

이산화탄소 배출량을 고려한 국내 컨테이너터미널 환경 효율성 분석

심민섭* · † 김울성

*국립한국해양대학교 해양콘텐츠융복합협동과정 물류시스템전공, † 국립한국해양대학교 물류시스템공학과 교수

A Study on the Environmental Efficiency of the Container Terminals in South Korea Considering Carbon Dioxide Emissions

Min-Seop Sim* · † Yul-Seong Kim

*Department of Convergence Interdisciplinary Education, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

† Logistics system engineering, Korea maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 전 세계적으로 기후변화에 대응하기 위하여 탈탄소화의 중요성이 강조되고 있으며, ‘2050 탄소중립’이 글로벌 의제로 부상하였다. 국내 항만공사는 정부의 탄소중립 추진과제에 맞추어 세계적인 탄소중립 규제 흐름에 동참하고 있다. 항만에서 탈탄소화가 중요하게 인식되기 시작하면서, 2010년대 이후로 유해산출물을 고려한 컨테이너터미널 효율성 분석이 다양하게 진행되고 있다. 하지만, 이산화탄소 배출량을 고려하여 국내 컨테이너터미널의 효율성을 비교분석한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 대부분의 선행연구는 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 Tier 1 기준에 따라 이산화탄소 배출량을 측정하였으며, Tier 3 기준에 따라 효율성을 분석한 연구는 미비한 상황이다. 이에 본 연구에서는 17개 국내 컨테이너터미널 운영사를 대상으로 Tier 3 방식 기준 이산화탄소 배출량 지표를 활용하여 효율성을 분석하였다. 그리고 DEA-SBM 모형과 Undesirable Outputs 모형 분석결과를 비교분석하여 유해산출물 고려 전후의 효율성 변화를 파악하였다.

핵심용어 : 컨테이너터미널 운영사, 효율성 분석, 이산화탄소 배출량, DEA-SBM 모형, Undesirable Outputs 모형

Abstract : Recently, there has been a global emphasis on decarbonization in order to address climate change and achieve carbon neutrality by 2050. In line with government regulations, domestic port authorities have also started participating in this global agenda. Since 2010, when decarbonization became an important task in ports, there have been studies analyzing the environmental efficiency of container terminals, taking into account undesirable outputs. However, most of these previous studies only measured carbon dioxide emissions based on Tier 1, whereas this study is the first to analyze the environmental efficiency of South Korea's container terminals based on Tier 3, as presented in the IPCC guidelines. The study considered 17 container terminal operators in South Korea as decision-making units and used the DEA-SBM Model. Subsequently, an Undesirable Outputs Model was conducted to calculate the environmental efficiency.

Key words : container terminal operator, efficiency Analysis, CO₂ emission, DEA-SBM model, undesirable outputs model

1. 서 론

IPCC(2021, Intergovernmental Panel on Climate Change)에 따르면, 지구온난화로 지구의 온도는 가파르게 상승하고 있으며, 평균 기온은 1850-1900년 대비 2001-2020년 약 0.99℃ 상승하였다. 세계 평균 해수면은 지속적으로 상승하여 21세기 말 최대 1.01m, 해수온도는 최대 3.7℃로 상승할 전망이다. 이러한 기후변화 문제를 발생시키는 가장 큰 원인 중 하나는 이산화탄소(CO₂)이다(Jung and Chung, 2004). 전 세계적으로 기후변화에 대응하기 위한 탈탄소화의 중요성은 지속적으로 강조되고 있으며, 2016년 파리협정 및 2019년 유엔 기후행동

정상회의 이후 121개 국가가 기후목표 상향동맹에 가입하면서 2050 탄소중립이 글로벌 의제로 부상하였다(KMI, 2021).

IMO(International Maritime organization)는 온실가스 배출량을 2008년 대비 2050년까지 50% 감축을 목표로 설정하였다. 그리고 향상된 Port Master Data를 통한 선박·선석 호환성 개선, 선박 재화중량 최적화, 항만 간 운항속도 최적화 등 8대 온실가스 감축 조치방안을 제시하였다.

우리나라 정부는 2020년 12월에 발표한 ‘2050 탄소중립 추진전략’을 통해 세계의 기후변화 대응 전략에 동참하고 있다. 정책의 주요 추진과제를 살펴보면, 에너지 전환 가속화, 탄소중립 사회에 대한 국민인식 제고, 순환경제 활성화, 지역

† Corresponding author : 종신회원, logikys@kmou.ac.kr 051)410-4332

* 정희원, tla6355@g.kmou.ac.kr 051)410-4890

(주) 이 논문은 “이산화탄소 배출량을 고려한 국내 컨테이너터미널 효율성 분석”이란 제목으로 “2023년도 한국항해항만학회 추계학술대회(부산도시공사 이르피나, 2023.11.02.-03, pp.68-69)”에 발표되었음.

