

항만의 탈탄소 전환에 관한 연구: 장애요인과 해결방안을 중심으로

한철환*

A Study on Port's Decarbonization Strategies : focusing on its Barriers and Solutions

Han, Chul-Hwan

Abstract

To achieve the national goal of "2050 Carbon Neutrality" in the era of the climate crisis, it is important to support the decarbonization of ports, which are the vital node of the global supply chain. Following the establishment of the concept of port's decarbonization, this study reviewed the obstacles and solutions to port decarbonization through literature research. Furthermore, the goals and strategies for decarbonization implementation of world major ports were examined through case analysis, and the level of decarbonization implementation of the five Korean major ports was quantitatively evaluated using a performance-based score measurement method. As a result of the analysis, the level of decarbonization of Korean ports is generally far behind that of advanced countries. In particular, measures for environment-friendly inland transportation, future alternative fuel bunkering facilities, and various market-based incentive policies are needed. As a policy task for the decarbonization of Korean ports, first, the necessity of establishing a emission inventory, monitoring, and reporting system and the disclosure of related information, second, the mixing strategy of various greenhouse gas reduction measures, and third, the increase in the proportion of renewable energy at ports were suggested.

Key words: port decarbonization, net-zero port, emission reduction measures

▷ 논문접수: 2024. 06. 07 ▷ 심사완료: 2024. 06. 25. ▷ 게재확정: 2024. 06. 28.

* 동서대학교 국제물류학과 교수, 제1저자, chhan16@dongseo.ac.kr

I. 서론

비야흐로 해운항만산업도 2D의 시대에 접어들고 있다. 디지털화(Digitalization)과 탈탄소화(Decarbonization)가 바로 그것이다. 4차 산업혁명 시대의 도래에 따라 인공지능, 사물인터넷, 블록체인 등 디지털 기술들을 활용하여 기업의 운영효율성을 제고하고 고객경험을 강화하는 한편 새로운 비즈니스 모델을 구축해 나가는 것이 디지털화라고 할 수 있다. 탈탄소화는 기후위기를 맞아 온실가스 배출을 줄여나가기 위해 국제사회가 공동으로 노력하고 있는 가운데 해운항만산업도 이에 적극 동참할 필요성이 그 어느 때보다 높아지고 있다.

2015년 유엔기후변화협약(UNFCCC) 제21차 당사국 총회(COP 21)에서 파리협약이 채택되었다. 이에 따라 산업화 이전 대비 지구 평균 기온 상승을 1.5°C 이하로 제한하는 데 모든 당사국이 합의하였다. 또한 같은 해 국제연합은 “UN 2030 아젠다” 발표를 통해 인류의 보편적 문제, 지구 환경문제, 경제 사회문제를 해결하기 위한 17개의 지속 가능한 발전목표(SDGs)를 선정하였다. 2023년 안토니우 구테흐스 UN 사무총장은 지금은 지구온난화(global warming)가 아닌 ‘지구열대화(global boiling)’ 시대라며 기후비상사태를 선언하며 기후안전사회를 구축하기 위해 전 지구적 노력이 필요하다고 역설하였다. 이러한 국제사회의 기후대응 움직임과 보조를 맞춰 국제해사기구(IMO)도 2023년 제80차 해양환경보호위원회(MEPC 80)에서 지난 2018년 수립한 온실가스 초기전략(Initial GHG Strategy)의 목표를 대폭 강화하여 “2050 국제해운 탄소중립”을 채택하였다. 이는 2050년까지 2008년 기준 온실가스 총배출량을 50% 감축하기로 했던 기존 목표를 상향하여 2030년까지 최소 20%, 2040년까지 최소 70%를 감축하고 2050년에는 순 배출량 제로를 달성한다는 것이다. 이를 위해 회원국들은 목표 기반 연료유 표준제와 온실가스에 탄소부담금을 부과하는 결합조치를 도입하기로 합의했다. 이에 우리나라도 아시아 국가 최초로 2023년 ‘국제해운 탈탄소화 추진 전략’을 발표하고, 이를 위한 세부 전략으로 친환경

선대 전환, 해운산업 투자 여건 개선, 친환경 기술 및 연료 인프라 확충, 무탄소 항로 구축(Green Corridor) 등 4대 전략을 제시한 바 있다(해양수산부, 2023). IMO에 따르면 국제해운산업은 글로벌 이산화탄소(CO₂) 배출량의 약 3% 정도를 차지하고 있으며, 향후 아무런 조치를 취하지 않을 경우 국제해운산업의 온실가스 배출량은 2050년에 가서는 2008년 수준 대비 130% 증가할 것으로 예상된다(IMO, 2020).

그동안 해운항만산업은 외항해운 선박에서 발생하는 배출가스 저감에 초점을 맞추어 왔고, 항만의 배출가스에 대한 조치는 상대적으로 덜 주목을 받아왔다. 이는 항만에서의 배출가스는 선박, 열차, 트럭 등 항만의 직접적 통제권 밖에 있는 오염원들이 많아 측정 및 관리하기 어렵기 때문이다. 그럼에도 불구하고 항만은 다양한 종류의 운송차량과 하역장비들이 사용되는 글로벌 공급망의 주요 기점이자 해상운송과 육상운송의 연결점이라는 전략적 중요성을 고려할 때 대기오염과 온실가스가 집중되는 지역이다. 또한 항만 인근에는 대도시가 위치하고 있어 지역주민들의 건강에 해로운 대기오염 물질들이 많이 배출된다는 점에서 항만의 탈탄소 전환은 중대한 문제이다. 따라서 국제해사기구(IMO) 및 국가 차원의 탄소중립 목표를 달성하기 위해서는 항만의 탈탄소 전환에 대한 이해와 실천이 시급한 실정이다.

이에 본 연구는 항만의 탈탄소 전환을 위한 방해요인과 해결방안을 문헌연구를 통해 알아보고, 국내의 항만의 온실가스 배출저감조치(Emission Reduction Measures)를 사례 연구를 통해 제시해 보고자 한다. 특히 국내 5대 항만들을 대상으로 온실가스 배출저감조치별 항만 탈탄소화 전략을 성과기반 스코어링 측정방법(performance-based scoring measurement method)에 의거하여 비교 평가해보는 데 그 목적이 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 항만 탈탄소의 개념과 지속 가능한 항만, 녹색항만(green port), 탄소중립항만(net-zero port)의 관계에 대해 알아보고, 항만의 탈탄소화에 관한 기존 문헌들을 고찰한다. III장에서 항만의 탈탄소화를 방해하는 요인들과 해결방안에 대해 이론적으로 검토하고, IV장에서는

아시아, 유럽, 북미 대표 항만들의 탈탄소화 조치를 비교하고, 국내 5대 항만을 대상으로 배출가스 저감조치별 탈탄소화 성과를 평가한다. 마지막으로 V장은 결론 및 정책제언으로 마무리하였다.

II. 항만의 탈탄소화에 관한 문헌 검토

1. 항만 탈탄소화의 개념

항만의 탈탄소화에 대한 보다 정확한 이해를 위해서는 녹색항만(green port)과 지속 가능한 항만(sustainable port)에 관한 개념부터 살펴보는 것이 필요하다. 녹색항만이란 용어는 항만의 환경적 영향을 완화하기 위한 종합적 프로그램의 일환으로 1997년에 도입되었고, 2011년 이후부터 유럽항만기구(ESPO)에서 사용하고 있다. Chang과 Wang(2012)은 녹색항만을 환경, 사회 그리고 경제라는 세 가지 지속가능성 원리와 조화를 이루기 위한 도구라고 정의하였고, Pavlic 외(2014)는 녹색항만을 환경친화적 항만 인프라를 건설하기 위한 장기계획의 결과물이라고 정의하였다. 이를 토대로 Chen 외(2019)는 녹색항만을 풍부한 생태계, 지속 가능한 자원의 사용, 낮은 에너지 소비, 환경보전과 항만 인프라 건설의 생태학적 결합을 통해 오염을 최소화하는 항만이라고 정의하였다.

이에 반해 지속 가능한 항만이란 항만관리운영에 있어서 환경보호, 경제적 번영, 사회적 참여라는 지속가능성 원리를 고려한 접근방식으로 비용효율성, 환경적 지속가능성 그리고 사회적 지속가능성을 목표로 한다. 환경적 지속가능성이란 해운 항만 활동으로 야기되는 부정적 환경영향을 다루기 위한 지속 가능한 경영정책과 항만운영을 위한 기본요소이고, 사회적 지속가능성이란 항만근로자와 지역민들을 위해 사회경제적 전략을 채택하여 사람들의 생활 수준을 개선하는 것을 의미한다. 경제적 지속가능성이란 사회·환경적 성장을 위태롭게 하지 않으면서 이윤극대화를 보장하는 지속 가능한 발전전략을 추진하는 것을 의미한다. 이를 통해 지속 가능한 항만이란 항만 운영에 있어서 환경적, 사회적, 경제적 요인들을 고려하는 항만관리

접근방식이라고 정의할 수 있다. 지속 가능한 항만은 미래 세대의 유지 가능성을 전제로 주로 항만 운영의 환경적, 경제적, 사회적 관점에 초점을 맞추며, 지속 가능한 항만 운영 개념과 조화되기 위해서는 이들 요소가 항만정책에 녹아들어야 한다(Alamoush 외, 2021). 이에 반해 녹색항만은 주변 생태계에 부정적 영향을 줄이는 환경친화적 방법들을 사용함으로써 환경보전을 우선시한다. 여기에는 신재생에너지 사용, 폐기물 발생 감축, 온실가스 배출 저감 등이 포함된다. 따라서 녹색항만은 지속 가능한 항만의 일부이며 전반적인 지속가능성 달성에 이바지한다. 결론적으로 녹색항만은 환경적 지속가능성에 초점을 맞추지만, 지속 가능한 항만은 환경적, 사회적, 경제적 요소의 조화를 통한 종합적 접근을 추구한다고 볼 수 있다(Mahmud 외, 2023).

