증분석이 수반될 필요
 - 항만은 발전설비, 육상운송 등과 더불어 잠재적인 수소 사용 분야로 각광받고 있으므로, 수소와 같은 무탄소 배출이 가능한 연료의 도입과 이를 활용한 장비 구동 기술 도입과 관련된 영향 및 효과에 대한 실증사업 추진 필요
 - 더불어 신재생 에너지원 적용 시의 효과 및 영향에 대해서는 실증 분석 선행 필요
- **체계적인 탄소배출원 목록 및 실시간 모니터링 시스템 구축**
 - 항만 내에서만 운영되는 배출원에 대한 배출량 별도 산정 및 관리 필요
 - 운영사가 임대장비에 대해서도 보유장비의 가동현황과 동일한 정보를 확보할 수 있도록 하거나 부정기적인 전수조사를 통해 각 항만에서 활용하고 있는 하역장비의 보유현황 및 실제 가동상태 파악 필요

-
- 항만 내 오염물질 배출 관련 빅데이터 수집 및 이를 활용한 예측과 대응을 위한 전문인력 양성 방안 마련
 - AI와 빅데이터가 상용화된 기술로 적용되는 디지털 항만에서는 항만 내 오염물질 배출 관련 빅데이터 수집 및 이를 활용한 예측과 대응이 필요
 - 친환경 스마트항만과 연계한 AI, 빅데이터, 머신러닝 등과 같은 4차 산업혁명 핵심기술을 고등교육과정 등에 도입 추진

EXECUTIVE SUMMARY

1. Purpose

- The primary purpose of this study is to present quantitative base data which can systematically connect the smartization of Korean ports to carbon emission reduction policy.
- While encompassing the concept of port automation, a smart port can be defined as an intelligent port aiming to obtain key components such as eco-friendliness, stability and effectiveness.
- However, current carbon neutrality-related projects being implemented in Korean ports are not presented from the perspective of smart ports.
- Thus, quantitative data on the effects of carbon reduction resulting from construction and operation of smart ports should be presented first in order to connect eco-friendly ports with smart ports.
- Moreover, this study conducted a cost-effectiveness analysis as a means to analyze the economic feasibility of building smart ports for reducing carbon emissions. Thereby, this

study offers the most cost-effective measure for handling traffic volumes.

2. Methodology and Features

1) Methodology

- Studying relevant literature and similar cases
 - This study extracted the connectivity between carbon neutrality and smart ports by delving into carbon neutrality-related policies and smart port-related policies together with an in-depth analysis of existing studies.
 - Trends and main agendas were reviewed pertaining to carbon neutrality in major global smart ports, while specific cases of carbon emissions at smart ports were analyzed. With this analysis, this study was able to secure solid validity for presenting quantitative emission reduction data following the power conversion of smart ports as intended.
- Carbon Emission Unit analysis and Benefit-Cost Ratio analysis
 - As the criteria, container terminals were classified into non-automated, semi-automated and fully-automated ones while applicable and reliable existing data and literature as well as consultation with experts were utilized.
 - With the Benefit-Cost Ratio formula applied, this study estimated the cost of constructing smart ports by stage and conducted a cost-benefit analysis at the time of construction.

2) Features

- Concentrating on the eco-friendless of smart ports, this study analyzed the effect of carbon reduction based on power conversion following the smartization of port equipment.
- There is a shortage of studies that provide quantitative data on the carbon reduction effect in building a smart port specifically by defining equipment from the perspective of smart ports as well as analyzing carbon emission unit analyses per corresponding equipment.
- This study estimated the basic unit of carbon emissions in accordance with the characteristics of equipment introduced by smartization stage. Hence, the study compared the amount of carbon emission per non-automated, semi-automated and fully automated terminals, verifying the reduction effect.
- This study proposed the most cost effective way to achieve carbon reduction effects following power conversion of port equipment.
- With the results of estimated carbon emissions, this study established carbon emissions of fully automated terminals, which emit the least amount of carbon, as the target of cost-benefit analysis. Following this, the cost of installing and operating equipment in non-automated and semi-automated terminals was converted into present value.

3. Result

1) Summary

- Estimating the basic unit of carbon emissions per equipment in accordance with the type of smartization of port terminals.
- Fully-automated terminals were found to be 34% more effective at reducing carbon emissions compared to non-automated terminals while being 22% more effective than semi-automated terminals.

〈Summary Table–1〉 Comparison of carbon emissions per type of smart ports

Unit: tCO₂

Type of smart ports	Basic unit of emissions per area (tCO ₂ /TEU)			Total sum of emissions		Reduction effect
	Quay	Transport	Equipment	Basic unit	1.95 million TEU	
Non-automation (Horizontal)	0.0058 (Single trolley)	0.0053 (Oil-powered YT)	0.0055 (Oil-powered RTG)	0.0166	32,308	–
Semi-automation (Horizontal)	0.0058 (Single trolley)	0.0053 (Oil-powered YT)	0.0029 (Electric ARMGC) Cantilever type	0.0140	27,238	16%(non → semi)
Full-automation (Vertical)	0.0055 (Duel trolley)	0.0019 (Electric AGV)	0.0035 (Electric ARMGC) Rahmen type	0.0109	21,278	22%(semi → full) 34%(non → full)

Footnote: Quay cranes are all electric-powered

Source: Prepared by the authors

- The result of converting the cost of equipment installation and operation for 30 years to the present value showed that fully automated ports incur the least cost to produce the same amount of carbon emissions.
- The cost of non-automated ports and that of semi-automated ports were calculated at 398.5 billion KRW and 353.1 billion KRW respectively while the cost of fully automated ports was estimated to be 345.8 billion KRW.

〈Summary table-2〉 Result of cost-effectiveness analysis

(Unit: 100 million KRW)

Classification	Non-automated terminal (A)	Semi-automated terminal (B)	Fully automated terminal (C)
Equipment cost (Face value)	6,303	5,387	4,978
Cost (Present value)	3,985	3,531	3,458
Cost Reduction (Present value)	(A-B)	(A-C)	(B-C)
	455	527	73

2) Policy suggestions

- Pushing ahead demonstration projects for reducing carbon emissions within ports
- An empirical analysis through simulation should be carried out to improve energy effectiveness via automation of port equipment as well as operational optimization and consequently to promote minimizing carbon emissions.

-
- Ports have been in the spotlight as a potential field for using hydrogen along with power installation and land transportation. Therefore, it is necessary to push forward a project which can demonstrate the introduction of carbon-free fuels such as hydrogen, the adoption of equipment driving technology utilizing carbon-free fuels, and its impacts and effectiveness.
 - In addition, an empirical analysis should be preceded on the effects and impacts of applying renewable energy sources.
 - Systematically listing sources of carbon emissions and building a real-time monitoring system
 - Sources of carbon emissions only operated within ports should be separately estimated and managed.
 - It is necessary to identify the present status of possessing cargo handling equipment as well as the actual operational status of the equipment currently utilized in each port. For these purposes, stevedores should be allowed to secure the information of leased equipment just as the information of equipment in possession is or carry out irregular complete enumeration.
 - Devising measures for nurturing professional manpower capable of collecting big data on pollutant emissions at ports, forecasting and responding based on the data.
 - Digital ports, where AI and big data are applied as a commercial technology, need to collect big data relevant to pollutant emissions within ports as well as forecasts and responses based on the data.

- Key technologies of the 4th Industrial Revolution connected to eco-friendly smart ports, such as AI, big data and machine learning should be introduced to the curriculum of higher education.

01

서론

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경 및 필요성

작업 생산성, 운영 효율성 및 안전성 향상을 위한 항만의 자동화 기술 도입은 전 세계적으로 확대되는 추세다. 2021년 기준, 전 세계 총 55개의 컨테이너터미널이 자동화 장비를 도입하여 운영 중이며 그중 완전자동화 항만은 15개, 반자동화 항만은 40개로 조사되고 있다.¹⁾ 세계 스마트항만 시장 규모 또한 2019년부터 2024년까지 연평균 25%씩 증가하여 2019년 기준 16억 달러에서 2024년에는 53억 달러까지 증가할 것으로 전망된다.²⁾³⁾

한편, 스마트항만에 대한 정의는 종종 자동화 항만과 혼용되어 쓰이고 있으며 학자나 기관에 따라 조금씩 정의하는 바에 차이가 있다. 일반적으로

1) Rodrigue and Notteboom(2021), pp. 20-25.

2) 해양수산부(2020a), p. 52.

3) 투자액은 인프라(접안시스템 및 AMP, 환경솔루션 등)(32.4%), 관제시스템(25.4%), 화물처리시스템(24.2%), 안전·보안시스템(10.6%) 순. 해양수산부(2020a), p. 52.

스마트항만은 생산성 향상과 같은 전통적 성과영역 외에도 친환경이나 지속가능성, 선박 및 배후도시와의 정보 연계성 등 외부적인 성과영역까지 고려하며, 이 과정에서 자동화나 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 첨단 기술을 활용한다. 이러한 점에서 스마트항만의 핵심 요소는 자동화 및 지능화이며, 이는 빅데이터, IoT 및 AI 등 4차 산업혁명기술 기반의 무인자동화장비와 고도화된 항만운영정보시스템 간 연계를 통한 물류의 최적화로 구현될 수 있다. 더불어 사람의 개입을 최소화하고 운영 최적화를 통한 생산성 향상을 도모한다는 점에서 완전자동화 항만을 지향한다고 할 수 있다. 이는 구동 방식에 있어서도 비자동화에서 완전자동화로 갈수록 장비의 동력원이 화석연료 중심에서 전기 또는 LNG 및 신재생에너지로 전환되며, 이를 탄소배출 저감 측면에서 살펴보면 스마트항만은 재래식 항만에 비해 친환경적인 특성을 가진다고 할 수 있다.

전기식으로 구동되는 스마트항만의 자동화장비와 연계된 시스템의 운영 최적화 등도 친환경과 밀접한 관련이 있다.⁴⁾ 이는 자동화 장비 및 관련 기술 도입에 따라 컨테이너를 처리하는 무브(move)당 전력소모량 및 처리물동량에서 차이가 발생하여 탄소배출량에 차이가 나기 때문이다.⁵⁾ 전기구동식의 자동화 항만장비 및 관련 기술 도입을 통한 항만에서의 탄소배출 저감은 세계 주요 항만에서 추진되고 있다. 예를 들어 함부르크항은 항만 내 이송장비를 디젤 연료 구동 방식에서 리튬배터리 방식으로 전환하고 수소허브 등을 조성하고 있으며, 미국의 LBCT는 캘리포니아주 항만 대기오염 저감계획(CAAP: Clear Air Action Plan) 이행을 위해 2016년에 무인이송 차량 및 자동화 크레인을 도입했다. 현재 개발 중인 싱가포르 투아스항 또한 무인자동화 기반 하역시스템 도입과 더불어 항만 내 환경오염 최

4) 동력전환 이외에도 공급사슬 최적화, 정보·지능화 등을 통한 탄소배출 저감 가능(Port Technology, 「SmartPortsBCN: Port of Rotterdam highlights going green and its smart port journey」(검색일: 2021. 10. 1)

5) 해양수산부(2019a), p. 253.

소화를 위한 전기식 장비 구동, 선박 AMP 설치 등을 추진하고 있다.

국내 항만분야 또한 이러한 세계적 추세에 따라 스마트 해상물류 체계 구축전략(2019) 및 ‘2030 항만정책방향과 추진전략(2020)’⁶⁾ 등에 기반한 한국형 스마트항만 구축⁷⁾과 더불어 ‘2050 탄소중립 추진전략(2020)’⁸⁾에 따른 저탄소 친환경 항만 구현이 동시에 요구되고 있는 상황이다.

그러나 정책적으로는 아직까지 스마트화 추진과제와 저탄소 관련 추진과제 간 연계성은 낮은 실정이며 이에 따라 국내 탄소중립 정책에 부합하는 항만분야 스마트화 세부 추진과제의 수립이 필요하다. 특히 정부의 탄소중립 추진전략인 ‘2010년 기준 배출량의 45% 이상 절감, 2050년까지 이산화탄소 배출량 Zero 달성’에 대한 항만부문의 대응방안을 스마트항만 구축 관점에서 제시할 필요가 있다.

이렇듯 스마트항만과 탄소중립항만 구축의 유기적인 추진을 위해서는 스마트항만 단계별 탄소배출 저감효과를 규명하기 위한 정량적 근거자료 확보가 선제적으로 요구된다. 따라서 본 연구에서는 스마트항만의 단계별(비자동화-반자동화-완전자동화⁹⁾) 탄소배출량 비교를 통한 스마트항만의 탄소배출량 저감효과 분석과¹⁰⁾ 더불어 실효성 있는 정책대안 마련을 위한 스마트항만 단계별 구축비용과 구축 시 경제성 분석을 수행하고자 한다. 다

6) 주요 내용으로 4차 산업혁명 기술 발전에 따른 항만물류 디지털화 및 지능화 적극 추진, 지속적인 인프라 확충을 통한 항만의 글로벌 경쟁력 강화 등이 포함됨

7) 광양항 항만자동화 테스트베드를 구축, 이를 기반으로 부산항 제2신항에 자동화 기술 도입(~'30)을 계획 중임

8) 경제구조의 저탄소화, 신유망 저탄소산업 생태계 조성, 탄소중립 사회로의 공정 전환, 탄소중립 제도적 기반 강화 등이 포함됨. 추진전략 발표('20.12) 전 문재인 대통령은 국무회의 모두발언('20.11)을 통해 기후 위기 대응은 선택이 아닌 필수라고 강조, 이후 G20 정상회의('20.11)에서도 2050 탄소중립에 대한 의지를 밝힌 바 있음

9) 완전자동화에 대한 정의는 기관 및 전문가별로 상이하며 한국해양수산개발원(2018)의 『디지털포트 4.0 구축기술 개발』 발표 자료에서는 (완전)자동화 터미널을 기술 수준과 친환경성, 유/무선화, 정보/지능화에 따라 3개의 형태로 구분하기도 함

10) 온실가스 절감편익의 경우, Y/T(경유에서 AGV(전기) 또는 자율주행트럭 도입 시 약 1.4억 원 절감효과가 있는 것으로 나타남(해양수산부(2019a))

만 본 연구는 탄소흡수 및 포집 등을 통한 탄소중립이 아닌, 단·중기적인 관점에서 저탄소 항만을 구축하기 위한 탄소 저감에 초점을 두고 장비의 스마트화에 따른 동력 전환에 기반한 탄소 저감 효과를 분석하고자 한다.

2. 연구의 목적

본 연구의 목적은 국내 항만의 스마트화 추진과 항만부문의 탄소배출 저감 정책이 유기적으로 연계될 수 있는 정량적인 근거자료 제시와 더불어 관련 내용에 대한 정책적인 제언을 수행하는 것이다.

이러한 연구 목적을 달성하기 위한 방법은 두 가지로 구분된다. 첫째는 정책적 정합성 확보를 위한 문헌 및 사례연구이다. 본 연구에서는 국내 탄소중립(또는 탄소저감) 관련 정책과 스마트항만 관련 정책을 전반적으로 검토함으로써 친환경항만과 스마트항만의 연계성 측면에서 본 연구가 제시하고자 하는 정량적 수치의 의의를 도출하고자 한다. 추가적으로 해외 스마트항만의 탄소중립 추진동향 및 사례를 분석하여 국내 탄소중립 스마트항만의 현주소를 진단하고 정책적 시사점을 도출하고자 했다.

둘째는 정량적 자료 제시를 위한 스마트항만 구축 시의 탄소배출량 및 경제성 분석이다. 이를 위해 본 연구에서는 자동화항만과 스마트항만을 정의하고, 이를 바탕으로 스마트항만 도입 단계별 투입장비에 대한 탄소배출량 원단위 분석을 수행했다. 또한 배출량 분석의 결과는 장비의 동력전환에 따른 경제성을 이산화탄소배출량 감소 효과에 한정하여 분석하는 데 활용하였다.

제2절 연구의 내용 및 방법

1. 연구내용

본 연구는 총 네 개의 장으로 구성된다.

제1장은 서론으로 연구의 배경과 목적을 기술하고 주요 선행연구에 대한 고찰을 통해 선행연구와의 차별성을 제시했다.

제2장에서는 국내 탄소중립 정책과 스마트항만 관련 정책의 주요 추진과제를 검토하고, 해외 주요 스마트항만인 로테르담항 및 싱가포르항의 탄소중립 추진동향을 살펴봄으로써 국내 항만의 현 단계를 진단하고, 탄소중립 항만과 스마트항만을 동시에 달성하기 위한 시사점을 도출하고자 했다.

제3장에서는 연구범위 규정 및 방법론 선정을 통해 분석의 틀을 마련하고, 스마트항만 유형별 장비의 탄소배출량 원단위 산정 및 그에 따른 경제성 분석을 수행하였다.

마지막으로 결론 및 정책제언을 통해 스마트항만 유형별 탄소 저감효과 및 비용편익 분석 결과를 종합하고 정책적 시사점을 제언하였다.

2. 연구방법

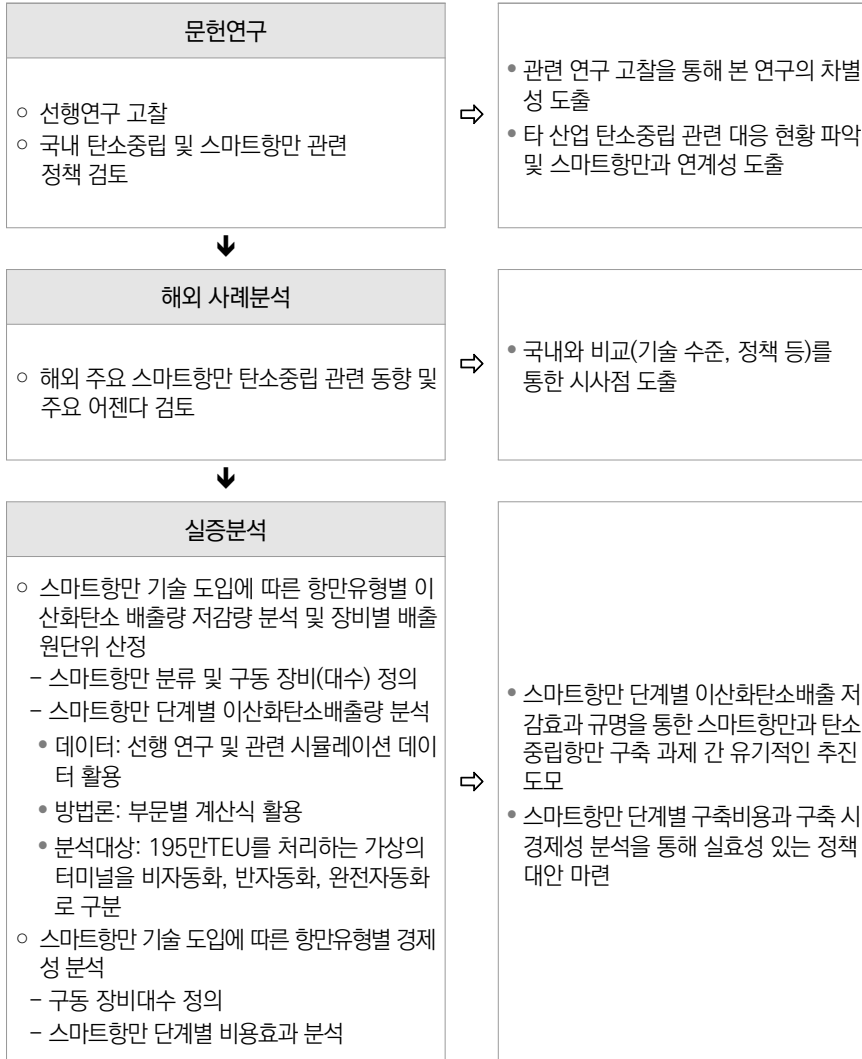
본 연구는 문헌 및 유사 사례연구와 실증분석을 통해 수행하였다.

먼저 문헌연구를 통해서 기존에 추진된 연구에 대한 고찰과 더불어 탄소중립 관련 정책 및 스마트항만 관련 정책을 검토함으로써 탄소중립과 스마트항만의 연계성을 도출하고자 했다.

더불어 해외 주요 스마트항만 탄소중립 관련 동향 및 주요 어젠다를 검토하고 스마트항만의 탄소배출 사례를 분석함으로써 본 연구에서 제시하고자 하는 스마트항만의 동력 전환에 따른 정량적인 배출량 감소 데이터에 대한 의의를 찾고자 하였다.

실증분석은 탄소배출량 원단위 분석을 위한 계산식과 경제성 분석을 위한 비용편익비율법을 활용하여 수행하였다. 탄소배출량 산정방식의 경우 주요 유사 사례를 선행연구에서 검토함으로써 본 연구에 적합한 산정식을 선정하였다. 실증분석의 대상은 컨테이너 터미널을 기준으로 비자동화, 반자동화, 완전자동화로 구분하고, 준용 가능한 공신력 있는 기존 자료와 더불어 문헌 및 전문가 자문 등을 활용하여 분석하였다. 이를 통해 비자동화, 반자동화, 완전자동화 단계별로 탄소배출 저감효과를 규명하고자 하였다. 더불어 경제성 분석에서는 비용편익비율법을 적용하여 스마트항만 단계별 구축비용과 구축 시의 편익 분석을 수행했다.

〈그림 1-1〉 연구방법 및 기대효과



자료: 저자 작성

제3절 선행연구 고찰

1. 선행연구 검토

1) 자동화항만 및 스마트항만의 정의 관련 연구

Martín-Soberón A.M. *et al.*(2014)은 자동화 터미널의 개념을 소개하고 있는데, 특히 반자동화 터미널에 대해서 야드영역이 자동화되어 있고 이송영역(dock-yard interchanges)에서는 전통적인 이송장비를 활용하는 터미널을 의미한다고 정의하고 있다. Wang P. *et al.*(2019)은 터미널의 3가지 영역(해측, 야드, 육측) 중에서 하나 또는 두 개의 영역에 자동화 장비를 투입해 활용한다면, 반(Semi-) 자동화 터미널, 모든 프로세스에서 자동화 장비가 활용되면 완전(Fully) 자동화 터미널이라고 정의하고 있다.

스마트항만의 경우 Wang K. J. *et al.*(2018)은 사물인터넷, 정보통신기술, 빅데이터, 환경 친화적 기술 등 높은 수준의 기술을 사용하는 자동화 시스템을 도입해 항만의 생산성과 효율을 향상하는 항만을 스마트항만으로 정의하고 있다. Rodrigo González R. *et al.*(2020)의 연구에서는 스마트항만을 새로운 기술을 활용해 항만의 서비스를 상호적이고 동적으로 변환시키고 더욱 투명하고 효율적으로 개선하고 환경과 도시, 시민을 고려한 항만으로 정의하고 있기도 하다.

Yau *et al.*(2020)은 세대별로 항만을 구분하고 있는데,¹¹⁾ 먼저 1세대 항만은 육상 및 해상 운송의 거점으로 물류, 운송, 어업 등 기본적인 작업을 제공하는 항만이며, 2세대 항만은 인력에 대한 의존도를 낮추기 위해 장비 및 인프라가 도입된 항만으로 정의된다. 3세대 항만은 분류, 포장, 라

11) Yau, Peng and Qadir *et al.*(2020), p. 83387.

벨링, 유통 등 부가가치 서비스를 제공하는 항만을 말하며, 4세대 항만은 물리적으로 분리된 항만 간 네트워크 형성이 특징이다. 마지막으로 5세대 항만은 가장 최신의 항만으로 수요자 및 커뮤니티 중심의 스마트항만을 뜻한다. 특히 5세대 항만인 스마트항만은 다음의 5가지 주요 기능을 내포하고 있다. 첫째, 선박 및 컨테이너 관리 스마트 시스템, 둘째, 자동화, 정보화, 데이터 센터 등의 기술, 셋째, 에너지 효율성 향상을 통한 온실가스 저감 등 친환경 기술, 넷째, 항만 배후에 위치한 기업 및 이해 관계자 등으로 구성된 클러스터 및 이에 대한 관리, 마지막으로 서로 다른 항만 간의 협력을 위한 허브 인프라 등이다.

즉, 5세대 항만인 스마트항만에서는 이전 세대 항만 대비 높은 에너지 효율을 통한 환경오염 물질 배출량 감축을 주요 기능 중의 하나로 포함하고 있다.

종합해보면 자동화 항만은 작업 프로세스 내 인간의 개입을 최소화한 장비를 활용하는 항만이며, 그리고 스마트항만은 이러한 자동화를 통한 생산성 향상뿐만 아니라 친환경, 안전성, 항만 내 에너지 최적화 등을 고려하고 항만을 중심으로 선박과 배후도시의 연계성을 강화하는 정보화까지 포함하고 있다. 결론적으로 항만의 자동화는 스마트항만의 개념에 포함된다고 할 수 있다.

2) 에너지원에 따른 탄소 배출량 변화

에너지원에 따른 탄소 배출량 변화에 대한 초기 연구는 전력 생산 시 친환경 에너지원을 사용함에 따른 효과에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 세부적으로 K. Sakaki and K. Yamada(1997)의 연구에서는 전력을 생산하는 데 있어 태양광 및 바이오매스를 활용했을 경우 탄소 배출량의 감소 정도를 제시하였다. 태양광의 경우 설치하는 방식에 따라 차이가 있었지만

전력 1kWh를 생산하는 데 이산화탄소는 5~15g-C/kWh 발생하며, 바이오매스의 경우 2g-C/kWh로 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다. 타 에너지원의 경우 해당 연구에서는 1kWh의 전력을 생산하는 데 평균적으로 127g-C/kWh의 이산화탄소가 발생되기에 태양광 및 바이오매스의 경우 상대적으로 배출량이 매우 낮은 것으로 평가되었다.¹²⁾

상술한 초기 연구에 이어 각 산업별 에너지원 전환에 따른 탄소배출 저감 효과에 대한 연구도 다수 진행되었다. 항만 분야에 있어서도 2000년대 초반부터 약 10년 동안 ‘온실가스’ 및 ‘기후변화’에 대한 이슈가 대두되면서 친환경 및 녹색기술 등과 관련된 연구들(한국해양수산개발원, 2003a; 에너지경제연구원, 2008; 한국해양수산개발원, 2009b; 한국해양수산개발원, 2011 등)이 활발히 수행되었다.