중심의 탄소 중립 실현 등의 내용을 포함하고 있다. 이후 2021년 12월 산업통상자원부에서 ‘탄소중립 산업 대전환 추진전략’, ‘에너지 탄소중립 혁신전략’, 국토교통부에서 ‘국토교통 탄소중립 로드맵’을 발표하면서, 탄소중립에 대한 국가적인 관심이 집중되었다. 해양수산부는 ‘해양수산 분야 2050 탄소중립 로드맵’을 발표하였으며, 2050 해양수산 탄소 네거티브라는 비전을 수립하고 5대 부분(해양에너지, 항만, 블루카본, 수산·어촌, 해운) 중심의 탄소중립을 추진하고 있다. 특히, 항만분야에서는 2050년까지 탄소중립 항만 구축을 목표로 하고 있으며, 국내 항만분야는 저탄소 친환경 항만 구현이 요구되고 있는 상황이다. 이에 따라 항만 구역 내 LED 조명 교체, 항만 탄소저감 건설기술 마련 및 태양광 발전시설 설치 등 에너지 효율화가 필요한 상황이다.

국내 항만에서는 야드 트랙터(Yard Tractor), 트랜스퍼 크레인(Transfer Crane) 등 항만장비를 친환경으로 전환하고, 재생에너지 발전과 에너지 효율화를 통하여 탄소배출을 제로화하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 대표적으로, 부산항만공사(BPA, Busan Port Authority)는 부산항을 친환경 항만으로 조성하고자 LNG 하이브리드 셔틀캐리어(S/C) 연구개발 사업을 추진하였다. 그리고 인천항만공사(IPA, Incheon Port Authority)는 인천항의 대기오염물질 배출 저감을 위해 선광신컨테이너터미널(SNCT)과 인천컨테이너터미널(ICT), E1컨테이너터미널(E1CT) 3개사의 야드 트랙터 75대와 트랜스퍼 크레인 4대의 배출가스저감장치 부착사업(DPF)을 성공적으로 완료하였다. 여수광양항만공사는 2021년 12월 공공기관 탄소중립 주관을 맞아 친환경 항만하역시설 현장을 점검하고 예코 안전조끼 전달식 행사를 진행하였다. 그리고 광양항에서 운영 중인 야드트랙터 85대에 배출가스저감장치 부착사업(DPF)을 진행하여 항만 미세먼지 배출 저감을 위해 노력하고 있다. 이와 같이 국내 항만공사는 우리나라 정부의 탄소중립 추진과제에 맞추어 다양한 정책을 수립하여 세계적인 탄소중립 규제 흐름에 동참하고 있다.

컨테이너터미널 효율성과 관련된 선행연구들을 살펴보면, 대부분 DEA(Data Envelopment Analysis) 분석을 진행하였으며, 컨테이너물동량을 산출변수로 선정하여 다양한 시사점을 도출하였다. 컨테이너물동량의 증감은 항만의 경쟁력을 나타내는 지표로, 항만 경쟁력은 물동량의 이동과 유치에 중요한 요인이 된다(Liu and Lee, 2019). 하지만, 2010년대 이후로 항만에서 탈탄소화가 중요하게 인식되기 시작하면서, 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NO_x) 등 유해산출물을 고려한 컨테이너터미널 효율성 분석이 진행되고 있다(Chang, 2013; Shin and Jeong, 2013; Lee, 2017; Na et al., 2017; Lin et al., 2019). 그리고 국토해양부(2008), KMI(2009, 2021, 2022) 등 정부 및 연구기관은 우리나라 항만의 이산화탄소 배출량을 측정하기 위한 다양한 산출방식을 제안하고 있다. 하지만, 국내 컨테이너터미널의 효율성을 비교할 때 유해산출물을 고려한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 유해산출물을 고려한 대부분의 선행연구