한편 일반적으로 탈탄소화(decarbonization)란 탄소배출 완화 조치나 제거를 통해 이산화탄소 배출량 제로를 달성하는 것으로 정의된다. 항만 탈탄소화(port decarbonization)란 다양한 항만의 배출가스 오염원-항만 운영, 선박, 육상운송-으로부터 발생하는 이산화탄소 배출량을 감축하기 위한 완화 조치를 사용하거나 이산화탄소 흡수 혹은 제거를 통해 잉여 이산화탄소 배출량을 상쇄하는 행위를 말한다(Alamoush 외, 2023). 항만 탈탄소화를 달성한 항만을 탄소중립항만(net-zero port)이라고 정의할 수 있다(EDF, 2024).

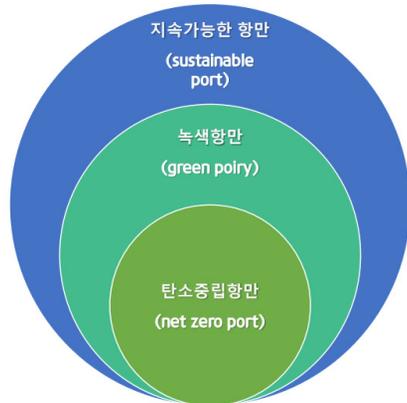


그림 1. 탄소중립항만, 녹색항만, 지속 가능한 항만의 관계

이상의 내용을 종합하면 탄소중립항만은 대기오염 그 가운데 온실가스인 이산화탄소의 배출량을 제로로 만든 항만을 말하며, 녹색항만은 대기오염뿐만 아니라 수질오염, 폐기물, 소음 등 항만 운영 전반에 걸쳐 친환경적 관리에 초점을 맞춘 항만이라고 할 수 있다. 반면, 지속 가능한 항만은 환경적 요인뿐만 아니라 사회적, 경제적 요인까지 함께 고려한 가장 광의의 개념으로 이해할 수 있다.

2. 항만 탈탄소화에 관한 기존 연구

그동안 항만 탈탄소화에 관한 연구는 주로 항만에서 발생하는 온실가스 배출량을 줄이는 조치에 초점을 맞추어 진행되어 왔다. 이 같은 항만의 온실가스 배출 저감과 관련된 연구들은 기술적 측면, 운영적 측면, 관리 및 정책적 측면, 에너지 효율성 측면, 선박 측면, 내륙운송 측면 등 다양한 관점에서 진행됐다. 이를 항만의 배출가스 오염원별로 항만 운영(하역 및 이송 장비), 내륙운송(트럭이나 열차), 선박과 항만 간 연계 관점에서 정리하면 <표 1>과 같다. 먼저 항만 운영 측면에서 노후 하역장비의 개조 및 대체를 포함하여, 기존 디젤유를 대안연료(alternative fuel) 그리고 신재생에너지로 전환하는 방안, 에너지 관리 시스템(EMS)이나 스마트 그리드(smart grid)¹⁾ 같은 에너지 효율성을 높이는 방안들이 있다. 그 외 항만자동화를 통해 장비들의 전기화(electrification), 스마트 기술을 이용하여 항만의 온실가스 배출을 줄이는 방안들을 들 수 있다. 내륙운송 측면에서는 노후 트럭의 교체라든지 트럭예약시스템(truck appointment system)과 게이트 운영시간 연장 등을 통해 트럭의 혼잡을 줄임으로써 온실가스를 줄이는 방안이 있다. 나아가 전환교통(modal shift)정책을 통

해 배후 지역으로의 화물운송을 기존 트럭 대신

열차나 내륙수로(inland waterway) 운송으로 대체하는 방안이 있다. 선박과 항만 연계 측면에서는 육상전원공급장치²⁾ 설치, 대안연료 공급(병커링)시설, 선박의 도착예정시간(ETA)을 사전에 파악하여 입항과 동시에 선석을 배정하는 방법이나 자동계선시스템, 선박속도저감(vessel speed reduction) 프로그램 등이 대표적이다.

항만의 배출가스 저감방안에 관한 학자별 연구 결과를 살펴보면 먼저 Bjerkan과 Seter(2019)는 지속 가능한 항만에 초점을 맞춰 항만관리와 정책, 동력과 연료, 해상활동, 육상활동 4개 범주 26개 수단을 제시하였다. Iris와 Lam(2019)은 항만의 에너지 효율성에 초점을 맞추고 항만의 배출가스 저감조치를 운영적 전략, 기술, 에너지관리시스템 3개 범주로 나누어 광범위한 문헌 연구를 수행하였다. Alamoush 외(2020, 2021, 2023)는 온실가스를 줄이고 에너지 효율성을 개선하기 위해 항만의 기술적 저감조치와 운영적 저감조치를 체계적으로 분석한 뒤, 이러한 조치를 항만 정책입안자들이 더욱 쉽게 채택할 수 있게 항만정책과 관리측면에서 분석하였다. 나아가 이들은 항만 탈탄소화의 장애요인과 이를 완화할 해결방안을 이론적으로 검토하였다. 한편 Wang 외(2023)는 선박과 육상 2개 범주를 대상으로 저감조치의 효과성을 검토하여 운영적 조치의 잠재적 저감효과는 20~50%에 달하지만, 에너지 조치는 80% 이상 저감효과가 발생한다고 주장하였다. Mahmud 외(2023)는 녹색항만 관리를 위한 방안으로 7개 범주 44개 항목을 제시한 후 12개 아시아 항만을 대상으로 녹색항만 이행성과를 평가하였다. 한편 Song(2024)은 운영적 조치, 기술 적조치, 연료 및 에너지 조치, 인프라 조치, 디지털화 조치, 정책 및 협력 조치 등 6개 범주에 있어서 항만의 온실가스 저감방안을 제시하고 영국 항만들을 대상으로 사례 연구를 수행한 바 있다.

1) 스마트 그리드란 전기의 생산, 운반, 소비과정에서 정보통신기술을 접목하여 공급자와 소비자가 상호 작용하여 에너지 효율성을 높이는 지능형 전력망 시스템을 말하며, 마이크로 그리드(micro grid)란 소규모지역에서 전력을 자급자족할 수 있는 스마트 그리드 시스템을 의미함

2) 육상전원공급장치는 Onshore Power Supply(OPS), Alternative Marine Power(AMP), Cold Ironing 등 다양한 명칭이 있음

표 1. 항만 배출가스 오염원별 탈탄소화 조치들

범위	대상	조치들
항만 운영	장비	<ul style="list-style-type: none"> 노후 장비와 엔진의 대체, 개조
	에너지원	<ul style="list-style-type: none"> LNG, 메탄올, 수소, 암모니아, 바이오연료 등 대안연료 바이오연료 생산시설의 개발 대안 전력 시스템(배터리)과 하이브리드화(배터리+연료) 신재생에너지 이용(풍력, 태양광, 파력, 지열에너지)
	에너지 효율성	<ul style="list-style-type: none"> 빌딩, 창고, 야드, 관공선, 하역장비, 항만근로자 통근을 위한 에너지 절감 조치 에너지 관리시스템의 사용과 계획 에너지관리기술(에너지저장시스템, 스마트그리드, 가상발전소, 마이크로그리드)
	운영적 조치	<ul style="list-style-type: none"> 컨테이너터미널 자동화 항만 장비의 유지보수
	항만-도시 통합과 산업 연계	<ul style="list-style-type: none"> 폐기물관리, 재활용, 열과 증기의 재사용을 위한 순환경계의 활용 탄소포집이용저장(CCUS), 온실가스흡수원(carbon sink) 활용
	디지털화	<ul style="list-style-type: none"> PCS, 싱글윈도우 등 디지털 기술 이용 스마트 디지털 기술 이용(IoT, 블록체인, 5G)
내륙 운송	트럭 배출가스 감축	<ul style="list-style-type: none"> 노후 트럭 사용금지, 지능형 운송시스템 이용
	전환교통(modal shift)	<ul style="list-style-type: none"> 열차, 내륙수로운송 지원 Motorway of the Sea, 트럭 군집 운송, Dry port 개발
	트럭 혼잡 감축	<ul style="list-style-type: none"> 트럭예약시스템(Truck Appointment System) 스마트 게이트 시스템 게이트 운영시간 연장, 피크 시 교통 완화요금 부과
선박-항만 연계	선박의 배출가스 감축	<ul style="list-style-type: none"> 육상전원공급장치 LNG나 연료전지 기반 항내선
	대안연료 병커링	<ul style="list-style-type: none"> LNG, 메탄올, 암모니아 수소 등 청정연료 공급
	선박 재항시간 단축	<ul style="list-style-type: none"> 선석 할당, 야드장비 할당 및 스케줄을 위한 터미널운영시스템 자동계선시스템(automated mooring system) 선석 예약을 통한 사전 선석 배정
	선박속도 저감	<ul style="list-style-type: none"> 선박 입출항 시 속도 저감
	가상 및 JIT 도착	<ul style="list-style-type: none"> 전자데이터교환, 디지털 기술을 활용한 선박의 정시 도착
	기타 서비스 제공	<ul style="list-style-type: none"> 선체 청소 및 프로펠러 광택 서비스 제공