항만 산업에 있어 에너지 전환에 따른 탄소배출 저감 관련 연구를 세부적으로 살펴보면 다음과 같다. 먼저, Harry Geerlings and Ron van Duin(2011)의 연구에서는 네덜란드 로테르담항의 사례를 통해 에너지원 전환 및 터미널 레이아웃 변화에 따른 이산화탄소 배출량 수준을 분석하였다. 해당 연구 결과, 이산화탄소 배출량을 크게 감축할 수 있는 방안은 터미널 레이아웃을 조정하는 것으로 장비의 이동을 최적화할 경우 최대 65%의 이산화탄소 감소 효과를 기대할 수 있다고 제시하였다. 다만, 터미널 레이아웃의 조정은 상대적으로 높은 비용이 발생하기에 대안으로 디젤 장비 교체 및 바이오 연료 혼소를 제시하였다. 그 결과 디젤 장비의 교체 시 이산화탄소 배출은 19% 감소하고, 바이오연료 혼소의 경우 21% 감소된다는 결과가 도출되었다.

다음으로 Julián Martínez-Moya. *et al.*(2018)의 스페인 발렌시아항 노아툼(Noatum) 컨테이너 터미널의 사례를 분석한 연구에서는 먼저 항만

12) K. Sakaki and K. Yamada(1997), p. 660.

장비별 이산화탄소 배출 비중을 산정하고, 이를 감소시킬 수 있는 방안에 대해 제시하였다. 해당 터미널의 경우 야드트랙터와 RTG(Rubber Tyre Gantry) 크레인에서 터미널 내 배출량의 약 68%에 달하는 이산화탄소를 배출하는 것으로 나타났다. 이산화탄소 배출 저감을 위해서 야드트랙터의 연료를 LNG로 교체하는 것을 제시했으며, 이 경우 야드트랙터에서 발생하는 이산화탄소의 배출량은 최대 24% 감소가 가능한 것으로 나타났다. RTG의 경우 연료 전환 이외에도 낮은 전력의 발전기 교체 방안을 제시했는데, 이 경우 전력 규모에 따라 43~53%의 이산화탄소 감소 효과가 있는 것으로 분석되었다.

이상의 선행연구를 종합하면 항만 분야에서도 에너지원 전환에 따른 이산화탄소 배출 변화에 대한 연구는 지속적으로 수행되어왔다. 다만, 에너지원 전환을 통한 이산화탄소 등 배출량 감소 효과에 대한 제시는 있었지만 항만의 스마트화의 관점에서 장비를 정의하고 그에 따른 배출량 감축 효과를 분석한 연구는 제한적이었다. 또한 선행연구에서 제시된 것처럼 이미 운영 중인 터미널을 대상으로 한 장비 에너지원의 전환과 이를 통한 친환경 항만 구축은 대규모 투자가 이루어져야 하기에¹³⁾ 면밀한 실증분석 및 검토를 바탕으로 한 정책 수립 및 전략 실행이 요구된다.¹⁴⁾

3) 항만분야 탄소배출량 산정 관련 연구

국내에서 가장 먼저 수행된 항만분야 이산화탄소 배출량 산정과 관련된 연구는 국토해양부(2008)로 국내 28개 항만 및 257개 부두를 대상으로 선박, 하역장비, 외부차량을 발생원으로 구분하여 이산화탄소 배출량을 산정했다. 분석 범위는 항계점부터 안벽(접안)까지, 안벽부터 게이트까지로 정

13) Geerlings and Van Duin(2011), pp. 459-473.

14) J.M. Moya and M. Feo-Valero(2016), pp. 1-22.

하고 하역장비별 배출량은 연료소비량과 배출계수의 곱으로 도출하였다. 또한 항계 내 선박에서 발생하는 이산화탄소는 항계 내 선박 이동과 부두 접안 시 발생하는 이산화탄소로 구분하고 항계 내 선박으로부터 발생하는 총 이산화탄소량은 항계 내 선박 이동 및 정박의 합으로 산정하였다. 외부 차량에 대해서는 컨테이너트럭 및 외부차량이 항만의 게이트로 들어와 다시 게이트 밖으로 나갈 때까지의 배출량과 트럭이 정차했을 때의 배출량을 합산하여 계산했다. 이상의 산정방법을 통해 산출된 우리나라 항만의 2007년 총 이산화탄소 배출량은 약 282만 tCO₂로 산정되었으며, 항만의 발생원별 배출량은 선박이 63.2%로서 가장 높았고, 다음으로 하역 21.2%, 외부차량 15.6% 순으로 나타났다.

일본 국토교통성은 2009년 전국 항만에 대한 이산화탄소 배출량 저감을 위해 항만 내 작업영역별 배출량 산정 방법을 표준화했다.¹⁵⁾ 배출계수 및 원단위는 국가 고유 계수를 사용했으며, 고유 계수는 물동량을 가장 많이 처리한 요코하마항과 가장 적게 처리한 시미즈항의 데이터를 평균하여 산정하였다. 이산화탄소를 발생시키는 원인은 선박의 정박, 하역작업, 항내 이송, 배후지 운송, 사무동 등으로 구분하여 제시했으며, 하역장비의 이산화탄소 배출량은 연료사용량과 배출계수의 곱으로 산정하였다.

미국 환경보호국(EPA: Environmental Protection Agency)은 국내 지역별 운송수단에 따른 배출량 계산 시뮬레이터 'MOVES'¹⁶⁾에 항만 하역장비와 관련된 요소를 추가하고, 이를 효과적으로 사용하기 위한 가이드라인인 "Port Emissions Inventory Guidance"를 발표했다. 그리고 항만 하역장비에 대한 오염물질 배출량 산정 요소로 엔진 마력, 장비부하계수, 시간당 에너지 소모량, 엔진 가동 시간, 배출계수를 제시했다. 유럽환경청(EEA: European Environment Agency) 또한 1996년부터 2019년까지

15) 국토교통성(2009)

16) Motor Vehicle Emission Simulator

대기오염물질 배출 인벤토리 가이드라인을 지속적으로 업데이트하여 제공하고 있다. EEA의 인벤토리는 유럽경제위원회(UNECE: United Nations Economic Commission for Europe)의 대기오염 관련 협약인 ‘CLRTAP(The Convention on Long-range Transboundary Air Pollution)’¹⁷⁾와 EU 국가 배출 한도 지침에 따른 배출량 관련 정보 제공 및 대기오염물질원에 따른 배출량 산정에 대한 가이드라인을 제시하고 있다. 그리고 EEA 및 EPA의 인벤토리를 바탕으로 이정옥·이향숙(2021)은 인천항 대기오염물질 배출량 산정 연구를 통해 인천항에서 2020년 1년간 배출된 선박, 차량, 하역장비, 철도 등에서 발생하는 일산화탄소, 질소산화물, 황산화물 등에 대한 배출량을 분석하는 연구를 수행하기도 했다.

4) 항만분야 경제성 분석 관련 연구

한국해양수산개발원(2015)은 항만분야 예비타당성조사의 경제성평가의 기준 개선 연구를 통해 항만부문 예비타당성조사 시에 적용될 편익 종류를 정의하고 편익 산정 방법 및 적용 원단위 등의 개선 방향을 제시하였다. 신승식(2015)은 항만건설 예비타당성조사의 편익산정 개선에 대한 연구에서 기존 항만 개발의 편익항목을 검토하고 우리나라 항만건설 편익산정의 문제점을 제시했다. 더불어 항만건설의 편익산정 방법론을 검토함으로써 항만분야 예비타당성조사의 경제성 분석에 적용되는 편익 산정과 비용 검토 및 개선 방안을 제시하였다. D. Sartori *et al.*(2014)은 투자사업의 우선순위 결정을 위한 가이드라인 제공을 위해 투자사업의 비용편익 분석에 대한 EU의 매뉴얼을 제시하는 연구를 수행하기도 했다. 항만분야의 경제성 평가를 위한 연구는 지속적으로 수행되어 왔음에도 불구하고, 스마트항

17) 우리말로 번역하면 ‘월경성 장거리이동 대기오염물질에 관한 협약’으로 1975년 북유럽지역의 국경을 넘는 대기오염 문제가 제기됨에 따라 1979년 채택된 협약으로 대기환경에 관한 최초의 다자간 환경협약 (네이버 외교통상용어사전, 검색일: 2022. 1. 10)

만 구축에 따른 장비 동력 전환 시 그에 대한 비용과 탄소배출에 대한 편익을 분석한 연구는 아직까지 미미한 실정이다.

이상의 내용을 종합하면 다음의 <표 1-1>과 같다.

<표 1-1> 주요 선행연구 정리

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
1	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Calculating the Carbon Footprint in ports by using a standardized tool 연구자(연도): Sahar A. <i>et al.</i>(2021) 연구목적: 항만에서의 GHG 배출량 계산을 위한 표준화 도구 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 심층문헌 연구 실증분석 유효성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> 전 세계 및 해운항만 분야의 기후변화 이니셔티브 고찰 탄소배출량 산정 방식 고찰 항만 탄소배출원의 3가지 범위에 따른 탄소배출량 산정도구 제안 오슬로항 사례 검증
2	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 인천항 대기오염물질 배출량 산정 연구 연구자(연도): 이정욱, 이향숙 (2021) 연구목적: 인천항에서 발생하는 대기오염물질 배출량 파악을 통한 대기질 개선 정책 우선 순위 마련 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 및 사례조사 실증분석 (EEA, EPA 배출계수 활용) 	<ul style="list-style-type: none"> 선박, 차량, 하역장비, 하역/야적재비 산먼지, 도로재비산먼지, 철도 6개 부문으로 분류하여 실증분석 진행 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOX), 총부유물질(TSP), 미세먼지 및 초미세먼지(PM10, PM2.5), 암모니아(NH3) 대상 NOx, CO, SOx, TSP 등의 순으로 오염물질 배출 선박, 차량 등의 순으로 오염물질 배출 AMP 설치, 노후차량 운행규제 등의 지속적인 모니터링 및 관리 시스템 구축 필요
3	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Ports Emissions Inventory Guidance 연구자(연도): EPA(2020) 연구목적: 선박·항만·도로운송 등에 대한 오염물질원별 배출량 산정 가이드 라인 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 실증분석 	<ul style="list-style-type: none"> 항만 하역장비의 오염물질 배출량 산정 요소로 엔진 마력, 장비부하계수, 시간당 에너지 소모량, 엔진 가동 시간, 배출계수를 제시
4	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Preparation of a Smart Port Indicator and 	<ul style="list-style-type: none"> 심층문헌 연구 	<ul style="list-style-type: none"> 스마트항만 인덱스 선정 인덱스 가중치 선정

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
	<ul style="list-style-type: none"> Calculation of a Ranking for the Spanish Port System 연구자(연도): Rodrigo González R. <i>et al.</i>(2020) 연구목적: 스페인 항만 시스템의 스마트화 진단을 위한 평가 체계 제안 	<ul style="list-style-type: none"> 설문조사 델파이 	<ul style="list-style-type: none"> 순위 선정(스페인항만 대상) 스마트항만의 개념에 대해 서술: 새로운 기술을 활용하여 항만 서비스를 상호적이고, 동적으로 변환, 투명하고 효율적으로 개선, 환경과 도시, 시민을 고려
5	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept 연구자(연도): Nikolaos Sifakis and Theocharis Tsoutsos(2020) 연구목적: 제로 에너지 항만을 위한 가이드라인 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 심층문헌 연구 SWOT 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 항만 에너지 관리 방안 및 관련 시스템 고찰(선박 저속운항, 장비 연료 전환, 항만 운영 및 서비스 자동화, 재생에너지 시스템, 연료 및 폐기물 전환, 스마트 마이크로그리드 등) 항만별 특성에 따른 탄소 저감에 대한 SWOT
6	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: R&D 예비타당성조사 비용효과분석 방법론 탐색 연구 연구자(연도): 서울대학교 (2020) 연구목적: 국가 R&D 사업에 대한 표준화된 지침 및 세부 가이드라인 마련 	<ul style="list-style-type: none"> 사례조사 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 R&D 및 해외 비용효과분석 사례 검토 비용효과분석의 적용기준 검토 비용효과 단위의 선택 검토 대안 설정의 범위 검토
7	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 연구자(연도):EEA(2019) 연구목적: 대기오염물질 배출 인벤토리 구축 가이드라인 	<ul style="list-style-type: none"> 심층문헌 연구 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> 산업분야별 대기오염물질 배출량 추정 지침 제시 연료별 대기오염물질 배출 관련 전략 제시
8	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Alignments between strategic content and process structure: the case of container terminal service process automation 연구자(연도): Wang P. <i>et</i> 	<ul style="list-style-type: none"> 심층문헌 연구 대상 컨테이너터미널 샘플링 및 그룹화(시장에서의 포지션과 자동화 	<ul style="list-style-type: none"> 20개의 컨테이너터미널을 기준으로, 항만이 시장에서 갖는 전략적 포지션과 작업 프로세스를 바탕으로 한 터미널 자동화 평가 항만 자동화를 다음과 같이 분류함: 터미널의 3대 프로세스(해측작업, 야드작업, 육측작업)에서, 하나 또는 두 개의 프로세스에서 자동화 장비를 투입

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
	<p><i>al.</i>(2019)</p> <ul style="list-style-type: none"> 연구목적: 자동화를 통한 장점을 항만의 작업 프로세스와 비즈니스 전략 콘텐츠 중심으로 분석 	수준으로 구분)	해 활용한다면 반(Semi-) 자동화 터미널, 모든 프로세스에서 자동화 장비가 활용되면 완전(Fully) 자동화 터미널로 정의
9	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Carbon emissions reduction in China's container terminals: Optimal strategy formulation and the influence of carbon emissions trading 연구자(연도): Zhong <i>et al.</i> (2019) 연구목적: 탄소 저감비용 계산 및 컨테이너 운영사의 법정 배출량 충족 최적화를 위한 비선형 프로그래밍 모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 비선형모델링 민감도분석 ※ 광저우 난사항 사례 참조 	<ul style="list-style-type: none"> 탄소 저감 조치 중 디젤에서 전기로의 RTGC 전환이 가장 효과적으로 나타남(전체 배출량 저감의 75%, 비용은 9.8%에 불과) 배출 추정 및 감축의 비선형 최적화 모델 개발 관련 비용 최소화하면서 법적 배출 감축 요구 사항 충족하는 컨테이너 터미널에 대한 최적의 탄소 감축 전략 공식(formulation)화
10	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Environmental Performance Indicators for Green Port Policy Evaluation: Case Study of Laem Chabang Port 연구자(연도): Rattaporn T. <i>et al.</i>(2019) 연구목적: 항만 환경평가 지수 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 심층 사례조사 항만 환경평가 지수 (EPIs) 적용 	<ul style="list-style-type: none"> 태국 람차방항의 측정 가능한 환경적 데이터(수질, 대기질, 소음 통제 등) 수집 문헌조사를 기반으로 만들어진 EPIs 지수 적용을 통해 람차방항의 환경적 데이터 개선 정도 확인 태국의 항만 환경 개선을 위한 정책 방향성 제시 그린 항만 측정을 위한 EPIs 도구화
11	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis 연구자(연도): Wang K. J. <i>et al.</i>(2018) 연구목적: 스마트항만 산업이 대한민국 경제에 미치는 영향 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 심층문헌 연구 델파이 투입산출 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 항만산업, 신산업 및 스마트항만 산업의 경제로의 영향 분석(투입-산출분석 활용) 선행연구를 종합해 스마트항만의 정의를 내림: 스마트항만은 사물인터넷, 정보통신기술, 빅데이터, 환경 친화적 기술 등 높은 수준의 기술을 사용하는 자동화 시스템을 도입해 항만의 생산성과 효율을 향상하는 항만을 의미
12	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: A simulation-based 	<ul style="list-style-type: none"> 시뮬레이션 	<ul style="list-style-type: none"> 항만 탄소배출량 저감요인으로 운항 속도 저감, 접안 보조 시간 단축, 육상

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
	<p>research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals</p> <ul style="list-style-type: none"> • 연구자(연도): Peng W. <i>et al.</i>(2018) • 연구목적: 항만의 탄소배출 저감 요인들의 영향 정도에 대한 정량적 규명 		<p>전력 공급 및 대체 연료 사용, 항만 장비의 작업 효율성 증가를 고려, 해당 요인을 적용한 시뮬레이션 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> • 항만의 탄소배출량 주요 원인은 선박(배출량의 81% 차지) • 항내 저속운항(24노트→8노트)을 통해 선박 배출량 48%, 터미널 전체 배출량의 33% 저감 가능 • 디젤에서 LNG로 연료 전환 시, 배출량 11%, 전체 배출량 8% 저감 가능
13	<ul style="list-style-type: none"> • 연구명: 그린항만 구축을 위한 정책우선순위 평가 - 부산항과 인천항을 중심으로 • 연구자(연도): 정태원 외 (2018) • 연구목적: 부산항과 인천항의 그린항만 구축을 위한 정책우선순위 평가 	<ul style="list-style-type: none"> • 사례조사 • 인터뷰 • Fuzzy-MCDM • Fuzzy-TOPSIS 	<ul style="list-style-type: none"> • 미국 서부 항만의 그린 항만 정책을 검토하여 우리나라 항만에 적용 가능한 정책(AMP 설치, Pier Pass 시행, 입항선박 감속운항 등) 선정 • Fuzzy-MCDM 결과 그린쉽 인센티브, 탄소 발자국 등의 정책이 높은 중요도를 보임 • Fuzzy-TOPSIS 결과 인천항과 부산항 모두 AMP 설치, 입항선박 감속운항 등이 중요 정책
14	<ul style="list-style-type: none"> • 연구명: A global review of the hinterland dimension of green port strategies • 연구자(연도): G.A. Marta <i>et al.</i>(2018) • 연구목적: 항만 배후지역 운송에서 발생하는 환경오염 개선 	<ul style="list-style-type: none"> • 문헌조사 • 심층 사례조사 • 눈덩이 표집 기법 	<ul style="list-style-type: none"> • 항만 배후지역 운송에서 발생하는 환경오염 개선 • 배후운송목표 달성을 위한 대책을 시행하고 있는 항만 발굴 • 내륙 운송의 환경 성능 개선을 위한 일반적인 목표와 조치 확인 • 목적에 따른 세계 항만의 군집화 • 친환경 항만의 목적에 따른 벤치마킹 항만 제시
15	<ul style="list-style-type: none"> • 연구명: Reducing air emissions in a container terminal • 연구자(연도): Ari Hirvonen <i>et al.</i>(2017) • 연구목적: 항만 내 대기오염의 원인 규명 및 관련 장비 고찰을 통한 배출량 감소 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> • 실태조사 • 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> • 컨테이너 항만의 대기오염원 규명 • 버지니아 International Gateway 사례조사를 통한 탄소배출량 감소 효과, 야드 및 STS, 이송, 운전자 교육, 터미널 자동화, 소음 등
16	<ul style="list-style-type: none"> • 연구명: A carbon emission evaluation model for a 	<ul style="list-style-type: none"> • 시스템다이 나믹스 	<ul style="list-style-type: none"> • 항만 내 주요 활동별(선박, 하역, 운송 등) 탄소배출량 추정

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
	<ul style="list-style-type: none"> container terminal 연구자(연도): Jaehun Sim(2017) 연구목적: 공정별 탄소배출량 분석 및 2030년까지 우리나라 국가 탄소배출량 감축목표 달성에 필요한 컨테이너터미널의 탄소배출량 감축량 추정 	<ul style="list-style-type: none"> 민감도 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 정부 설정 배출량 감축목표 달성을 위한 감축량 산정 컨테이너 물동량의 불확실성이 탄소배출량 및 탄소배출 저감목표에 미치는 영향 추정(민감도 분석)
17	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Benchmark dynamics in the environmental performance of ports 연구자(연도): Marti P. <i>et al.</i>(2017) 연구목적: 에코항만 회원사들의 환경 벤치마크 성과 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 SDM(Self-Diagnosis Method) 트렌드 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ESPO(European Sea Ports Organisation) 회원 항만(91개 항만)의 환경 성과 비교 환경적 정책, 조직 및 인력 관리, 환경 인식 및 훈련, 의사소통, 운영 관리, 비상시 계획, 환경적 이슈 및 모니터링으로 7가지 성과 구분 대기질, 에너지 소비, 소음, 지역 주민과의 의사소통, 쓰레기 및 항만 폐기물, 선박 폐기물, 배후지역과 연계한 항만 발전, 수질, 먼지, 준설 작업이 10대 환경 우선 순위 환경 관리 시스템 49% 개선 대기질, 에너지 소비, 소음 지역 주민과의 의사소통이 최우선 순위
18	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 국가연구개발사업의 비용효과 분석 방향 연구 - 시스템 개발사업을 중심으로- 연구자(연도): 한국과학기술기획평가원(2017) 연구목적: 비용효과분석의 실무적 완성도 제고 및 합리적 예비타당성 수행 	<ul style="list-style-type: none"> 사례조사 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 비용효과분석의 수행 절차 및 단계별 설명 핵심 고려사항 검토 시스템개발 유형에 따른 구체적 검토 사항 도출
19	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: R&D 예비타당성조사를 위한 비용효과분석 적용 방안 마련 연구 연구자(연도): 김정권 외(2017) 연구목적: 국가연구개발사업의 예비타당성조사에서 실질적으로 참고할 수 있는 적용방안 마련 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 사례조사 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 비용효과분석 고려사항 검토 비용효과분석의 적용 절차 검토

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
20	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Clean Air Guide for Ports & Terminals 연구자(연도): Marcelo Norsworthy <i>et al.</i>(2016) 연구목적: 항만의 부문별 대기 오염 저감을 위한 프레임워크 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 심층 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> 선박, 항만, 트럭, 이송장비, 철도 등으로 구분하여 각각의 전략, 예시, 효과, 고려사항 등을 제시→핵심전략 도출 자금확보 방안 및 로드맵 제시
21	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 항만분야 예비타당성 조사의 경제성평가 기준 개선 연구 연구자(연도): 한국해양수산개발원(2015) 연구목적: 항만부문 경제성 분석의 합리적 적용방안 제고 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 통계분석 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 적용 편익 및 산정 방식 등 정리·분석 국내외 SOC 사업의 추진 시 적용되는 편익 조사 항만부문 예비타당성조사 시에 적용될 편익 종류 편익 산정 방법 및 적용 원단위 등의 개선 방향 제시
22	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 항만건설 예비타당성 조사의 편익산정 개선에 대한 연구 연구자(연도): 신승식(2015) 연구목적: 항만분야 예비타당성조사의 경제성 분석에 적용되는 편익 산정과 비용 검토 및 개선 방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 실증분석 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 기존 항만 개발의 편익항목 검토 우리나라 항만건설 편익산정의 문제점 항만건설의 편익산정 방법론 검토 및 분석
23	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects 연구자(연도): D. Sartori <i>et al.</i>(2014) 연구목적: 투자사업의 우선순위 결정을 위한 가이드라인 제공 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 심층 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> 투자사업의 비용편익 분석에 대한 EU의 매뉴얼 제시 에너지 사업의 편익 평가 방법 제시
24	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: Automation in port container terminals 연구자(연도): A.M. Martín-Soberón <i>et al.</i> (2014) 연구목적: 자동화 터미널의 개념을 소개하고, 항만 자동화와 관련된 주요 이점과 과제 소개 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 심층 사례조사 그룹화 	<ul style="list-style-type: none"> 현재의 자동화터미널은 야드와 이송 영역만이 자동화되어 있음 반자동화 터미널은 야드영역이 자동화 되어 있고, 이송영역(dock-yard interchanges)에서는 전통적인 이송장비를 활용하는 터미널을 의미

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
25	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 우리나라 항만특성에 맞는 그린포트정책 수립에 관한 연구 - AHP를 이용한 울산항 그린포트 정책 우선순위 개발 연구자(연도): 김태균 외 (2014) 연구목적: 울산항의 친환경 항만 구축방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 심층 사례조사 인터뷰 AHP 중요도 분석 	<ul style="list-style-type: none"> 친환경성 4가지, 지역교류성 4가지, 경제성 5가지로 정책 기준 설정 하드웨어적 방안 12가지(하이브리드 터그보트, AMP, 태양열 활용 등), 소프트웨어적 방안 12가지(환경 인센티브, 친환경 R&D 추진 등) 설정 시설 및 제도적 측면의 동등한 정책 이행 필요 LED 및 AMP 구축, 울산항만공사의 환경관리부서 신설 등이 최우선 순위
26	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: RFID based model for an intelligent port 연구자(연도): J. K. Siror <i>et al.</i>(2011) 연구목적: 무선 주파수 인식 (RFID: Radio Frequency Identification) 기반의 지능형 항만 모형 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌연구 시스템 아키텍처 모델링 모의실험 (Simulation) 	<ul style="list-style-type: none"> 케냐 몸바사항(the Port of Mombasa)을 기반으로 지능형 항만 시스템 아키텍처 제안 지능형 항만은 지능형 시스템이 도입된 항만이며, 지능형 시스템의 예로 태그와 리더를 통해 사물을 감지하는 RFID 시스템을 지목 이러한 지능형 기술은 ① 항만 효율을 높이고, ② 화물 추적성을 개선하며, ③ 수송화물 우회를 억제함
27	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 녹색기술 기반의 미래 항만 개발전략과 효과분석 - 컨테이너 터미널을 중심으로- 연구자(연도):한국해양수산개발원(2011) 연구목적: 녹색기술 기반 미래 항만 구축의 효율적이고 체계적인 국가정책 추진전략 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 전문가자문 (전기, 전자, 에너지 등) 목표계획법 (goal programming)을 활용한 녹색항만 구축모델 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 녹색항만 개념과 실태분석 항만 녹색기술 현황 및 발전전망 녹색항만 구축을 위한 모델수립 녹색항만기술 실증분석 및 선정 미래녹색항만 구축효과 분석 및 개발 전략
28	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: IAPH Tool Box Port clean air program 연구자(연도): IAPH(2010) 연구목적: 항만과 해상활동에서 기인한 대기질과 온실가스 배출량 산정 및 대응체계 수립 지원 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 심층 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> 항만관련 대기질 개선 전략 제시 선박기인 배출량 저감 전략 항만장비기인 배출량 저감 전략

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
29	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 항만에서의 온실가스 효과, 가스배출 삭감계획 작성 가이드라인 연구자(연도): 국토교통성 (2009) 연구목적: 전국 항만의 이산화탄소 배출량 감축을 위한 부문별 이산화탄소 배출량 산정 방법 표준화 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 실증분석 	<ul style="list-style-type: none"> 하역장비의 이산화탄소 배출량은 연료사용량과 배출계수의 곱으로 산정 이산화탄소 발생원을 선박 정박, 하역, 항내 이송, 배후지 수송, 관리동 등으로 구분하여 제시
30	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 우리나라 항만 및 배후물류단지의 친환경 물류체계 구축에 관한 연구 연구자(연도): 한국해양수산개발원(2009) 연구목적: 제4차 기후변화 종합대책과 연계한 항만물류분야 온실가스 감축대책 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 및 사례조사 퍼지집합이론을 활용한 평가지표 가중치 선정 압력-상태-대응지수(PSR)를 활용한 친환경 물류 종합지수 선정 	<ul style="list-style-type: none"> 친환경물류 관련 선행연구 분석 국내 항만 및 배후단지 친환경 물류체계 현황 및 문제점 해외 선진항만 및 배후단지 사례분석 친환경 물류체계 비전 및 관리목표 친환경 물류체계 구축방안
31	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 항만분야 기후변화협약 대응방안 연구자(연도): 한국해양수산개발원(2009) 연구목적: ① 항만 이산화탄소 배출량 산정, 전망, ② 항만 이산화탄소 저감 목표치 설정, ③ 부문별 저감 대안 설정, ④ 추진 로드맵 제시, ⑤ 항만분야 실행 가능한 정책 제언 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사, 전문가 자문 인터뷰 계량분석 및 사례조사 	<ul style="list-style-type: none"> 기후변화협약 및 우리나라 대응방안 항만분야 국내외 대응 동향 항만분야 온실가스 배출량 산정 항만분야 저감목표치 설정 저감에 따른 경제성 분석 로드맵 작성 및 정책제언
32	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 저탄소 경제시스템 구축전략 연구 연구자(연도): 에너지경제연구원(2008) 연구목적: 항만의 개발 및 운영과 관련된 환경영향 및 환경에 대한 부정적 영향의 최소화 방안 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 실증분석 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 7개 산업부문을 대상으로 온실가스 감축비용 산출을 위한 상향식 모형 구축 온실가스 한계감축비용 산출

NO.	연구목적	연구방법	주요 연구내용
33	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 항만의 환경오염 저감 방안에 관한 연구 연구자(연도): 송계의 외 (2007) 연구목적: 항만에서 발생하는 환경오염 저감 	<ul style="list-style-type: none"> 실태조사 심층 사례조사 문헌조사 	<ul style="list-style-type: none"> 선박, 하역장비, 트레일러 등 항만 화물운송 및 하역장비 중심의 환경오염 저감 방안 검토 선박: 인센티브 프로그램 도입, AMP 도입, 청정연료 사용, 저감장치 이용 시 항만이용료 할인 하역장비: 대체연료엔진 활용, 청정 연료 활용 차량 및 철도: 배기가스 배출통제 차량 대체, 청정원료 사용
34	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 환경친화적 항만개발 및 운영방안 연구자(연도): 한국해양수산개발원(2003) 연구목적: 항만의 개발 및 운영과 관련된 환경영향 및 환경에 대한 부정적 영향의 최소화 방안 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 실증분석 전문가 자문 	<ul style="list-style-type: none"> 항만의 개발 및 운영과 관련한 환경영향의 검토, 환경영향의 최소화방안 검토 바람직한 항만환경의 조성 및 환경관리에 대한 시민과 사용자에 대한 홍보 방안
35	<ul style="list-style-type: none"> 연구명: 항만개발사업의 경제적 타당성 평가의 개선방안 연구 연구자(연도): 한국해양수산개발원(2003) 연구목적: 항만투자사업에 경제성 평가항목 및 산정기준 정립과 시설물별 표준비용 구간 설정을 통한 경제적 타당성 평가 개선방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> 문헌조사 사례조사 실증분석 	<ul style="list-style-type: none"> 경제적 타당성 평가여건 변화요인 분석 기존 편익항목의 타당성 평가 및 개선 방안 경제적 편익항목 선정 및 산출방법 표준화 방안 경제적 비용항목 표준화 가능성 검토 및 개선방안

주: 순서는 연도별 내림차순으로 정리함
자료: 저자 작성

2. 선행연구와의 차별성

본 연구와 선행연구의 차별성은 세 가지로 제시할 수 있다.

