

컨테이너 항만 하역장비의 친환경 전환에 따른 탄소 배출저감 효과 분석*

안용성** · 이향숙*** · 이지원****

Analysis of carbon emission reduction effect due to electricity conversion of container port's CHE

Ahn, Yong Sung · Lee, Hyang-Sook · Lee, Ji-Won

Abstract

As the 'Eco-friendly conversion project for Port's CHE(Cargo handling Equipment) ' which has started in 2014 ends in 2024, in addition to the existing 'Low pollution' paradigm to respond to fine dust problems, a full-fledged 'Zero-emission' conversion is to be required to implement 2050 carbon neutrality at the port level. Accordingly, this study calculated the future replacement demand for container handling equipments at the four major domestic ports(Busan, Incheon, Yeosu Gwangyang, and Ulsan), and assumed a scenario where every CHE supposed to eb replaced is electrified intum every year. And then the resulting future emission reduction effect accordingly was calculated and analyzed.

In particular, compared and analyzed the emission outlook applying the life-cycle concept(LCA), which is being adopted as a new emission calculation standard in most industrial fields, and the existing emission calculation concept that only considers direct emissions within the port, to provide more effective implications for the promotion of follow-up conversion projects. According to the analysis results, if the CHE is replaced according to the proposed schedule, it is expected that the existing emissions can be reduced by 79% compared to BAU in 2025 and 97.4% in 2030. However, if the LCA is applied, it is expected to be reduced by only 27.6% by 2030. This suggests that port's CHE must be converted to zero emissions and at the same time establish an Ports' self-sufficient energy grid based on renewable energy.

Key words: CHE, Electricity conversion, Emission forecast, Scenario analysis, LCA

▷ 논문접수: 2024. 05. 22. ▷ 심사완료: 2024. 06. 07. ▷ 게재확정: 2024. 06. 28.

* 본 논문은 한국해양수산개발원이 수행한 해양수산부 『컨테이너 항만 하역장비의 친환경 저탄소 관리 고도화 방안 연구(2023)』의 내용 중 일부를 수정·보완하여 작성되었음

** 한국해양수산개발원 부연구위원, 제1저자, ahnys@kmi.re.kr

*** 인천대학교 동북아물류대학원 교수, 공동저자, hslee@inu.ac.kr

**** 인천대학교 동북아물류대학원 박사과정, 교신저자, jiwonlee@inu.ac.kr

I. 서론

최근 전지구 차원의 탄소중립 달성 목표와 그 시한이 정해지면서, 모든 사회 부문은 2000년 전후부터 점차 강화된 대기오염물질 배출 저감 및 관리를 위한 국내의 규제에 이어 추가적으로 증대되고 있는 탄소중립 이행 압력에 효과적으로 대응하기 위한 탈탄소화 작업을 매우 빠른 수준으로 준비하고 있다.

국제해사기구(IMO)는 국제해운의 주요 대기오염 물질에 대한 배출 제한 규제를 시행하고 점차 기준 및 요건을 확대하는 한편, 2050 탄소중립 구현에 기여하기 위한 방안을 논의 중에 있으며, 유럽연합 위원회(EC)는 2050년까지 모든 산업 분야의 기후중립을 달성하기 위한 정책 패키지 「EU Green Deal」와, 이를 위해 2030년까지 탄소 배출량을 1990년 수준 대비 최소 55%까지 감축하기 위한 입법안 패키지 「Fit for 55」를 발표한 바 있다.

우리 정부 역시, 항만의 미세먼지 배출, 이로 인한 인근지역의 오염을 저감하거나 집중적으로 관리하기 위한 「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」을 제정·시행하고, 선박과 더불어 항만 내 주요 배출원 중 하나인 하역장비에 대해서도 유해가스의 배출을 저감하기 위한 친환경 전환 사업을 추진하고 있다. 이는 '컨테이너 항만의 주요 하역장비(야드트랙터 및 크레인 등)에 대한 저공해 조치'로 요약할 수 있으나, 항만 역시 최근 탄소중립 구현을 위한 이행 스케줄에 맞추어 '무탄소' 또는 배출제로 개념의 새로운 정책 패러다임에 의한 다음 단계의 하역장비 교체사업을 준비해야 하는 시점이다.

본 연구는 국내 컨테이너 항만 하역장비에 대한 현행 '친환경 전환' 정책과정에 따른 한계 및 성과를 식별하고, 이를 바탕으로 이른바 항만의 2050 탄소중립 이행 트랙의 일환인 다음 단계의 전환사업의 추진에 유효한 시사점을 제시하고자 하였다. 이를 위해, 제II장에서는 국내 컨테이너 항만 하역장비의 교체로 인한 배출저감 효과를 평가·전망하기 위해, 시

나리오 분석을 적용하거나 이 과정에서 배출원 단위 개념을 도입·활용한 선행 연구사례들을 검토하였다. 제III장에서는 항만에 대한 친환경 전환 정책과정에서 해당 사업의 성과 및 다음 단계 사업의 지향점을 식별하고, 이에 따른 하역장비의 교체현황 및 특성을 살펴보았다. 제IV장에서는 국내 컨테이너 항만 하역장비의 교체수요 등을 반영하여 새로운 '배출제로 전환' 패러다임의 시나리오를 구성하고, 이에 따른 효과 및 전망을 제시하였다.

II. 이론적 고찰

1. 관련 선행 연구

특정 정책 또는 기술 등의 도입, 시장 및 환경 등 주요 지표의 변화를 반영하는 시나리오를 구성하고 이를 바탕으로 특정 시점의 배출 규모를 예측하거나, 특정 시점의 배출 목표 수준을 설정하고 이를 달성하기 위한 시나리오를 도출하는 방식은 특정 조건의 변화에 따른 효과를 매우 직관적인 수치로 확인할 수 있는 분석틀로, 오랜동안 배출 관리 또는 저감과 관련한 연구 등에서 널리 활용되고 있다.

국제해사기구(IMO)는 '제4차 IMO GHG 연구(2020)'에서 2012년부터 2018년까지 국제해운의 온실가스 배출량을 산정하고, 이를 바탕으로 GDP, 인구, 해상 운송량, 에너지 소비량 변화를 장기적인 경제 및 에너지 시나리오에 반영하여 2050년의 배출량을 추정하였다. 이 과정에서 해양 부문의 에너지 절약 기술, 재생 에너지 및 대체 연료의 사용, 감속 운항 등 4가지 친환경 전략의 도입 가능성을 고려하고, 이를 위해 기준년도인 2030년과 2050년에 대한 개별 전략 및 기술의 시장 보급률 수준을 가정하여 분석하였다.