주 : 가상발전소란 가정용 태양광과 같이 분산된 소규모 에너지 발전, 연료전지 등 발전설비와 전력수요를 클라우드 기반으로 통합 관리하는 가상의 발전소를 말함

자료 : Alamoush 외(2023) 토대로 저자 작성

표 2. 항만 배출가스 저감에 관한 선행 연구

저자	범주	세부 방안	특징
Bjerkan & Seter(2019)	<ul style="list-style-type: none"> 항만관리와 계획 동력과 연료 해상활동 육상활동 	<ul style="list-style-type: none"> 항만계획, 환경 및 에너지관리 모니터링, 전환교통, 양허 협정 	<ul style="list-style-type: none"> 4개 범주 26개 기술(수단) 제시 일반적인 항만 지속가능성에 초점 문헌 연구
Iris & Lam(2019)	<ul style="list-style-type: none"> 운영적 전략 기술 에너지관리시스템 	<ul style="list-style-type: none"> 첨두부하저감(peak-shaving)* 장비의 전기화, 육상전원공급장치, 에너지저장시스템(ESS) 에너지 소비 모니터링, 신재생에너지, 대안연료, 스마트 그리드 	<ul style="list-style-type: none"> 3개 범주 항만의 에너지 효율성에 초점 문헌 연구
Alamoush 외 (2020, 2021, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> 정보 장비 에너지 에너지 효율성 운영 육상운송 선박-항만 연계 	<ul style="list-style-type: none"> 배출가스와 에너지 모니터링 및 목록 작성 노후 장비 개조 및 교체 장비의 전기화, 대안연료, 신재생에너지 에너지관리시스템(EMS)과 기술(스마트 그리드, ESS) 디지털화, 터미널 자동화 트럭 배출가스 저감, 전환교통 	<ul style="list-style-type: none"> 7개 범주 19개 항목 제시(2022b) 문헌 연구
Wang 외 (2023)	<ul style="list-style-type: none"> 선박 육상 	<ul style="list-style-type: none"> 대안연료, 신재생에너지, 선박운영 최적화 정보, 에너지, 에너지 효율성, 운영, 육상운송, 화물오염 통제 	<ul style="list-style-type: none"> 2개 범주 제시 Alamoush 외(2020)연구와 유사 문헌 연구
Mahmud 외 (2023)	<ul style="list-style-type: none"> 자동화와 디지털화 환경친화적 기술 에너지관리시스템 오염통제 항만 고유 환경규제 환경인센티브제도 준수 및 증명서 	<ul style="list-style-type: none"> 터미널 자동화, 선박 접안, 장비 및 화물관리의 디지털화 육상전원공급장치, e-RTG, AGV, LNG병커링, 탄소포집활용-저장(CCUS), LED조명 태양력, 풍력, 대안연료 항만환경검토시스템(PERS) 선박속도저감, ECA내 연료전환, 환경친화적 배후수송망, 환경관리시스템 ESI, Green Award, EPI, CSI 자가진답법(SDM), ISO 14001 	<ul style="list-style-type: none"> 7개 범주 44개 항목 제시 녹색항만관리 방안에 초점 문헌 연구와 계량분석
Song (2024)	<ul style="list-style-type: none"> 운영적 조치 기술적 조치 연료 및 에너지 인프라 조치 디지털화 정책과 협력 	<ul style="list-style-type: none"> 선박속도저감, JIT도착, EMS, 게이트운영시간 연장, 게이트 자동화 육상전원공급장치, CCUS, 노후트럭교체, e-RTG 대안연료, 수소처리식물성오일(HVO), 배터리, 수소 AMP, 병커링 시설, 전환교통, 마이크로 그리드 자동계류시스템, 선박ETA예측, 스마트항만, 디지털플랫폼 선박속도저감, 인센티브와 규제 	<ul style="list-style-type: none"> 공간 기준으로 4개 오염원(해측, 안벽과 야드, 게이트, 육상측)에 대한 6개 범주 배출가스 저감 조치 제시 문헌연구와 사례연구

주 : ESI=Environment Ship Index, EPI=Environmental Port Index, CSI=Clean Ship Index

* 첨두부하저감(peak-shaving): 전기가격이 시간대에 따라 달라짐을 감안하여 경부하 시기에 ESS를 충전하고 피크 시 방전하여 차액으로 수익 발생

표 3. 항만 탈탄소화의 경제적 장애요인

장애요인	세부 항목	세부 내용
(경제적) 시장실패	불완전 정보 (정보의 비대칭성)	<ul style="list-style-type: none"> 비대칭적 정보는 불확실성을 증가시키고 왜곡된 정보로 인해 비용 효과적 기술을 채택할 기회를 상실 탈탄소화 조치에 대한 정보는 판매자 기회주의(sellers' opportunism)의 영역
	역선택	<ul style="list-style-type: none"> 기술 제공자와 이용자(항만) 간 정보격차 존재하여 탈탄소 기술의 성과보다는 가격에 기반하여 선택
	주인-대리인 문제	<ul style="list-style-type: none"> 주인(항만공사)과 대리인(TOC)간 이해관계의 불일치
	분할인센티브	<ul style="list-style-type: none"> 탈탄소 비용은 항만공사(임대인) 부담하고 혜택은 TOC, 선사, 트럭운송회사가 봄
(경제적) 비시장실패	높은 투자비용과 자본 접근성 문제	<ul style="list-style-type: none"> 높은 투자비용과 부족한 자본이 주요 장애요인 개도국의 경우 신재생에너지를 위한 자본비용이 매우 높음
	간접비용(hidden cost)	<ul style="list-style-type: none"> 연구개발, 컨설팅, 사업타당성 분석, 데이터 취급, 교육훈련 등 탈탄소화에 들어가는 숨은 비용이 큼
	리스크	<ul style="list-style-type: none"> 자산 특유성 : 크루즈선용 OPS는 다른 운송수단들은 이용 불가 좌초자산(stranded asset) : LNG 병커링 시설
	이질성	<ul style="list-style-type: none"> 이해관계자들의 이질성 항만의 이질성(소형항만 vs 대형항만)

자료 : Alamoush

대부분의 선행 연구는 문헌 연구를 통해 항만에서 발생하는 온실가스를 줄이기 위한 저감방안을 제시하는 데 초점을 맞추고 있다. 이에 본 연구는 항만의 탈탄소화 개념 정의에서 출발하여 온실가스 저감조치를 체계적으로 분류하고, 아시아, 유럽, 미주 등 각 대륙을 대표하는 싱가포르, 로테르담항, 로스엔젤레스항을 대상으로 현재 시행하고 있는 항만 탈탄소화 전략 사례분석을 통해 고찰하고, 나아가 우리나라 5대 항만들에 대해 항만 탈탄소화 이행성과를 정량적으로 분석해 보고자 한다.

III. 항만의 탈탄소화의 장애요인과 해결방안

1. 항만 탈탄소화의 장애요인

Sorrell 외(2004)는 에너지 효율성에 관한 장애요

인을 환경적으로나 경제적으로 효율적 기술들(혹은 조치들)에 대한 투자를 저해하는 것으로 정의하였다. 이러한 장애요인들은 엄격한 환경규제들이 존재함에도 불구하고 적절한 환경오염 저감조치의 이행을 방해한다. Sorrell 외(2011)는 에너지 효율성과 관련한 장애요인을 검토하기 위해 조직(권력과 문화), 행위(제한된 합리성, 정보형성, 신뢰성, 타성, 가치와 우선순위), 경제적 시장실패(주인 대리인 문제, 분할인센티브, 도적적 해이, 불완전한 정보/정보의 비대칭성), 경제적 비시장실패(시장 이질성, 간접비용, 자본과 위험에 대한 접근성)라는 체계를 수립하였다. 한편 Alamoush 외(2023)는 기존문헌 검토를 통해 항만 탈탄소화의 장애요인으로 경제적 시장실패, 경제적 비시장실패, 행위, 조직, 제도, 기술, 시간, 관리 측면에서 8개 요인을 제시하였다. 이에 본 연구에서는 Sorrell(2004, 2011)과 Alamoush(2023)의 체계를 토대로 항만 탈탄소화에 대한 장애요인을 정리해 보고자 한다.

1) 경제적 요인

신고전학과 경제학에서 시장실패가 발생하는 원인은 불완전 경쟁시장, 외부성, 공공재, 정보의 비대칭성 등이 있다.

항만의 탈탄소 전환을 방해하는 요인 중 시장실패와 관련한 다양한 요인들이 있다.

첫째, 불완전한 정보는 탈탄소 기술의 채택을 방해할 수 있다. 탈탄소 기술 사용에 따른 탄소 저감 가능성과 비용편의 비율 등에 관한 정확한 정보를 파악하지 못할 때 해당 기관은 관련 기술의 채택을 주저하거나 포기하게 된다. 즉 탈탄소 기술 제공업자들은 관련 기술에 대한 정보(장단점)를 정확히 파악하고 있지만, 구매자인 항만은 불완전한 정보에 기초해 의사결정을 내려야 한다. 이것이 항만에 있어서 탈탄소화 저감기술의 도입을 방해하는 요인이라는 것이다. 만약 항만이 탈탄소 조치들에 대한 올바른 정보를 가지고 있다면 기술을 채택하지 않을 리스크는 줄어들 것이다.