는 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 Tier 1(단일 오염물질 당 공통된 기본 배출계수 활용) 기준에 따라 이산화탄소 배출량을 측정하였으며(Chang, 2013; Na et al., 2017; Lin et al., 2019), Tier 2(특정 오염물질에 대해 장비 종류와 연료 종류로 구분하여 국가고유 배출계수와 국가고유의 통계를 적용하여 산출하는 방법), Tier 3(실제 장비 대수, 출력, 부하율 등의 데이터 재원 활용)의 기준에 따라 효율성을 분석한 연구는 미비한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 국내 컨테이너터미널 운영사 17개를 대상으로 KMI(2022)에서 발표한 Tier 3 방식(실제 출력, 부하율, 장비 대수 등의 데이터 재원 활용)에 따라 도출된 이산화탄소 배출량 지표를 활용하여 효율성을 분석하고자 한다. 이를 위해 현재까지 진행된 우리나라 항만분야 이산화탄소 배출량 측정 방법을 검토하였으며, 이산화탄소(CO₂) 배출량은 KMI(2022)에서 발표한 2021년 항만별 컨테이너 단위 당 이산화탄소 배출량을 적용하여 산출하였다. 그리고 유해산출물 고려 전후의 국내 컨테이너터미널 효율성 변화를 파악하고자, DEA-SBM 모형과 Undesirable Outputs 모형 분석을 순서대로 진행하였다. DEA-SBM 모형 분석 시 산출변수는 컨테이너물동량을 고려하였으며, Undesirable Outputs 모형에서는 산출변수로 컨테이너물동량과 이산화탄소 배출량을 동시에 고려하였다. 이후 두 가지 모형의 분석결과를 비교하여 국내 컨테이너터미널에 대한 다양한 시사점을 도출하였다. 기초자료는 각 항만공사 홈페이지 및 해양수산부에서 발표한 통계자료를 활용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 우리나라 항만분야 이산화탄소 배출량 측정 방법

국토해양부(2008)의 「저탄소 항만 구축방안에 관한 연구」에서는 국내 30개 항만 및 257개 부두를 대상으로 하역장비, 외부차량, 선박으로 구분하여 이산화탄소 배출량을 산정하였다. 분석 범위는 육지 기준 항만 게이트를 기점으로 하며, 해상 기준 부두의 항계점부터 부두까지의 항만활동에서 발생하는 이산화탄소 배출량으로 제한하였다. 그리고 각 연료에 대하여 이산화탄소(CO₂) 배출량은 연료소모량[t]×순발열량[TJ/t]×배출계수[KgCO₂/TJ]×산화계수로 표현하였다. 이를 통해 산출된 2007년 우리나라 항만의 이산화탄소 배출량은 약 421만 톤CO₂로 추정되었다. 이산화탄소 배출량은 광양항이 약 85만 톤CO₂(20.25%)로 가장 높았으며, 그 다음으로 울산항 약 80만 톤CO₂(18.98%), 인천항 약 56만 톤CO₂(13.25%), 부산항 약 50만 톤CO₂(11.93%) 순으로 나타났다. 또한, 부문별 발생량으로는 선박부문 62.61%, 하역부문 21.34%, 차량부문 16.05% 순으로 나타났다.

KMI(2009)는 우리나라 이산화탄소 배출량 산정 체계를 바탕으로 2006 IPCC 가이드라인에서 제시하고 있는 Tier 1 산

정방법을 사용하여 이산화탄소 배출량을 측정하였다. IPCC 가이드라인에 따르면, 탄소 배출량을 산정하기 위해 3가지 산정방식(Tier 1, Tier 2, Tier 3)으로 구분할 수 있다. Tier 1은 단일 오염물질 당 공통된 기본 배출계수를 활용한다. Tier 2는 특정 오염물질에 대하여 장비 종류와 연료 종류로 구분하여 국가고유 배출계수 및 국가고유의 통계를 적용하여 산출하는 방법이다. 마지막으로 Tier 3은 부하율, 출력, 실제 장비 대수 등의 데이터 재원 활용으로 산정이 가능하다. 이산화탄소 배출량의 산정범위는 국토해양부(2008)에서 관리하는 항계선부터 항만배후단지까지로 설정하였다. 2008년 우리나라 항만의 이산화탄소 배출량을 산정한 결과 약 189만 톤CO₂을 배출한 것으로 추정되었다. 이산화탄소 배출량은 부산항이 약 46만 톤CO₂(24.58%)로 가장 높았으며, 그 다음으로 광양항 약 34만 톤CO₂(17.99%), 울산항 약 25만 톤CO₂(13.36%), 인천항 약 22만 톤CO₂(11.89%) 순으로 나타났다. 또한, 부문별 발생량으로는 선박부문 34.8%, 하역부문 31.3%, 차량부문 33.9% 순으로 나타났다.