공간 및 대상을 항만으로 국한하여 부두별, 배출원별, 배출물질별 배출량을 산정하고, 이를 바탕으로

각종 기술적·정책적 조치의 도입에 따른 저감 효과 및 전망 등을 분석한 연구 역시 다수 선행되었다.

조정정 외(2020), 김화영·부이 하이당(2020)은 각각 인천항 하역장비, 그리고 광양항 입출항 컨테이너 선박의 대기오염물질 배출량 산정하고, 이를 항만 내 구역 또는 배출원의 활동 상태 등으로 구분한 배출량을 비교분석하였다. 이정욱·이향숙(2022), 이민우 외(2023)는 인천항 입출항 선박의 배출량을 산정하고 배출규제해역(ECA) 및 연료유 내 황함량 규제조치, 항만 내 속도 저감조치(VSR), 정박 시 배출저감 조치인 AMP 도입 등에 따른 효과를 개별 시나리오 별로 분석하였다. Shi, K.·Weng, J.·Li, G.(2020)는 중국 Shanghai 항만 인근 수역에서 공간별로 단계적으로 적용된 ECA, 즉 선박 연료유 내 황함량 규제 수준의 차이 및 변화를 반영하는 시나리오를 설정하고, 이에 따른 배출저감 효과를 분석하였다.

또한, 산정된 배출자료를 바탕으로 특정 지표에 대한 '배출 원단위'를 도출하고, 이를 활용하여 데이터 구축이 어려운 유사 환경에 적용하거나 범용 정책에 대한 시사점을 분석하기도 하였다.

고지원(2021)은 국내 4대 항만(부산, 인천, 울산, 여수광양)의 하역장비에 의한 대기오염물질 배출량을 산정하고, 해당 부두의 종류별 물동량을 반영하여 배출 원단위(g-pollutant/ton)를 추정하는 한편, 이를 활용하여 국내 전체 하역장비의 배출량 및 기여도를 추정·분석하였다. Jaehun Sim(2018)은 우리나라 전체 항만구역 내 컨테이너 처리과정에서 발생하는 탄소 배출량을 추정하기 위해, 물동량 자료 및 예측치와 연계한 선박·하역장비의 탄소 배출밀도(kg/TEU) 원단위를 도출하여 활용하였다. Daogui Tang et al(2023)은 중국 Chuanshan 항만 내에 정박된 선박과 컨테이너 하역장비의 배출량을 산정하고, 에너지 소비 패턴을 비교분석하였다. 이 과정에서 하역장비의 연료 소비량과 처리된 물동량 지표를 연계하여 TEU당 소비되는 하역장비의 연료 원단위를 추정하고, 이를 바탕으로 Chuanshan 항만의 월별 및 연도

별 전기, 디젤, LNG 사용량 등 에너지 소비량 시나리오를 구성·분석하였다. OKŞAŞ-Olgay.(2023)은 터키 Ambarli 항만의 컨테이너 터미널 하역장비 배출량을 산정하고, 2030년까지 탄소배출량을 추정하기 위한 방안으로 배출 원단위 개념을 활용하였다. 이 과정에서 배출량 자료를 해당 터미널 물동량 추이에 연계하여 배출 원단위(CO₂/TEU)를 도출하고, 이후 물동량 시나리오를 반영하여 배출저감 목표 달성을 위한 전기 전환 수준 및 일정을 제시하였다.

2. 선행연구와의 차별성

최근 특정 시점을 기준으로 산정한 배출자료를 바탕으로, 배출 저감을 위한 주요 조치의 투입에 따른 배출저감 효과를 분석한 연구들이 발표되고 있다. 하지만, 선박과 달리 하역장비의 경우 활동 데이터는 물론 운용 현황조차 파악이나 접근이 매우 제한적이라는 현실적인 이유로 정확한 배출자료의 도출에 어려움이 있었다.

본 연구는 하역장비에 대한 정책 패러다임의 전환에 따른 배출량의 차이를 수치적으로 비교하기 위해, 최근 해양수산부에서 제시한 하역장비별 배출 원단위, 즉 1대당 연간 배출량 정보를 활용하여 우선 국내 4대 주요 항만(부산, 인천, 여수광양, 울산) 컨테이너 부두 하역장비의 운용으로 인한 배출량을 산정하였다. 또한, 이를 해당 항만의 물동량 추이에 연계하여, BAU 및 친환경 교체 시나리오에 따른 미래 배출량을 추정하였다.

특히, 컨테이너 항만 하역장비의 교체 방식 및 시기, 규모를 규정하는 시나리오의 신뢰도를 제고하기 위해, 해양수산부의 등록정보 및 항만공사별 자료를 교차 검토함으로써 등록된 '소유' 장비가 아닌 컨테이너 부두의 실제 '운용' 장비의 현황을 파악하는 한편, 이들의 연식정보를 기준으로 보다 현실적인 교체 연한을 반영함으로써 보다 정확한 하역장비 운용현황 및 교체수요의 산정을 시도하였다.

III. 국내 컨테이너 항만 하역장비 전환 현황

1. 현행 정책과정의 식별

해양수산부는 2014년 컨테이너 항만의 주요 하역장비인 야드트랙터를 대상으로 하는 ‘항만장비 친환경 LNG 연료 교체사업’을 시작으로, 국내 컨테이너 항만의 하역장비를 친환경 방식으로 교체하고 있으며 2024년까지 이른바 ‘저공해’ 조치를 완료하게 된다. 이를 통해 기존의 경유 방식 야드트랙터(Y/T)를 LNG 방식(또는 저공해 엔진)으로 교체하고 트랜스퍼크레인(TC) 등을 전기화하는 한편, 저공해 방식 전환이 어려운 장비에 대해서는 배출저감장치(DPF)를 부착하였다. 이는 당시의 기준에서 기술적으로 충분히 검증된 배출저감 또는 저배출 방식을 활용하여 기 배출 규모를 감축하고자 한 것으로 이해할 수 있다.