둘째, 탈탄소 기술제공업자와 항만 간 정보의 비대칭성으로 인해 역선택이 발생할 경우 이는 항만 탈

탄소화의 저해 요인이 될 수 있다. 정보의 비대칭성으로 인해 탈탄소 기술 선택 시 탄소저감효과와 같은 성과보다는 가격과 같은 요인에 기반하여 의사결정이 이루어질 수 있다. 이 같은 역선택은 행위자(항만)가 기회주의적으로 행동할 수 있다는 점에서 도덕적 해이에 해당한다. 이는 결국 투자를 저해하거나 투자자가 유익하지 않은 기술을 선택하게 만든다.

셋째, 정보의 비대칭성은 주인-대리인 문제를 일으킨다. 주인(지주로서 항만공사)은 해당 항만의 탈탄소화에 대리인(임차인으로서 민간부두운영회사)이 적극적으로 투자하길 원하지만, 대리인은 자신의 이익을 위해 비용이 수반되는 탈탄소화 조치의 도입을 꺼릴 수 있다. 따라서 주인은 대리인의 탈탄소화 관리를 엄격하게 통제하고 모니터링해야 하며, 대리인은 주인에게 탈탄소화 조치 실행에 대한 신뢰할 수 있고 정확한 정보를 제공하는 것이 중요하다. 항만 탈탄소화를 위해 주인-대리인 문제를 해결하기 위해서는 터미널 임대계약 시 탈탄소화 이행성과 정도를 선정 요건의 하나로 검토할 필요가 있다.

표 4. 항만 탈탄소화의 비경제적 장애요인

장애요인	세부 항목	세부 내용
비경제적 장애요인	행위적 장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 정보 형성(Specific, Vivid, Simple and Personal: SVSP) • 탈탄소 기술에 대한 신뢰성 • 가치(탈탄소화에 대한 CEO 의지) • 관성 (심리적 문화적 요인) • 제한된 합리성(정확한 정보와 지식보다는 경험칙에 기반한 의사결정)
	조직적 장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 권한 (중앙집중 vs 지방분권) • 문화 (환경에 대한 문화, CSR)
	제도적 장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 정치적 역할 (복잡하고 중첩된 항만거버넌스) • 정부 규제(강력한 규제나 정책의 부재는 환경에 대한 투자의 불확실성 가중) • 산업 규범과 모방행위
	기술적 장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 양립불가능성(항만특성과 탈탄소기술간 불일치, 별크션 OPS 이용 어려움) • 항만의 주요 프로세스에 대한 간섭 • 탈탄소 조치들의 복잡성(OPS는 항만의 전원, 선박의 종류와 빈도, 도시 전력망과의 거리 등에 영향받음) • 기술 준비성과 저감 가능성(CCUS)
	시간적 장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 탈탄소 기술의 이행 결정에는 지자체, 중앙정부와 여러 계층의 다양한 부처 및 조직과 협의
	관리적 장애요인	<ul style="list-style-type: none"> • 탈탄소화를 위한 자원, 인력, 기술의 부족 • 항만공사 내부 부서 간 이해관계 충돌

넷째, 분할 인센티브(split incentive) 문제를 들 수 있다. 분할 인센티브는 원래 건물주와 세입자 간 에너지 절약에 대한 상반된 이해관계에서 출발한 개념이다. 즉 세입자는 자신이 부담하는 에너지 비용을 절감하기 위한 유인이 존재하나 건물주는 이에 대한 유인이 부족하여 건물의 에너지 효율 개선이 더디게 진행되는 것을 의미한다. 항만에 있어서 분할 인센티브 문제는 임대인인 항만공사가 탈탄소화를 위한 다양한 조치를 시행하는 비용을 부담하는 반면, 임차인인 민간부두운영회사는 혜택만 보게 될 때 탈탄소화 조치의 도입은 지연되게 된다. 또한 항만당국은 육상전원공급장치(OPS), 대안연료 병커링, 게이트자동화 등 선박과 육상운송분야의 탈탄소화를 위해 막대한 투자비용을 부담하는 반면, 선사와 트럭운영회사는 선박 및 트럭의 재항시간 단축을 통해 이윤을 창출하고, 탄소발자국을 줄여 녹색 이미지를 개선하는 등 혜택을 얻게 되지만 어떠한 대가도 지불하지 않는다. 즉 항만이 탈탄소화 조치를 시행할 경우, 그 비용은 항만이 부담하는 반면, 항만이용자들은 무임승차자가 되는 구조에서는 적절한 탈탄소 조치의 도입이 원활하게 이루어지기 어렵다.

다섯째, 높은 투자비용과 자본 접근성의 문제를 들 수 있다. 하역장비의 전기화나 육상전원공급장치를 포함한 탈탄소 기술의 채택에 드는 투자 비용은 매우 비싸다. 한 선석에 육상전원공급장치를 설치하는 비용은 1백만 달러에 달하며, LNG와 대안연료 병커링 시설을 구축하는 데 드는 비용도 막대하다. 이러한 높은 투자 비용이 항만 탈탄소화 기술 채택을 저해하는 요인이 된다. 또한 중앙정부의 보조금이나 재정지원 부족에 따른 자본 부족도 항만의 탈탄소화 이행을 저해하는 요인이다. 특히 신재생에너지에 대한 자본비용이 높은 개발도상국이 경우 자본 부족 문제는 더욱 심각하다.

여섯째, 간접비용(hidden cost)으로 탈탄소화를 위한 연구개발, 컨설팅, 사업타당성 분석, 탈탄소 기술의 운영 및 유지보수, 등과 관련된 숨은 비용이 많이

들어 탈탄소화 기술의 채택을 방해할 수 있다.

그 외에도 자산 특유성(asset specificity)과 좌초자산(stranded asset)³⁾이라는 리스크도 장애요인이 된다. 예를 들어, 크루즈선박용 육상전원공급장치(OPS)는 다른 선박이나 육상운송수단에 사용할 수 없는 자산특유성이 있으며, LNG 병커링 시설은 향후 넷제로 대안연료를 사용해야 하는 점을 고려할 시 좌초자산이 될 가능성이 높다.

또한 항만의 여러 이해관계자는 탈탄소화와 관련하여 다양한 이해관계를 가지고 있다는 측면에서 이질적이며, 항만 규모 면에서 대형항만에 비해 소규모 항만은 탈탄소화 구현에 필요한 막대한 비용을 감당하기 어렵다는 점에서 항만 이질성(port heterogeneity)도 탈탄소화를 저해하는 장애요인이 될 수 있다(Ashrafi 외, 2019).

2) 행위적 장애요인

항만의 탈탄소화를 방해하는 행위적 요인으로는 먼저 정확한 정보 형성과 정보의 신뢰성을 들 수 있다. 성공적인 항만 탈탄소화 이행을 위해서는 탈탄소화의 이점, 온실가스 감축 가능성, 투자수익률(ROI)에 대한 정보뿐만 아니라 선사, 항만당국, 터미널운영자 등 이해관계자 간 에너지 소비나 탄소발자국에 관한 정보공유가 필수적이다. 또한 탈탄소 기술에 대한 정보의 신뢰성 부족은 부적절하고 비효율적인 선택으로 이어질 수 있다.

둘째, 항만 탈탄소화 조치의 이행은 오염을 일으키는 조직(항만)의 규범과 가치에 영향을 받는다. 특히 최고경영진의 탈탄소화에 대한 진정한 의지 부족과 조직원의 이해 부족은 탈탄소화 이행에 장애물로 확인되었다(Lozano 외, 2019).

셋째, 작업환경의 변화를 거부하는 조직(원)의 심리적 문화적 저항은 항만의 탈탄소화 이행을 저해한다. 탈탄소화는 새로운 개념이기 때문에 항만의 최고

3) 좌초자산이란 이미 투자를 진행했으나 수명이 끝나기 전에 더는 경제적 수익을 올리지 못하는 자산을 뜻함

경영진이 시행하기에 강력한 저항에 부딪힐 수 있다. 이는 손쉬운 수익성 있는 사업을 놔두고 비용이 많이 들고 성과가 낮은 탈탄소 전환은 추가적인 부담이기 때문이다. 이러한 조직의 관성(inertia)에는 항만근로자들이 새로운 지식과 훈련이 필요한 신규 장비보다 오래된 장비를 선호하는 것도 포함된다.

넷째, 제한된 합리성(bounded rationality)은 항만 탈탄소화를 저해하는 또 다른 행위적 요인이다. 항만 관리자 등은 제한된 합리성에 얽매어 있기 때문에 탈탄소화 조치를 시행할 때 정확한 정보에 기반한 합리적인 의사결정을 내리기보다는 비합리적인 경험칙(rule of thumb)에 주로 의존한다. 이는 전문지식이 부족하고 탈탄소 이행 조치에 대한 적절한 투자평가를 수행할 수 있는 능력이 부족한데 기인한다.

3) 조직적 장애요인

항만의 탈탄소화를 저해하는 조직적 장애요인으로 먼저 항만 거버넌스 측면에서 항만의 환경책임자가 권한과 지위가 부족할 때 탈탄소화 문제는 의사결정의 우선순위가 뒤로 밀리게 된다. 또한 항만당국의 역할에 따라 환경조치 이행에 차이가 있다. 예를 들어 북부 발틱국가들은 한자동맹 전통에 따라 지방정부나 지방자치단체가 항만에 대한 강력한 통제권을 갖고 있어 항만당국은 환경조치를 차질 없이 이행할 수 있는 더 많은 권한과 자율성을 갖게 된다. 이에 반해, 아시아권은 중앙정부가 항만에 대한 강력한 통제권을 가지고 있는 경우가 많아 항만당국이 환경조치를 취하는 데 있어 권한과 자율성이 적다. 한편 조직의 문화 측면에서 해당 항만이 평소 환경에 대한 존중과 감사, 기업의 사회적 책임(CSR)을 중요시한다면 항만관리자는 탈탄소화 조치를 적극 추진할 것이다.