첫째, 전 세계적으로 대두되고 있는 탄소중립에 대한 대응방안을 스마트 항만의 관점에서 제시하고자 했다는 점이다. 국내 관련 연구의 경우, ‘온실가스 저감’, ‘녹색항만 구축’과 같은 키워드를 활용한 친환경 기술에 대한 연구는 다수 수행되어 왔으나, 스마트항만과 친환경항만 간 연계성을 고찰하고 이를 실증분석한 연구는 부진하다.

둘째, 실증분석을 통해 스마트화에 따른 탄소배출량의 차이를 하역장비별 원단위로 산정했다는 점이다. 본 연구는 스마트항만 도입 단계별 탄소저감효과에 대한 정량적인 자료를 제시함으로써 국내 항만의 스마트화 추진과 항만부문의 탄소배출 저감 정책이 유기적으로 연계될 수 있는 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

셋째, 탄소 저감을 위한 스마트항만의 유형별 비용과 편익을 분석했다는 점이다. 기존 유사 연구에서 저탄소 스마트항만 구축에 대한 경제성 분석을 시도한 내용은 찾아보기가 힘들다. 방법론 또한 문헌조사 및 사례연구에 그치고 있어 정량적인 자료 제시를 통한 탄소 저감에 관한 정책적 대응방안을 제공하지 못하고 있다. 본 연구는 스마트항만과 탄소중립이 연계된 경제성 분석을 수행함으로써 정책적 시사점 도출 시 비용 측면의 가이드라인 또한 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

02

국내 스마트항만 및 탄소중립 정책 현황과 해외 사례

제1절 탄소중립 및 스마트항만 관련 주요 정책

본 절에서는 에너지, 산업, 건설, 교통 등 각 분야별로 수립한 탄소중립과 관련된 주요 정책과 그 내용을 살펴보고, 항만 분야 주요 정책과의 연관성을 도출함으로써 탄소중립시대에 항만의 대응방향에 대한 시사점을 찾고자 한다.

1. 탄소중립 관련 주요 정책 현황

탄소중립과 관련된 가장 대표적인 정책인 ‘2050 탄소중립 추진전략’은 국가 단위의 전략으로 각 산업 및 분야별 기후변화 및 탄소중립 관련 대응 계획을 수립하고 추진하기 위한 방향을 제시하고 있다. 3대 정책방향은 ① 경제구조의 저탄소화, ② 신유망 저탄소산업 생태계 육성, ③ 탄소중립 사회로의 공정 전환이며, 제도적 기반 강화를 위한 분야별 세부 전략은 각

분야의 주관부처에서 수립하도록 하고 있다. 각 분야별 세부 전략으로는 에너지 부문의 ‘에너지 탄소중립 혁신전략’, 산업 부문의 ‘탄소중립 산업 대전환 추진전략’, 교통 부문의 ‘수송부문 미래차 전환전략’, 건설 부문의 ‘건물 부문 2050 탄소중립 로드맵’,¹⁸⁾ 해양수산 부문의 ‘해양수산 분야 2050 탄소중립 로드맵’¹⁹⁾ 등이 있다.

다음으로 에너지 부문에서 가장 대표적인 탄소중립 정책은 ‘에너지 탄소중립 혁신전략’으로 에너지 전환 및 CCUS(이산화탄소 포집 및 활용, 저장)를 통해 최종적으로 에너지 부문에서 배출하는 이산화탄소를 전량 감축하는 목표를 제시하고 있다. 이를 위해 재생 에너지 발전량을 높이는 한편, 장기적으로 석탄발전의 폐지 및 다른 에너지원으로의 전환 등 청정에너지로의 전환을 가속화하고 기반 구축을 위한 세부 계획을 포함하고 있다. 아울러 NDC(국가 온실가스 감축목표) 달성을 위한 핵심기술 상용화 등 새로운 성장동력 창출을 위한 지원 방안 및 탄소중립을 위한 이행 체계 강화 방안 또한 제시하고 있다.

셋째로는 ‘탄소중립 산업 대전환 추진전략’이 있다. 이는 산업 부문에서 발생하는 탄소 배출량을 2050년까지 2018년 대비 80.4%를 감축하기 위한 세부 전략을 제시하고 있다. 특히 산업 부문별 특성과 감축 추진 시 애로사항을 파악함으로써 이를 해소할 수 있는 방안을 선제적으로 검토하였다. 산업계는 탄소중립과 관련하여 기술의 불확실성, 경제성에 대한 우려, 제도의 미비 등을 가장 큰 애로사항으로 꼽기도 했는데, 이에 대해 산업통상자원부는 기업 차원에서 단·중·장기적으로 단계별 핵심기술을 확보할 수 있는 지원 방안 수립, 경제성 부문에 있어서 세제, 금융 등 정부의 전폭적인 지원 등을 통해 산업계의 부담을 최소화할 것을 발표하였다. 더

18) 2050 탄소중립 추진전략에서는 ‘건물부문 2050 탄소중립 로드맵’으로 명시했으나 실제 발표에서는 ‘국토교통 탄소중립 로드맵’으로 변경됨

19) ‘해양수산 분야 2050 탄소중립 로드맵’은 스마트항만 관련 주요 정책 부분에서 다룸

불어 탄소중립 관련 신기술의 적용을 제한하는 규제에 대해서는 원칙적으로 폐지할 것을 계획하였다.

넷째로, ‘국토교통 탄소중립 로드맵’에서는 2050년까지 건물에서 발생하는 탄소배출량은 2018년 대비 88.1% 감축, 수송 분야에서는 같은 기간 97.1%²⁰⁾ 감축하는 목표를 제시하였다. 이를 위해 건물 부문에서는 성능 데이터를 기초로 신축 건물의 제로 에너지화, 기축 건물의 그린 리모델링 등 기술 및 제도 확산 등과 관련된 계획을 수립하였다. 수송 분야에서는 차량의 전기, 수소차 전환을 위해 탄소배출량 감소 효과가 큰 사업용 차량을 우선적으로 전환을 추진하는 한편, 대중교통의 활성화 및 수요관리를 병행하여 내연차의 총 주행거리를 감축하는 방향을 제시하였다.

이상의 내용을 종합하면 국내 탄소중립 관련 정부의 정책은 2020년 수립된 ‘2050 탄소중립 추진전략’을 중심으로 국가 차원의 탄소중립 비전 및 추진 방향을 제시하고 있으며, 세부적인 분야별 탄소중립 방안은 관련 부처에서 계획을 수립하는 것을 알 수 있다. 각 분야별 전략의 공통점은 탄소중립을 위한 장비, 시설 등의 도입을 단계적으로 의무화하는 한편, 이에 따라 발생하는 추가적인 비용에 대해 세제 및 금융 지원을 통해 부담을 경감하는 데 있는 것으로 보인다. 또한, 관련 기술 개발 및 제도 개선 역시 각 분야에서 공통적으로 제시하고 있는 사항이다.

20) 국토교통 탄소중립 로드맵에서는 수송 분야의 경우 시나리오별로 탄소배출 감축량을 제시하고 있으며 각 시나리오별로 97.1% 및 90.6%를 감축하는 것을 목표로 하고 있음

〈표 2-1〉 탄소중립 관련 분야별 주요 정책

구분	2050 탄소중립 추진전략	에너지 탄소중립 혁신전략	탄소중립 산업 대전환 추진전략	국토교통 탄소중립 로드맵
관련 부처	관계부처 합동	산업통상자원부		국토교통부
발표시기	2020. 12. 7	2021. 12. 10		2021. 12
비전	<ul style="list-style-type: none"> 적응적 감축에서 능동적 대응으로: 탄소중립, 경제성장, 삶의 질 향상 동시 달성 	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 시스템 혁신을 통해 탄소중립 선도국 도약 	<ul style="list-style-type: none"> 저탄소 경제를 선도하는 세계 4대 산업강국 	<ul style="list-style-type: none"> 국민의 생활터전이 되는 모든 공간과 이동수단의 탄소중립
주요 추진과제	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 전환 가속화 고탄소 산업구조 혁신 미래모빌리티로 전환 도시, 국토 저탄소화 신유망 산업 육성 혁신생태계 저변 구축 순환경제 활성화 취약 산업 계층 보호 지역중심의 탄소중립 실현 탄소중립 사회에 대한 국민인식 제고 	<ul style="list-style-type: none"> 탈탄소 공급 믹스 전환 분산 에너지 시스템 확산 에너지 효율 혁신 전력 계통망 혁신 에너지 저장 체계 구축 전력시장제도 개선 에너지 가격체계 개편 탄소중립 핵심기술 개발 에너지 신산업 생태계 조성 투자활성화 유도 	<ul style="list-style-type: none"> 탄소중립 실현 핵심기술 확보 기업부담 경감 전폭적 정부지원 저탄소 시대 맞춤형 제도 구축 안정적 에너지 기반 확보 탄소가치 반영 시장 창출 빈틈없는 탄소중립 공급망 관리 3대 분야 등 신성장동력화 추진 중소, 중견기업 맞춤형 저탄소 혁신 전통산업, 인력 선제적 미래전환 지역경제 녹색 균형발전 추진 	<ul style="list-style-type: none"> 건물 데이터 기반 구축 신축건물 제로 에너지화 기축건물 그린 리모델링 건물 에너지 수요 관리 교통 데이터기반 구축 전기, 수소차 전환 지원, 사업용 차량 집중 대중교통 활성화, 자가용 이용 수요 관리 친환경 철도, 항공
감축량 ('50년까지) 백만톤 CO ₂ eq	△686.3 ²¹⁾	△269.6	△209.4	△45.9

자료: 관계부처합동(2020, 2021), 산업통상자원부(2021a, 2021b), 국토교통부(2021) 자료를 토대로 저자 재작성

21) 2021년 8월 발표한 2050 탄소중립 시나리오상 2018년 국가 전체 배출량(686.3백만톤CO₂eq) 대비 감축 목표로 2050년까지 전량 감축하는 것을 목표로 함

2. 스마트항만 관련 주요 정책 현황

항만은 국가 물류의 주요 인프라로서 이를 개발·운영하는 데 큰 비용이 소요됨에 따라 효율성과 생산성은 항만의 수익성 및 경쟁력 평가를 위한 핵심 요소로 자리 잡아 왔다. 이에 따라 효율적인 항만 운영을 위해 항만 관련 장비, 시설, 운영 시스템 등은 지속적으로 발전되어 왔으며, 4차 산업혁명 기술이 항만분야에 도입·적용됨에 따라 세계 주요 항만의 발전 방향은 궁극적으로 스마트항만을 지향하고 있다. 스마트항만은 장비, 시설, 운영 시스템 등 항만을 구성하는 요소들의 정보화, 지능화, 디지털화를 아우르는 개념으로 운영 측면의 생산성 및 효율성 증대뿐만 아니라 운영 최적화 및 구동방식의 변화 등으로 인해 환경 측면의 이점 역시 기대되고 있어 앞서 기술한 탄소중립과 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다.

이에 국내 항만 관련 정책 중 스마트항만과 관련된 현재까지의 정책을 살펴보고, 앞서 다룬 탄소중립과 관련된 각 분야별 주요 정책에서 다루지 않은 해양수산 분야의 탄소중립 로드맵 역시 살펴보고자 한다.

첫째, ‘해양수산 스마트화 추진전략’은 2019년 11월, 빅데이터, IoT, 인공지능 등의 4차 산업혁명 핵심기술 적용으로 기존 해양수산업의 체질을 개선하고 해양수산 분야의 새로운 미래성장동력을 창출하기 위해 수립되었다. 목표는 2030년까지 자율운항선박시장 점유율 50%, 스마트양식 보급률 50%, IoT 기반 항만 대기질 측정소 1,000개 구축, 해양재해 예측 소요시간 단축(12시간 → 4시간), 해양수산 통합 빅데이터 플랫폼 구축 등이 있다.²²⁾ 특히 항만 부문에서는 스마트항만, 초연결 해상통신, 고정밀 위치정보 등의 스마트 해상물류 인프라 및 서비스 구축에 대한 실행방안을 제시하고 있는데, 여기서 스마트항만의 역할은 자율운항선박의 운항에 필요한 입·출항 관리, 운항지원센터, 최적 하역, 연료 충전 등을 지원하는 것으로

22) 한국해운신문(2019.11.11), ‘4차 산업혁명 이끌 해양스마트화 본격 시동’(검색일: 2022. 1. 10)

정의되고 있다.²³⁾ 또한 초대형·자율운항선박에 적합하고 안정적인 초고속·대용량 하역을 위한 항만 자동화 시스템을 개발·구축함과 동시에, 사물인터넷·인공지능 기술로 항만 내 모든 작업과 물류 데이터를 실시간으로 수집·분석하여 최적의 물류 프로세스와 안전한 작업환경을 구현하는 지능형 항만의 개발과 관련된 내용도 포함하고 있다.²⁴⁾

둘째로는 ‘2030 항만정책 방향과 추진전략’이 있다. 주요 내용은 광양항 테스트베드²⁵⁾ 구축 및 기술검증과 2030년도에 부산항에 한국형 스마트항만을 본격적으로 도입하기 위한 내용을 담고 있다. 특히 ‘항만의 자동화 및 디지털화를 통한 스마트 해상물류 기반 마련’ 전략에서는 4차 산업기술 활용, 자동화·지능화된 항만과 선박 기반 물류정보시스템 구축을 통한 화물흐름의 최적화 도모 등을 제시하고 있다. 이를 위한 실행과제로는 ‘국내 기술 중심의 자동화 항만 도입’, ‘항만물류 정보화·지능화를 통한 스마트 물류 연계망 구축’, ‘4차 산업기술을 활용한 디지털 항만 인프라 관리체계 마련’ 등이 있으며, 특히 완전자동화 기술은 개별 장비의 자동화를 넘어서 항만 내 무인차량이송(AGV) 및 ‘선박 ↔ 장치장 ↔ 게이트’ 간 화물흐름을 완전 자동화하여 연계하는 것으로 2030년까지 부산항 진해신항에 해당 기술이 적용된 운영체계를 도입하는 것을 목표로 하고 있다.

셋째, ‘스마트 해운물류 확산전략’에서는 2025년까지 스마트 해운물류 기술의 전반적인 수준 향상 및 적용을 확대함으로써 공급사슬의 주체 간 데이터 공유 및 이를 통한 민간 비즈니스 활성화 유도를 목표로 수립하고 있다. 이를 실현하기 위해, ‘스마트 물류기술 개발 및 확산’, ‘디지털기반 해운물류 안전확보’, ‘해운물류 데이터경제 활성화’, ‘전문인력 양성 및 민

23) 해사신문(2019.11.11.) ‘선원 없는 자율운항선박 2025년까지 개발할 것’(검색일: 2022. 1. 10.)

24) 해양수산부 보도자료(2019.11.11.), ‘4차 산업혁명 시대 이כל 해양수산 스마트화 본격 시동’(검색일: 2022. 1. 10.)

25) 광양항 테스트베드 구축의 주요 목적은 기술융역·R&D를 통해 항만자동화 기술을 국산화하고, 실제 운영 가능한 컨테이너 부두(광양항 4선석)를 구축하여 2026년부터 기술 검증을 수행함

관협력 추진’ 등 4대 전략과 전력별 이행과제를 제시하고 있다. 또한 이를 통해 선박 접안시간 5% 단축, 신 디지털서비스 10개 창출, 전문인력 2천명 육성 등을 도모할 것을 발표했다.

특히 ‘해운·항만 스마트물류 기술개발 및 확대’ 사업의 일환으로 추진되는 스마트항만 기술개발 및 구축사업은 스마트항만을 자동화와 지능화로 구분하여 세부 과제를 제시하고 있다. 먼저, 항만 자동화는 항만 내 전 영역에 대한 자동화 기술 및 장비 개발과 도입을 목표로 광양항 테스트베드 구축·운영, 자율주행차량 기술에 기반한 승무식 이송에서 무인이송방식으로의 변환에 대한 내용을 포함하고 있다. 항만 지능화는 항만 내 장비 및 작업자 관련 데이터를 실시간으로 수집하여 컨테이너 배치 등 항만 운영 관련 일련의 과정을 인공지능 기반으로 분석하여 공급사슬 운영의 최적화 달성을 목표로 하고 있다.²⁶⁾ 더불어, 물류기술과 관련해서 자동차 운반선 자동탑재 기술개발²⁷⁾ 및 스마트컨테이너 기술개발²⁸⁾ 등을 추진할 계획이다.

넷째, ‘해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵’은 앞 절에서 살펴본 ‘2050 탄소중립 추진전략’의 일환으로 해양수산 분야의 탄소중립 전략을 제시하고 있다. 기존 해운항만 분야에서 발생하는 탄소배출량은 2018년 기준, 약 406만 톤이며 2050년까지 흡수원을 포함하여 729만 톤을 감축하는 것을 목표로 하고 있다. 특히 항만 분야에서는 야드트랙터, 트랜스퍼 크레인 등의 하역 및 이송 장비를 친환경으로 전환하는 한편, 재생에너지 발전 및 에너지 효율화를 통해 탄소배출 제로화 실현을 제시하고 있다.

이상의 국내 스마트항만 관련 정책을 종합하면, 단기적으로는 스마트항만 관련 기술 개발 및 실증을 통해 이를 부산항 진해신항에 도입하고, 장기

26) 대상 항만은 부산항 신선대부두로 2021년 9월부터 IoT 기반 지능형항만 플랫폼 현장실증을 추진함

27) 자동차 운반선 자동탑재 기술은 2021년부터 2027년까지 산업부·과기정통부·국토부·경찰청 주도로 추진 중인 자율주행차량 기술개발 혁신사업과 연계하여 기술을 개발함

28) 스마트컨테이너는 내장된 센서를 통해 화물의 위치 및 상태 등을 실시간으로 확인하여 온·습도를 원격제어할 수 있는 컨테이너로 2021년부터 2024년까지 개발을 추진함

적으로 스마트항만을 육성하기 위한 전략을 수립하고 있음을 알 수 있다. 이를 통해 항만의 효율성, 생산성을 제고하는 한편, 항만 시설, 장비에서 발생하는 오염물질 배출 역시 저감이 가능할 것으로 판단된다.

〈표 2-2〉 스마트항만 및 탄소중립 관련 분야별 주요 정책

구분	해양수산 스마트화 추진전략	2030 항만정책 방향과 추진전략 ²⁹⁾	스마트해운물류 확산전략	해양수산분야 2050 탄소중립 로드맵
관련 부처	해양수산부		관계부처합동	해양수산부
발표시기	2019. 11	2020. 11	2021. 4	2021. 12
비전	<ul style="list-style-type: none"> 스마트 해양수산 선도국가 도약 	<ul style="list-style-type: none"> 글로벌 경쟁력을 갖춘 고부가가치 스마트항만 실현 	<ul style="list-style-type: none"> 세계를 선도하는 스마트 해운물류 실현 	<ul style="list-style-type: none"> 2050 해양수산 탄소 네거티브
주요 추진과제	<ul style="list-style-type: none"> 선박, 항만 지능화로 스마트 해상물류 실현 물류 프로세스의 디지털 전환 촉진 초연결 해상교통 인프라 구축 지속가능한 스마트 어업 관리체계 구축 건강하게 기르는 스마트 양식 확산 믿을 수 있는 수산물 유통, 가공 체계 구축 연안, 항만 환경의 상시 감시체계 구축 미리 예측하는 해양 재해 대응 체계 구축 스마트 기술로 연안, 소형선박 안전 강화 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 기술 중심의 자동화 항만 도입 항만물류 정보화, 지능화를 통한 스마트 물류 연계망 구축 4차 산업기술을 활용한 디지털 항만 인프라 관리체계 마련 부산항 진해신항 적기 개발을 통한 동북아 물류 중심 위상 공고화 광양항을 배후산업과 연계된 아시아 최고의 중합물류 항만으로 발전 인천항 등 서해권 항만을 대중국 교역거점으로 특화개발 	<ul style="list-style-type: none"> 해운, 항만 스마트 물류 기술개발 및 확대 물류 전 구간의 운송 최적화 항만 내 작업자 및 시설 안전 강화 첨단 해상통신기술 기반 선박사고 방지 플랫폼 기반 해운물류 신규서비스 제공 데이터 공유 및 유통 체계 구축 스마트 해운물류 스타트업 육성 공공, 민간 스마트 물류 역량 결집을 위한 협력 	<ul style="list-style-type: none"> (해운)친환경 관공선 건조, 민간선사 친환경 전환 등 (수산)친환경 어선 개발, 확산, 양식 에너지 효율 향상 (해양)해양에너지 발전 확대, 해양 그린수소 생산 (항만)하역장비 친환경 전환, 항만 내 재생에너지 발전, 에너지 효율화, 수소항만

자료: 해양수산부(2019, 2020, 2021), 관계부처합동(2021) 자료를 토대로 저자 재작성

29) 2030 항만정책 방향과 추진전략에서는 3대 전략 및 10대 과제를 발표함. 본 연구에서는 지면의 한계를 감안하여 10대 과제 중 6개 과제만 명시함

3. 소결

본 절에서는 국내의 탄소중립 관련 정책 및 스마트항만 관련 정책의 현황에 대해 살펴보았다. 먼저, 2020년 발표된 ‘2050 탄소중립 추진전략’에서는 국가 단위에서의 탄소중립 전략을 제시하고, 이를 기반으로 한 각 분야별 탄소배출 감축량 및 세부 계획을 통해 2050년에는 2018년 기준 686백만톤CO₂eq에 달했던 탄소배출량을 전량 감축하는 시나리오를 제시하고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해 각 분야에서는 화력발전의 전면 중단, 또는 에너지원 전환, 전기, 수소차 도입 확대와 함께 이산화탄소 포집, 활용 등의 기술개발 전략 등을 수립했다. 해양수산 분야 또한 해운 산업에서 발생하는 탄소배출량을 2018년 대비 2050년에는 약 70%를 감축하는 목표와 함께 조력 등 해양에너지를 활용한 추가적인 감축 등으로 전체적으로 탄소 네거티브를 달성하기 위한 계획을 발표하였다.

한편, 항만의 스마트화와 관련된 정책은 자동화 및 지능화를 기반으로 한 스마트항만 구축을 핵심 내용으로 하고 있다. 다시 말해 항만 내 전 영역에 자동화 장비 및 기술을 도입하고, 실시간 데이터 수집 및 인공지능 기반의 분석과 최적화를 통해 스마트항만을 구현하는 것이다. 또한, 항만 이용 주체 간의 정보 연계 및 전체 물류 프로세스의 최적화를 강조하고 있다. 더불어 최근의 정책에서는 스마트항만 구현을 통한 항만 내 안전 확보가 주요 추진 과제로 제시되고 있기도 하다.

즉, 국내 스마트항만 관련 정책에서 의미하는 항만의 스마트화는 자동화와 지능화, 안전 등을 모두 포함한 개념으로 볼 수 있지만 친환경성을 별도로 강조하고 있지는 않다. 하지만 앞서 살펴본 국내 탄소중립 관련 정책과 항만 분야와의 연계성은 장비의 동력 전환 및 항만 내 에너지 관리 효율화, 운영 최적화를 통한 에너지 절약 등으로 도출되며 이는 스마트항만과도 밀접한 관련이 있다. 예를 들어 장비의 동력전환의 경우, 동력 계통이 기존의

내연기관에서 전기 및 친환경 연료에 맞게 부품이 변화하고 기능 또한 자율주행 등이 탑재될 수 있는데³⁰⁾ 이와 같은 기술이 적용된 항만 이송장비를 도입한 항만은 스마트항만으로 볼 수 있기 때문이다.