하지만, 2050년까지 탄소중립을 달성해야 하는 전 지구적인 목표가 확정된 현 시점의 상황은 새로운 정책 패러다임으로 전환을 요구하고 있다. 이에, 항만·물류는 물론 전산업 분야에서 탄소중립 이행 압력 등을 반영하여 산업 현장의 배출제로화를 구현하기 위해 목표 수준 및 이를 위한 이행방안을 재조정하고 있다. 즉, 과도기적인 대안 에너지 및 기술 위주의 저공해 또는 기 배출의 일부 저감을 목표로 하는 기존 정책 패러다임에서, 전기 및 수소 등 배출제

로(Emission-Zero) 또는 Near Emission-Zero 개념으로 전환하기 위한 새로운 정책 패러다임, 이를 현실화하기 위한 실효적 방안이 필요한 시점이다.

2. 국내 컨테이너 항만 하역장비의 전환

1) 국내 컨테이너 항만 하역장비 현황

국내 컨테이너 항만의 주요 하역장비는 야드트랙터, 트랜스퍼크레인, 갠트리크레인, 스트래들캐리어, 리치스태커, 탑핸들러로 구분할 수 있다. 이 중 야드트랙터, 트랜스퍼크레인, 갠트리크레인, 스트래들캐리어는 「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」 및 시행령을 근거로 해양수산부에서 운영현황 및 배출 등을 관리할 수 있으나, 리치스태커와 탑핸들러는 환경부의 관리대상인 ‘건설장비’로 구분되고 있다.

국내 컨테이너 항만의 하역장비 현황정보는 해양수산부의 도움으로 ‘항만시설장비관리시스템’의 기재 정보를 1차적으로 수집·선별하였다. 이어서, 부산, 인천, 여수광양 및 울산 등 4대 항만공사의 협조를 통해, 항만공사가 파악하고 있는 컨테이너 항만의 하역장비 현황 정보를 수집하고, 이를 다시 ‘항만시설장비관리시스템’의 정보와 대조·선별하여 2023년 기준 실제 운용되고 있는 하역장비의 현황을 반영하도록 하였다.

표 1. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비 운용 현황

분 류	총 합		부산항		인천항		여수광양항		울산항	
	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)
야드트랙터	923	49.4	696	49.6	115	49.8	77	45.8	35	53.0
트랜스퍼크레인	552	29.6	403	28.7	76	32.9	56	33.3	17	25.8
갠트리크레인	183	9.8	132	9.4	21	9.1	23	13.7	7	10.6
스트래들캐리어	71	3.8	71	5.1	-	0.0	-	0.0	-	0.0
리치스태커	71	3.8	44	3.1	10	4.3	12	7.1	5	7.6
탑핸들러	67	3.6	56	4.0	9	3.9	-	0.0	2	3.0
합 계	1,867	100.0	1,402	75.1	231	12.4	168	9.0	66	3.5

자료: 항만시설장비관리시스템(해양수산부), 해당 항만공사별 현황정보를 활용하여 저자 작성

표 2. 4대 주요 항만 컨테이너 하역장비의 연식 현황

연 도	부산항		인천항		여수광양항		울산항		합계	
	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)
2000년 이전	98	7.0	-	0.0	30	17.9	7	10.6	135	7.2
2000년~2005년	201	14.3	16	6.9	41	24.4	-	0.0	258	13.8
2006년~2010년	300	21.4	52	22.5	28	16.7	26	39.4	406	21.7
합계(2010년 이전)	599	42.7	68	29.4	99	58.9	33	50.0	799	42.8
2011년~2015년	200	14.3	38	16.5	39	23.2	19	28.8	296	15.9
2016년~2020년	404	28.8	109	47.2	27	16.1	13	19.7	553	29.6
2020년 이후	199	14.2	16	6.9	3	1.8	1	1.5	219	11.7
합 계	1,402	100.0	231	100.0	168	100.0	66	100.0	1,867	100.0

자료: 항만시설장비관리시스템(해양수산부), 해당 항만공사별 현황정보를 활용하여 저자 작성

국내 주요 4대 항만(부산, 인천, 여수광양, 울산) 전체 컨테이너 부두에서 운용 중인 하역장비 현황을 장비의 종류 및 항만별로 살펴보면 다음의 <표 1>과 같다. 부산항의 하역장비 규모가 주요 4대 항만 전체의 75.1%로 가장 많은 하역장비를 운용하고 있으며, 항만별 환경 및 특성에 따라 다소 차이가 있긴 하지만 대체로 야드트랙터 및 크레인의 운용 규모가 다른 하역장비에 비해서 압도적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

이들 하역장비의 제조연식 현황은 <표 2>와 같으며, 특히 2010년 이전에 제조된 장비가 전체의 42.7% 수준으로 나타나 교체 연한이 이미 경과된 장비의 규모가 적지 않음을 확인할 수 있다. 대형 크레인 및 여타 이송·하역장비 등 용도 및 활동도에 따라서 교체연한의 차이가 있긴 하지만, 인천항을 제외하고는 2010년 이전 년식의 노후장비의 비율이 50% 내외로 나타났다.

표 3. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비 친환경 교체 현황(항만별)

구 분	합계	교체 완료						미조치	
		전기화		배출 저감조치		합계			
		(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)
부산항	1,402	499	35.6	674	48.1	1,173	83.7	229	16.3
인천항	231	93	40.3	126	54.5	219	94.8	12	5.2
여수광양항	168	58	34.5	80	47.6	138	82.1	30	17.9
울산항	66	22	33.3	35	53.0	57	86.4	9	13.6
합 계	1,867	672	36.0	915	49.0	1,587	85.0	280	15.0

자료: 항만시설장비관리시스템(해양수산부), 해당 항만공사별 현황정보를 활용하여 저자 작성

표 4. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비 친환경 교체 현황(항만별)

구 분	합계	교체 완료						미조치	
		전기화		배출 저감조치		합계		(대)	(%)
		(대)	(%)	(대)	(%)	(대)	(%)		
야드트랙터	923	-	0.0	801	86.8	801	86.8	122	13.2
트랜스퍼크레인	552	489	88.6	15	2.7	504	91.3	48	8.7
갠트리크레인	183	183	100.0	-	0.0	183	100.0	-	0.0
스트레들캐리어	71	-	0.0	29	40.8	29	40.8	42	59.2
리치스태커	71	-	0.0	40	56.3	40	56.3	31	43.7
탑핸들러	67	-	0.0	30	44.8	30	44.8	37	55.2
합 계	1,867	672	36.0	915	49.0	1,587	85.0	280	15.0

자료: 항만시설장비관리시스템(해양수산부), 해당 항만공사별 현황정보를 활용하여 저자 작성

2) 국내 컨테이너 항만 하역장비의 전환 특성

국내 컨테이너 항만 하역장비의 교체 현황을 살펴 보면, 전체 하역장비 총 1,867대 중 1,587대는 전기 구동방식으로 교체하거나(672대; 36%), 저감조치(LNG 방식 전환, Tier-4F 이상으로의 전환, POx-NOx 저감장치 부착, DPF 장치 부착, DEF 장치 부착 등)를 적용하였으며(915대; 49%), 여러가지 이유로 미조치된 경우 장비는 280대(15%)로 나타났다.