4) 제도적 장애요인

제도적 장벽은 주로 정치제도, 즉 중앙정부와 지방정부에 의해 발생하는 문제이다. 항만의 지속가능성을 위

한 주요 제도적 장벽은 운송부문간 및 관할권간 협력이 필요한 공급망 문제와 관련되어 있다(Lam 외, 2014).

먼저 중앙정부와 지방정부에 의한 중복된 항만 거버넌스(overlapping port governance)는 탈탄소화를 위한 의사결정에서 항만의 정치적 역할을 약화시킬 수 있다. 항만거버넌스의 불필요한 복잡성은 항만의 친환경 조치의 이행을 확실히 지연시킨다. 예를 들어 항만정책에 대한 중앙정부와 도시정책에 관한 지방정부의 이해관계가 상충하면 원활한 항만 탈탄소화가 진행되기 어렵다.

또한 항만 탈탄소화에 대한 정부규제가 없거나 규제가 마련되어 있더라도 정부나 항만당국이 엄격하게 시행하지 않으면 항만의 지속가능성을 위한 투자는 제한될 가능성이 높다.

5) 기술적 장애요인

먼저 탈탄소화 기술과 항만 유형(운영) 간에는 양립불가능성(incompatibility)이 존재한다. 일부 기술은 컨테이너터미널에 적합하지만, 벌크 또는 일반화물 터미널에 동일한 기술을 구현하는 데 어려움이 있을 수 있다. 일례로 항만을 자주 방문하는 정기선 선박인 여객선이나 컨테이너 선박은 육상전원공급장치(OPS)를 활용할 수 있으나 부정기적으로 입항하는 벌크선은 OPS를 거의 활용하지 않는다(Williamsson 외, 2022). 또한 육상전원공급장치와 관련하여 충전소의 전압 및 주파수가 선박과 호환되지 않는 일도 있다.

둘째, 일부 탈탄소화 기술은 항만 운영을 방해하고 문제를 일으킬 수 있다. 예를 들어, 항만 탈탄소화를 위한 디지털화는 항만정보나 개인정보 유출 등 항만경쟁력을 훼손하는 사이버보안 문제를 유발할 수 있다.

셋째, 탈탄소 기술의 구현에는 여러 가지 복잡성이 존재한다. 일부 기술은 연료저장시설이나 OPS 같은 인프라 건설로 인해 새로운 공간을 차지하여 항만 운영을 방해할 수 있다. OPS는 일반적으로 항만의 전기 공급원, 기항 선박의 종류와 빈도, 도시 전력망까지의 거리에 영향을 받는다. OPS의 연결 및 해체, 그리고

충전에 걸리는 시간은 선박의 재항 시간을 증가시킬 수 있어 항만경쟁력에 부정적 영향을 미칠 수 있다 (Gibbs 외, 2014).

마지막으로 기술 준비성과 저감 가능성을 들 수 있

다. 탈탄소화를 위한 대안연료 중 바이오연료는 현재 공급이 제한적인 상황이고, 탄소포집이용저장(CCUS)과 같은 기술은 아직 성숙하지 않은 상황이다.

표 5. 항만 탈탄소화의 해결방안

해결 수단	주요 내용	사례
규제와 기준	<ul style="list-style-type: none"> 국제협약 및 국내 환경관련 법 이행 PA는 기후목표를 달성하기 위한 행동계획인 탈탄소정책 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 로테르담항 :Building a Sustainable Port LA항 :Clean Air Action Plan(2006)
인센티브	<ul style="list-style-type: none"> 높은 운영비용, 예산부족, 정부 지원부족은 항만 지속가능성의 주요 장애요인 항만관리자는 환경보다 경제적 지속가능성 중시(Becker& Caldwell, 2015) 차별화된 항만이용료, 선석우선배정, 임대계약 시 우대 등 다양한 인센티브 제공 	<ul style="list-style-type: none"> ESI, CSI, Green Award Clean Truck Program 선박속도저감 프로그램
비인센티브	<ul style="list-style-type: none"> 오염자부담원칙에 따라 요금 징수, 배출권거래제(ETS),탄소세 부과 	<ul style="list-style-type: none"> LALB :PierPass프로그램 (피크 시 킨당 \$50 부과)
자발적 합의	<ul style="list-style-type: none"> 항만 비용 부담 없이 오염자 스스로 탄소저감 노력 참여자들은 그린이미지 개선, 선석우선배정이나 선박검사 감면 혜택 부여 	<ul style="list-style-type: none"> 롱비치항 :Green Flag 프로그램(속도저감 프로그램) 로테르담항 :전환교통 프로그램
강제적 합의	<ul style="list-style-type: none"> PA가 부두 임대차계약 시 탈탄소 조항을 계약서에 포함(트럭회사, 예도선으로 확대) 	<ul style="list-style-type: none"> 로테르담항 :부두계약 시 탈탄소화의무화
정보공유와 인식 제고	<ul style="list-style-type: none"> PA가 정보 및 지식제공자로서 역할 (배출량 목록 가이드라인, 탈탄소화 성공사례, 저감기술 정보) PA가 혁신추진자 역할(필요시 대학, 연구기관과 협력) 	<ul style="list-style-type: none"> 로테르담항 :PortXL
항만전략계획	<ul style="list-style-type: none"> 국가 차원의 항만 마스터플랜에 탈탄소전략 포함 온실가스 배출량 목록, 모니터링, 보고체계 수립 	<ul style="list-style-type: none"> 로테르담항 :Port Vision 2050 싱가포르항 :Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint(2022)
투자 및 재정유인	<ul style="list-style-type: none"> 환경관련 공공재원과 은행권 그린론 활용 Public-Private Partnership(PA와 항만이용자/대형화주 간 공동투자) 	<ul style="list-style-type: none"> 함부르크항 :HHLA와 복합운송업자 Dry port 공동투자
관리개발	<ul style="list-style-type: none"> 항만관리자의 환경에 대한 인식 제고, 항만 최고위층의 탈탄소화에 대한 확고한 의지 중요 	<ul style="list-style-type: none"> 항만의 ESG 경영
3C(협력, 협업, 조정)	<ul style="list-style-type: none"> 항만거버넌스의 복잡성으로 인해 다양한 이해관계자 간 협력과 협조가 중요 국가, 역내, 국제 차원의 네트워크 구축(정보, 기술, 성공사례 공유) 	<ul style="list-style-type: none"> IMO, IAPH, C40

주 : Alamoush 외(2023) 토대로 저자 작성

6) 시간적 장애요인

일반적으로 의사결정에는 시간이 걸리고 탈탄소 조치를 배치하는 데도 시간이 필요하다. 또한 일부 탈탄소 기술의 이행 결정에는 중앙정부와 지자체 등 여러 계층의 다양한 부처 및 조직과 협의해야 하는

사안이 많다. 이러한 의사결정은 긴 리드타임을 초래하거나 또는 한발 늦은 결정으로 이어질 수 있다.

7) 관리적 장애요인

관리적 장애요인은 항만이 탈탄소화 솔루션의 구

현을 분석하고, 의사결정 및 감독할 수 있는 인식, 가이드라인, 자원, 경험있는 직원 및 숙련된 기술이 부족할 때 발생한다.

또한 항만 내부 부서 간에 행정적 갈등이 존재할 수 있다. 예를 들어, 재무부서는 낮은 자본비용을 선호하고, 조달부서는 내구성이 길고 운영효율적인 기술을 선호할 수 있으며, 환경에너지부에서는 배출가스 저감 가능성과 에너지 효율적인 기술에 초점을 맞출 수 있다.

2. 항만 탈탄소화의 해결방안

앞서 살펴본 다양한 항만의 탈탄소화의 장애요인들을 해결하기 위해서는 항만정책과 관리에 이들 수단과 도구들을 내재화하는 것이다. Alamoush 외(2021)는 항만의 탈탄소화를 위한 다양한 정책과 관리수단들을 제시하였다. 여기에는 규제와 기준, 인센티브와 비인센티브, 자발적 및 강압적 합의, 역량구축, 정보공유와 인식 제고, 항만의 전략적 계획, 온실가스 배출량 목록 작성, 모니터링과 보고, 다양한 이해관계자 간 협력과 조정 등이 포함된다.

나아가 Alamoush 외(2023)는 기존 연구 검토를 통해 추가적인 항만 탈탄소화 해결방안을 제시하였는데 여기에는 투자 및 재정 유인, 관리개발, 기타 해결방안 등이 있다.