스마트항만이 향후 항만분야의 탄소중립 또는 탄소저감에 중추적 역할을 할 것으로 예상됨에도 불구하고, 해양수산분야 탄소중립 로드맵과 항만의 스마트화의 접점을 세부적으로 밝히고 관련된 정량적인 정보를 제시하고 있지는 않다는 한계가 존재한다.

결과적으로 스마트항만 추진 전략을 통해 도입되는 장비 및 시설은 기존 재래식 항만과 비교하여 상대적으로 낮은 탄소 배출량 등 친환경 설비가 도입될 것으로 판단된다. 하지만 기존 항만과 비교하여 스마트항만의 탄소 배출량이 어느 정도 감소하는지에 대한 정량적인 값의 제시는 현재까지 전무한 실정이다. 이에 따라 본 연구에서는 스마트항만으로의 전환이 탄소 배출량에 어떠한 효과가 있는지에 대해 정량적으로 분석하고, 그 결과를 제시함으로써 향후 스마트항만 도입에 따른 환경오염 저감 효과를 판단하는 데 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

제2절 해외 주요 스마트항만의 탄소중립 추진동향

항만을 둘러싼 환경의 변화 및 효율성, 생산성 측면의 향상을 위해 세계 주요 항만은 스마트화를 추진 중이다. 스마트항만은 정보화, 지능화와 함께 각 물류 단계의 연결 및 친환경 등을 모두 내포하고 있다. 이러한 스마트항만을 구축하는 데 있어 로테르담항 및 싱가포르항은 세계적으로 선도적인

30) THEEELEC(검색일: 2022. 1. 27)

위치에 있다고 볼 수 있다. 본 절에서는 친환경 스마트항만의 대표적 사례로 로테르담 및 싱가포르항의 정책 및 관련 프로젝트를 살펴보고, 더불어 해외 주요 항만의 탄소배출 저감 사례 및 관련 정책을 추가적으로 검토하고자 한다.

1. 해외 주요 항만의 친환경 차원의 스마트화 추진 동향

1) 로테르담

네덜란드의 로테르담항은 ‘스마트항만’을 달성하기 위해 스마트에너지 및 산업, 스마트 물류, 그리고 미래지향 항만 인프라 관련 로드맵을 구축하고 다양한 프로젝트를 수행하고 있다.³¹⁾

이 중, 스마트에너지 및 산업 부문은 화석연료에 대한 의존도를 줄이거나 풍력 등 재생가능 에너지의 활성화 방안, 그리고 에너지 인프라 및 연료원의 전기화 등을 다루고 있다. 해당 분야는 탄소중립과 밀접한 관련이 있다고 볼 수 있으며, 크게 ① 친환경 에너지원을 통한 지속가능성 달성, ② 새로운 에너지원 활용에 따른 영향 검토 및 대비(공급, 지역사회 등)로 분류될 수 있다. 또한, 단순한 정책적인 접근을 위한 프로젝트 수행이 아닌, 화학공학 등 공학적인 접근을 기초로 한 프로젝트로 추진하고 있는 것이 특징이다.

스마트항만과 연계된 탄소중립 프로젝트와는 다른 축으로 ‘에너지 전환’이라는 목표를 달성하기 위해 3단계의 접근 방식을 로테르담 항만공사에서 제시하기도 했다.³²⁾

31) SmartPort(검색일: 2021. 11. 15)

32) Port of Rotterdam(검색일: 2021. 11. 15)

첫 번째 단계로는 항만에서 발생하는 열에너지의 재사용과 탄소를 포집 및 저장하는 단계이다. 이때, 기업들은 열과 수소 네트워크를 활용해 에너지를 교환할 수 있고, 풍력 발전을 더해 친환경성을 달성할 수 있도록 한다. 이 과정에서 효율성을 확보하는 것이 첫 번째 단계의 핵심으로 볼 수 있다.

두 번째 단계는 수소와 그린수소³³⁾를 활용한 전기화로 대표된다. 기존에는 천연가스를 수소화하는 과정에서 이산화탄소가 배출되고, 이를 포집 및 저장함으로써 탄소중립을 실현하려 했다. 다만, 수소 생산을 위해 추가적인 이산화탄소를 발생시키는 단점을 가지고 있다. 이에, 그린 수소를 활용한 전기화의 경우 지하자원을 활용하지 않으면서 풍력, 태양 에너지 등을 통해 수소와 전기를 생산할 수 있는 이점이 있다.

세 번째 단계는 새로운 자원과 연료 시스템을 달성하는 것으로, 지속 가능한 대체 연료를 완벽히 활용하는 에너지 전환의 완성단계로 볼 수 있다. 이는 단순한 친환경 에너지원 활용뿐만 아니라 에너지 순환 고리를 고려한 궁극적인 에너지 전환으로 설명하고 있다.

33) 풍력과 태양 에너지를 활용해 만든 수소를 말함

〈표 2-3〉 로테르담항의 스마트에너지 및 산업 부문 프로젝트

프로젝트명	내용	수행 기간(연도)
Power-2-Fuels	도로, 해상 및 항공에 사용될 가능성이 있는 합성 연료(수소, 메탄, 메탄올, FT 디젤 등)가 무엇인지 파악하고, 어떻게 도입될 수 있는지 검토	2019. 4 ~ 2020. 4
Electrons to Chemical Bonds (E2CB)	합성 연료와 화학물질의 생산에서 전기 분해 기술 진보 방안 도출	2019 ~ 2023
CAPCOM ³⁴⁾	바이오매스 원료를 사용한 표준화된 고품 바이오연료 ³⁵⁾ 생산 방안 검토	2019 ~ 2021
Governance van het havenindustriële complex en klimaatdoelstellingen	기후 목표 실현에 이바지하기 위한 거버넌스 구조 개선 (지속 가능한 이니셔티브의 허가 제공, 모니터링 및 집행과정에 초점)	2018 ~ 2019
CCU landscaping	항만과 산업 단지에서 이산화탄소를 재사용할 방안(건축자재, 시멘트 등)과 이와 관련된 영향	2015 ~ 2017
Electrons to Chemicals	전자, 이산화탄고 등을 활용해 화학제품이나 지속가능한 연료를 생산하는 실증 테스트 수행	2018 ~ 2021
Flexnet	비즈니스 프로세스 전기화에 따른 Botlek 지역 내 기업의 관계 검토	2018 ~ 2019
System integration Energy	재생 가능한 에너지의 공급 불안정성 해소 방안 연구 (잉여 에너지 저장 산업단지 등)	2016 ~ 2020
DDP bottom-up - Power-2-Hydrogen	항만 및 인근지역에서 큰 규모의 수소 활용 가능성 검토	정보 부재
DDP - Deep Decarbonisation Pathways	2050년까지 로테르담항 지역의 이산화탄소 배출량을 30%에서 98%까지 감소하는 시나리오 검토	2016 ~ 2018

자료: SmartPort(검색일: 2021. 11. 12)를 기반으로 저자 정리

34) CAPCOM: Clean Agro Pellet Commodity

35) 알약 또는 총알 형태의 바이오펠릿(Biopellet)

2) 싱가포르

싱가포르항은 빠르게 스마트항만으로 변모하고 있는 항만으로 미래 지향적인 친환경 자동화 기반의 스마트항만 건설을 위해 ‘차세대 항만 2030’ 사업을 추진하고 있다. 해당 사업의 일환으로 도심에 위치한 컨테이너 터미널을 전부 통합·이전하기 위해 2016년부터 투아스항 터미널 1단계를 착공하여 2040년 완공이 예상된다.

투아스항은 무인자동화 기반 운영과 더불어 환경오염을 최소화하기 위한 친환경 시설이 구축될 예정이다. 특히 터미널 물류시스템의 자동화 뿐만 아니라 친환경 기술, 드론, 선박 위치 추적 등 다양한 측면에서 스마트 기술의 동시 도입·적용을 목표로 하고 있다. 또한, 배터리구동방식의 무인자동화 이송장비 및 ARMGC 등의 활용과 더불어 항만운영 측면의 디지털 혁신을 통한 선박기인 배출량 저감에 긍정적인 효과를 기대하고 있다.

한편, 싱가포르는 기후변화 및 탈탄소화에 대응하기 위한 범국가적 계획인 ‘Singapore Green Plan 2030’을 수립하여 추진 중이며, 이에 따라 싱가포르 항만청(MPA) 또한 운송 시 발생하는 온실가스 감축을 통한 탈탄소화 전략인 ‘Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint 2050’을 추진하고 있다. 이 전략은 항만, 차세대 연료 및 병커링 기준, 싱가포르 등록선박, IMO 규제 준수 등을 포함한 7가지 부문으로 구성되어 있다.

항만부문의 경우, 싱가포르 국가 기준 탄소 배출량 목표 지원을 위해 싱가포르항만청(MPA)은 PSA 및 주룽항(Jurong Port Pte Ltd)과 함께 항만 내 태양광 발전 시스템 구축, 터미널 내 에너지원으로써 전력 사용, 저탄소 연료프로젝트 등을 협력하여 추진 중이다. 이에 따라 PSA는 2005년부터 항만장비의 전기화 전략에 따라 디젤식 야드크레인을 전기식으로 변환시키고 있으며, 항만 이송장비의 연료로 수소 및 LNG를 활용하고 있다.³⁶⁾

36) MPA(검색일: 2021. 11. 26)

더불어 선박에서 기인한 배출량을 감축하고자 싱가포르항만청은 탈탄소 센터를 위한 1억 2천만 싱가포르 달러(9천만 달러) 규모의 펀드를 조성했다. 이를 통해 싱가포르항만청은 6개의 해운기업과 양해각서를 체결하여 싱가포르 해양 탈탄소화 센터를 설립하고 해양 탈탄소화 연구 및 기술 개발에 자금을 지원할 예정이다.

현재 싱가포르 해운업계는 2050년까지 온실가스 배출량을 2008년 수준에서 50% 감축한다는 국제해사기구의 목표를 달성하기 위해 다양한 기술을 검토 중이다. 또한 양해각서 체결을 통해 잠재적인 저탄소 또는 무탄소 선박용 연료를 포함하여 항만 운영, 해양 공급망 및 해운 전반에 걸쳐 탄소 배출량을 줄이기 위한 공동 노력의 토대를 마련할 것으로 기대되고 있다.³⁷⁾

2. 해외 항만의 탄소 배출량 저감 사례

항만에서의 환경오염 배출물질 저감을 위한 노력은 과거부터 지속적으로 추진되어 왔다. 이는 기후변화에 대한 전 세계적인 우려와 함께 항만의 경우 환경오염 물질 배출량이 상대적으로 많은 산업으로 인식된 데 따른다. 세계 주요 항만은 AMP 도입, 장비 연료의 전환 또는 바이오연료 혼소 등을 통해 온실가스 저감 정책을 추진했으며, 대표적인 몇 가지 사례를 살펴보면 다음의 <표 2-4>와 같다.

<표 2-4> 세계 주요 항만의 온실가스 저감 정책 및 사례

항만	정책	주요 내용
제노바 (Genova)	1. 항만 환경 에너지 계획(The Port)	• 항만에서의 열·전기 에너지 소비를 관리하여 소비량 감축을 위한 방안을 제안/예측하는 것이 목적

37) Reuters(검색일: 2021. 11. 26)

항만	정책	주요 내용
	Environmental Energy Plan)	
	2. 선박수리 부두의 전기화(Quay electrification of ship-repair docks)	<ul style="list-style-type: none"> • 계류된 선박이 장기간 보조 엔진을 작동시키면서 도심에 다량의 온실가스를 배출하고 소음을 유발하는 것을 방지하기 위한 정책 • 연간 10,000톤의 이산화탄소 배출량을 절감할 것으로 예측
안트워프 (Antwerp)	1. 콜드 아이어닝(Cold ironing)	<ul style="list-style-type: none"> • 바지선, 예인선, 준설선, 플로팅 크레인, 드라이 도크를 비롯해 유람선, 하우스 보트 등에 육상전력을 공급 • 파일럿 테스트 결과 이산화탄소를 50%, 질소산화물을 97% 감축
	2. 시장 지위 확보(Reinforcing market position)	<ul style="list-style-type: none"> • 유럽 및 플랑드르 지역의 환경 목표를 달성하는 데 주도적인 역할 수행이 목표 • 항만 사용자 요구 수준 이상의 노력을 기울일 경우 보상이 주어지고, 환경적 책임을 다하지 않는 경우 시정 정책을 도입하여 시장에서의 지위를 강화
싱가포르 (Singapore)	1. 녹색 항만 프로그램(Green Port Programme)	<ul style="list-style-type: none"> • ‘싱가포르 해운 그린 이니셔티브’의 일환으로 2022년 7월 발표된 프로그램으로 싱가포르항을 이용하는 선박의 오염물질 배출 감축을 촉구 • 승인된 저감장치 및 스크리버를 사용하거나 항구 체류 기간 동안 MARPOL의 요구사항 이상으로 황 함량이 낮은 연료를 사용하는 경우 입항료 15%를 인하
	2. 녹색 기술 프로그램(Green Technology Programme)	<ul style="list-style-type: none"> • 지역 해사기업이 그린 기술을 개발·사용하도록 장려하기 위한 프로그램으로 비용의 50% 보조금 지원 • 터미널운영사, 선주를 비롯한 관련 지역 기업이 프로그램 참여 대상
리예카 (Rijeka)	1. 환경경영시스템(EMS)	<ul style="list-style-type: none"> • 잠재적 환경 문제의 근원을 발견·해결하여 환경 성과를 개선하고, 발생 가능한 오염을 방지하여 에너지 및 천연자원을 보전하기 위해 환경경영시스템(EMS) 개발
지브리게 (Zeebruges)	1. 콜드 아이어닝(Cold ironing)	<ul style="list-style-type: none"> • 이산화탄소 배출량을 줄이기 위한 생태 발자국 측정
	2. 풍력발전(Windmills)	<ul style="list-style-type: none"> • 아스피라비 네바다(Aspiravi NV)사가 71개의 풍력 터빈과 7개 VLEEMO-풍력 터빈의 25%를 운영 • 아스피라비 네바다(Aspiravi NV)사는 관련 해상 풍력 발전 프로젝트에 참여하고 있으며, 모두 가동된다면 북해 지역에서 750MW의 에너지를 생산할 것으로 추정

항만	정책	주요 내용
LA/롱비치 (Los Angeles/Long Beach)	1. 선박 감속 프로그램 (Vessel speed reduction programme)	<ul style="list-style-type: none"> • 2001년에 도입된 자발적 프로그램으로 선박이 항만에 접근할 때 20해리 구역 내에서 속도를 줄이도록 요청 • 참여 선박에게는 정박 및 하역작업이 즉시 시작될 수 있도록 하는 사전 할당과 준수 수준이 높은 기업에 '그린 플래그' 프로그램을 인센티브로 제공
	2. 클린 트럭 프로그램(Clean Truck Program)	<ul style="list-style-type: none"> • 'Clean Air Action Program'의 일환으로 2006년에 도입된 프로그램 • 초기 목표는 2007년 연방 환경 보호국 표준을 준수하는 트럭을 도입하여 2010년까지 항구 관련 차량의 배출량을 50% 감축하는 것 • 규정을 준수하지 않은 트럭이 운반하는 적재된 컨테이너는 TEU당 35\$의 비용(Clean Truck Fee) 부과 • 2009년까지 컨테이너 트럭의 75%가 표준을 준수하는 트럭으로 대체, 대형 디젤 트럭에서 기인한 오염 배출량은 2010년까지 약 90% 감소
함부르크 (Hamburg)	1. HHLA 터미널의 자율운행차량 전기화	<ul style="list-style-type: none"> • 2010년 전기 배터리로 작동하는 자율운행차량 (AGV)을 도입 • 차량에서 배기가스가 발생하지 않고 소음이 적어 환경 비용 절감이 가능하며, 전원은 터미널 내에서 인증된 녹색 에너지를 통해 공급
	2. 정체성 확립을 위한 컨설팅	<ul style="list-style-type: none"> • 함부르크항의 CTS(Central Terminal Steinwerden) 재개발 방안을 논의하기 위한 2009년 회의에서 30여 개의 제안이 도출, 2010년 최종 개발 방안을 선정 • 최종 방안 선정 기준으로 운영 방식의 혁신과 환경적 측면을 고려

자료: Acciaro, Michele, *et al.*(2014), pp. 487-490을 바탕으로 저자 작성

과거부터 친환경 정책을 통한 온실가스 저감의 노력은 최근의 스마트항만 구축에 있어 주요 기능으로 작용하고 있다. 선행연구에서는 스마트항만 구축에 따른 주요 효과를 다음과 같이 제시하고 있다. 첫째, 온실가스 배출량의 감소, 둘째, 에너지 활용 효율성의 향상, 셋째, 컨테이너 처리 소요되는 시간의 감소, 넷째, 상대적으로 낮은 에너지 비용에 따른 투자 비용 저감 효과, 다섯째, 예측 정확도 향상에 따른 장비의 적기 투입 및 이에

따른 비용 절감 효과 등이다.³⁸⁾ 이를 바탕으로 보면 스마트항만은 환경친화적 항만으로 인식할 수 있다.

동력원 전환과 관련된 가장 최신의 실증 사례는 싱가포르항의 사례로 해당 항만은 2015년 이후 개장한 터미널의 경우 전기 RTG 크레인을 도입하고 있으며, 2019년부터 기존 디젤 RTG 크레인을 전기 자동화 크레인으로 교체하고 있다고 밝혔다. 현재 디젤 RTG 크레인은 해당 항만의 이산화탄소 배출의 약 20%를 차지하고 있으며, 최종적으로 디젤 RTG 크레인이 모두 전기로 전환될 경우, 최대 30%의 이산화탄소 배출량 감소를 기대할 수 있다고 제시하고 있으나³⁹⁾ 이는 장치영역에 국한된 수치라는 한계가 있다.

항만의 온실가스 배출량 감소와 관련하여 오염물질 배출량 저감 비중, 연료전환에 따른 배출량 감소 등을 제시한 실증연구가 존재하기도 하지만 자동화 도입 단계별 운용 장비 특성에 기반한 배출량을 비교 제시하기 보다는 특정 장비 또는 특정 에너지원에 대한 결과값만을 제시하고 있다는 한계점을 가지고 있다.⁴⁰⁾

〈표 2-5〉 항만의 스마트화에 따른 오염물질 배출량 감소 효과

구분	롱비치	로테르담	발렌시아	싱가포르
연구, 발표시기	2016	2011	2018	2022
활용기술	AMP	디젤 장비 교체, 바이오연료	LNG 연료	디젤 → 전기
오염원	온실가스	이산화탄소	이산화탄소	이산화탄소
감소 비중	70%	19% ~ 21%	~ 24%	~ 30%

자료: Muni-Fed-Antea Group Energy Partners(2016), H. Geerlings and Ron van Duin(2011), J.M. Moya and M. Feo-Valero(2016), MPA 자료를 바탕으로 저자 재작성

38) Yau, Peng and Qadir *et al.*(2020), p. 83392.

39) MPA(검색일: 2021. 11. 26)

40) AMP 설치 시 최대 70% 감축, 연료 효율이 높은 디젤 장비 교체 시 이산화탄소를 19% 감축, 바이오연료와 혼소할 경우 21% 감축, 야드트랙터 연료를 LNG로 교체할 경우 기존 야드트랙터에서 발생하는 이산화탄소를 최대 24% 감축할 수 있다는 연구 등이 수행되어 옴

3. 소결

기후변화에 대응하기 위해 항만에서는 대기오염물질 배출을 저감하고자 다양한 정책 수립 및 관련 기술 개발 등을 지속적으로 추진해왔다. 스마트항만의 주요 효과 중 하나는 항만의 최적화 및 동력원 전환 등을 통해 온실가스 배출 감소를 도모하는 것이다. 그리고 세계 주요 항만은 스마트화의 도입 촉진과 더불어 이를 통한 친환경 항만으로의 전환을 기대하고 있다.

다수의 선행 연구에서는 스마트항만 구축을 가정하고 대기오염물질 배출 저감이 가능할 것으로 추정하고 있으나 실제 사례 연구에서는 항만 전 영역에 걸친 장비별 배출량 감소 원단위 제시가 통합적으로 제시되고 있지 않다는 한계가 있다. 또한, 국내 탄소중립 정책에서도 산업 부문별로 배출량 감축에 대한 목표치는 설정하고 있으나 항만부문에서 이를 이행하기 위한 하나의 방안으로써 스마트항만을 도입했을 경우 기대되는 배출량 저감 효과와 그에 따른 비용효과에 대한 제시는 정책자료에 별도로 언급되고 있지 않다. 아무리 친환경적인 측면에서 도입의 필요성이 강조될지라도 경제적인 부분에서 도입 주체에게 비용부담으로 작용할 경우, 이는 실효성 있는 정책이 될수 없다.⁴¹⁾

스마트항만의 배출량 저감효과와 더불어 비용효과를 규명하기 위해 다음 장에서는 항만의 스마트화에 따라 이산화탄소의 배출이 어느 정도 감소하는지에 대한 정량적인 수치 및 배출량 감소에 따른 경제적 효과를 분석하고자 한다. 그리고 그 결과는 향후 탄소중립 시대의 스마트항만 정책 수립 시 비교적 객관적인 기초자료의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

41) J.M Moya and M. Feo-Valero(2016), pp. 1-22.

03

스마트항만 도입에 따른 탄소 저감효과 및 경제성 분석

제1절 이산화탄소 배출량 분석 개요

1. 스마트항만의 정의 및 유형별 도입 장비 검토

1) 스마트항만의 정의

스마트항만은 학자 또는 기관에 따라 다르게 정의된다. 항만 분야 유명 온라인 매체인 ‘Port Technology’는 사물인터넷, 블록체인, 빅데이터, 인공지능 등 자동화를 포함한 혁신 기술을 활용해 향상된 성능을 추구하는 항만을 스마트항만으로 정의했다.⁴²⁾ 세계적인 컨설팅 그룹 딜로이트(Deloitte)의 Berns *et al.*(2017)은 공간·재정 제약, 생산성과 안전 및 보안 개선, 지속가능성 확보 등 현재와 미래의 핵심 안건을 해결하는 또는 해결한 항만을 스마트항만으로 정의했다.

해운 데이터 솔루션을 제공하는 업체인 ‘SINAY’는 기존 항만보다 효과

42) Port Technology(게시일: 2021. 4. 14, 검색일: 2021. 10. 1)

적이고, 경제성이 뛰어나며 인근 시민을 핵심 이해관계자로 고려하는 항만을 스마트항만으로 정의했다. 또한, 스마트항만은 실시간 정보와 협업 관리 방안을 활용하고, 더욱 높은 수준의 보안을 제공하며, 에너지를 절감할 수 있어야 한다고 언급했다. 이들은 새로운 기술을 활용하는 자동화된 항만을 스마트항만이라 강조하며, 친환경, 디지털 및 지속가능성을 핵심 역량으로 여겼다.⁴³⁾

상기한 정의에서 알 수 있듯이, 스마트항만의 정의는 대동소이하다고 볼 수 있다. 우선, 생산성 향상과 같은 전통적 성과영역 외에도 친환경이나 지속가능성, 시민 등 외부적인 성과영역을 고려한다. 이 과정에서 자동화나 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 첨단기술을 활용한다. 구체적으로는 센서 기반의 사물인터넷을 통해 데이터를 수집하고, 빅데이터와 인공지능을 결합해 유의미한 정보를 도출하며, 이를 각종 의사결정에 활용한다. 이를 통해 다양한 성과영역에서 개선을 추구한다.

‘Port Technology’⁴⁴⁾의 스마트항만 정의에서 유추할 수 있듯이, 스마트항만과 함께 자주 거론되는 자동화항만은 스마트항만의 일부로 볼 수 있다. 자동화란 인간의 개입을 최소화하는 기술 적용을 의미하므로,⁴⁵⁾ 인간의 개입을 최소화한 장비가 투입되고, 인공지능을 통한 의사결정이 수행되는 항만을 자동화항만으로 볼 수 있다. 항만을 컨테이너를 처리하는 컨테이너터미널로 한정지어 언급하면, 컨테이너를 하역·이송하는 장비의 자동화 및 터미널 운영시스템(TOS: Terminal Operating System)의 자동화가 항만 자동화로 여겨진다.

스마트항만의 일부를 자동화로 여긴 사례 일부는 다음과 같은데, 먼저 통신 장비 제조사인 에릭슨(Ericsson)에서는 스마트항만의 핵심 요소 중

43) SINAY(게시일: 2021. 5. 28, 검색일: 2021. 10. 1)

44) Port Technology(게시일: 2021. 4. 14, 검색일: 2021. 10. 1)

45) IBM(검색일: 2021. 10. 1)

하나를 자동화 하역·이송장비의 활용으로 인식했다.⁴⁶⁾ 싱가포르의 소프트웨어 솔루션 공급업체인 Innovez-One에서는 자동화를 스마트항만의 시작점으로 여김과 동시에 센서 및 빅데이터 네트워크 통합을 위한 선행단계로 생각했다.⁴⁷⁾ Yang *et al.*(2018)은 사물인터넷을 통해 초연결성을 달성한 자동화항만을 스마트항만으로 인식했으므로, 자동화항만이 스마트항만의 일부라 판단했음을 유추할 수 있다.

앞서 기술한 각종 매체 및 문헌에서 정의 내리고 있는 스마트항만과 스마트항만 관점에서의 자동화에 대한 시각을 정리해보면 다음의 <표 3-1>과 같다.

<표 3-1> 스마트항만의 정의 요약

정의 주체	정의	자동화에 대한 시각
Port Technology	• 자동화를 포함한 혁신기술을 활용해 향상된 성능을 추구하는 항만	자동화 C 스마트화
Bern <i>et al.</i>	• 공간·재정 제약, 생산성과 안전 및 보안 개선, 지속가능성 확보 등 현재와 미래의 핵심 안건을 해결하는 또는 해결한 항만	상동
SINAY	• 새로운 기술을 활용하는 자동화된 항만 • 핵심역량은 친환경, 디지털 및 지속가능성	상동
Ericsson	• 센서 등 장치를 활용해 자동화 장비, 인프라 등의 연결망을 구축하고, 비용 효율성을 추구하는 항만	상동
Innovez-One	• 프로세스의 자동화와 데이터의 최대활용을 달성한 항만	상동

자료: Port Technology(검색일: 2021. 10. 1), Bern *et al.*(2017), SINAY(검색일: 2021. 10. 1), Ericsson(검색일: 2022. 2. 3), Innovez-One(검색일: 2022. 2. 3)기반으로 저자 정리

국내에서는 자동화항만과 스마트항만을 유사 또는 동일하게 보는 경향이 있었지만, 최근 들어 이 두 개의 항만을 구분하기 시작했다. <표 3-2>를 통해 파악할 수 있듯이, 스마트항만에서의 주 고려대상을 장비나 시설로

46) Ericsson(검색일: 2022. 2. 3)

47) Innovez-One(검색일: 2022. 2. 3)

한정한다면, 자동화항만과의 차이점이 크지 않다. 본 연구에서는 스마트항만의 장비구동방식에 초점을 두고 구동 방식에 따른 이산화탄소배출량 차이를 규명하는 것을 목적으로 두기 때문에 자동화항만을 스마트항만과 동일하다고 간주하고자 한다. 즉, 서론에서도 언급했듯 본문에서는 완전자동화항만과 스마트항만을 동일한 개념으로 보고자 한다.