기존 사업에 따른 '친환경 전환율'은 85%로 현저한 사업성과를 확인할 수 있으나, 이중 배출제로 개념의 전기화 비중은 36% 정도로 크레인 장비에 국한되어 있다. 트랜스퍼크레인과 갠트리크레인은 전기화 위주로 교체가 진행된 반면, 그 외 하역장비는 주로 저공해 엔진 또는 배출저감장치를 부착하는 방식으로 진행되었다.

특히, 크레인 장비 외 하역장비 중 야드트랙터의 친환경 전환율이 86.8%인 반면, 그 외 스트레들캐리어, 리치스태커, 탑핸들러의 전환율은 50% 전후로, 야드트랙터의 전기화와 더불어 이들 장비에 대한 친환경 방식 전환 역시 시급한 것으로 나타났다.

IV. 국내 컨테이너 항만 하역장비의 전환 효과 예측

1. 국내 컨테이너 항만 하역장비의 교체 수요

1) 하역장비별 교체연한

하역장비의 교체연한은 법적으로 명확한 기준으로 정해진 바는 없으나, 법인세의 과세 요건과 절차를 규정한 「법인세법」 하위 항목 시행령에 따른 '유형 고정자산 상각 내용연수표'는 하역장비의 종류와 용도 및 규모 등에 관계없이 '하역설비'를 기계 및 장치군으로 분류하고 15년의 교체연한을 제시하고 있다.

한편, 이태우·임종길(2000)은 컨테이너 터미널의 건설원가, 투자비를 산정하여 터미널의 적정 사용료를 평가하는 과정에서 야드트랙터는 10년, 트랜스퍼크레인 및 갠트리크레인은 15년으로 교체연한을 제시한 바 있으며, 성숙경(2003)은 터미널 운영사의 부두 임대 생산성 제고를 위해 크레인 같은 대형 하역장비의 적정 내용연수를 20년으로 제안하였다. 한국개발연구원(2015), 한국해양수산개발원(2019, 2017) 역시 하역장비 중 크레인은 20년, 그 외 이송하역장

비는 10년의 교체연한을 설정하였다.
본 연구에서는 국내 컨테이너 항만 하역장비의 친환경 전환을 위한 교체수요 산정을 위해, 관련 선행 연구를 참조하는 한편, 주요 항만공사 및 운영사 실무담당자들과의 검토를 통해 장비별 교체연한 기준을 다음과 같이 가정하였다.

표 5. 컨테이너 하역장비 교체연한

구 분	교체연한
야드트랙터	10년
탑핸들러	
리치스태커	
트랜스퍼크레인	20년
갠트리크레인	
스트레들캐리어	

2) 국내 컨테이너 항만 하역장비의 교체 수요 산정
'저공해' 또는 '저탄소' 전환 패러다임이 완료되는

2024년 이후로 예정된 다음 단계 친환경 전환사업의 기본 방향은 '무탄소' 개념의 배출제로 전환으로 요약할 수 있다. 이에 따라서 4대 주요 항만 컨테이너 하역장비의 교체수요는 기존에 교체되었거나 교체 예정인 컨테이너 항만 하역장비의 개별 연식정보를 기준으로 상기 교체연한을 반영하여 후속 친환경 전환사업 시작년도로 예정된 2025년 이후의 하역장비별 교체수요 및 전망을 산정하였다.

결과를 보면, 이미 100% 전기화를 완료한 갠트리 크레인을 제외한 모든 하역장비의 교체 대기수요가 이미 상당수 존재하고 있어, 이들 장비의 본격 전기화 추진의 시급성을 시사한다. 특히, 운용 숫자(대수)로 가장 큰 규모인 야드트랙터의 경우 전기 및 수소 야드트랙터, 이를 활용하는 자동유도차량(AGV), 자율주행차량(IGV) 등이 이미 상용화를 마친 시점임을 감안할 때, 후속 친환경 전환사업에서 이들의 시범 도입 및 본격 운용을 포함할 수 있을 것으로 보인다.

표 6. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비의 교체수요 전망(장비별)

(단위: 대)

구 분	장비 합계	기 전환 완료	교체수요							2025~2030년 합계	2030년 이후
			2025년	2026년	2027년	2028년	2029년	2030년			
야드트랙터	923	-	380	88	133	67	134	543	923	-	
트랜스퍼크레인	552	489	58	-	-	-	1	3	63	2*	
갠트리크레인	183	183	-	-	-	-	-	-	-	-	
스트레들캐리어	71	-	-	-	-	-	-	-	71	71**	
리치스태커	71	-	47	4	1	1	7	24	71	-	
탑핸들러	67	-	45	6	1	8	-	22	67	-	
합 계	1,867	672	530	98	135	76	142	592	1,195	73	

주) * 2041년 교체수요 2대

** 2031년 교체수요 28대; 2040년 교체수요 43대

표 7. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비의 교체수요 전망(항만별)

(단위: 대)

구 분	장비 합계	기 전환 완료	교체수요							
			2025년	2026년	2027년	2028년	2029년	2030년	2025~2030년 합계	2030년 이후
부산항	1,402	499	357	43	127	52	124	475	903	71
인천항	231	93	61	43	7	13	5	77	138	-
여수광양항	168	58	82	1	-	11	13	26	110	2**
울산항	66	22	30	11	1	-	-	14	44	-
합 계	1,867	672	530	98	135	76	142	592	1,195	73

주) * 2031년 교체수요 28대; 2040년 교체수요 43대
 ** 2041년 교체수요 2대

2. 새로운 전환 시나리오의 구성 및 적용

시나리오 분석은 향후 발생할 수 있는 주요 지표의 조건을 가정하여 이로 인한 미래의 변화를 예측하는 방식으로, 본 연구에서는 컨테이너 항만에서 운용 중인 하역장비의 배출제로 전환의 효과를 모사하기 위해 앞서 도출한 교체수요를 반영한 시나리오를 구성하였다.