먼저 항만의 탈탄소화 방해요인을 해결하기 위해서는 적절한 규제와 기준이 필요하다. 항만당국은 파리협약과 IMO MARPOL과 같은 국제협약과 국내 환경관련법에 따라 항만의 온실가스 배출을 줄이기 위한 관련 규정과 정책을 마련하고 법적 책임 기준을 명확히 할 필요가 있다. 둘째, 항만 탈탄소화를 유도하기 위한 당근과 채찍으로 인센티브와 비인센티브를 들 수 있다. 항만당국의 예산 부족과 정부 지원 부족은 항만의 지속가능성을 이행하는 데 주요 제약요인이다. 여기에 항만관리자들은 장기적인 환경보호보다는 단기적인 경제적 목표에 치중하는 경향이 있다(Becker 외, 2015). 따라서 환경친화적 선박에

대한 차별화된 항만이용료, 선석우선 배정, 세제감면과 같은 금전적 인센티브는 항만 탈탄소화에 이바지한다. 반면, 항만당국은 오염자부담원칙에 따라 선사, 민간부두운영회사, 트럭운영회사에 대해 차등요금을 부과하거나, 배출권거래제(ETS), 탄소부담금 등을 부과함으로써 배출가스를 줄이도록 유도해 나가야 한다. 셋째, 자발적 합의와 강제적 합의도 항만 탈탄소화를 위해 필요한 해결방안이다. 항만당국은 법적 강제력이나 보상이 없는 자발적 합의를 오염자들과 체결함으로써 항만의 비용부담 없이 오염자 스스로 탄소저감 노력을 유도하는 방법이다. 반면 강제적 합의는 항만당국이 부두임대차 계약 시 탄소저감이나 탈탄소 조항을 계약서에 명시적으로 포함함으로써 항만의 탈탄소화를 도모하는 방법이다. 넷째, 정보 및 지식공유를 항만 탈탄소화 저해요인들을 해결할 수 있다. 항만당국은 정보 및 지식제공자로서 오염자들에게 배출량 목록 가이드라인, 탈탄소화 성공사례, 온실가스 저감 기술 등을 제공하고, 필요시 대학이나 연구기관과 협력하여 탈탄소 기술을 개발하는 등 혁신추진자로서 역할을 해야 한다. 다섯째, 항만의 마스터플랜이나 전략계획에 탈탄소화 등 항만의 지속가능성 목표와 추진전략을 명시함으로써 배출량 목록, 모니터링, 보고체계 수립부터 세부적인 에너지 전환 및 항만 탈탄소화 방안들을 제시하여야 한다.

여섯째, 항만 탈탄소화를 자금 마련을 위해 투자 및 재정 유인이 필요하다. 이를 위해 환경관련 공공재원이나 은행권의 그린론을 활용할 필요가 있다. 또한 항만당국과 운송업자간 민관파트너십을 통해 항만배후지역에 복합터미널이나 내륙터미널(dry port) 등을 건설하여 환경친화적인 배후수송망을 구축하거나, 항만배후단지에 입주한 아마존, 알리바바와 같은 대형 전자상거래업체와 공동투자 등도 항만 탈탄소화에 필요한 자금 부족 문제를 해결하는 데 도움이 될 수 있다.

일곱째, 관리측면에서 항만관리자의 환경에 대한

인식 제고와 이를 위한 지속적인 교육훈련이 필요하다. 특히 최고위층의 항만 탈탄소화에 대한 확고한 의지는 조직 내 탈탄소화를 저해하는 행위적 장애요인을 해결하는 데 무엇보다 중요하다.

끝으로 다양한 이해관계자 간 협력과 협조가 항만 탈탄소화를 방해하는 다양한 장애요인을 해결하는 데 꼭 필요하다. 항만 거버넌스의 복잡성과 항만커뮤니티의 다양성을 고려할 때 성공적인 항만 탈탄소화를 위해서는 다양한 이해관계자들의 협조와 협력이 절대적으로 선결되어야 한다.

IV. 세계 주요 항만과 국내항만의 탈탄소화

1. 세계 주요 항만의 탈탄소화 사례

이번 장에서는 개별 항만들의 탈탄소화가 어떻게 진행되고 있는지 이해하기 위해 세계 주요 항만의 사례를 분석해 보고자 한다. 이를 위해 아시아, 북미, 유럽의 대표항만인 싱가포르항, 로스앤젤레스항, 로테르담항을 대상으로 탈탄소화 추진 목표와 조치를 비교해 봄으로써 글로벌 차원의 통찰력을 제공하고자 한다.

먼저 아시아 최대 환적항만인 싱가포르항은 2030년까지 항만의 배출가스를 2005년 수준의 60%까지 감축하고, 2050년까지 탄소중립을 달성하는 것을 목표로 설정하였다. 이를 위해 싱가포르항은 2030년까지 주요 이동수단과 하역장비의 전기화를 지속적으로 추진하고, 운송장비의 연료를 디젤에서 LNG로 전환하고, 관공선에 대해 바이오연료를 사용할 계획이다. 또한 신재생에너지 측면에서 2030년까지 태양광 사용을 확대하고, 2050년까지 수소연료를 하역장비에 적용할 예정이다. 2017년 완공한 LNG 병커링 시설뿐만 아니라 바이오연료, 암모니아, 수소 병커링 시설을 건설할 계획이다. 특히 디지털 전환 측면에서

2019년 윈스톱 데이터 저장 및 공유플랫폼인 싱가포르 해사데이터허브(Singapore Maritime Data Hub)를 구축하여 무역 및 물류생태계를 통합 운영하고 있다. 또한 2019년부터 항만운영 효율성을 제고하기 위해 선박기항 최적화를 위한 플랫폼인 'digitalPort'를 운영하여 입출항 선박의 제항시간 단축과 선박의 배출가스를 줄이고 있다.

미국 최대항만인 로스앤젤레스(LA)항은 화물이 선박에서 터미널을 거쳐 최종 종착지까지 이동하는 과정에서 “배출량 제로 경로(zero emission pathway)”를 달성한다는 목표를 수립하였다. 이를 위해 2030년까지 하역장비, 2035년까지 트럭의 탄소중립을 달성할 계획이다. 항만의 탈탄소화를 위한 세부적인 조치들로는 하역장비의 전기화에 이어 2020년부터 리튬이온 배터리를 장착한 야드트랙터와 수소연료전지 트럭의 실증운행을 마쳤다. LA항은 항만의 기술선도 프로그램(Technology Advancement Program)을 통해 청정기술과 관련 인프라 구축을 위해 자금조달, 테스트베드, 실증연구 등을 지원하고 있다. 또한 인센티브 방안으로 2005년 PierPass 프로그램을 도입하여 오프피크타임을 이용하는 트럭에 대해 인센티브를 제공함으로써 항만 인근의 트럭 정체 해소와 대기시간을 줄임으로써 항만의 배출가스를 줄이는 제도이다. 정책적 측면에서는 2006년 청정대기행동계획(Clean Air Action Plan)을 채택하여 클린트럭 프로그램, 선박속도저감 프로그램을 도입하였으며, 항만 이해관계자 간 협력 방안을 마련하는 계기가 되었다.

유럽 최대항만인 로테르담항은 2016년부터 2022년 사이 이산화탄소 배출량을 67% 감축한 데 이어 2030년까지 90% 감축목표를 설정해 두고 있다. 이를 통해 2050년 이전에 완전한 항만 탄소중립을 달성할 계획이다. 운영적 측면에서 2022년 싱가포르항과 녹색디지털 해운항로(Green & Digital Shipping Corridor)를 구축하여 2030년까지 해당 항로에서 이산화탄소를 20-30% 감축할 계획이다. 또한 1990년대

표 6. 세계 주요 항만의 탈탄소화 사례

항목	싱가포르항	로스앤젤레스항	로테르담항
목표	<ul style="list-style-type: none"> 2030년까지 (2005년 수준) 60% 감축 2050년까지 탄소중립 달성 	<ul style="list-style-type: none"> 2030년까지 하역장비 Net zero 달성 2035년까지 트럭 Net zero 달성 2040년까지 탄소중립 달성 	<ul style="list-style-type: none"> 2030년까지 배출량 90% 감축(Scope 1 & Scope 2) 2050년까지 탄소중립 달성
하역장비 전기화	<ul style="list-style-type: none"> e-RMGC(2015년), e-RTG (2019년) 배터리 AGV(2021년) 	<ul style="list-style-type: none"> e-YT(2009년), 하이브리드 YT(2010년) 	<ul style="list-style-type: none"> AGV (1996년) 2030년까지 모든 승용차 전기화
하역장비 저탄소연료	<ul style="list-style-type: none"> LNG-YT (2021년) 관공선에 바이오연료 사용(2025년) 	<ul style="list-style-type: none"> 배터리 YT(2020년), 수소연료전지 트럭 (2021년) 	<ul style="list-style-type: none"> 선박연료 HVO로 대체(2018년)
신재생 에너지	<ul style="list-style-type: none"> 태양광(2025-2030) 수소연료 하역장비(2025-2050) 	<ul style="list-style-type: none"> 트럭용 수소연료 충전소(2022) 	<ul style="list-style-type: none"> 청정연료 사용 준설선 (2028년)
인프라	<ul style="list-style-type: none"> LNG 병커링(2017년) 바이오연료, 암모니아, 수소 병커링 시설 계획 관공선용 전기충전소(2023-2030) 	<ul style="list-style-type: none"> 육상전원공급장치(AMP) 하역장비용 전기충전시설 (2020년) 	<ul style="list-style-type: none"> 육상전원공급장치 대안연료 공급시설 확충(LNG, 암모니아, 메탄올)
디지털화	<ul style="list-style-type: none"> Singapore Maritime Data Hub (2019) 원스톱 데이터 저장 및 공유플랫폼 스마트그리드(2025) 	<ul style="list-style-type: none"> 공급사슬 최적화를 위한 IT 및 데이터기술 활용 (2014) 	<ul style="list-style-type: none"> Smart Port 전담조직 운영 Pronto 스마트플랫폼 운영
인센티브	<ul style="list-style-type: none"> Green Ship Program (2011) 	<ul style="list-style-type: none"> PierPass Program Clean Truck Program 	<ul style="list-style-type: none"> ESI 기반 Green Passport
정책과 협력	<ul style="list-style-type: none"> digitalPORT 활용하여 이해관계자 간 협력 유도 	<ul style="list-style-type: none"> Clean Air Action Plan(2006) 선박속도저감 프로그램 	<ul style="list-style-type: none"> Green Deal on Maritime and Inland Shipping(2019) World Ports Climate Action Program 주도

자료 : 각 항만공사 홈페이지를 토대로 저자 작성

중반 세계 최초 완전 무인 자동화 컨테이너터미널을 운영한 경험을 기반으로 2030년까지 모든 영업 차량을 전기차로 교체하고, 2028년 청정연료를 사용하는 준설선을 사용할 계획이다. 육상전원공급장치를 대폭 확대하고 선박용 청정연료(LNG, 메탄올, 암모니아, 수소) 병커링 시설을 확충해 나갈 계획이다. 특히 로테르담항은 탄소중립과 디지털 전환을 함께 추진하는 전략을 시도하고 있다. 스마트플랫폼 Pronto

를 비롯하여 스마트항만 전담조직을 운영하고 있다.