〈표 3-2〉 자동화항만과 스마트항만의 차이

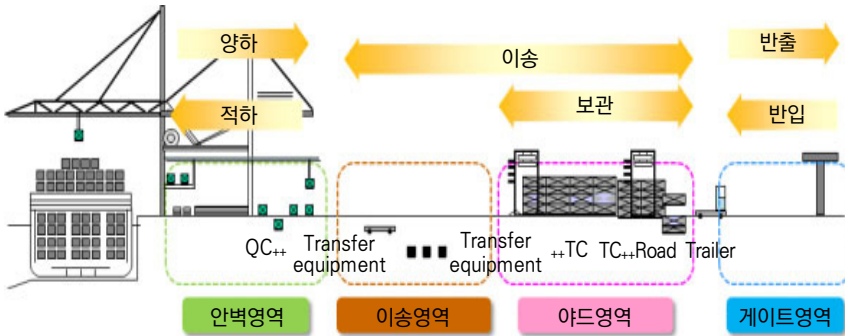
항만 유형	특성
자동화항만	<ul style="list-style-type: none"> • 작업 프로세스 내 인간의 개입을 최소화한 장비 활용 • 터미널 운영시스템의 핵심 의사결정을 사전에 정의된 규칙, 알고리즘 등을 활용해 수행 • 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 첨단기술의 제한적 활용
스마트항만	<ul style="list-style-type: none"> • 항만 생산성 향상과 같은 전통적인 성과영역뿐 아니라 친환경, 지속가능성, 인근 시민 삶의 질 등 항만 외적인 요소를 고려 • 상기한 요소들을 위해 자동화를 포함한 인공지능, 빅데이터, 사물인터넷 등 첨단기술의 확장적 활용(특히, 기계학습 등 스마트화 과정을 포함함)

자료: 저자 작성

2) 스마트항만의 유형 및 활용 장비

스마트항만의 유형을 파악하기 위해서는 항만 내 다양한 작업영역을 먼저 이해해야 한다. 본문에서의 항만은 컨테이너터미널을 의미하므로, 작업영역이란 컨테이너를 직·간접적으로 처리하는 단위 구역으로 볼 수 있다. 일반적으로, 컨테이너터미널의 작업영역은 크게 안벽영역, 이송영역, 장치(또는 야드)영역, 그리고 지원(또는 게이트)영역으로 구분된다.

〈그림 3-1〉 컨테이너터미널 작업영역 구분



자료: 해양수산부(2019b), p. 21

각 영역에서의 작업은 다음과 같이 요약된다. 안벽영역은 선박이 접안, 안벽 크레인의 도움으로 컨테이너를 양·적하하는 영역이다. 이송영역은 안벽영역과 장치영역 사이를 오가는 이송 장비(예: 야드 트럭)를 통해 컨테이너를 이송하는 영역이다. 장치영역은 컨테이너를 임시저장하는 영역으로, 컨테이너를 장치하기 위한 장비가 활용된다. 지원영역은 터미널을 진·출입하는 게이트와 컨테이너 수리 및 세척시설 등을 포함하며, 터미널 내 전반적인 하역업무를 지원하는 영역으로 볼 수 있다. 지원영역의 핵심은 게이트이기 때문에 게이트 영역으로 표현되는 경우도 많다(〈그림 3-1〉).

〈그림 3-2〉 싱글트롤리 안벽 크레인(위)과 듀얼트롤리 안벽 크레인(아래)



자료: (위) Riviera Maritime Media(게시일: 2021. 3. 2, 검색일: 2021. 10. 1), (아래) Liftech(검색일: 2021. 10. 1)

스마트항만을 자동화 컨테이너터미널로 한정한다면, 자동화 터미널의 유형은 크게 반자동화 터미널과 완전자동화 터미널로 구분될 수 있다. 반자동화 터미널은 앞서 설명한 항만 내 작업영역 중, 장치영역이 자동화된 터미널을 의미하며, 싱글트롤리 안벽 크레인이 안벽 장비로(그림 3-2), 유인 야드 트럭이 이송 장비로 활용된다. 대표적인 반자동화 터미널은 부산신항 1~4부두,⁴⁸⁾ 인도네시아 자바(Java)의 뿌띠 꼬마스 세마랑 터미널(TPKS:

48) 현대해양(게시일: 2021. 6. 9, 검색일: 2021. 10. 1)

Terminal Petikemas Semarang)⁴⁹⁾이다.

완전자동화 터미널은 이송과 장치영역이 자동화된 터미널을 의미하며, 최근에는 안벽 크레인이 원격으로 조종되는 안벽영역을 추가적으로 고려하기도 한다. 반자동화 터미널과는 달리, 듀얼트롤리 안벽 크레인을 활용하는 경우도 많다(〈그림 3-2〉). 듀얼트롤리 안벽 크레인은 두 개의 트롤리를 활용해 대(對)선박 하역작업을 해측과 육측으로 분리할 수 있는 크레인을 의미한다. 대표적인 완전자동화 터미널은 미국 롱비치의 롱비치 컨테이너 터미널(LBCT: Long Beach Container Terminal), 네덜란드 로테르담의 마스블락테 II(Maasvlakte II Rotterdam)의 APMT,⁵⁰⁾ 호주 멜버른항의 빅토리아 국제 컨테이너 터미널(VICTL: Victoria International Container Terminal Ltd),⁵¹⁾ 그리고 오클랜드항(Port of Auckland)⁵²⁾ 등이 있다. 상술한 해외 사례를 바탕으로 본 연구에서는 반자동화 터미널의 안벽 크레인은 싱글트롤리 방식으로, 완전자동화 터미널은 듀얼트롤리 방식을 사용하는 것으로 가정한다.

반자동화 터미널의 유형은 장치장에서 활용되는 야드 장비에 따라 두 가지로 세분화할 수 있다. 장치장에서는 주로 자동화 야드크레인이 활용되는데, 야드크레인은 주행방식에 따라 레일을 따라 움직이는 ARMGC(Automated Rail-mounted Gantry Crane)와 타이어를 활용하는 ARTGC(Automated Rubber-tyred Gantry Crane)로 나뉜다(〈그림 3-3〉). 타이어구동방식의 갠트리 이동 외의 기능은 같지만, 레일형 야드크레인(RMGC)은 레일을 필요로 하므로, 별도의 토목공사비가 추가된다. 재래식 터미널을 제외한 전 세계 주요 반자동화 및 완전자동화 터미널에서는 타이어주행방식보다 비교적 정확도가 높은⁵³⁾ 레일주행방식의 ARMGC를 사용하고 있는

49) Pema(2016), pp. 28-29.

50) The Maritime Executive(게시일: 2015. 4. 28, 검색일: 2021. 10. 1)

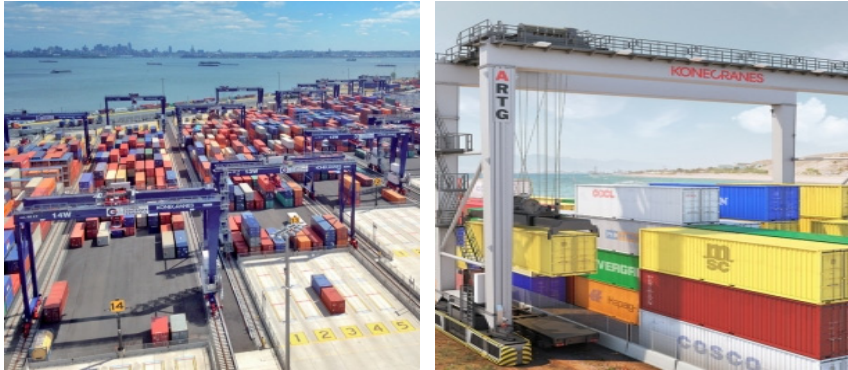
51) Pema(2016), pp. 28-29.

52) Nzherald(게시일: 2019. 2. 16, 검색일: 2021. 10. 1)

53) 해양수산부(2019a), p. 24.

므로, 본 연구에서 반자동화 및 완전자동화 터미널의 야드크레인인 ARMGC를 대상으로 분석하고자 한다.

〈그림 3-3〉 ARMGC(좌측)와 ARTGC(우측)



자료: (좌) Konecranes(검색일: 2021. 9. 27), (우) Konecranes(검색일: 2021. 9. 28)

야드크레인(RMGC) 구동방식은 켄틸레버(cantilever) 방식과 라멘(rahmen) 방식이 있다. 야드크레인의 구동방식 외에, 이들이 작업하는 야드블록의 배치방식에 따라 터미널을 구분하기도 한다. 완전자동화 터미널의 경우, 개별 야드블록이 안벽면으로부터 수직으로 배치된 수직형 터미널 구조를 가지며, 수평으로 배치된 수평형 터미널은 반자동화 터미널에 주로 채택이 된다. 이는 외부차량과 내부차량의 작업공간을 분리시킬 수 있는 수직형 배치의 특성 때문이다. 터미널 야드블록 배치방식에 따라 켄틸레버 방식과 라멘 방식 크레인이 구분되어 도입되는 것은 아니나, 본 연구에서는 해외 주요 사례를 바탕으로 완전자동화 터미널은 수직형임을 가정하여 라멘형 크레인을, 반자동화 터미널은 수평형으로 켄틸레버형을 사용하는 것으로 정의하고자 한다.

〈그림 3-4〉 켄틸레버 타입(좌측)과 라멘 타입(우측)



자료: (좌) 카고뉴스(검색일: 2021. 9. 29), (우) 코리아쉬핑가제트(검색일: 2021. 9. 29)

마지막으로 반자동화 터미널과 완전자동화 터미널을 구분짓는 가장 큰 특징인 이송영역의 자동화 유무에 대해서 살펴보고자 한다. 반자동화 터미널은 사람이 승무하여 운행하는 야드트랙터 또는 스트래들 캐리어를 사용하나, 완전자동화 터미널에서는 사람이 승무하지 않는 무인자동화 이송장비를 사용한다. 이러한 자동화 이송장비가 외부 트랙과 동일한 동선을 사용할 경우 동선에 혼란이 생겨 효율성이 떨어지므로 이동공간을 분리하기 위해 완전자동화 터미널에서는 수직형 배치를 가지고 있다.⁵⁴⁾

완전자동화 터미널 이송 장비는 대표적으로 세 가지로 세분화할 수 있다. 가장 기초적인 자동화 이송 장비인 AGV(Automated Guided Vehicle)는 자율주행이 가능한 야드 트럭으로 볼 수 있다. 트럭과 마찬가지로, 특정 지점에 놓인 컨테이너를 상차하거나, 상차된 컨테이너를 스스로 내릴 수 없어 하역 장비의 도움이 필요하다(〈그림 3-5〉).

54) 해양수산부(2019a), p. 49.

〈그림 3-5〉 AGV(좌측)와 Lift-AGV(우측)



자료: (좌) Konecranes(검색일: 2021. 9. 30), (우) Konecranes(검색일: 2021. 9. 29)

둘째로, Lift-AGV는 AGV보다 조금 더 진보된 형태로 플랫폼을 통해 컨테이너를 상·하차할 수 있다. 크레인인 〈그림 3-5〉에서 보이는 플랫폼에 컨테이너를 올려놓으면, Lift-AGV는 플랫폼 아래로 이동 후, 차량 내 장치를 이용해 컨테이너 위로 올려 플랫폼으로부터 분리하고, 플랫폼을 빠져나온 후 차량 내 장치를 아래로 내려 컨테이너를 안정적으로 상차한 후 이동한다. 컨테이너를 플랫폼에 하차하는 작업 역시 플랫폼과 차량 내 장치를 활용해 수행할 수 있다.

〈그림 3-6〉 자동화 스트래들 캐리어



자료: Konecranes(검색일: 2021. 10. 1)

셋째로, 현재 가장 진보된 이송장비는 ALV(Automated Lifting Vehicle)로 플랫폼의 도움 없이 바닥에 놓인 컨테이너를 상차하거나, 상차된 컨테이너를 바닥에 놓을 수 있는 이송 장비이다. 외형은 이송과 장치를 수행할 수 있는 스트래들 캐리어(〈그림 3-6〉)보다 낮은 높이이며 기능은 플랫폼을 활용하지 않는다는 점을 제외하면, Lift-AGV와 기능적으로 같다. 또한 Lift-AGV와 ALV는 크레인 작업과 실시간으로 연계될 필요가 없으므로, 크레인 대기를 최소화하기 위한 추가 이송 장비가 투입될 필요가 없다. Saanen(2016)은 안벽 크레인당 적정 차량 수를 AGV 6.5대, Lift-AGV 4.0대, ALV 3.5대로 각각 제시하기도 했다.

상기한 유형을 기반으로 국내 및 전 세계 주요 반자동화·자동화 터미널을 구분하여 정리하면 〈표 3-3〉과 같다. 표에서 알 수 있듯 전 세계 주요 완전자동화 터미널에서 이송장비로 AGV를 주로 사용하고 있는 것을 알 수 있다.

〈표 3-3〉 세계 주요 반·완전자동화 터미널

유형	터미널명(위치)	영역별 장비(유형)		
		안벽영역	이송영역	장치영역
반자동화	부산항 신항1~4부두	싱글트롤리	YT	ARMGC
	부산항 신항 2-4단계	싱글트롤리 ⁵⁵⁾	YT	ARMGC
완전자동화	ECT Euromax(네덜란드)	듀얼트롤리 ⁵⁶⁾	AGV	ARMGC
	마스블락테 II (네덜란드)	듀얼트롤리 ⁵⁷⁾	Lift-AGV	ARMGC
	LBCT(미국)	듀얼트롤리	AGV	ARMGC
	양산 4기(중국)	듀얼트롤리	AGV	ARMGC
	샤먼 오션게이트(중국)	듀얼트롤리	AGV	ARMGC
	토비시마(일본)	싱글트롤리 ⁵⁸⁾	AGV	ARTGC
	시드니 AutoStrad(호주)	싱글트롤리 ⁵⁹⁾	ASC	

자료: Pema(2016), pp. 24-29 및 Nanxi W. *et al.*(2019)을 기반으로 저자 정리

이를 바탕으로 본 연구에서 반자동화 항만은 싱글트롤리 방식 안벽 크레인과 장치장 크레인은 ARMGC, 이송장비는 유인야드장비(야드트랙터)를 사용하는 터미널로 정의하고자 한다. 또한 완전자동화 항만은 듀얼트롤리 방식의 안벽 크레인과 이송장비는 AGV를 사용하며 장치영역은 반자동화와 동일한 레일주행방식인 ARMGC를 사용하는 터미널로 정의한다.

〈표 3-4〉 본 연구에서 스마트항만 유형과 장비

구분	안벽영역 장비	이송영역 장비	장치영역 장비
반자동화	싱글트롤리 크레인	YT	ARMGC
완전자동화	듀얼트롤리 크레인	AGV	ARMGC

자료: 저자 작성

55) 연합뉴스(검색일: 2022. 1. 14)

56) ECT(검색일: 2022. 1. 14)

57) AJOT(검색일: 2022. 1. 14)

58) AGVblog(검색일: 2022. 1. 14)

59) Patrick Terminals(검색일: 2022. 1. 14)

2. 이산화탄소 배출량 산정 개요

1) 방법론

선행연구 검토에서 살펴본 바와 같이 배출량 산정은 연료사용량에 배출 계수의 곱을 통해 도출하는 것이 일반적으로 통용되고 있다. 최근 들어 EEA 및 EPA가 발표한 인벤토리에서는 배출량 산정 시 연료사용량과 배출 계수의 곱에 장비 엔진 마력, 엔진 부하계수, 엔진 가동 시간까지 곱하여 산정하고 있다. 그러나 본 연구의 분석대상 중 하나인 완전자동화 터미널의 경우, 영역별 장비의 엔진 가동 시간 및 연료사용량과 관련된 세부적인 정보 구득에 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 일반적으로 통용되는 연료사용량과 배출계수를 적용한 산정식을 사용하고자 하며 구체적인 계산식은 다음과 같다.

〈표 3-5〉 이산화탄소 배출량 산정식

이산화탄소 배출량 산정식
$CO_2 \text{배출량}(tCO_2) = \text{탄소배출량}(tC) \times \text{이산화탄소 원자량/탄소원자량}$ <ul style="list-style-type: none"> 탄소배출량(tC) = 연료발열량(MJ) \times 탄소배출계수(E_i)/10^6 연료발열량(MJ) = 연료사용량_{연료} \times 발열량_{연료}
자료: 한국에너지관리공단(검색일: 2021. 12. 14)

배출량 산정은 국가 고유 배출계수가 있을 때 사용하는 Tier 2를 사용하여 장비 구동 방식에 따라 디젤 및 전기에 대한 각각의 배출계수를 적용한다.

〈표 3-6〉 배출량 산정 등급

배출량 산정 등급(Tier)	내용	산정식
Tier 1	국제적으로 통용되는 IPCC 가이드라인에서 제시하는 배출계수 사용 ※국가 고유 배출계수가 없을 시 사용	연료종류 × 연료사용량 × 배출계수(IPCC 기준)
Tier 2	국가 고유 배출계수가 있을 때 사용	연료종류 × 연료사용량 × 배출계수(자국 기준)
Tier 3	연료 종류, 연소 기술, 작동 조건, 통제 기술, 유지관리 방법, 장비 연식 등에 대하여 국가 고유 자료가 있을 때 사용	연료종류 × 연소기술 × 작동조건 × 통제기술 × 유지관리 방법 × 장비연식 × 연료사용량 × 배출계수(IPCC 기준)

주: 산정등급(Tier)은 활동자료, 배출계수, 산화율, 전환율 및 온실가스 배출량 등 산정방법의 복잡성을 나타내는 수준으로 산정등급이 높을수록 신뢰도와 정확도가 향상됨. (환경부 홈페이지(검색일: 2021. 12. 14))
자료: 환경부 그린캠퍼스(검색일: 2021. 12. 14) 및 환경부 홈페이지(검색일: 2021. 12. 14)를 바탕으로 저자 재구성

국가에서 정하고 있는 각 연료별 이산화탄소 배출계수는 다음의 〈표 3-7〉과 같으며 배출량 단위는 tCO₂를 사용한다.

〈표 3-7〉 연료별 이산화탄소 배출계수

연료별(E_i)	경유(L)(E_1)	전기(MWh)(E_2)
배출량 [tCO ₂]	20.111 tC/TJ	0.4594tCO ₂ eq./MWh

주: E_i 는 각 연료별 CO₂ 배출계수를 나타냄

자료: 한국 에너지관리공단 에너지온실가스 종합정보 플랫폼(<https://tips.energy.or.kr>)(검색일: 2021. 12. 14)

2) 분석 범위 및 활용 데이터

먼저, 본 연구 대상은 컨테이너를 처리하는 가상의 비자동화, 반자동화, 완전자동화(스마트화) 항만이며 배출량 산정의 통일성을 위해 모두 3개 선석(1선석당 65만 TEU 처리)으로 이루어진 연간 하역능력 195만 TEU의

터미널임을 가정한다.⁶⁰⁾ 그리고 1TEU 처리 시 안벽, 장치, 이송 영역의 장비별 배출량 원단위 도출과 더불어 195만 TEU를 처리할 경우의 배출량도 함께 살펴보고자 한다.

배출량 분석에서 가장 핵심이 되는 에너지 사용량 관련 데이터의 경우 비자동화와 반자동화는 국내 실적데이터가 일부 존재하나, 리핸들링 및 유틸시간이 각기 다른 다양한 터미널 운영 여건으로 인해 통일성 있는 자료 확보가 불가능하며, 각 운영사별로 에너지 사용량에 대한 데이터를 별도로 수집하고 있지 않다는 한계가 있다. 또한 완전자동화 터미널의 듀얼트롤리 방식의 안벽 크레인도 국내에서 아직 운영되기 전이며 해외 사례의 경우에도 정확한 에너지 사용량에 대한 실적 데이터가 부재한 실정이다. 이에 본 연구에서는 가장 최신의 통일성 있는 시뮬레이션 데이터를 포함하고 있는 해양수산부(2019)의 자료 및 Y. Saanen(2016) 등을 포함한 기존 연구에서 제시하고 있는 데이터를 활용하고자 한다.

분석대상별 상세 항목과 준용 데이터를 정리한 표는 다음의 <표 3-8>과 같다.

<표 3-8> 분석 대상 및 활용 데이터

구분	작업영역별 장비 및 연료			주요 사례	활용 데이터
	안벽	이송	장치		
비자동화	싱글트롤리 크레인 (전기) ¹⁾	YT (경유) ²⁾	RTGC (경유) ³⁾	• 부산항 북항	1) Wilmsmeier, Gordon – Spengler, Thomas(2016) ⁶¹⁾ 2), 3) Muhammad A.B. et al.(2021) ⁶²⁾
반자동화	싱글트롤리 크레인 (전기) ¹⁾	YT (경유) ²⁾	ARMGC (경유) ⁴⁾	• 부산항 신항	1) Wilmsmeier, Gordon – Spengler, Thomas(2016)

60) 부산항 신항 설계 시 1선석당 연간표준하역능력 65만 TEU를 적용한 것을 준용함

구분	작업영역별 장비 및 연료			주요 사례	활용 데이터
	안벽	이송	장치		
					2) Muhammad A.B. <i>et al.</i> (2021) 3) 해양수산부(2019a) ⁶³⁾
완전 자동화	듀얼트롤리 크레인 (전기) ⁶⁾	AGV (전기) ⁶⁾	ARMGC (전기) ⁷⁾	<ul style="list-style-type: none"> • 네덜란드 RWG • 마스블락테 II APMT • 독일 CTA • 중국 QQCTN 및 양산4기 • 호주 Patrick • 미국 LBCT 	5) 해양수산부(2019a) 6) Y. Saanen(2016) 7) 해양수산부(2019a)

자료: 저자 작성

제2절 스마트항만 유형별 탄소배출량 원단위 산정

본 절에서는 제1절에서 정리한 스마트항만의 분류에 대한 내용을 기반으로 스마트항만을 싱글트롤리 안벽 크레인, 유인 야드 트럭, 유인 RTGC를 사용하는 전통적인 비자동화 터미널과 비교해 탄소배출량 원단위를 산정한다.

탄소배출량은 장비의 동력원뿐 아니라, 각 영역의 장비 운영 효율에 따라 결과가 다를 수 있다. 예를 들어, AGV의 컨테이너 이송 작업할당이나

61) Wilmsmeier, Gordon-Spengler, Thoma(2016), 「Energy consumption and container terminal efficiency」, p. 6.

62) Muhammad A.B. *et al.*(2021), 「Evaluation of CO₂ emissions and energy use with different container terminal layouts」, p. 3.

63) 해양수산부(2019a), 「고생산성 자동화컨테이너 터미널 구축 추진 전략 연구」, pp. 233-234.

경로계획을 개선함으로써, 더 적은 AGV를 활용해 같은 수준의 물동량을 처리하는 것이 가능하다. 즉, 이에 따라 탄소배출량 역시 감소된다. 다만, 운영효율에 따라 장비 수량을 산정하는 것은 매우 복잡한 의사결정 문제 중 하나이므로, 이를 정교하게 고려하여 배출량을 산정하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서의 장비 대수는 실제 적용되고 있는 사례를 바탕으로 산정하되, 에너지 사용량은 불확실성이 수반되는 운영 여건을 반영한 실적 데이터보다는 시뮬레이션을 바탕으로 도출된 기존 연구의 데이터를 우선하여 분석에 적용하고자 한다. 또한 최대한 데이터의 일관성을 유지하기 위해 동일한 장비에는 동일한 데이터를 활용한다.

1. 스마트항만 유형별 탄소배출량 및 원단위 산정

1) 비자동화 터미널

(1) 장비 대수 산정

비자동화 터미널의 투입 장비는 현재 운영 중인 부산항 북항의 자성대, 신선대, 감만, 신감만 터미널의 사례를 바탕으로 산정하였다. 195만 TEU 처리를 가정했을 경우, 비자동화터미널에 투입되는 QC는 평균 13기, 야드크레인 35기, YT는 78대로 도출되었다. 이렇게 산출된 장비대수는 195만 TEU 처리 시의 이산화탄소배출량 산정과 경제성 분석에 활용하고자 한다.

〈표 3-9〉 비자동화터미널의 장비 대수

구분		북향				
		자성대	신선대	감만	신감만	평균
선석수 (350m 기준)		4.1	4.3	4	2.4	3.7
QC 대수		14	15	9	7	11.3
RTGC 대수		33	36	30	19	29.5
YT 대수		64	86	74	39	65.8
선석당 QC 대수		3.4	3.5	2.3	3	3
QC1기당 RTG 대수		2.4	2.4	3.3	2.7	2.6
QC1기당 YT 대수		4.6	5.7	8.2	5.6	5.8
실제 물동량 (2020 실적, 만 TEU)		182	230	150	103	166
195만 TEU 처리 가정 시 장비 대수	QC	15	13	12	13	13
	QC당 RTGC	36	30	38	36	35
	QC당 이송	69	72	95	74	78

자료: 부산항 북향 운영사 자료를 바탕으로 저자 재작성

(2) 장비별 배출량 원단위 산정

먼저 안벽 크레인의 경우, 비자동화 및 자동화 터미널 모두 대부분 전기식으로 구동하고 있다. 에너지소비량은 2016년 발표된 Wilmsmeier, Gordon - Spengler, Thomas(2016)⁶⁴⁾의 데이터인 7.9kwh/move를 사용하고자 한다. 다음으로 이송장비인 야드트랙터와 장치장 크레인인 RTG의 에너지 소비량은 Muhammad A.B. *et al.*(2021)⁶⁵⁾에서 제시하고 있는 데이터인 1.27L/move 및 1.32L/move를 각각 인용한다. 일반적으로

64) 유엔 중남미·카리브 경제위원회(ECLAC) 발간. 라틴아메리카지역의 35개 컨테이너터미널을 대상으로 장비별 경우 및 전기 에너지 소비량에 대한 실증분석을 수행함

65) 기존 연구들을 바탕으로 컨테이너 취급 장비별 move당 에너지 소비 원단위를 제시함

move당 처리할 수 있는 box 개수를 정확하게 파악하기 위해서는 작업 싸이클 타임, 작업효율 및 가동률 등을 고려하여 순 시간당 처리 개수에 대한 시뮬레이션 분석이 필요하므로 본 연구에서는 1move당 1box를 처리함을 가정한다.