저공해 전환 또는 배출저감장치 부착 등의 방식으로 '배출의 정도를 저감'하는 데에 방점을 두고 추진되었던 '컨테이너 항만 하역장비 친환경 전환사업'은 2024년 종료된다. 이후 2025년으로 예정된 후속 전환사업의 출범을 고려하여, 전망 기준년도인 2025년(시작년도), 2030년 및 2030년 이후의 하역장비별 교체수요, 즉 각각 해당년도까지 교체연한이 도래한 하역장비 전수(全數)를 전기 구동방식으로 교체하는 것으로, 전기 전환 교체대수를 변수로 하는 시나리오를 구성하였다.

또한 비교분석의 기준을 제공하기 위하여, 현시점 이후 배출 감축을 위한 추가적 노력을 전혀 하지 않는 경우에 대한 개별 전망 기준년도의 이산화탄소 배출추정치(BAU)를 도입하고, 이를 추정하기 위하여 2023년 기준 배출량에 한국해양수산개발원(2022)에서 제시한 컨테이너 물동량 증가율을 적용하였다.

하역장비의 본격 전환에 따른 배출량 추정에서도,

① 전주기적 개념(LCA; Life cycle assessment)을 반영하여 하역장비의 구동을 위한 전기의 생산 및 공급 과정의 배출까지 고려하는 경우와 ② 하역장비의 항만 내 직접 배출만을 고려하는 경우(하역장비가 전기 구동방식인 경우 배출량=0으로 가정)를 다음의 <표 8>과 같이 구분하였다.

표 8. 분석 시나리오의 구성

구 분	내 용
1 BAU	현재 상태 유지
2-1 전기 전환 (LCA)	해당 년도 교체수요 모두 전기 구동방식으로 교체 ※ 전주기적 개념(LCA) 반영
2-2 전기 전환 (직접배출)	해당 년도 교체수요 모두 전기 구동방식으로 교체 ※ 항만 내 직접 배출만을 고려

배출량 추정과정에서는 가장 최신의 해양수산부 공식 자료, 즉 전국 항만의 배출량을 추정하기 위해 제시한 '항만 탄소중립 구축 기본계획(2024)'의 항만 하역장비 유형별 1대당 배출량 정보를 활용하였다. 해당 자료는 컨테이너 항만의 하역장비를 ①이송장비(야드트랙터, 스트래들캐리어), ② 하역장비(리치스태커, 탑핸들러), ③크레인(트랜스퍼크레인, 갠트리크레인)으로 통합·구분하고, 부산항 및 인천항 컨테이너 부두의 장비별 배출량을 운용 하역장비 대수로

나누어, <표 9>와 같이 세가지 유형별 장비 1대당 연간 배출량을 제시하고 있다.

표 9. 장비 유형별 1대당 배출량

구 분	장비명	장비 1대당 배출량(tCO2eq)		
		경유	LNG	전기
이송장비	야드트랙터, 스트레틀캐리어	108.0	82.6	32.4
하역장비	리치스태커, 탑핸들러	123.7	-	37.1
크레인	트랜스퍼크레인	408.4	-	189.2
	갠트리크레인	-	-	382.8

자료: 해양수산부(2024)

3. 분석 결과

2024년 종료되는 해양수산부 ‘컨테이너 항만 하역장비 친환경 전환사업’의 후속사업이 본격 배출제로 전환 개념으로 2025년부터 매년 장비별 교체수요에 대

해서 전기화를 추진하는 시나리오에서, 국내 컨테이너 항만 하역장비의 전체 탄소 배출은 전주기적 개념(LCA)을 적용하는 경우 2025년에는 2023년 이후 BAU(Business As Usual) 대비 15.9%, 2030년에는 27.6%까지 저감할 수 있으며, 항만 내 직접 배출만을 고려하는 경우에는 2025년 79.0%, 2030년에는 97.4%까지 배출저감을 달성할 것으로 예측되었다.

여기에서 주목할만한 점은 하역장비에 대한 본격 전기 전환에도 불구하고, 전주기적 개념으로 배출을 파악하는 경우 배출저감 효과의 예측값이 그리 크지 않다는 데에 있다.

이는 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선, 대형 장비인 크레인과 그 외 장비(이송·하역장비)의 배출저감 효과의 예측값이 큰 차이로 나타나고 있다. 하지만, 트랜스퍼크레인의 전환율 88.6%, 갠트리크레인 100%로 이미 전기화가 충분히 완료된 크레인 장비의 경우, 추후 전기 전환에 의한 저감이 다른 장비에 비해 그리 크지 않다는 점을 고려해야 한다.

표 10. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비의 배출제로 전환 효과(장비별)

장비명	동력	2023년		2025년						2030년					
		하역 장비 (대)	배출량 (tco2eq)	전환 수요 (대)	배출량 (tco2eq)			BAU 대비 저감율 (%)		전환 수요 (대)	배출량 (tco2eq)		BAU 대비 저감율 (%)		
					BAU*	전기 전환**	전기 전환***	전기 전환*	전기 전환**		전기 전환***	전기 전환*	전기 전환**	전기 전환***	
야드 트랙터	경유	422	45,564	310	48,792	23,702	12,950	51.4	73.5	112	55,715	16,715	-	70.0	100.0
	LNG	501	41,364	70	44,295	40,534	38,106	16.9	21.9	431	50,580	19,844	-	60.8	100.0
	합계	923	86,928	380	93,087	64,236	51,056	31.0	45.2	543	106,295	36,558	-	65.6	100.0
스크래들 캐리어	경유	71	7,666	-	8,209	8,209	8,209	-	-	-	9,374	9,374	9,374	-	-
리치 스태커	경유	71	8,785	47	9,407	5,048	3,180	46.3	37.0	24	10,742	3,223	-	70.0	100.0
탑핸들러	경유	67	8,290	45	8,877	4,704	2,915	47.0	38.0	22	10,137	3,041	-	70.0	100.0
트랜스퍼 크레인	경유	63	25,731	58	27,554	13,940	2,187	49.4	92.1	3	31,464	14,577	-	53.7	100.0
	전기	489	92,532	-	99,088	99,088	-	-	100.0	-	113,148	113,148	-	-	100.0
	합계	552	118,263	58	126,643	113,028	2,187	10.8	98.3	3	144,611	127,725	-	11.7	100.0
갠트리 크레인	전기	183	70,044	-	75,007	75,007	-	-	100.0	-	85,649	85,649	-	-	100.0
하역장비	합계	1,867	299,976	530	321,231	270,233	67,547	15.9	79.0	592	366,809	265,570	9,374	27.6	97.4