2. 국내 항만의 탈탄소화 수준 평가

여기서는 국내 5대 항만인 부산항, 인천항, 울산항, 여수광양항, 평택당진항을 대상으로 항만 탈탄소화 수준을 평가해 보고자 한다. 이를 위해 기존 연구들에서 제시된 항만 탈탄소 저감방안을 바탕으로 하되 한국적 현실을 고려하여 4개 저감조치별 23개 평

가항목에 대해 정량적 평가를 실시하였다. 먼저 운영적 조치에는 선박속도저감 프로그램, 효율적 선박 관리(선박기항 최적화, 자동계류시스템), 하역장비의 친환경화(청정연료 사용), 트럭의 친환경화(노후 트럭 교체, 전기트럭 사용), 신재생에너지 사용(태양광, 풍력), 대안연료 벙커링 시설(LNG, 메탄올, 암모니아), 효율적 게이트시스템(트럭예약시스템), 친환경적 배후수송망(전환교통정책)을 평가항목으로 하였다. 기술적 조치에는 육상전원공급장치, 하역장비 전기화(e-Y/T, e-G/C, e-T/C), 에너지 최적화(스마트 그리드), 항만자동화, 디지털화(스마트항만, 디지털플랫폼 운영), 탄소포집이용저장(CCUS), LED 조명(그린 빌딩)을 평가항목으로 사용하였다. 다음으로 시장 기반조치에는 환경친화적선박지수(ESI)에 기반한 입항료 인하, Green Award기반 인센티브, 환경친화적 배후수송에 대한 인센티브를 평가항목으로 하였다. 마지막으로 정책 및 규제적 조치에는 환경관리계획, 에너지 관리계획, 자체 배출량 모니터링, 보고, 목록 시스템, 환경전담부서의 존재 여부를 평가항목에 포함하였다. 평가항목별 정보는 각 항만이 발간 지속가능경영 보고서, ESG경영보고서와 홈페이지를 통해 수집하였다. 평가방법은 평가항목별 완전히 개발했거나/채택하였거나/실행하고 있으면 6점, 부분적으로 시행하고 있거나 운영 중일 경우 3점, 미개발, 미운영일 경우 0점을 부과하였다. 이 같은 성과기반 스코어측정 방법은 Mahmud 외(2023)가 남아시아 항만들을 대상으로 수행한 바 있다. 평가결과에 따르면 총점 138점 중 부산항 78점으로 가장 높았으며, 인천항 60점, 여수광양항과 울산항 54점, 평택당진항 21점 순이었다(〈그림 2〉 참조). 부산항이 상대적으로 높은 점수를 얻은 것은 올 4월 부산신항 7부두에 국내 최초 완전자동화터미널이 개장하여 트럭예약시스템, 항만자동화, 스마트항만 분야에서 높은 점수를 얻었으며, 부산항만공사는 5대 항만 중 유일하게 탄소중립사업부라는 독립된 전담부서를 운영하고 있다는 점이 높이 평가되었다. 그러나 전반적으로 국내

항만들의 경우 선박 기항 최적화 같은 효율적 선박 관리, 트럭 친환경화, 대안연료 벙커링 시설, 친환경적 배후수송망, 스마트 그리드, 탄소포집이용저장(CCUS) 등은 전혀 실시되지 않거나 향후 계획 중인 것으로 조사되어 해외 선진항만에 비해 항만의 탈탄소화 수준이 미비한 것으로 평가된다. 특히 시장기반 조치로서 환경친화적 선박에 대한 인센티브는 전혀 시행되지 않고 있다.⁴⁾ 또한 육상전원공급장치의 경우 4대 항만에 설치되어 있으나 사용 의무화 조치가 없어 사용률이 저조한 실정이다.

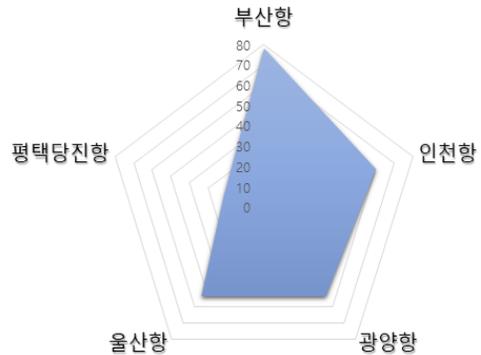


그림 2. 국내 5대 항만의 탈탄소화 수준 평가

V. 결론

기후위기 시대를 맞아 온실가스 배출을 줄여나가기 위해 국제사회가 공동으로 노력하고 있는 상황에서 해운항만산업도 탈탄소화에 적극 나서야 한다. 이 같은 시대적 소명에 따라 2023년 우리나라는 아시아 국가 최초로 ‘2050 국제해운 탄소중립’ 목표를 발표하였다. 그러나 2050년 탄소중립을 실현하기 위해서는 해운산업뿐만 아니라 글로벌 공급망의 주요 거점

4) 부산항, 인천항, 여수광양항, 울산항의 경우 선박속도저감 프로그램에 참여하는 선사에 대해서만 인센티브를 지급하고 있음

으로 선박, 하역장비, 육상운송수단이 결집되는 항만의 탈탄소화가 뒷받침되어야 가능하다.

이에 본 연구는 국내 최초로 항만에 초점을 맞춘 탈탄소화 전략을 제시해 보고자 하는 목적에서 항만 탈탄소화의 정의와 녹색항만, 지속 가능한 항만과의 개념적 차이점을 검토한 후, 항만의 배출가스 오염원 별로 선박-항만 연계, 항만운영, 내륙운송 관점에서 저감방안을 검토하였다. 나아가 구글 스칼라를 이용하여 최근 5년간 논문검색을 통해 항만 탈탄소화에 관한 문헌 연구를 실시하였다. 또한 문헌 연구를 통해 항만의 탈탄소화를 저해하는 요인들로서 경제적 요인, 행위적 요인, 조직적 요인, 제도적 요인, 기술적 요인, 시간적 요인, 관리적 요인 등을 제시하고, 이를 해결하는 방안을 검토하였다. 이어 아시아, 북미, 유럽의 대표항만들을 대상으로 항만의 탈탄소화 추진 목표와 주요 조치를 중심으로 이행 현황을 살펴보기 위해 사례분석을 시도하였다. 분석 결과에 따르면 선진국 항만들은 빠르면 2040년 늦어도 2050년 탄소중립 달성을 목표로 하역장비의 전기화와 저탄소 연료로의 전환을 적극 추진하고 있고, 태양광과 풍력 등 신재생에너지의 사용과 함께 수소연료 장비와 차량의 도입도 서두르고 있다. 또한 다양한 시장기반 인센티브 제도의 시행은 물론, 항만의 디지털 전환을 적극 추진하여 탄소중립을 실현하는 전략을 추진하고 있다.

한편 국내 5대 항만을 대상으로 항만 탈탄소화 이행 수준을 평가해 보고자 시도하였다. 이를 위해 기존문헌에서 제시되었던 온실가스 저감조치들을 바탕으로 한국 현실을 고려한 4개 저감조치(운영적 조치, 기술적 조치, 시장기반 조치, 정책 및 규제적 조치)별 23개 평가항목에 대해 정량적 평가를 시도해 보았다. 그 결과 부산항이 2024년 4월 국내 최초 완전 자동화 컨테이너터미널을 개장한 데 힘입어 가장 높은 평가를 받았으나 전반적으로 국내 항만들의 탈탄소화 수준은 선진국 항만들에 비해 상당히 뒤처져 있는 상황이다. 특히 환경친화적 내륙운송을 위한 조

치, 미래 대안연료 벙커링 시설, 스마트 그리드 등은 전혀 없는 실정이며 시장기반 인센티브 정책은 선박 속도저감 프로그램이 유일하며, 육상전원공급장치도 강제화 조치가 없어 이용률이 저조한 실정이다.

이상의 연구 결과를 토대로 국제사회의 온실가스 규제 강화 움직임에 적극 대응하는 한편, 국내 항만의 경쟁력 유지하기 위해서는 다음과 같은 항만 탈탄소화 정책과제를 적극 추진해야 한다.