장비별 이산화탄소 배출량 산정은 제1절에서 기술한 바와 같이 한국에너지공단⁶⁶⁾의 이산화탄소배출량 계산 가이드라인에 따라 연료발열량과 탄소배출계수를 곱한 탄소배출량에 이산화탄소원자량(44)을 탄소원자량(12)으로 나눈 값을 곱하여 계산한다.

〈표 3-10〉 장비별 이산화탄소 배출량 산정식

CO_2 배출량(tCO_2) = 탄소배출량(tC) \times 이산화탄소 원자량/탄소원자량

- 탄소배출량(tC) = 연료발열량(MJ) \times 탄소배출계수(E_i)/10⁶
 - 연료발열량(MJ) = 연료사용량_{연료} \times 발열량_{연료}
-

자료: 한국에너지관리공단(검색일: 2021. 12. 14)

일반적으로 box를 TEU로 환산하기 위한 계수(Coefficient)는 1.6으로⁶⁶⁾ 본 연구에서도 이를 적용하여 TEU당 에너지소비량을 도출한다.

이상의 내용을 종합하여 비자동화터미널의 장비별 이산화탄소 배출량을 산정한 결과, 1TEU 처리 시 안벽 크레인⁶⁶⁾은 0.0058tCO₂, 이송장비인 야드 트랙터는 0.0053tCO₂, 장치장 크레인(RTG)은 0.0044tCO₂를 배출하는 것으로 도출되었다.

66) 인천항만공사(2008), p. 156, 해양수산부(2019a), p. 233.

〈표 3-11〉 장비별 이산화탄소 배출량 원단위 - 비자동화터미널

영역	장비	연료	에너지 사용량 (/box)	에너지 사용량 (/TEU) ²⁾	배출계수 (2017년 국가탄소배출 계수)		배출량 (tCO ₂ /TEU)
안벽	QC (싱글트롤리)	전기	7.9 Kwh	12.64 Kwh	0.4594	tCO ₂ eq./ MWh	0.0058
이송	YT	경유	1.27 L	2.032 L	20.111	tC/TJ	0.0053
장치	RTGC	경유	1.05 L ¹⁾	1.6896 L	20.111	tC/TJ	0.0044

주: 1) 장치영역의 경우 시뮬레이션 데이터를 기반으로 인용 데이터에 0.8moves/box를 적용

2) TEU 박스계수 1.6을 적용

자료: Wilmsmeier, Gordon - Spengler, Thomas(2016), p.6, Muhammad A.B. *et al.*(2021), p. 3을 바탕으로 저자 재작성

2) 반자동화 터미널

(1) 장비 대수 산정

반자동화 터미널의 투입장비는 현재 운영 중인 부산항 신항의 1부두부터 4부두까지의 사례를 바탕으로 산정하였다. 5부두의 경우 수직반자동화 터미널로 장치장 평면배치상 투입되는 장비가 상이하여 장비 대수 산정 시 제외하였다. 195만 TEU 처리를 가정했을 경우, 반자동화 터미널에 투입되는 QC는 평균 9기, 야드크레인(ARMGC)은 31기, YT는 67대로 도출되어 비자동화 터미널에 비해 적은 수의 장비가 투입됨을 알 수 있다.

〈표 3-12〉 반자동화 터미널의 장비 대수

구분		북항				
		1부두	2부두	3부두	4부두	평균
선석수 (350m 기준)		3.4	5.7	3.1	3.3	3.9
QC 대수		12	22	12	12	15
ARMGC 대수		41	69	42	38	48
YT 대수		83	154	96	85	105
선석당 QC 대수		3.5	3.9	3.8	3.7	4
QC1기당 ARMGC 대수		3.4	3.1	3.5	3.2	3
QC1기당 YT 대수		7	7	8	7	7
실제 물동량 (2020 실적, 백 만 TEU)		2.74	4,83	2,95	2,11	3,16
195만 TEU 처리 가정 시 장비 대수	QC	9	9	8	11	9
	ARMGC	29	27	28	35	31
	YT	59	62	63	79	67

주: 1) 수직반자동화 터미널인 신항 5부두는 제외함

2) 선석수의 경우, 본 연구에서 동일한 기준을 적용하기 위해 350m를 기준으로 산정한 수치임

자료: 부산항 신항 각 운영사 자료를 바탕으로 저자 재작성

(2) 장비별 배출량 원단위 산정

반자동화 터미널과 비자동화 터미널의 차이점은 야드장비의 전기식 구동 유무이다. 반자동화 터미널에서는 일반적으로 원격조종방식의 전기식 ARMGC를 사용한다. 이에 반자동화 터미널의 이산화탄소 배출량 원단위 산정에서는 안벽 크레인 및 야드트랙터는 비자동화와 동일한 기준을 적용 하되, 장치장 크레인은 해양수산부(2019)의 장치장 크레인 에너지 사용량 관련 데이터인 3.92kwh/move를 인용하고자 한다.

이를 종합하여 반자동화 터미널의 장비별 이산화탄소 배출량을 산정하면 1TEU 처리 시 안벽 크레인 및 이송장비의 배출량은 비자동화와 동일하며 전기구동방식의 장치장 크레인(ARMGC)의 경우, 0.0029tCO₂를 배출하는 것으로 나타났다. 이는 비자동화 터미널 장치장 크레인의 TEU당 배출량인 0.0044tCO₂보다 약 0.0015tCO₂ 적은 수치이다.

〈표 3-13〉 장비별 이산화탄소 배출량 원단위 - 반자동화 터미널

영역	장비	연료	에너지 사용량 (/box)	에너지 사용량 (/TEU)	배출계수 (2017 국가탄소 배출계수)		배출량 (tCO ₂ /TEU)
안벽	QC (싱글 트롤리)	전기	7.9 Kwh	12.64 Kwh ¹⁾	0.4594	tCO ₂ eq./ MWh	0.0058
이송	YT	경유	1.27 L	2.032 L ²⁾	20.111	tC/TJ	0.0053
장치	ARMGC (켄틸레버)	전기	3.92 kwh ¹⁾	6.272 Kwh ³⁾	0.4594	tCO ₂ eq./ MWh	0.0029

자료: Wilmsmeier, Gordon – Spengler, Thomas(2016), p. 6, Muhammad A.B. *et al.*(2021), p. 3, 해양수산부(2019a), p. 234를 바탕으로 저자 재작성

3) 완전자동화(스마트) 터미널

(1) 장비 대수 산정

완전자동화 터미널의 투입장비는 더블트롤리 방식의 안벽 크레인과 ARMGC, 그리고 자동화 이송장비 중 AGV를 운영하고 있는 세계 주요 터미널의 사례를 바탕으로 산정하였다. 상술한 장비를 구동 중인 완전자동화 터미널은 독일 CTA, 중국 QQCTN 및 양산4기, 미국 LBCT가 대표적 사례로 꼽힌다. 195만 TEU 처리를 가정했을 경우, 완전자동화 터미널에 투입되는 QC는 평균 8기, 야드크레인(ARMGC)은 35기, AGV는 44대로 도출되어 비자동화 및 반자동화 터미널에 비해 적은 수의 장비가 투입됨을 알 수 있다.

〈표 3-14〉 완전자동화(스마트) 터미널의 장비 대수

구분		세계 주요 완전자동화 터미널				
		독일 CTA	중국 QQCTN	중국 양산 4기	미국 LBCT	평균
선석수 (350m 기준)		4	6	7	4	5
QC 대수		14	16	26	14	18
ARMGC 대수		52	76	119	70	79
AGV 대수		91	83	135	72	95
선석당 QC 대수		4	3	4	4	3
QC1기당 ARMGC 대수		4	5	5	5	5
QC1기당 AGV 대수		7	5	5	5	6
실제 물동량 (2020 실적, 만 TEU)		300	520	630	330	445
195만 TEU 처리 가정 시 장비 대수	QC	9	6	8	8	8
	ARMGC	34	29	37	41	35
	AGV	59	31	42	43	44

자료: BPA 내부자료 및 해양수산부(2019a) 자료를 바탕으로 저자 재작성

(2) 장비별 배출량 원단위 산정

완전자동화 터미널은 앞서 기술한 바와 같이 수직형 배치를 가정한다. 수직형 배치는 블록을 세로로 배치하여 자동화 이송장비와 외부트럭 간 동선을 분리함에 따라 안벽 크레인 하부와 장치장 간 이송장비(AGV)의 이송 시간이 단축됨으로써 효율성 증대 및 에너지 사용량 감소에 따른 배출량 감소에 긍정적인 영향을 줄 수 있다.

장비별 에너지사용량은 장치장 크레인은 반자동화와 동일한 기준을 적용하고, 더블트롤리 방식의 안벽 크레인 및 무인자동화 이송장비인 AGV에 대해서는 해양수산부(2019a) 및 Y. Saanen(2016)의 데이터를 준용하고

자 한다. 먼저 해양수산부(2019a)는 더블트롤리방식의 안벽 크레인 1대 당 7.5kwh의 에너지를 사용하는 것으로 도출했다.⁶⁷⁾ 이는 반자동화 및 비자동화 터미널의 승무식 싱글트롤리방식에 비해 해측은 원격으로, 육측은 자동으로 운용됨에 따라 비교적 적은 에너지를 사용하는 데 기인하는 것으로 보인다.

한편 Y. Saanen(2016)은 이송영역에서 사용하는 장비인 AGV, Lift AGV, ALV의 시간당 연료소비량, 이산화탄소 배출량을 산정했으며 그 결과는 아래 <표 3-15>와 같다. 이를 바탕으로 AGV의 시간당 연료소비량과 시간당 박스처리량을 박스당 연료소비량으로 계산하면 2.6kwh/box가 도출된다.

<표 3-15> 무인자동화 이송장비별 연료소비량, 이산화탄소 배출량

이송장비 종류	AGV (경유/전기)	Lift AGV (경유/전기)	ALV (경유)
중량	26t/26t	31t/31t	52t
연료소비/시간	7.5L/17kw	12.0L/27kw	17L
탄소 배출량/시간	19.3kg/4.9kg	30.9 kg/h	43.6kg
차량수/CC	30.	3.5	4.0
순생산성/시간	14/box	12/box	10.5/box
CC생산성/시간	42/box	42/box	42/box

자료: Y. Saanen(2016), "AGV versus Lift AGV versus ALV", p. 32.

이를 종합하여 완전자동화 터미널의 장비별 이산화탄소 배출량을 산정하면 1TEU 처리 시 라멘 방식의 장치장 크레인 배출량이 반자동화 터미널에서 사용됨을 가정한 켄틸레버 방식의 장치장 크레인보다 약간 많은 0.0035tCO₂로 나타났다. 더블트롤리 방식의 안벽 크레인과 무인자동화 이송장비인 AGV의 경우 각각 1TEU 처리 시 0.0055tCO₂, 0.0019tCO₂

67) 해양수산부(2019a), p. 234.

가 배출되는 것으로 계산되었다. 종합적으로 완전자동화 터미널은 비자동화 터미널보다 0.0056tCO₂, 반자동화 터미널보다 0.003tCO₂ 적은 수치로 완전자동화 터미널의 이산화탄소 배출량 원단위가 가장 낮은 것으로 도출되었다.

〈표 3-16〉 장비별 이산화탄소 배출량 원단위 - 완전자동화(스마트)터미널

영역	장비	연료	에너지 사용량 (/box)	에너지 사용량 (/TEU)	배출계수 (2017 국가탄소 배출계수)	배출량 (tCO ₂ /TEU)
안벽 (더블)	RC QC (더블트롤리; 해측 원격/ 육측 자동)	전기	7.5 kwh	12 kwh	0.4594 tCO ₂ eq./MWh	0.0055
이송	AGV		2.6 kwh	4.16 kwh		0.0019
장치	ARMGC (라멘)		4.75 kwh	7.6 kwh		0.0035

주: 해양수산부(2019a), p. 233, Y. Saanen(2016) p. 32. (17kw/h, 6.5box/h →) TEU factor 1.6 적용)
를 바탕으로 저자 재작성

2. 스마트항만 단계별 저감효과 종합

앞서 산정한 비자동화, 반자동화, 완전자동화 터미널의 장비별 TEU당 이산화탄소 배출량 원단위 합계를 바탕으로 스마트화에 따른 탄소배출량을 비교하면 비자동화 터미널이 0.0166tCO₂, 반자동화 터미널이 0.0140tCO₂, 완전자동화 터미널이 0.0109tCO₂로 도출되어 스마트화될 수록 탄소배출량 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

이를 3선식, 연간 하역능력 195만 TEU를 처리하는 가상의 터미널로 가정하여 터미널 유형별 탄소배출량을 살펴보면 탄소배출량이 가장 많은 터미널은 비자동화 터미널(싱글트롤리-야드크레인(유류)-YT(유류))로 총

32,308tCO₂를 배출하는 것으로 산정되었다. 종합해보면 비자동화에서 반자동화로 갈수록 16%의 이산화탄소 감축효과가 있는 것으로 나타났으며, 완전자동화 터미널은 비자동화 대비 34%, 반자동화 대비 22%의 배출량 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

〈표 3-17〉 스마트 유형별 이산화탄소 배출량 비교

단위: tCO₂

스마트 항만 유형	영역별 배출량 원단위(tCO ₂ /TEU)			배출량 합계		저감 효과
	안벽	이송	장치	원단위	195만 TEU	
비자동화 (수평)	0.0058 (싱글 트롤리)	0.0053 (유류식 YT)	0.0055 (유류식 RTG)	0.0166	32,308	-
반자동화 (수평)	0.0058 (싱글 트롤리)	0.0053 (유류식YT)	0.0029 (전기식 ARMGC) 켄틸레버 타입	0.0140	27,238	16% (비→반)
완전 자동화 (수직)	0.0055 (듀얼 트롤리)	0.0019 (전기식 AGV)	0.0035 (전기식 ARMGC) 라멘 타입	0.0109	21,278	22% (반→완) 34% (비→완)

주 : 안벽 크레인인 모두 전기식 구동

자료: Wilmsmeier, Gordon – Spengler, Thomas(2016), p. 6, Muhammad A.B. *et al.*(2021), p. 3, Y. Saanen(2016) p. 32. 해양수산부(2019a), pp. 233-234를 바탕으로 저자 재작성

따라서, 향후 스마트항만의 친환경성을 확보하기 위해서는 기존 유류식 장비 도입을 지양하고 전기 및 기타 친환경 연료를 사용하는 장비의 도입·전환이 필요하다. 또한 탄소 저감에서 한발 더 나아가 2050 탄소중립 실현을 위해서는 무탄소배출이 가능한 수소터미널 등으로의 개발 방향 설정도 고려할 수 있을 것이다.

제3절 스마트항만 유형별 경제성 분석

1. 경제성 분석 방법의 선정

스마트항만 구축 사업은 사업추진에 따른 편익이 국민경제에 영향을 미칠 수 있는 대규모 인프라 사업으로 공공 재정이 소요될 수 있는 만큼 사업의 경제성을 검증할 필요가 있다. 경제성 분석은 기업 수준의 재무성 분석과는 다르게 국민경제 전체의 관점에서 비용과 편익을 파악한다. 국민경제적 관점에서 편익은 해당 사업의 국민 생산에 대한 공헌을 의미하며, 비용은 국가자원의 낭비(즉, 자원의 기회비용)를 일컫는다. 경제적 타당성 분석은 사업 시행 여부 판단을 위해서 사업을 추진할 경우에 발생할 편익을 사업이 추진되지 않는 경우와 비교하는 것이다. 즉, 사업 전후(before and after)가 아닌 시행 유무(with or without) 비교를 통한 사회 후생 (social welfare)의 차이를 분석할 필요가 있다.

국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 총괄지침에 따르면, 국가연구개발사업 예비타당성조사에서 경제적 타당성 분석은 비용편익 분석기법을 이용하거나 비용효과 분석 등의 대체 분석기법을 이용할 수 있다고 명시한 바 있다. 비용효과 분석은 사업의 효과를 화폐가치로 환산할 수 없어 시장 가격의 측정이 곤란한 공공재를 다룰 수 있고, 동일한 목적에 대해 가장 효율적인 대안을 찾을 수 있는 방법이다.

〈표 3-18〉 비용편익 분석과 비용효과 분석의 비교

구분	비용편익 분석	비용효과 분석
특성	<ul style="list-style-type: none"> • 효율적인 수단 외에 그 목적이 추구할만한 가치가 있는지 결정 • 화폐단위로 측정하여 비용효과 분석보다 넓은 대상에 대해 명확한 비교가 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 동일한 목적에 대해 가장 효율적인 대안을 찾음 • 화폐단위로 측정하는 문제를 피하기 때문에 비용편익 분석보다 더 폭넓고 쉽게 적용
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 비교 가능 대안의 폭이 넓음 • 경제적 효율성 등 비용효과 분석보다 많은 의사결정 정보를 제공함 	<ul style="list-style-type: none"> • 외부효과나 무형적인 것의 분석에 용이함. 비효율적인 대안을 제거할 수 있음 • 대안들의 상대적 편익 발생 지수를 제시할 수 있음
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 계량화가 어렵거나 주관적이기 쉬움 	<ul style="list-style-type: none"> • 비교 가능한 대안의 폭이 좁음 • 최적 편익 수준의 결정 문제는 해결하지 못함

자료: 한국과학기술기획평가원(2020b), p. 325

항만건설사업에 대한 경제성 분석은 일반적으로 비용편익 분석을 적용하고 있다. 〈표 3-19〉에서 살펴보듯이 항만건설사업에서 발생하는 편익은 이용자 측면, 공급자 측면, 기타 측면에서 총 8가지 편익(① 선박대기비용 절감, ② 선박재항비용 절감 … ⑦ 환적화물 수입증대효과, ⑧ 토지조성효과)으로 구성된다. 항만부문 예비타당성조사 표준지침에서는 신식 하역장비의 탄소 배출량 저감 효과를 고려하지 않고 있다. 또한, 신식 하역장비의 온실가스 절감 편익은 비자동화 터미널 탄소배출금액과의 비교로 산정하는 것이기에 항만건설 유무(with or without)의 비교로 간주하기 어렵다. 이러한 점을 종합한다면, 스마트항만 구축의 탄소 저감 효과에 대해서 비용편익 분석을 적용하기란 쉽지가 않다.

〈표 3-19〉 항만건설사업의 편익항목

편익의 분류		편익항목	편익산정방법
직접편익	이용자 측면	선박대기비용 절감 선박재항비용 절감 하역비용 절감효과 선박운항비용 절감효과 내륙운송비용 절감효과 화물운송시간 절감효과	항만체증 완화 비용 절감 추정 비용 절감 추정 비용 절감 추정 비용 절감 추정 시간 절감 추정
	공급자 측면	환적화물 수입증대효과	환적화물 유입
	기타	토지조성효과	신규 조성토지의 가치
간접편익	지역경제	건설부문의 고용·소득 증가 관련 산업의 고용·소득 증가 지역산업의 안정·성장 산업의 국제경쟁력 제고	파급효과로 산정
공공부문	조세	지방세·국세의 증가	이전지출

자료: 한국개발연구원(2014), p. 297

따라서 본 절에서는 탄소 저감 효과에 대한 스마트항만 구축의 경제성을 분석하기 위해 비용효과 분석을 주된 분석방법으로 활용하고자 한다. 비용 효과 분석은 목표를 달성하는 데 가장 적은 비용이 소요되는 대안을 선정할 수 있는 방법으로 동일 물동량 처리 시 가장 비용효율적인 대안을 제시하기 위한 본 연구의 목적에 부합하는 방법이기 때문이다. 경제성을 분석하기 위해 본장의 1절에서 가정한 바와 같이 항만을 비자동화, 반자동화, 완전자동화 3개 유형으로 구분하고 연간 195만 TEU를 처리한다고 가정한다.

2. 비용효과 분석

1) 방법론

비용효과 분석에는 두 가지 방법이 있다. 첫째는 고정효과 접근법으로, 이는 효과가 주어져 있을 때 목표를 달성하는 데 가장 적은 비용이 소요되는 대안을 선택하는 것이다. 둘째로 고정비용 접근법은 비용이 주어져 있을 때 목표를 최대로 달성하는 대안을 선택하는 것이다⁶⁸⁾ 여기서 유의해야 할 사항은 ① 비교대상인 각 대안들이 동일한 성격의 목표(효과)가 있으며, ② 그 목표가 무엇인지 명확하게 규명되고, ③ 화폐단위가 아닌 물리적 단위에 의한 것이라도 동일한 기준으로 분명하게 측정 가능해야 한다는 점이다. R&D 예비타당성조사 경제성 분석에서 비용효과 분석을 적용한 사업을 살펴보면 대부분 고정효과 접근법을 채택하고 있음을 알 수 있다.

〈표 3-20〉 고정효과 접근법을 채택한 R&D 예비타당성조사 사업

연도	사업명	효과지표	대안 비교 방식
2018	사용후핵연료 관리 표준화시스템 개발사업	사용후핵연료의 심층처분	목표 효과 달성을 위해 사용후핵연료 관리 시스템을 새롭게 표준화하는 대안과 기존 방식을 활용하는 대안의 비용 비교
2015	제2쇄빙연구선 건조사업	정부의 극지 진출 역량 강화기반 확보를 위한 쇄빙선 건조	목표 효과 달성을 위한 신규 쇄빙선 건조, 타 국쇄빙선 임차, 규모 축소 다목적쇄빙선 대안 비용 비교
2014	생물다양성 위협 외래생물 관리기술 개발사업	미유입 외래생물 위해성 예측, 생태계교란생물 제거 등	목표 효과 달성을 위해 R&D 사업을 시행하는 경우와 비R&D사업만 시행하는 경우의 비용 비교
2014	Multi-Terminal 직류 송배전 시스템 개발사업	국내 송전망 운영 이슈 해결	목표 효과 달성을 위한 다양한 R&D 대안 간의 비용 비교, 기술적 대안 3개와 현행 유지(주민 보상) 대안 1개

68) 김동건(2012)

연도	사업명	효과지표	대안 비교 방식
2014	국가 초고성능 컴퓨팅 인프라 선진화사업	슈퍼컴퓨터 수요 의 안정적 제공	목표 효과 달성을 위한 다양한 대안 간의 비용 비교. 해외 서비스 100% 이용, 기존 서비스 + 해외 서비스 동시 활용, 100% 자체 개발 대안 비교
2012	국립 축산과학원 가축 유전자원 시험장 이전사업	가축전염병 방역 기능 확보	타 지역 이전 대안과 현 시험장을 개선하는 3개 대안 비용 비교
2010	온라인 전기자동차 기반 수송시스템 혁신사업	전기자동차 기반 수송시스템 구축	온라인 전기버스 도입 대안과 충전식 전기버스 도입 대안을 비교

자료: 한국과학기술기획평가원(2020a), p. 198

〈표 3-21〉은 비용효과 분석의 사례를 정리한 것이다. 온라인 전기자동차 기반 수송시스템 혁신사업에서는 해당 R&D 예비타당성조사를 위해 순수 전기버스(PEV)와 온라인 전기버스(OLEV)의 효과가 동일하다고 가정하고 해당 효과를 달성하는 데 가장 적은 비용이 소요되는 대안을 선택하는 고정효과접근법을 채택하였다. 분석결과에 따르면, 2008년도 기준 현재 가치치로 PEV⁶⁹⁾ 버스(8,811억 원)가 OLEV⁷⁰⁾ 버스(10,757억 원) 대비 82% 수준이며 약 1,946억 원 절감되는 것으로 분석되었다. 이에 따라, OLEV 버스는 경제적 타당성을 확보하지 못하는 것으로 판명되었다.

69) Pure Electronic Vehicle

70) On-Line Electronic Vehicle

〈표 3-21〉 비용효과 분석 사례

단위: 억 원

구분		비용(2038년까지 2008년 기준 현가, 할인율: 5.5%)			
		OLEV		PEV	
버스 제작	버스 제작 (기본차량 제외)	1,801	23,942대 기준 배터리 25kWh 집전장치 0.1억 원/대	3,540	23,942대 기준 배터리 100kWh
	배터리 교체	1,130	버스 수명 9년 배터리 수명 3년 배터리 25kWh	4,522	버스 수명 9년 배터리 수명 3년 배터리 100kWh
인프라 구축		4,262	2,110 line·km (25km/h 기준) 2.86억 원/km	369	359개 노선 충전기: 8개/노선 0.187억 원/개
유지보수		3,564	도로: 0.148억 원/km 인버터: 연간 8% 운영시스템: 연간 13%	380	하드웨어 연간 8% 유지보수율
합계		10,757		8,811	1,946억 원 절감

자료: 한국과학기술기획평가원(2010), p. 26

2) 비용

본 절에서는 비용효과 분석을 통해 장비의 동력 전환에 따른 탄소 저감 효과를 가장 비용효율적으로 달성할 수 있는 대안을 제시하고자 한다. 이를 위해 제2절에서 산정된 탄소배출량 결과에 따라 탄소를 가장 적게 배출하는 완전자동화 터미널의 탄소배출량을 비용효과 분석의 목표로 설정하였다.

터미널을 구축하는 비용에는 공사비, 시설부대경비 등 여러 가지가 포함될 수 있지만 본 연구에서는 장비의 동력 전환에 따른 탄소 저감효과 분석이라는 목적을 강조할 수 있도록 장비비용, 에너지비용, 탄소 저감비용만 고려하고자 한다.

아울러, 비용효과 분석을 시행하는 기간은 통상 항만건설 사업의 예비타당성조사에서 적용하는 항만운영 기간인 30년을 적용하였다.

(1) 장비비

본 연구에서 고려하는 항만시설장비는 크게 안벽, 이송, 장치 영역으로 구분되며, 제2절에서 제시된 각 대안별 장비의 종류와 대수, 에너지원에 기반하여 장비 단가를 검토하였다. 최신 자료를 활용하기 위해 『항만자동화 테스트베드 구축 예비타당성조사(한국개발연구원, 2022)』, 『부산항 제2신항 건설사업 예비타당성조사(한국개발연구원, 2021)』 등 항만건설 예비타당성조사에서 제시된 단가를 검토하였으나, 완전자동화 관련 장비에 대한 단가만 제시되고 있어 비자동화, 반자동화, 완전자동화 3개 유형을 다루고 있는 본 연구의 장비비에 적용하기에는 한계가 있었다. 따라서 동일한 연구 내에서 3개 유형의 터미널에 설치한 장비 단가를 대부분 제시하고 있는 해양수산부(2019a)의 장비비를 참조하였다. 해당 연구에서 제시되고 있지 않은 RTG의 단가는 해양수산부 장비시설 장비목록⁷¹⁾에서 최근 10년간 단가를 대상으로 최댓값, 최솟값을 제외한 평균값으로 산정하였다.