주) * BAU: 2023년 배출량 × 컨테이너 물동량 증가율(한국해양수산개발원, 2022)

** 전기전환(LCA): 전주기적 관점(LCA)으로 전기 장비 1대당 배출량으로 ‘항만 탄소중립 구축 기본계획(해양수산부, 2024)’ 제시 수치 적용 (표10, 참조)

***전기전환(항만 내 직접 배출): 전기 장비 1대당 ‘배출량=0’으로 적용

표 11. 4대 주요 항만의 컨테이너 하역장비의 배출제로 전환 효과(항만별)

구 분	2023년		전환 수요 (대)	2025년					전환 수요 (대)	2030년				
	하역 장비 (대)	배출량 (tco2eq)		배출량 (tco2eq)		BAU 대비 저감율 (%)		배출량 (tco2eq)		BAU 대비 저감율 (%)				
				BAU*	전기 전환**	전기 전환***	전기 전환***	BAU*		전기 전환***	전기전 환***	전기 전환***	전기 전환***	
합 계	1,867	299,976	530	321,231	270,233	67,547	15.9	79.0	592	366,809	265,570	9,374	27.6	97.4
부산항	1,402	217,131	357	232,516	199,198	51,960	14.3	77.7	475	265,506	196,508	9,374	26.0	96.5
인천항	231	38,063	61	40,760	35,102	9,072	13.9	77.7	77	46,544	33,903	-	27.2	100.0
여수광양항	168	33,802	82	36,197	26,662	4,220	26.3	88.3	26	41,333	27,317	-	33.9	100.0
울산항	66	10,980	30	11,758	9,270	2,296	21.2	80.5	14	13,426	8,823	-	34.3	100.0

주) * BAU: 2023년 배출량 × 컨테이너 물동량 증가율(한국해양수산개발원, 2022)
 ** 전기전환(LCA): 전주기적 관점(LCA)으로 전기 장비 1대당 배출량으로 '항만 탄소중립 구축 기본계획(해양수산부, 2024)' 제 시 수치 적용 (표10, 참조)
 ***전기전환(항만 내 직접 배출): 전기 장비 1대당 '배출량=0'으로 적용

표 12. 장비 유형별 전환 효과 비교

(단위: %)

구 분	2025년		2030년	
	전기전환*	전기전환**	전기전환*	전기전환**
이송·하역 장비	31.1	45.3	63.5	96.1
크레인	8.3	98.7	9.0	100.0

주) * 전기전환(LCA): 전주기적 관점(LCA)으로, 전기 장비 1대당 배출량 적용 (표 9, 전기장비 배출량 참조)
 **전기전환(항만 내 직접 배출): 전기 장비 1대당 '배출량=0'으로 적용

이와 더불어, 이들 크레인류 장비는 전반적인 전기 전환 성과에도 불구하고, 절대적인 배출 규모가 여전히 매우 크다는 점 역시 살펴보아야 할 지점이다. 이들 장비는 대형 하역장비로, 경유 방식을 전기 방식으로 전환하는 경우 50% 이상의 저감 효과를 기대할 수 있으나, 기본적으로 장비당 출력, 이에 따른 전력수요가 다른 장비에 비해 매우 크기 때문에 항만 내에서 재생 에너지를 사용하여 이러한 전력 수요에 공급하지 않는 한 전주기적 개념에서는 배출 규모를 획기적으로 저감하기 힘들다.

표 13. 장비 유형별 전환 효과 비교

(단위: tco2eq)

구 분	2025년		2030년	
	전기전환*	전기전환**	전기전환*	전기전환**
이송·하역 장비	146,433	116,416	88,755	9,374
크레인	301,063	4,374	341,099	0

주) * 전기전환(LCA): 전주기적 관점(LCA)으로, 전기 장비 1대당 배출량 적용 (표 9, 전기장비 배출량 참조)
 **전기전환(항만 내 직접 배출): 전기 장비 1대당 '배출량=0'으로 적용

한편, 이송장비 중 스크래블캐리어의 경우 교체연한이 2030년 이후에 도래하게 되므로, 시나리오 상 전환대상에서도 제외되었다. 기존 친환경 전환 사업에서도 야드트랙터의 LNG 전환 및 배출저감장치 부착, 크레인의 전기화는 활발하게 진행된 반면, 그 외 하역장비는 상대적으로 전환 대상에서 배제되거나 우선순위에서 후순위로 배치되고 있다. 이들 장비들의 운용 규모와 활동도가 상대적으로 적음에도 장비 1대당 배출량은 야드트랙터와 비교하였을 때 상대적으로 크게 나타나는 만큼, 이들에 대한 전기화 또는 대안 에너지 활용에 의한 배출제로 전환 역시 본격

적으로 추진되어야 할 것으로 보인다.

V. 결론 및 시사점

본 연구는 국내 컨테이너 항만의 하역장비에 대한 친환경 전환사업이 2024년 종료됨에 따라서, 후속 사업의 추진방향 및 시사점 도출을 위한 현황 및 미래 교체수요를 도출하는 한편, 이를 바탕으로 본격 전환에 따른 배출저감 전망 및 효과를 분석하였다.

우선, 분석을 위한 기본 시나리오는 후속 사업 시 작년도로 예상되는 2025년부터 해당 년도 교체수요 전부를 전기화하는 것으로 가정하고, 최근 대부분의 산업 분야에서 배출량 산정의 새로운 기준으로 채택되고 있는 전주기적 개념(LCA)을 적용한 결과와, 하역장비의 항만 내 직접 배출만을 고려하여 산정하여 예측한 배출 전망, 이렇게 두가지 결과와 현시점을 기준으로 추가적 전환 노력을 하지 않는 경우의 배출 전망치(BAU)를 비교하였다.