첫째, 현재 해양수산부는 해운 탈탄소화를 위해 친환경 선박 건조에 초점을 맞추고 있으나 이제는 항만의 탈탄소화 방안에 대해서도 적극적인 정책 수립이 요구된다. 우리나라 국가산업단지 32개 중 20개(전체 산업단지 62.5%)가 항만에 인접해 있어 해운 산업과 더불어 항만에서의 탄소감축 노력은 국내 기업의 Scope 3 감축에 중요한 역할을 하며 결과적으로 범국가적인 2050년 탄소중립에 크게 이바지할 수 있다.⁵⁾ 또한 현재 항만법은 항만에서 배출되는 온실가스를 GHG 프로토콜의 Scope 기준에 의해 구분하지 않고 있다. 그 결과 항만이 공개하는 온실가스 배출량 범위는 항만별로 상이한 실정이다. 따라서 선박, 항만, 배후지역에서 발생하는 온실가스 전생애주기 배출량 목록(emission inventory), 모니터링, 보고 체계 수립하고 관련 정보 공개에 대한 정부의 표준화 및 규제가 필요하다.

둘째, 항만 탈탄소화를 위해서는 다양한 배출가스 저감 조치의 믹스전략이 필요하다. 화석연료에 기반한 운영적 저감조치만으로는 항만 탄소중립 달성이 불가하므로 기술적 조치(특히 디지털 전환), 무탄소

5) GHG 프로토콜(온실가스 회계처리 및 보고기준)에 의해 Scope 1은 기업이 직접 소유하고 관리하는 자원에서 발생한 탄소를 의미하므로 항만의 직접 통계 및 운영하에 있으며 기업이 소유하고 운영하는 모든 배출원을 포함함. Scope 2는 소유자산의 간접배출을 의미하므로 항만 소유 건물 및 운영을 위해 사용하는 전력 등이 포함되며, Scope 3은 이외 모든 간접적인 탄소배출을 의미하는 것으로 항만배후단지의 배출량을 포함하여 항만에서 발생하는 모든 배출량을 말함(기후솔루션, 2023)

연료 등 에너지 전환 조치, 인프라 조치, 규제 조치 등이 병행되어야 탈탄소 효과를 극대화할 수 있다. 이와 관련 기술적 저감 조치방안 중 육상전원공급장치의 경우 국내 항만은 시설 설치에만 정책적 초점을 맞출 것이 아니라 육상전원공급장치의 이용률 제고를 위한 인센티브와 사용 의무화 조치가 필요하다. 참고로 유럽연합은 'FuelEU Maritime'에 따라 2030년부터 EU 역내 항만에 정박하는 컨테이너선과 여객선에 대해 육상전원공급장치 사용을 의무화하고 있으며, 미국 캘리포니아주 대기자원청(CARB)은 2007년부터 육상전원공급장치 사용을 의무화하고 있다.

셋째, 항만의 탄소중립 달성을 위해서는 궁극적으로 신재생에너지 비중을 높여야 한다. 결국 탄소중립은 화석연료 기반에서 신재생에너지로의 전환을 의미하기 때문이다. 이를 위해 하역장비와 운송장비의 연료를 무탄소 청정연료로 전환하고, 항만 인근에 해상풍력 및 태양광 발전 설비를 확충하여 재생에너지 비중을 높여 나가야 한다. 나아가 향후 수요가 증가할 수소, 암모니아, 메탄올과 같은 무탄소 청정연료의 생산과 공급, 저장, 병커링 및 배후지역으로의 운송을 위한 인프라 시설을 구축하여 항만의 탄소중립 달성은 물론 항만의 에너지 허브화 전략을 적극 추진해 나갈 필요가 있다.

참고문헌

기후솔루션(2023), “국내 항만 탈탄소화 제언: 5대 항만을 중심으로”, 『산업동향 브리프』 No.3 .
 해양수산부 (2023), 『국제해운 탈탄소화 추진전략』
 IMO(2021), Fourth Greenhouse Gas Study 2020.
 Alamoush, A. S., Ballini, F., & Olçer, A. I. (2020). Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 160.
 Alamoush, A.S.; Olcer, A.I.; Ballini, F.(2021), Port greenhouse gas emission reduction: Port and

public authorities' implementation schemes, *Research in Transportation Business Management*, Vol. 43.
 Alamoush, A.S.; Dalaklis, D.; Ballini, F.; Olçer, A.I.(2023) Consolidating Port Decarbonisation Implementation: Concept, Pathways, Barriers, Solutions, and Opportunities. *Sustainability*, 15.
 Ashrafi, M., Acciaro, M., Walker, T.R., Magnan, G.M., Adams, M.(2019), Corporate Sustainability in Canadian and US Maritime Ports, *Journal of Clean Production*, 220, 386-397.
 Barberi, S., Sambito, M., Neduzha, L., Severino, A.(2021), Pollutant Emissions in Ports: A Comprehensive Review, *Infrastructures*, 6, 114
 Becker, A., Caldwell, M.R.(2015), Stakeholder Perceptions of Seaport Resilience Strategies: A Case Study of Gulfport (Mississippi) and Providence (Rhode Island). *Coastal Management*, 43, 1-34.
 Bjerkan, K.Y.; Seter, H.(2019), Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports? *Transportation Research Part D*, 72, 243-260.
 Chang, C.-C., and C.-M. Wang.(2012), “Evaluating the Effects of Green Port Policy: Case Study of Kaohsiung Harbor in Taiwan.” *Transportation Research, Part D17* (3): 185-189
 Cheon, S., and E. Deakin.(2010), “Supply Chain Coordination for Port Sustainability: Lessons for New Institutional Designs.” , 2166 (1): 10-19
 Chen, J., T. Zheng, A. Garg, X. Lang, L. Sifan, and Y. Fei.(2019), “Alternative Maritime Power Application as a Green Port Strategy: Barriers in China.” , 213:825-837
 Environmental Defend Fund (2024), *Practical Pathways for Port Decarbonization and Environmental Justice*.
 Gibbs, D., Rigot-Muller, P., Mangan, J., Lalwani, C.(2014), The Role of Sea Ports in End-to-End Maritime Transport Chain Emissions, *Energy Policy*, 64, 337-348.
 Iris, C., Lam, J.S.L.(2019), A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 170-182.

- Kuhlman, T., and J. Farrington.(2010), "What is Sustainability?" *Sustainability*, 2 (11): 3436-3448.
- Lam, J. S. L., and K. X. Li.(2019), "Green Port Marketing for Sustainable Growth and Development." , 84:73-81.
- Lozano, R.; Fobbe, L.; Carpenter, A.; Sammalisto, K.(2019), Analysing Sustainability Changes in Seaports: Experiences from the Gävle Port Authority. *Sustainable Development*, 27, pp. 409-418.
- Mahmud, K., Mohammed Mojahid Hossain Chowdhury & Md. Mostafa Aziz Shaheen,(2023), Green port management practices for sustainable port operations: a multi method study of Asian ports, *Maritime Policy & Management*,
- MPA(2022), Maritime Singapore Decarbonisation Blueprint: Working Towards 2050.
- Pavlic, B., F. Cepak, B. Sucic, M. Peckaj, and B. Kandus,(2014), "Sustainable Port Infrastructure, Practical Implementation of the Green Port Concept." *Thermal Science* 18 (3): 935-948
- Song, D.-P.(2024), A Literature Review of Seaport Decarbonisation: Solution Measures and Roadmap to Net Zero. *Sustainability*, 16.
- Sorrell, S.; O'Malley, E.; Schleich, J.; Scott, S.(2004), *The Economics of Energy Efficiency: Barriers to Cost-Effective Investment*, Edward Elgar, London.
- Sorrell, S., Mallett, A., Nye, S.(2011), *Barriers to industrial energy efficiency: A literature review*, UNIDO.
- Wang, B.; Liu, Q.; Wang, L.; Chen, Y.J.; Wang, J.S.(2023), A review of the port carbon emission sources and related emission reduction technical measures? *Environmental Pollution*.
- Williamsson, J.; Costa, N.; Santén, V.; Rogerson, S.(2022), Barriers and Drivers to the Implementation of Onshore Power Supply—A Literature Review. *Sustainability*, 14, 6072

항만의 탈탄소 전환에 관한 연구: 장애요인과 해결방안을 중심으로

한철환

국문요약

기후위기 시대를 맞아 '2050 탄소중립' 목표를 달성하기 위해서는 해운산업뿐만 아니라 글로벌 공급망의 주요 거점인 항만의 탈탄소화가 뒷받침되어야 가능하다. 이에 본 연구는 항만의 탈탄소화 개념 정립에 이어, 항만 배출가스 오염원별로 항만 탈탄소 전환의 장애요인과 해결방안을 문헌 연구를 통해 검토해 보았다. 이어 세계 주요 항만들의 탈탄소화 이행 목표와 전략에 대해 사례분석을 통해 살펴보고, 성과기반 스코어 추정방법을 이용하여 국내 5대 항만들의 탈탄소화 이행 수준을 정량적으로 평가해 보았다. 분석 결과, 국내 항만들의 탈탄소화 수준은 전반적으로 선진국 항만들에 비해 상당히 뒤쳐져 있는 상황이다. 특히 환경친화적 내륙운송을 위한 조치, 미래 대안연료 병커링 시설, 그리고 다양한 시장기반 인센티브 정책이 필요한 것으로 나타났다. 국내 항만의 탈탄소 전환을 위한 정책과제로서는 첫째, 항만에서 배출되는 온실가스의 배출량 목록, 모니터링, 보고체계 수립과 관련 정보 공개의 필요, 둘째, 다양한 온실가스 저감조치의 믹스전략, 셋째, 항만의 신재생에너지 비중 제고 등을 제시하였다.

주제어 : 항만 탈탄소화, 탄소중립항만, 배출저감조치