비용효과 분석을 위한 대안별·유형별 장비 단가 적용 기준은 다음과 같다.

71) 공공데이터포털, “해양수산부_항만시설장비목록”(검색일: 2021. 12. 29)

〈표 3-22〉 대안별 장비 소요 규모

단위: 백만 원

항목	영역	장비	연료	대수	장비 단가	장비 총금액
기준 대안 (비자동화)	안벽	QC	전기	13	9,600	124,800
	이송	YT	경유	78	101	7,878
	장치	RTG	경유	35	1,061.4	37,148
대안 1 (반자동화)	안벽	QC	전기	9	9,600	86,400
	이송	YT	경유	67	101	6,767
	장치	ARMGC (켄틸레버)	전기	35	2,320	81,200
대안2 (완전자동화)	안벽	QC	전기	8	12,000	96,000
	이송	AGV	전기	44	700	30,800
	장치	ARMGC (라멘)	전기	35	2,320	81,200

자료: 해양수산부(2019a)와 공공데이터포털 “해양수산부_항만시설 장비목록”(검색일: 2021. 12. 29)를 활용하여 저자 작성

(2) 장비교체비 및 잔존가치

장비별로 내구연한이 존재하므로 분석기간인 30년 동안 장비교체비가 발생하게 된다. 이에 장비별로 내구연한을 검토하고, 내구연한이 도래하는 시점에 장비교체비를 투자하는 것이 타당할 것이다. 장비의 내구연한은 해양수산부(2019a)에서 제시하는 것과 같이 이송장비(YT)는 10년, 안벽장비(QC)와 장치장 장비(ARMGC)는 20년으로 하여 교체비용을 산정하였다. 비자동화 터미널의 장치장 크레인인 RTG의 내구연한은 해당 보고서에서 다루고 있지 않지만 장치영역 장비로 분류되어 있으므로 20년을 적용하였다.

또한 운영기간 30년을 적용하여 이송장비는 2회, 안벽 및 장치장비는 1회의 교체비용을 반영하였다. 그리고 분석 종료시점에 내용연수가 남아있는 장비의 경우는 정률 감가상각법을 적용하여 잔존가치를 반영하였다.

〈표 3-23〉 대안별 장비별 교체비 및 잔존가치

단위: 백만 원

항목	영역	장비	내용연수	2033	2043	2053
기준 대안 (비자동화)	안벽	QC	20		124,800	
	이송	YT	10	7,878	7,878	7,878
	장치	RTG	20		37,148	
대안 1 (반자동화)	안벽	QC	20		86,400	
	이송	YT	10	6,767	6,767	6,767
	장치	ARMGC (컨틸레버)	20		81,200	
대안2 (완전자동화)	안벽	QC	20		96,000	
	이송	AGV	10	30,800	30,800	30,800
	장치	ARMGC (라멘)	20		81,200	

자료: 해양수산부(2019a)와 한국개발연구원(2021) 자료를 활용하여 저자 작성

(3) 에너지비

앞서 배출량 분석에서 기술한 바와 같이 분석 대상 장비에 사용되는 에너지원은 경유와 전기이며, 안벽장치는 모든 경우에서 전기를 사용한다. 기준 대안에서는 이송 및 장치장비 모두 경유를 사용하며, 대안 1에서는 이송 장비는 경유, 장치장 크레인만 전기로 전환, 대안 2에서는 이송 및 장치장비 모두 전기로 전환하여 운영되는 것으로 하였다.

에너지비 산출에 사용되는 변수는 제2절에서 도출된 장비별 TEU당 에너지사용량과 단위 에너지 가격이다. 단위 에너지 가격은 다음과 같은 사항들을 고려하여 산정하였다. 먼저, 경유단가는 한국석유공사에서 운영하는 유가동향정보 사이트인 오피넷의 국내유가를 활용하여 2021년 12월 기준 최근 5개월 평균인 1,481.12원/L을 기준으로 설정하고,⁷²⁾ 할인율

72) 오피넷(검색일: 2022. 1. 1)

84.38%⁷³⁾를 적용하여 최종적으로 1,250원/L으로 산정하였다. 할인율을 적용한 것은 경유의 단위가격은 소비자의 구매가와 항만의 구매가가 다를 수 있기 때문이다. 다음으로 전기단가는 경유와 동일한 이유로 한국전력공사의 전기요금표 중 '산업용전력(을)-고압B-선택Ⅲ'의 시간대별 요금을 평균으로 계산한 값인 97원/kWh으로 산정하였다.⁷⁴⁾

에너지비는 안벽, 이송, 장치 영역별 각각의 장비로 나누어 산정하였으며 장비별 단위 에너지비는 장비별 단위 에너지 사용량에 단위 전기료를 곱하여 산출하였다. 또한 연간 에너지비는 제2절에서 대안별로 연간 195만 TEU를 처리한다고 가정하였으므로 장비별 단위 에너지비에 연간 처리량을 곱하여 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{장비별 단위 에너지비(원/TEU)} \\ &= \text{장비별 단위 에너지사용량(kWh/TEU)} \times \text{단위 전기료(원/kWh)} \\ \\ & \text{장비별 연간 에너지비(원/195만 TEU)} \\ &= \text{장비별 단위 에너지비(원/TEU)} \times 195\text{만 TEU} \end{aligned}$$

위의 식을 활용하여 산출한 대안별 장비별 연간 에너지비는 각각 다음과 같다.

73) 해양수산부(2019a), pp. 234~235.

74) 부산항만공사 관계자 인터뷰 내용을 참고하여 산정함

〈표 3-24〉 대안별 장비별 연간 에너지비

항목	영역	장비	연료	에너지 사용량 (L,kWh/ TEU)	에너지단가 (원 /L,kWh)	단위 에너지비 (원/TEU)	연간 에너지비 (백만 원/ 195만 TEU)
기준 대안 (비자동화)	안벽	QC	전기	12.6	97	1,228	2,395
	이송	YT	경유	2.0	1,250	2,540	4,952
	장치	RTG	경유	1.7	1,250	2,112	4,118
대안 1 (반자동화)	안벽	QC	전기	12.6	97	1,228	2,395
	이송	YT	경유	2.0	1,250	2,540	4,952
	장치	ARMGC (켄틸레버)	전기	6.3	97	609	1,188
대안2 (완전 자동화)	안벽	QC	전기	12.0	97	1,166	2,274
	이송	AGV	전기	4.2	97	404	788
	장치	ARMGC (라멘)	전기	7.6	97	738	1,440

자료: 해양수산부(2019a)와 한국개발연구원(2021) 자료를 활용하여 저자 작성

(4) 탄소저감비

비용효과 분석의 목표로 탄소를 가장 적게 배출하는 완전자동화 터미널의 탄소배출량을 설정하였으므로, 목표를 달성하기 위해 추가적으로 발생하는 비용을 고려할 필요가 있다. 대안별 장치를 그대로 운영하면서 탄소 배출량을 저감시킬 수 있는 방법은 저감장치를 장착하는 것이다. 이에 장비별 저감장치 설치비용과 저감장치 유지비용을 산출하였다. 또한 저감장치의 경우 이산화탄소(CO_2)가 아닌 탄소(CO)저감에 초점이 맞추어져 있다.⁷⁵⁾ 따라서 본 분석에서는 제2절에서 산출된 이산화탄소 배출량을 탄소 배출량으로 환산한 값을 적용하였다.

75) TC DPF 제작 및 설치업체 H사와의 인터뷰(2022. 4. 1)

장비별 탄소저감비 중 저감장치 설치비용의 산출 과정은 다음과 같다.

① 목표 배출량을 초과하는 배출량을 저감목표로 설정한다, ② 저감률이 90%인 저감장치의 성능을 고려하여 저감목표를 달성하기 위해 장비가 배출해야 하는 필요배출량을 산정한다, ③ 장비 1대당 배출량을 산정한다. ④ ‘②’에서 ‘③’을 나누어 필요 저감장치 대수를 구한다. ⑤ 필요 저감장치 수에 저감장치 단가를 곱하여 저감장치 총금액을 구한다,

- ① 저감목표 = 비교대안 장비별 연간배출량($\text{tCO}/195\text{만 TEU}$) - 목표 장비별 연간배출량($\text{tCO}/195\text{만 TEU}$)
- ② 필요 장비배출량 = 저감목표/ 0.9
- ③ 단위 장비배출량 = 연간 장비배출량 / 장비대수
- ④ 필요 저감장치수 = 필요 장비배출량 / 단위 장비배출량
- ⑤ 저감장치 총금액 = 필요 저감장치수 \times 저감장치 단가

저감장치 유지비용은 운영기간 동안 저감장치의 성능을 일정 수준으로 유지시키는 데 드는 비용이다. 저감장치는 주기적으로 클리닝 및 교체가 필요한데 그에 따른 비용이 2년에 한 번씩 발생하여, 이를 저감장치 유지비로 고려하였다.

가. 안벽장비

QC의 경우 기준 대안, 대안 1, 대안 2에서 에너지원으로 모두 전기를 사용하고 있어 동력전환에 따른 탄소 저감효과를 분석하기에 적절하지 않은 측면이 있다. 하지만 제2절의 배출량 산출 결과에 따르면 대안 2의 배출량이 기준 대안과 대안 1에 비해 $153\text{tCO}/195\text{만 TEU}$ 적은 데도 불구하고 반영하지 않는 것은 전체적인 탄소배출량 목표를 달성하는 데 적절하지 않다고 판단했기 때문이다. 따라서 기준 대안과 대안 1에서 공통적으로 초과 배출량만큼을 감소시킬 수 있도록 경유 사용 장비인 이송장비의 저감목표를 증가시켜 필요 저감장치 수를 산정하였다. 그러므로 안벽장비에서는 저감장치 설치비용과 유지비용이 존재하지 않는 것으로 간주할 수 있다.

〈표 3-25〉 안벽장비 저감목표에 따른 저감비

구분	배출량 (tCO/ 195만 TEU)	저감 목표량 (tCO/ 195만 TEU)	실제 배출량 (tCO/ 195만 TEU)	단위 장비 배출량 (tCO/대)	필요 저감 장치 수 (개)	저감 장치 단가 (백만 원)	저감 장치 총금액 (백만 원)
기준 대안	3,089	153	-	-	-	-	-
대안 1	3,089	153	-	-	-	-	-
대안 2 (목표)	2,936	0	-	-	-	-	-

자료: 저자 작성

나. 이송장비

YT의 경우 기준 대안, 대안 1에서는 경유를, 대안 2에서는 전기를 에너지원으로 사용하고 있다. 대안 2에서는 전기를 사용하며 연간 배출량은 2,936tCO/195만 TEU이다. 대안 2의 배출량 수준으로 기준 대안과 대안 1의 배출량을 감소시키려면 경유를 사용하는 이송장비의 배출가스 저감장치인 DPF(Diesel Particulate Filter)를 부착하여야 한다. 해당 저감장치의 설치비는 대당 780만 원이며, 필터교체 및 클리닝 등의 유지비용은 250만 원이다.⁷⁶⁾

전술하였듯, 기준 대안과 대안 1의 안벽장비 저감목표량을 이송장비로 이전하여 감소시키는 것을 고려하여 탄소 저감목표와 필요 저감장치 수를 산정하였다. 안벽장비의 저감목표량(153tCO/195만 TEU)을 추가하면 필요 저감장치 수는 기준 대안 5대, 대안 1에서 4대가 증가하여 각각 60대, 52대가 된다.

76) DPF 제작 및 설치업체 C사와의 전화 인터뷰(2022. 4. 1)를 통해 확인한 비용임

〈표 3-26〉 이송장비 저감목표에 따른 저감비

구분	장비수	배출량 (tCO/ 195만 TEU)	저감 목표량 (tCO/ 195만 TEU)	실제 배출량 (tCO/ 195만 TEU)	단위 장비 배출량 (tCO/대)	필요 저감 장치 수 (개)	저감 장치 단가 (백만 원)	저감 장치 총금액 (백만 원)
기준 대안	78	2,808	1,948	2,164	36	60	7.8	469
대안 1	67	2,808	1,948	2,164	42	52	7.8	469
대안 2 (목표)	44	1,013	0	-	-	-	-	-

자료: 저자 작성

다. 장치장비

기준 대안의 RTG만 경유를 사용하고 있으며, 대안 2의 연간 배출량 1,855tCO/195만 TEU를 초과하여 탄소를 배출하고 있다. 해당 장비의 배출가스 저감장치는 현재 시범 운영 중인 TC DPF(Diesel Particulate Filter)이다. 해당 저감장치의 설치비는 대당 1억 3천만 원이며, 필터교체 및 클리닝 등의 유지비용은 1,950만 원이다.⁷⁷⁾

기준 대안의 RTG의 탄소 저감목표는 1,059tCO/195만 TEU이며, 이를 저감하기 위해 필요한 저감장치는 14대로 산출되었다.

77) TC DPF 제작 및 설치업체 H사와의 전화 인터뷰(2022. 4. 1)를 통해 확인한 비용임

〈표 3-27〉 장치장비 저감목표에 따른 저감비

구분	장비수	배출량 (tCO ₂ /1 95만 TEU)	저감 목표량 (tCO ₂ /1 95만 TEU)	실제 배출량 (tCO ₂ /1 95만 TEU)	단위 장비 배출량 (tCO ₂ / 대)	필요 저감 장치 수 (개)	저감 장치 단가 (백만 원)	저감 장치 총금액 (백만 원)
기준 대안	78	35	1,059	1,177	83	14	130	1,837
대안 1	67	35	0	-	-	-	-	-
대안 2 (목표)	44	35	0	-	-	-	-	-

자료: 저자 작성

3) B/E 분석

장비 설치는 2022년에 완료하고, 2023년부터 2053년까지 30년 운영하는 것으로 하여 B/E 분석을 실시하였다.

비용효과 분석을 수행하기 위한 사회적 할인율은 기획재정부의 「예비타당성조사 수행 총괄지침」에 의거하여 4.5%로 설정한다. 또한, 할인되는 분석의 기준일은 해당 사업의 분석이 착수된 전년도 말로 설정하기 때문에 분석기준 연도는 2021년으로 설정한다.

기준 대안인 비자동화 터미널은 장비비 2,666억 원, 에너지비 3,554억 원, 저감장치비 84억 원을 적용하여 30년간 운영 시 총비용은 6,303억 원으로 분석되었다.

〈표 3-28〉 기준 대안(비자동화 터미널) 비용 분석 결과

단위: 억 원

연도	장비비	에너지비	저감	합계
2022	1,698.3	0.0	0.0	1,698.3
2023	0.0	114.6	23.1	137.7
2024	0.0	114.6	0.0	114.6

연도	장비비	에너지비	저감	합계
2025	0.0	114.6	4.3	119.0
2026	0.0	114.6	0.0	114.6
2027	0.0	114.6	4.3	119.0
2028	0.0	114.6	0.0	114.6
2029	0.0	114.6	4.3	119.0
2030	0.0	114.6	0.0	114.6
2031	0.0	114.6	4.3	119.0
2032	0.0	114.6	0.0	114.6
2033	78.8	114.6	4.3	197.8
2034	0.0	114.6	0.0	114.6
2035	0.0	114.6	4.3	119.0
2036	0.0	114.6	0.0	114.6
2037	0.0	114.6	4.3	119.0
2038	0.0	114.6	0.0	114.6
2039	0.0	114.6	4.3	119.0
2040	0.0	114.6	0.0	114.6
2041	0.0	114.6	4.3	119.0
2042	0.0	114.6	0.0	114.6
2043	1,698.3	114.6	4.3	1,817.2
2044	0.0	114.6	0.0	114.6
2045	0.0	114.6	4.3	119.0
2046	0.0	114.6	0.0	114.6
2047	0.0	114.6	4.3	119.0
2048	0.0	114.6	0.0	114.6
2049	0.0	114.6	4.3	119.0
2050	0.0	114.6	0.0	114.6
2051	0.0	114.6	4.3	119.0
2052	0.0	114.6	0.0	114.6
2053	-809.7	114.6	0.0	-695.1
합계	2,665.6	3,554.0	83.6	6,303.2

자료: 저자 작성

대안 1인 반자동화 터미널은 장비비 2,717억 원, 에너지비 2,646억 원, 저감장치비 24억 원을 적용하여 30년간 운영 시 총비용은 5,387억 원으로 분석되었다.

〈표 3-29〉 대안 1(반자동화 터미널) 비용 분석 결과

단위: 억 원

연도	장비비	에너지비	저감	합계
2022	1,743.7	0.0	0.0	1,743.7
2023	0.0	85.4	4.0	89.4
2024	0.0	85.4	0.0	85.4
2025	0.0	85.4	1.4	86.8
2026	0.0	85.4	0.0	85.4
2027	0.0	85.4	1.4	86.8
2028	0.0	85.4	0.0	85.4
2029	0.0	85.4	1.4	86.8
2030	0.0	85.4	0.0	85.4
2031	0.0	85.4	1.4	86.8
2032	0.0	85.4	0.0	85.4
2033	67.7	85.4	1.4	154.4
2034	0.0	85.4	0.0	85.4
2035	0.0	85.4	1.4	86.8
2036	0.0	85.4	0.0	85.4
2037	0.0	85.4	1.4	86.8
2038	0.0	85.4	0.0	85.4
2039	0.0	85.4	1.4	86.8
2040	0.0	85.4	0.0	85.4
2041	0.0	85.4	1.4	86.8
2042	0.0	85.4	0.0	85.4
2043	1,743.7	85.4	1.4	1,830.4
2044	0.0	85.4	0.0	85.4
2045	0.0	85.4	1.4	86.8
2046	0.0	85.4	0.0	85.4
2047	0.0	85.4	1.4	86.8
2048	0.0	85.4	0.0	85.4
2049	0.0	85.4	1.4	86.8
2050	0.0	85.4	0.0	85.4
2051	0.0	85.4	1.4	86.8
2052	0.0	85.4	0.0	85.4
2053	-838.0	85.4	0.0	-752.6
합계	2,717.0	2,645.9	23.6	5,386.5

자료: 저자 작성

대안 2인 완전자동화 터미널은 장비비 3,582억 원, 에너지비 1,396억 원을 적용하여 30년간 운영 시 총비용은 4,978억 원으로 분석되었다.

〈표 3-30〉 대안 2(완전자동화 터미널) 비용 분석 결과

단위: 억 원

연도	장비비	에너지비	합계
2022	2,080.0	0.0	2,080.0
2023	0.0	45.0	45.0
2024	0.0	45.0	45.0
2025	0.0	45.0	45.0
2026	0.0	45.0	45.0
2027	0.0	45.0	45.0
2028	0.0	45.0	45.0
2029	0.0	45.0	45.0
2030	0.0	45.0	45.0
2031	0.0	45.0	45.0
2032	0.0	45.0	45.0
2033	308.0	45.0	353.0
2034	0.0	45.0	45.0
2035	0.0	45.0	45.0
2036	0.0	45.0	45.0
2037	0.0	45.0	45.0
2038	0.0	45.0	45.0
2039	0.0	45.0	45.0
2040	0.0	45.0	45.0
2041	0.0	45.0	45.0
2042	0.0	45.0	45.0
2043	2,080.0	45.0	2,125.0
2044	0.0	45.0	45.0
2045	0.0	45.0	45.0
2046	0.0	45.0	45.0
2047	0.0	45.0	45.0
2048	0.0	45.0	45.0
2049	0.0	45.0	45.0
2050	0.0	45.0	45.0
2051	0.0	45.0	45.0
2052	0.0	45.0	45.0
2053	-886.0	45.0	-841.0
합계	3,582.0	1,395.5	4,977.5

자료: 저자 작성

각 대안별 장비설치 및 30년간 운영비용을 현재 가치로 환산한 결과 기준 대안인 비자동화 터미널은 3,985억 원이며, 반자동화 터미널인 대안 1은 3,531억 원, 완전자동화 터미널인 대안 2는 3,458억 원으로 분석되어 동일한 탄소배출량 5,804tCO₂/195만 TEU를 처리하기 위해 가장 적은 비용이 드는 터미널은 완전자동화 터미널인 대안 2로 도출되었다.

총비용의 변화를 대안별로 살펴보면, 기준 대안에서 대안 1로 이행시 운영설비비의 증가분은 커지나 그에 따른 운영비의 감소분, 특히 인건비의 감소분이 크지 않아 총비용이 증가하였다. 하지만 대안 2로 이행하면서 인건비의 감소분이 크게 나타나 대안 2의 총비용이 기준 대안과 대안 1에 비해 적은 것으로 분석되었다.

〈표 3-31〉 비용효과 분석 결과

단위: 억 원

구분	비자동화 터미널(A)	반자동화 터미널(B)	완전자동화 터미널(C)
장비비 (명목가치)	6,303	5,387	4,978
비용 (현재가치)	3,985	3,531	3,458
비용절감액 (현재가치)	(A-B)	(A-C)	(B-C)
	455	527	73

자료: 저자 작성

제4절 소결

본 장에서는 터미널의 스마트화 유형에 따른 장비별 이산화탄소 배출량 원단위를 산정하여 가상의 터미널을 구축했을 경우의 이산화탄소 배출량과 이를 바탕으로 한 비용효과 분석을 수행했다.

배출량 산정의 경우 비교적 공신력 있고 명확한 문헌자료를 활용하고자 했으며, 이를 바탕으로 산정된 탄소배출량은 연간 하역능력 195만 TEU를 처리 시 비자동화 터미널(싱글트롤리-야드크레인(유류)-YT(유류))이 가장 많은 이산화탄소를 배출(32,308tCO₂)하는 것으로 나타났다. 감축 비율을 살펴보면 비자동화에서 반자동화로 갈수록 16%의 이산화탄소 감축효과가 있는 것으로 나타났으며, 완전자동화 터미널은 비자동화 대비 34%, 반자동화 대비 22%의 배출량 감축효과가 있는 것으로 나타났다.

개별터미널은 운영시스템, 배치, 투입장비 대수, 작업방법, 취급물량의 특성이 모두 다르며, 같은 종류의 장비라도 생산자, 적용 제원 등이 모두 다르다. 따라서, 본 연구에서 제시한 원단위가 100% 맞다고 얘기할 수 없으나, 비자동화 터미널, 반자동화 터미널, 완전자동화 터미널의 경우 TC 또는 YT의 에너지 종류별 차이 외는 컨테이너터미널들의 운영형태, 방식이 유사하고 사용하는 장비들의 제원 등이 큰 차이가 없으므로, 본 연구에서 제시하고 있는 원단위와 도출된 결과는 의사결정의 참고자료로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

또한, 탄소 저감효과를 반영하기 위해 대안별 구축비용에 탄소배출 금액을 추가적으로 고려한 비용효과 분석을 수행했다. 각 대안별 장비설치 및 30년간 운영비용을 현재가치로 환산한 결과 기준 대안인 비자동화 터미널은 3,985억 원이며, 반자동화 터미널인 대안 1은 3,531억 원, 완전자동화 터미널인 대안 2는 3,458억 원으로 분석되어 동일한 195만 TEU를 처리하기 위해 가장 적은 비용이 드는 터미널은 완전자동화 터미널인 대안 2로 나타났다.

04

결론 및 정책제언

제1절 요약 및 결론

본 연구에서는 국내 항만의 스마트화 추진과 항만부문의 탄소배출 저감 정책이 유기적으로 연계될 수 있는 정량적인 근거자료 제시와 더불어 관련된 정책적인 제언을 수행하는 것을 목표로 하여, 유사 해외 사례 검토와 함께 스마트항만 구축에 따른 이산화탄소 배출량 저감효과를 장비별 원단위로 분석했다. 또한 이를 바탕으로 장비의 동력 전환에 따른 경제성을 이산화탄소배출량 감소 효과에 한정하여 비용효과 분석을 수행했다.

제1장에서는 연구의 배경 및 필요성 제시와 더불어 관련된 선행연구 검토했다. 특히 혼재되어 사용되고 있는 스마트항만과 자동화항만의 정의에 대한 고찰에서부터 에너지원에 따른 탄소배출량 변화, 항만분야 탄소배출량 산정과 관련된 연구들을 전반적으로 검토함으로써 본 연구의 실증분석을 위한 유용한 기초자료로 활용했다.

제2장에서는 에너지, 산업, 건설, 교통 등 각 분야별로 수립된 탄소중립과 관련된 주요 정책과 그 내용을 살펴보고, 항만 분야 주요 정책과의 연관성을 도출함으로써 탄소중립시대에 항만의 대응방향에 대한 시사점을

찾고자 했다. 더불어 해외 항만의 탄소배출량 저감 사례 검토를 통해 실제 장비의 전환 등에 대해 실증분석을 통한 결괏값을 제시하기보다는 추정을 통한 결과이므로 실제 사례로 검토하는 데에는 한계가 존재함을 확인했다.

제3장에서는 터미널의 스마트화 유형에 따른 장비별 이산화탄소 배출량 원단위를 산정하여 가상의 터미널을 구축했을 경우의 이산화탄소 배출량과 이를 바탕으로 한 비용효과 분석을 수행했다. 도출된 배출량은 연간 하역 능력 195만 TEU를 처리를 가정했을 경우 유류식 야드크레인 및 이송장비를 사용하는 비자동화 터미널의 이산화탄소 배출량이 가장 많은 것으로 나타났다. 감축 비율은 비자동화 대비 반자동화가 16% 감소, 완전자동화 터미널은 비자동화 대비 34%, 반자동화 대비 22%의 배출량 감축효과가 있는 것으로 나타났다. 이와 더불어 탄소 저감효과를 반영하기 위해 대안별 구축비용에 탄소배출 금액을 추가적으로 고려한 비용효과 분석을 수행했다. 각 대안별 장비설치 및 30년간 운영비용을 현재가치로 환산한 결과 기준 대안인 비자동화 터미널은 6,310억 원이며, 반자동화 터미널은 5,371억 원, 완전자동화 터미널인은 4,977억 원으로 분석됨에 따라 동일한 물동량(본 연구에서는 195만 TEU)을 처리하기 위해 가장 적은 비용이 드는 터미널은 완전자동화 터미널로 나타났다.