장비별 교체연한 도래에 따른 일정에 따라서 배출제로 개념의 장비로 교체를 진행하게 되면, 2025년에는 BAU 대비 79%, 2030년에는 97.4%까지 기존의 배출 규모를 감축할 수 있을 것으로 전망되었다. 하지만 전주기적 관점을 적용하면, 2030년까지 27.6% 저감할 수 있을 것으로 나타났다. 이 과정에서 특기할만 한 점은, 항만 내 직접 배출만을 고려하는 경우 제시된 일정에 따른 본격 장비 교체를 통해 실제 배출제로 항만을 구현할 수 있으나, 전력 또는 대안 에너지의 생산 및 공급에 따른 탄소 배출까지 고려하는 경우(LCA)에는 항만의 활동으로 인한 탄소 배출의 저감을 크게 기대할 수 없는 것으로 나타난 데에 있다. 이와 더불어, 크레인 장비의 경우 이미 대부분 전기전환이 완료되었음에도 상대적으로 높은 활동도와 장비 자체의 출력값으로 인해 절대적 배출값은 여전히 높은 수준을 유지하였다. 이는 항만 하역장비의 배출제로 전환과 동시에 재생 에너지 기반

의 항만 내 에너지 자립체계를 구축해야 함을 시사한다.

또한, 본 연구는 하역장비의 전기화 또는 이에 상응하는 배출제로 개념의 에너지 전환을 가정하고 있으나, 만약 교체수요 및 일정에 따라서 일부에 대한 전기 구동방식으로 본격 교체를 시작하는 경우 이들의 운용에 따른 전력 및 수소 등의 에너지 수요가 대폭 상승할 것은 명약관화하다. 따라서, 컨테이너 항만 하역장비에 대한 본격 배출제로 전환을 무리없이 추진하기 위해서는 당장 항만 내에서 활용 가능한 전력, 수소 등의 대안 에너지의 원활한 공급 및 충전·관리 시스템 구축이 필수적으로 선행되어야 한다.

분석결과와 전주기적 관점을 적용한 경우와 항만 내 직접 배출만을 고려한 시나리오에서의 배출저감 효과에서도 확인할 수 있듯이, 컨테이너 항만의 활동으로 인한 배출을 제로화하기 위해서는 국내 컨테이너 항만구역을 중심으로 재생 에너지 기반의 분산 전원, 즉 무탄소 에너지의 생산-공급-소비체계, 즉 항만의 자체 에너지 그리드의 구축이 필요하다. 이는 최근 정부가 발표한 '2050 탄소중립 추진전략' 및 '그린 뉴딜' 정책, 그리고 이에 따른 수소 및 전력 인프라 및 공급계획과 연계한 항만의 역내 에너지 생산·소비의 효율적인 운영기반 마련이 시급한 이유이기도 하다.

이와 더불어, 실제 사업의 원활한 추진을 위한 재원의 확보, 그리고 효과적인 집행구조를 시급히 마련해야 한다. 본 연구를 통해 확인한 본격 배출제로 전환의 당위성 및 시급성에도 불구하고, 국가의 재정 이외에는 장비 교체, 충전 인프라 구축 등을 위한 비용 지원을 위한 재원의 확보 대안은 미비한 상황이다. 기존 전환사업에서도 전환 비용의 45%를 정부 재정으로 지원하고, 항만공사(PA) 45%, 운영사 10%를 부담하도록 한 야드트랙터의 전환율이 매우 높았음을 감안할 때, 어떤 형태로든 교체를 위한 초기 투입 비용에 대한 지원방안이 서둘러 마련되어야 할 것

으로 보인다. 이 과정에서, 정부의 재정 지원 뿐 아니라, 다양한 금융방안(산업은행 및 해양진흥공사 등)에 의한 설비금융 및 VC 등 실효적 재원의 확보 및 지원 방안을 고려할 수 있다. 이를 통해 후속사업을 포함하는 장기적인 탄소중립 이행 트랙(~2030년; ~2050년)에 대한 효율적 정책 운영, 동시에 2030년 이후 재구조화가 확실시되고 있는 항만 탄소중립 기술시장의 국내 주요 참여자(공급자 및 수요자), 즉 가치사슬 전반에 대한 역량 강화 역시 도모할 수 있다.

2014년 이후 진행되어온 '항만 하역장비 친환경 전환 사업'을 통해 야드트랙터 및 크레인 장비에 대한 저공해 장비로 교체 또는 전기화가 활발하게 진행되었으나, 그 외의 하역장비에 대한 교체율은 상대적으로 저조하게 나타났다. 항만 장비 전환의 완결성 측면이 아니더라도, 이들 장비의 배출 규모는 활동도와 운용 규모에 비해서 상대적으로 높게 나타나고 있어, 후속 사업에서는 이들을 포함한 하역장비 전반에 대한 배출제로 전환 추진이 필요하다.

이와 관련해서, 배출제로 전환 및 이를 위한 인프라, ICT 등의 혁신기술 도입이 상대적으로 용이한 컨테이너 부두를 대상으로, 주요 하역·이송 설비의 전기화를 포함하는 탄소중립 핵심기술을 시범적으로 항만활동에 연계·적용할 수 있는 기회 및 이에 대한 유인을 제공할 수 있다. 또한 탄소중립의 이행 또는 이를 위한 핵심·연계기술의 도입 과정에서 항만의 고유의 공간적·산업적 특성으로 인해 발생할 수 있는 기술적 난점 등을 해결하기 위해, 항만 차원의 핵심기술 수요를 발굴하거나 이를 연구개발·실증할 수 있도록 지원하기 위한 정책적 방안 역시 고려해야 할 시점으로 보인다.