이에 따라 향후 스마트항만의 친환경성을 확보하기 위해서는 기존 유류식 장비 도입을 지양하고 전기 및 기타 친환경 연료를 사용하는 장비의 도입·전환이 필요하다는 결론에 도달할 수 있었다. 그리고 본 연구결과는 향후 스마트항만의 친환경 효과에 대한 정량적인 근거자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 항만장비 도입에는 막대한 비용이 소요되므로 기존 터미널은 연료 구동방식의 전환 및 배출저감장치 부착 등 비교적 적은 비용이 소요되는 방식으로 접근할 필요도 있다. 더불어 탄소 저감에서 한발 더 나아가

‘2050 탄소중립’ 실현을 위해서는 무탄소배출이 가능한 수소터미널 등으로의 개발 방향 설정도 고려되어야 할 것이다. 또한 전기 이외의 다양한 친환경 에너지원 도입과 함께 효율적인 에너지 관리를 통한 친환경과 지능화를 동시에 달성하도록 하는 정책 기반 마련도 필요하다.

제2절 정책제언

1. 무탄소배출 에너지원 활용 관련

탄소중립과 관련된 정책들과 항만부문의 연계성을 찾아보면 탄소배출 저감을 위해 항만 내 에너지원으로 수소를 비롯한 신재생에너지가 고려될 수 있다. 이에 따라 항만 이송장비에 전기 및 수소를 활용한 구동방식 도입 확대가 가능해진다. 현재 항만에서 구동되는 장비는 안벽 크레인부터 야드 트랙터에 이르기까지 다양하다. 현재 안벽 크레인의 경우 전기식이며 디젤 연료를 사용하고 있는 야드트랙터는 LNG로 연료를 전환 중이며 야드크레인 또한 대부분 전기식으로 구동되고 있다. 해외 스마트항만의 경우 무인 이송장비 대부분이 전기식으로 구동되고 있다.

항만 내 장비는 대부분 규모가 크고 특히 컨테이너 양적하 시 가장 많은 에너지를 소모하기 때문에 에너지를 전력으로 변환하여도 전력사용량에 따른 탄소배출은 존재한다. 항만은 발전설비, 육상운송 등과 더불어 잠재적인 수소사용 분야로 각광받고 있음에 따라 수소와 같은 무탄소배출이 가능한 연료의 도입과 이를 활용한 장비 구동기술 도입이 요구된다. 다만, 해당 에너지원 적용 시의 효과 및 영향에 대해서는 실증 분석이 선행되어야 한

다.⁷⁸⁾

현재 전력 소비 저감을 위해서 수소연료전지를 통한 친환경 전력을 공급하는 방안 등 다양한 전략적인 에너지 효율화 방법이 제시되고 있다. 일례로 세계적인 항만장비 공급업체인 중국의 ZPMC사는 2021년에 항만의 화석연료 저감을 위해 세계 최초로 수소연료전지 이동식 크레인을 시험 가동했다. 이는 고출력 디젤 발전기를 통해 작동되는 기존 이동식 크레인과의 비교했을 때 연간 평균 이산화탄소배출량을 300톤 이상 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다.⁷⁹⁾

이렇듯 항만 내 전기식 구동장비뿐만 아니라 수소와 같은 무탄소배출이 가능한 친환경 에너지원의 활용을 통해 탄소중립 관련 정책과의 정합성을 확보하기 위해서는 해당 에너지원 활용을 위한 사전 검증과 더불어 인적·물적 인프라 구축 또한 필요할 것이다.

2. 체계적인 탄소배출원 목록 및 실시간 모니터링 시스템 구축

항만 활동에 의한 탄소 배출량 산정 시, 관련된 데이터의 부재 또는 존재하는 데이터의 정확도 문제 등으로 인해 정확한 수치를 도출하는 데 애로사항이 존재한다. 이러한 문제점의 개선을 위해 항만 내 배출활동에 대한 탄소배출원 목록 및 실시간 모니터링 시스템의 구축 또한 필요하며 그 이유와 구체적 내용은 다음과 같다.

첫째, 기존 항만 통계자료는 육상과 해상의 공간 범위를 정확하게 구분하기 어려워 대부분 항만 전체를 대상으로 하고 있다. 일부 데이터에 대해서는 운행사 또는 항만별로 추정이 가능할 수도 있으나 터미널 내 해측

78) 본 연구에서는 수소저장 및 인수기지로서의 항만의 역할은 별도로 다루지 않음

79) 월간수소경제(검색일: 2021. 12. 10)

및 육측 작업영역별로 명확하게 구분하기에는 한계가 있다. 이에 따라 현재 항만 내에서만 운영하는 배출원에 대해 별도로 산정하고 관리할 필요가 있다.

둘째, 실제 항만 내에서 이용하는 장비가 많지만 수집 가능한 하역장비의 한계가 있다. 그중에서 임대장비도 항만별로 상당 부분을 차지하고 있는데, 임대업체 정보가 항만협회에 등록되어 있지 않아 해당 장비 정보 입수에 대한 문제점이 존재한다. 따라서 하역장비의 임대 비중과 관련한 정확한 정보 확보를 위해 운영사가 임대장비에 대한 세부정보를 확보할 수 있도록 하거나 전수조사(정기 또는 부정기)를 실시하여 각 항만에서 활용하고 있는 장비 보유현황 및 가동현황을 파악할 수 있도록 정책당국 주도의 가이드라인이 필요하다.

3. 스마트항만과 연계한 친환경항만 전문인력 양성 방안 마련 필요

스마트항만 구축 과정에서 개발 및 활용되는 다양한 기술에 대한 숙련도 높은 인력은 항만산업의 발전을 위한 필수적인 요소이다. 스마트항만은 앞서 정의한 바와 같이 디지털화뿐만 아니라 친환경, 안전, 보안에 대한 요소도 포함하고 있다. 따라서 스마트항만 전문인력의 양성 방안은 기존의 장비 구동방식 교육에서 벗어나 4차 산업혁명 기술의 활용이 가능한 혁신인재 양성으로의 패러다임 전환이 필요하다.

특히 디지털화를 통한 초연결성이 강조되고 있는 스마트항만에서의 탄소저감 노력은 친환경 데이터 플랫폼 구축을 통해 구현될 수 있다. AI와 빅데이터가 상용화된 기술로 적용되는 디지털 항만에서는 항만 내 오염물질 배출 관련 빅데이터 수집 및 이를 활용한 예측과 대응 또한 필수적이다.

이에 따라 향후 해당 기술과 관련된 일자리 수요에 대비하여 친환경 스마트항만과 연계한 AI, 빅데이터, 머신러닝 등과 같은 4차 산업혁명 핵심 기술을 고등교육과정 등에 도입함으로써 맞춤형 인재양성이 필요할 것으로 판단된다.

제3절 연구의 한계 및 향후 연구과제 제안

본 연구는 스마트항만의 장비 자동화 부분에 초점을 두고 동력 전환을 통한 탄소배출량 저감효과를 분석하였다. 분석 결과 안벽 크레인과 장치장 크레인은 원격조종식, 이송장비는 AGV를 구동하는 완전자동화 터미널의 배출량이 가장 적은 것으로 나타났다.⁸⁰⁾ 그러나 본 연구에서 활용한 자료는 터미널이 실제 운영될 때 적용될 수 있는 다양하고 고도화된 자동화 알고리즘이나 운영상 특징을 반영하지 못하는 한계가 있다. 또한 문헌에서 확인한 에너지사용량은 터미널의 1년 운영자료가 아닌 선박 1척 등에 대한 모의실험 결과로 실제 운영상의 실적 데이터가 충분히 반영되지 않았다.

따라서 단순히 전기식 자동화 장비 도입뿐만 아니라 자동화 알고리즘 고도화 및 운영 최적화를 통해 에너지 효율성을 높일 필요가 있다. 더불어 이에 따른 탄소배출량 최소화를 달성하기 위해 실제 적용될 알고리즘과 운영특성을 최대한 반영한 고도화된 모의실험을 수행하고, 정량적 분석결과를 도출해야 한다. 아울러 본 연구에서는 전력이 주 에너지원일 경우를 분석했으나 수소, 바이오매스 등 차세대 에너지원을 추가적으로 고려·분석함

80) 반자동화 및 완전자동화 터미널에 비해 규모 및 중량이 상대적으로 작아서 에너지 사용량도 적은 비자동화 터미널의 안벽 크레인 사례는 제외됨.

으로써 동일한 운영최적화 수준에 따른 에너지원별 탄소배출량을 더욱 정확하게 비교·분석할 필요가 있다.

이를 위해 2021년 11월 기준 항만자동화 테스트베드 구축사업이 통과된 광양항 테스트베드를 활용하여 자동화 장비 운용 및 운영의 최적화 분석과 더불어 현재 국내 항만 장비에 적용 가능한 에너지원에 대한 심화 검토가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

국내 문헌

- 관계부처합동(2020), 「2050 탄소중립 추진전략」
- 관계부처합동(2021), 「스마트 해운물류 확산전략」
- 국토교통부(2021), 「국토교통 탄소중립 로드맵」
- 국토해양부(2008), 『저탄소 항만 구축 방안에 관한 연구』
- 김동건(2012), 『비용·편익분석(제4판)』, 박영사.
- 김정권·최주석·이미숙(2017), 「R&D 예비타당성조사를 위한 비용효과분석 적용방안 마련 연구」, 『한국혁신학회지』, 12(3), pp. 1~22.
- 김태균·김환성(2014), 「우리나라 항만특성에 맞는 그린포트정책 수립에 관한 연구 -AHP를 이용한 울산항 그린포트 정책 우선순위 개발」, 『한국항해항만학회지』, 38 (5), pp. 549~559.
- 산업통상자원부(2021), 「에너지 탄소중립 혁신전략」
- 산업통상자원부(2021), 「탄소중립 산업 대전환 추진전략」
- 서울대학교(2020), 「R&D 예비타당성조사 비용효과분석 방법론 탐색연구」, 서울대학교 산학협력단.
- 송계의·한철환(2007), 「항만의 환경오염 저감방안에 관한 연구」, 『한국항만경제학회지』, 23 (1), pp. 95~113.
- 신승식(2015), 「항만건설 예비타당성조사의 편익산정 개선에 대한 연구」, 『한국항만경제학회지』, 31(4), pp. 17~38.

에너지경제연구원(2008), 「저탄소 경제시스템 구축전략 연구」

이정욱·이향숙(2021), 「인천항의 대기오염물질 배출량 산정 연구」, 『한국항만경제학회지』, 37 (1), pp. 143~157.

인천항만공사(2008), 『인천신항 1단계 사업 추진전략 수립연구』

정태원·이용주(2018), 「그린항만 구축을 위한 정책우선순위 평가-부산항과 인천항을 중심으로-」, 『해운물류연구』, 34 (4), pp. 657~675.

한국개발연구원(2014), 『항만부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 연구(제3판)』.

한국과학기술기획평가원(2010), 『온라인 전기자동차기반 수송시스템 혁신사업 예비타당성조사 보고서』

한국과학기술기획평가원(2017), 『국가연구개발사업의 비용효과 분석 방향 연구-시스템 개발사업을 중심으로 -』

한국과학기술기획평가원(2020a), 『R&D 예비타당성조사 비용효과분석 방법론 탐색 연구』

한국과학기술기획평가원(2020b), 『국가연구개발사업 예비타당성조사 수행 세부지침』

한국해양수산개발원(2003a), 『환경친화적 항만개발 및 운영방안』

한국해양수산개발원(2003b), 『항만개발사업의 경제적 타당성 평가의 개선방안 연구』

한국해양수산개발원(2009)a, 『우리나라 항만 및 배후물류단지의 친환경 물류체계 구축에 관한 연구』

한국해양수산개발원(2009b), 『항만분야 기후변화협약 대응방안』

한국해양수산개발원(2011), 『녹색기술 기반의 미래항만 개발전략과 효과분석-컨테이너 터미널을 중심으로-』

한국해양수산개발원(2015), 『항만분야 예비타당성조사의 경제성평가 기준 개선 연구』

해양수산부(2019a), 『고생산성 자동화컨테이너 터미널 구축 추진 전략 연구』

해양수산부(2019b), 「스마트해상물류 체계 구축전략」

해양수산부(2019c), 「해양수산 스마트화 추진전략」

해양수산부(2020a), 「2030 항만정책 방향과 추진전략」

해양수산부(2020b), 『스마트항만 육성방안연구』

해양수산부(2021), 「해양수산분야 탄소중립 로드맵」

국외 문헌

- 국토교통성(2009), 『항만에서의 온실가스 효과, 가스배출 삭감계획 작성 가이드라인』
- A. Hirvonen, H. Salonen & P. Soderberg(2017), “Reducing air emissions in a container terminal”, Kalmar.
- Acciaro, Michele, *et al.*(2014), “Environmental sustainability in seaports: a framework for successful innovation.” *Maritime Policy & Management*, 41.5, pp. 480-500.
- Berns *et al.*(2017), “Smart Ports: Point of View”, Deloitte Port Services.
- D. Sartori *et al.*(2014), “Guide to Cost-benefit Analysis of Investment Projects”, European Commission.
- EEA(2019), 『EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook』.
- EPA(2020), 『Port Emissions Inventory Guidance』.
- H. Geerlings & J.H.R Van Duin(2011), “Estimating CO₂ footprints of container terminal port-operations”, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 6, pp. 459-473.
- IAPH(2010), 『IAPH Tool Box Port clean air program』.
- J.P.Rodrigue & T. Notteboom(2021), “Automation in Container Port Systems and Management”, *TR News*, pp. 20-25.
- J. Sim(2017), “A carbon emission evaluation model for a container terminal”, *Journal of Cleaner Production*, 186, pp. 526-533.
- J.K. Siror, S. Huanye & W. Dong(2011), “RFID based model for an intelligent port”, *Computers in Industry*, 62, pp. 795-810.
- K. Sakaki & K. Yamada(1997), “CO₂ mitigation by new energy systems”, *Energy Conversion and Management*, 38, pp. S655-S660.
- M. Norsworthy *et al.*(2016), “Clean Air Guide for Ports & Terminals”, Environmental Defense Fund.
- Marta, G.A. *et al.* (2018), “A global review of the hinterland dimension of green port strategies”, *Transportation Research Part D*, 59, pp. 23-34.
- P. Marti *et al.*(2017), “Benchmark dynamics in the environmental performance of

-
- ports", *Marine Pollution Bulletin*, 121, pp. 111-119.
- Martín-Soberón A.M. *et al.*(2014), "Automation in port container terminals", *Social and Behavioral Sciences*, 160, pp. 195-204.
- Muhammad A.B. *et al.*(2021), "Evaluation of CO₂ emissions and energy use with different container terminal layouts", *Nature*. pp.1-14.
- Nanxi W. *et al.*(2019), "Analysis and Design of Typical Automated Container Terminals Layout Considering Carbon Emissions", *sustainability*, 11, 2957.
- N. Sifakis & T. Tsoutsos(2020), "Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept", *Journal of Cleaner Production*, 286. 125448.
- Pema(2016), 『Container Terminal Automation』.
- W. Peng *et al.*(2018), "A simulation-based research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals".
- T. Rattaporn & Y.C. Yang(2019), "Environmental Performance Indicators for Green Port Policy Evaluation: Case Study of Laem Chabang Port", *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 35(1), pp. 63-69.
- Rodrigo González R. *et al.*(2020), "Preparation of a Smart Port Indicator and Calculation of a Ranking for the Spanish Port System", *Logistics*, 4, p. 9.
- Sahar A. *et al.*(2020), "Calculating the Carbon Footprint in ports by using a standardized tool", *Science of The Total Environment*, 734(4), 139407.
- Wang K. J. *et al.*(2018), "Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, pp. 480-493.
- Wang P. *et al.*(2019), "Alignments between strategic content and process structure: the case of container terminal service process automation", *Maritime Economics & Logistics*, 21, pp. 543-558
- Wilmsmeier, Gordon - Spengler, Thomas(2016), "Energy consumption and container terminal efficiency", *ECLAC*, pp. 1-10.
- Y. Saanen(2016), AGV Versus Lift AGV Versus ALV: A Qualitative and Quantitative Comparison", *Port Technology*. 70, pp. 30-35.
- Zhong *et al.* (2019), "Carbon emissions reduction in China's container terminals:

Optimal strategy formulation and the influence of carbon emissions trading”,
Journal of Cleaner Production, 219, pp. 518-530.

인터넷 자료

네이버 외교통상용어사전, 「대기오염물질의 장거리 이동에 관한 협약」, <https://terms.naver.com/entry.naver?docId=637121&contentsParamInfo=isList%3Dtrue%26navCategoryId%3D42143&cid=42143&categoryId=42143> (검색일: 2022. 1. 10.)

법제처 국가법령정보센터, www.law.go.kr (검색일: 2022. 1. 14)

연합뉴스(2019. 6. 22.), 「부산신항에 일부 자동화 원격조종 크레인 설치한다」, <https://www.yna.co.kr/view/AKR20190619103300051> (검색일: 2022. 1. 14)

월간수소경제(2021. 11. 26.), 「中 상하이 항만서 ‘연료전지 크레인’ 시험 가동」, <https://h2news.kr/mobile/article.html?no=9424>(검색일: 2021. 12. 10)

카고뉴스(2008. 6. 5.), 「부산신항 한진해운 터미널 야드장비 1차설치 완료」, <http://www.cargonews.co.kr/news/articleView.html?idxno=9010>(검색일: 2021. 9. 29.)

코리아쉬핑가제트(2014. 10. 14.), 「최고의 항만생산성을 자랑합니다」, https://www.ksg.co.kr/news/news_print.jsp?bbsID=news&pNum=98043 (검색일: 2021. 9. 29)

한국에너지관리공단 에너지온실가스 종합정보 플랫폼, <https://tips.energy.or.kr> (검색일: 2021. 12. 14)

한국해운신문(2019.11.11), 「4차 산업혁명 이끌 해양스마트화 본격 시동」<http://www.maritimepress.co.kr/news/articleView.html?idxno=124243>(검색일: 2022. 1. 10)

환경부 홈페이지, <http://me.go.kr/home/web/index.do?menuId=10260> (검색일: 2021. 12. 14)

환경부 그린캠퍼스, <https://www.gihoo.or.kr/greencampus/intro/viewIntro05.do> (검색일: 2021. 12. 14)

현대해양(2021. 6. 9.), 「뒤쳐진 스마트항만 건설」, <http://www.hdhy.co.kr/news/articleView.html?idxno=14733> (검색일: 2021. 10. 1)

해사신문(2019.11.11.) 「선원 없는 자율운항선박 2025년까지 개발할 것」, <http://www.haesanews.com/news/articleView.html?idxno=87812>(검색일: 2022. 1. 10)

해양수산부 보도자료(2019.11.11.), 「4차 산업혁명 시대 이끌 해양수산 스마트화 본격 시동」<https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=27859&boardKey=10&menuKey=376¤tPageNo=1>(검색일: 2022. 1. 10)

Reuters, 「Singapore port authority launches \$90 mln decarbonisation fund」, <https://www.reuters.com/article/singapore-shipping-idINL1N2ME0FR>(검색일: 2021. 11. 26)

AGVblog, 「AGV application in 4 major foreign automated ports」, <http://www.agvblog.com/1222.html> (검색일: 2022. 1. 14)

AJOT, 「Port technology, moving up and out」, <https://www.ajot.com/premium/airport-technology-moving-up-and-out> (검색일: 2022. 1. 14)

ECT, 「HUTCHISON PORTS ECT EUROMAX」, <https://www.ect.nl/en/terminals/hutchison-ports-ect-euromax> (검색일: 2022. 1. 14)

IBM, 「What is automation?」, <https://www.ibm.com/topics/automation> (검색일: 2021. 10. 1)

Konecranes, 「AGV」, <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles/agv> (검색일: 2021. 9. 30)

Konecranes, 「Automated RMG (ARMG) System」, <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-rmg-armg-system> (검색일: 2021. 9. 27)

Konecranes, 「Automated RTG (ARTG) System Version 2.0」, <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-rtg-artg-system-version-20> (검색일: 2021. 9. 28)

Konecranes, 「Konecranes Noell A-STRAD」, <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/konecranes-noell-strad> (검색일: 2021. 10. 1)

Konecranes, 「Lift AGV」, <https://www.konecranes.com/equipment/container-handling-equipment/automated-guided-vehicles/agv>

- ding-equipment/automated-guided-vehicles/lift-agv (검색일: 2021. 9. 29)
- Liftech, 「LBCT Crane Procurement—Dual Trolley, Tandem Hoist Cranes」, https://www.liftech.net/liftech_projects/crane-procurement-dual-trolley-tandem-hoist-cranes/ (검색일: 2021. 10. 1)
- MPA, <https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home/maritime-singapore/green-efforts/decarbonisation> (검색일: 2021. 11. 26)
- Nzherald(2019. 2. 16.), 「Ports of Auckland goes driverless to boost container numbers」, <https://www.nzherald.co.nz/business/ports-of-auckland-goes-driverless-to-boost-container-numbers/SVDUHW2YCWKDF4OKSYXVSSBU/> (검색일: 2021. 10. 1)
- Port of Rotterdam, 「Energy Transition」, <https://www.portofrotterdam.com/en/port-future/energy-transition> (검색일: 2021. 11. 15)
- Port Technology(2021. 4. 14), 「What is a Smart Port?」, <https://www.porttechnology.org/news/what-is-a-smart-port/> (검색일: 2021. 10. 1)
- Port Technology(2020. 10. 17), 「SmartPortsBCN: Port of Rotterdam highlights going green and its smart port journey」, <https://www.porttechnology.org/news/smartportsbcn-port-of-rotterdam-highlights-going-green-and-its-smart-port-journey/> (검색일: 2021. 10. 1)
- Riviera Maritime Media(2021. 3. 2.), 「Latest STS container cranes reach new heights of efficiency」, <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/latest-sts-container-cranes-reach-new-heights-of-efficiency-63920> (검색일: 2021. 10. 1)
- SINAY(2021. 5. 28.), 「What is a Smart Port?」, <https://sinay.ai/en/smart-port-101-what-is-a-smart-port/> (검색일: 2021. 10. 1)
- SmartPort, <https://smartport.nl/en/> (검색일: 2021. 11. 15)
- SmartPort, <https://smartport.nl/en/roadmaps-projects/smart-energy-industry/> (검색일: 2021. 11. 12)
- SmartPort, 「Deep Decarbonisation Pathways」, <https://smartport.nl/en/project/deep-decarbonisation-pathways/> (검색일: 2021. 10. 1)
- The Maritime Executive(2015. 4. 28), 「APM Opens Most Advanced Container Terminal」,

<https://www.maritime-executive.com/article/apm-opens-most-advanced-container-terminal> (검색일: 2021. 10. 1)

Youtube, 「Patrick Terminals」, https://www.youtube.com/channel/UC0nez6_999nAnlWne-SkJRw (검색일: 2022. 1. 14)

기본연구보고서 발간목록

Ⅰ 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	수산물산업 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

2020년

01	해양수산업의 지역 간 연관구조 분석	장정인
02	해양수산 분야 기술 대외의존도 분석연구 - 스마트항만을 중심으로 -	전형모
03	지역 해양수산 오픈 플랫폼 구축방안 연구	최지연
04	갯벌 거버넌스 개선방안에 관한 연구	육근형
05	해양환경정책의 능동적 추진을 위한 재원체계 개선 방안 연구	박수진
06	항만 대기환경 관리 표준 및 평가모형 연구	안용성
07	해양수산분야 사회문제해결형 R&D 기반 구축 연구	좌미라
08	해양 유입 하천쓰레기 관리체계 개선방안	이윤정
09	수산식품 품질·안전관리 제도 개선방안 연구	이헌동
10	국제법 변화에 대응한 어선원 안전 및 권리 제고방안 연구	한덕훈
11	스마트 양식 클러스터 추진 방안 수립 연구	이상철
12	해양포유류 보호에 관한 수산업 대응 방안 연구	정명화
13	수산물 수급통계 개선 방안 연구	김수현
14	IMO 온실가스 규제 대응 정책방향 연구	박한선
15	퇴직전문가 활용을 통한 해운업 경쟁력 강화방안 연구	안영균
16	글로벌 선사들의 물류통합화 전략에 대한 국적선사의 대응방안	전형진
17	내항여객운송항로 정책 발전방안 연구	김태일
18	블록체인 기술기반 식품콜드체인 체계 구축 연구	조지성
19	항만자동화 도입 관련 노무 갈등 해소 방안 연구	김찬호
20	스마트항만과 스마트도시 연계 발전 방안 연구	이연경
21	항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구	김성기
22	IMO 규제기반 해수산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해수산업의경제적파급효과분석연구(4차년도) -	박한선
23	국내 항만연계 산업의 가치사슬 및 공급사슬 연계성 강화방안 - 자동차 산업을 중심으로	신수용

수시연구보고서 발간목록

Ⅰ 2021년

01	해양환경산업 육성 방안 연구	한기원
02	선원의 인권 및 근로조건 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

Ⅰ 2020년

01	포스트 코로나 19 해양수산 분야 정책방안	박광서
02	생분해성 어구 사용 활성화 방안 연구	심성현
03	해양법 전문인력 양성 방안 연구	박영길
04	무인도서 해양주권 강화와 이용 활성화를 위한 제도 개선방안	정지호
05	지역 해양수산 재정분권 대응방향	황재희
06	데이터 3법 개정에 따른 항만·물류 데이터 활용도 제고 방안	이기열
07	양식 활어 유통 효율화 방안 연구	마창모
08	해양레저관광사업 추진을 위한 제도정비 방안	홍장원
09	해양바이오기업의 규제 정비 방안 연구	최석문
10	비상체제 시 선원의 안전을 위한 선박-항만-항공 이동경로 구축방안	이혜진

일반연구보고서 발간목록

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

Ⅰ 2020년

01	지역 해양관광 경쟁력 지수 체계화 연구	최일선
02	AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구	강무홍
03	김 중기 수급전망모형 「Gim-MFoS」 구축 연구	허수진
04	중앙 북극 공해 비규제어업방지협정 이행방안 연구	김민수
05	동해 평화관광구역 조성 방안 연구	윤인주
06	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅱ) - 일반 수출입 컨테이너 정보교환방식 중심 -	이연경
07	스트레스 테스트를 통한 우리나라 해운·조선 기업의 안정성 분석	박성화
08	인공지능기반 해상운임예측 연구	황수진
09	국제물류주산업 실태분석 및 경쟁력 제고 방향 연구	최나영환
10	디지털화에 따른 개별 직업의 대체 가능성 추정 연구	박희대
11	시계열 분석을 통한 해운시장 분석 및 예측 연구	고병욱
12	해양수산분야 글로벌 경제효과 분석모형(KMI-GEM) 시범 구축 연구	임병호
13	해운항만물류 인력양성사업 관리운영 제도 개선 방안 연구	이자연

수시연구 2021-12

스마트항만 구축에 따른 탄소저감효과 연구 -동력전환을 중심으로-

인쇄 2022년 3월 29일

발행 2022년 3월 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 영진피앤피 (02-734-3713)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원