다만, 본 연구에서 활용한 배출 원단위, 즉 '하역장비 1대당 배출량' 자료의 경우, 전국의 컨테이너 항만에 범용으로 적용하기 위한 용도로 해양수산부가 부산항 및 인천항의 컨테이너 부두 일부에 대한 조사를 통해 도출한 결과물이다. 컨테이너 부두의 특성

상 배출원의 구성 및 이들의 활동도 등이 유사할 것이라는 가정에 기반한 개념이지만, 개별 항만 또는 심지어 부두별로도 환경 및 기후, 경제적 상황 등 수많은 요인들로 인해 작업의 환경 및 밀도, 이에 따른 배출원의 활동의 정도나 양상 역시 달라질 수 있으며, 더군다나 개별 항만 간에는 그 차이가 유의미할 것으로 예상된다. 후속 연구에서는 이러한 배출 원단위의 유효성을 검증하고, 이를 보완할 수 있는 복수의 지표 조합을 적용하여 유효한 배출 원단위 개념을 도출할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- 국가법령정보센터, 법인세법 지방공기업시행규칙 제11조 제1항 제1호 관련, 유형고정자산 내용연수표
고지원(2021). 항만 하역장비의 대기오염물질 배출량 산정에 관한 연구, 수원대학교 일반대학원 박사학위논문
- 김화영·부이·하이당. (2020). 선박 입출항 데이터 기반 항계 내 선박 배기가스 배출량 산정. 한국지능시스템학회 논문지, 30(6), 453-458.
- 성숙경(2003). 컨테이너부두 장기간 전용사용 허용해야, 한국해양수산개발원, 제 1100호, 2-8.
- 이정옥·이향숙. (2022). 인천항 선박 대기오염물질 배출량 산정 및 친환경 정책 효과에 대한 연구. 한국항만경제학회지, 38(1), 129-142.
- 이민우(2024). 항공기 이착륙에 의한 배출물질 및 대기확산 분석에 관한 연구 인천국제공항을 중심으로, 인천대학교 동북아물류대학원 박사학위논문
- 이태우·임종길. (2000). 컨테이너부두의 건설원가와 연간 투자비 회수에 관한 연구. 한국항만학회지, 14(2), 165-173.
- 한국개발연구원(2015), 14년 하반기 공공기관 사업 예비타당성조사 부산항 신항 서권 2-5단계 확장사업
- 한국해양수산개발원(2017), 저탄소 자동화 컨테이너 터미널 2단계 기획연구 보고서
- 한국해양수산개발원(2019), 고생산성 자동화컨테이너 터미널 구축 추진 전략 연구
- 한국해양수산개발원(2022), 2021년 품목별 항만물동량 예측보고서
- Chen, S., Meng, Q., Jia, P., & Kuang, H. (2021). An

- operational-mode-based method for estimating ship emissions in port waters. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103080.
- IMO(2020), Fourth IMO Green House Gas Study 2020
- Okşaş, O. (2023). Carbon emission strategies for container handling equipment using the activity-based method: A case study of Ambarlı container port in Türkiye. *Marine Policy*, 149, 105480.
- Sim, J. (2018). A carbon emission evaluation model for a container terminal. *Journal of cleaner production*, 186, 526-533.
- Shi, K., Weng, J., & Li, G. (2020). Exploring the effectiveness of ECA policies in reducing pollutant emissions from merchant ships in Shanghai port waters. *Marine pollution bulletin*, 155, 111164.
- Tang, D., Chen, Z., Xu, C., Yuan, Y., Zhong, X., & Yuan, C. (2023). Energy consumption and emissions analysis of large container seaports considering the impact of COVID-19: A case study of Ningbo Zhoushan Port. *Ocean & Coastal Management*, 244, 106781.
- UNCTAD(United Nations Conference Trade Development), *Port Development*, 1985
- Yun, P. E. N. G., Xiangda, L. I., Wenyuan, W. A. N. G., Ke, L. I. U., & Chuan, L. I. (2018). A simulation-based research on carbon emission mitigation strategies for green container terminals. *Ocean Engineering*, 163, 288-298.
- Zhao, T. T., Pham, T. H., & Lee, H. S. (2020). 인천항 하역장비 대기오염물질 배출량 산정 연구. *한국항만경제학회지*, 36(3), 21-38.
- 해양수산부 항만시설장비관리시스템,
<https://hems.portcals.go.kr>
- 해양수산부(2024), 항만 탄소중립 구축 기본계획 연구 보고서

컨테이너 항만 하역장비의 친환경 전환에 따른 탄소 배출저감 효과 분석

안용성 · 이향숙 · 이지원

국문요약

2014년 시작한 항만 하역장비 친환경 전환 사업이 2024년 종료됨에 따라서, 기존 미세먼지 대응을 위한 '저공해' 패러다임에 더해 항만 차원의 2050 탄소중립 이행을 위한 본격 '배출제로' 전환이 요구되는 시점이다. 이에 본 연구는 국내 주요 4대 항만(부산, 인천, 여수광양, 울산)의 컨테이너 부두 하역장비의 미래 교체수요를 산정하고, 후속 전환사업의 시작년도로 예정된 2025년부터 매년 하역장비별 교체수요를 모두 전기화한다는 시나리오를 가정하고, 이에 따른 미래 배출저감 효과를 산정, 분석하였다. 특히, 대부분의 산업 분야에서 새로운 배출 산정 기준으로 채택되고 있는 전주기적 개념(LCA)을 적용한 배출전망과 항만 내 직접 배출만을 고려하는 기존의 배출 산정 개념을 함께 적용 제시하여 비교함으로써, 후속 사업의 추진에 보다 유효한 시사점을 제공하고자 하였다.

제시된 일정에 따라서 하역장비에 대한 교체를 진행하게 되면, 2025년에는 BAU 대비 79%, 2030년에는 97.4%까지 기존의 배출 규모를 감축할 수 있을 것으로 전망되었다. 하지만 전주기적 관점을 적용하면, 2030년까지 27.6% 저감할 수 있을 것으로 나타났다. 이 과정에서 특기할만 한 점은, 크레인 장비의 경우 이미 대부분 전기전환이 완료되었음에도 상대적으로 높은 활동도와 장비 자체의 출력값으로 인해 절대적 배출값은 여전히 높은 수준을 유지하였다. 이는 항만 하역장비의 배출제로 전환과 동시에 재생 에너지 기반의 항만 내 에너지 자립체계를 구축해야함을 시사한다. 또한 야드트랙터 및 크레인 외 이송·하역장비에 대한 전기화 또는 대안 에너지를 활용하는 배출제로 전환 역시 본격적으로 추진할 필요가 있다.

주제어 : 항만 하역장비, 전기 전환, 배출 전망, 시나리오 분석, 전주기 평가