KMI(2021)는 스마트항만을 비자동화, 반자동화, 완전자동화와 같이 유형별로 구분하여 이산화탄소 배출량을 도출하였다. 배출량 산정방식은 국가 고유 배출계수가 존재할 때 사용하는 Tier 2를 적용하였으며, 장비 구동 방식에 따라 전기 및 디젤에 대한 각각의 배출계수를 적용하였다. 스마트항만 유형별 탄소배출량을 비교한 결과 195만TEU를 처리할 시 비자동화 컨테이너터미널은 32,308만 톤CO₂, 반자동화 컨테이너터미널은 27,238만 톤CO₂, 완전자동화 컨테이너터미널은 21,278만 톤CO₂를 배출하는 것으로 산정되었다. 이러한 결과를 통해 완전자동화 터미널은 비자동화 보다 34%, 반자동화 보다 22%의 배출량이 감축하는 것으로 나타났다.

KMI(2022)는 컨테이너와 비컨테이너로 구분하여 IPCC 가이드라인에 따라 Tier 3 방식으로 탄소 배출량을 산정하였다. 그리고 선행연구에서 각 장비의 출력별 배출계수는 탄소에 한정되어 있으나, 본 연구에서는 탄소의 배출계수에 이산화탄소 변환계수에 해당하는 44/12를 곱하여 이산화탄소 배출계수를 산출하였다. 이산화탄소 배출량의 산정방식은 아래 식 (1)과 같다. 항만별 컨테이너 단위당 배출량을 산정한 결과 2021년 기준 군산항과 부산항이 각각 26.536kgCO₂/TEU, 8,143kgCO₂/TEU를 배출하여 비교적 높은 수치를 보였으며, 그 다음으로 여수·광양항 4.682kgCO₂/TEU, 인천항 4.001kgCO₂/TEU, 평택·당진항 1.163kgCO₂/TEU로 나타났다. 이와 관련하여 자세한 내용은 <Table 1>과 같다.

$$E = \sum_{ij} (N_{ij} \times H_{ij} \times P_{ij} \times LF_{ij} \times EF_{ij}) \times 10^{-6}$$

$E = \text{emission (ton)}$
 $N_{ij} = \text{source population}$
 $H_{ij} = \text{annual hours of use of vehicle } i(h)$
 $P_{ij} = \text{average rated power of vehicle } i(kW)$
 $LF_{ij} = \text{typical load factor of vehicle } i(\text{fraction between } 0 \text{ and } 1)$
 $EF_{ij} = \text{average emission factor for use of fuel } j \in \text{vehicle } i(g/kWh)$
 $i = \text{off-road vehicle type}$
 $j = \text{fuel type}$

Table 1 Carbon emissions unit per container in 2012-2021(kgCO₂/TEU)

Year	Gunsan Port	Busan Port	Gwangyang port	Incheon port	Pyeongtaek Dangjin Port	Average
2012	13.979	7.889	4.481	6.091	1.052	6.699
2013	31.800	7.492	4.688	5.492	0.931	10.081
2014	23.116	7.064	4.792	5.030	0.995	8.199
2015	26.759	6.988	4.971	4.824	1.040	8.916
2016	20.991	7.616	4.375	4.146	1.128	7.651
2017	14.426	6.855	4.061	3.212	1.271	5.965
2018	14.683	7.327	4.410	3.256	1.342	6.204
2019	20.727	7.666	6.667	2.724	1.292	7.815
2020	22.216	7.718	4.908	2.660	1.278	7.756
2021	26.536	8.143	4.682	2.577	1.305	8.649
Average	21.523	7.476	4.804	4.001	1.163	7.793

Source: KMI(2022), A Study on the Improvement of Carbon-neutral Port Management System

2.2 선행연구 고찰

2.2.1 유해산출물을 고려한 컨테이너 항만 효율성 분석

Chang(2013)은 국내 23개 항만의 환경 효율성을 알아보기 자 SBM-DEA분석을 진행하였다. 투입변수로는 노동력, 선석 길이, 터미널 면적, 에너지 사용량으로 설정하였으며, 유익산출물로 화물 톤수, 선박 톤수를 설정하였다. 그리고 유해산출물로서 이산화탄소(CO₂) 배출량을 선정하였다. 분석결과, 우리나라 항만은 경제적으로 비효율적이나, 환경적인 요소를 고려 시 효율적인 것으로 나타났다.

Shin and Jeong(2013)은 2007년부터 2010년까지 이산화탄소(CO₂) 배출량을 고려한 8개 부산항과 광양항 컨테이너터미널의 효율성을 측정하고자 방향성 생산거리 함수(Directional Technology Distance Function) DEA 분석을 진행하였다. 투입변수로는 선석길이, CY 면적, 갠트리크레인 개수를 선정하였으며, 유익산출물로 컨테이너물동량, 유해산출물로 이산화탄소(CO₂)를 선정하였다. 분석결과, 유해산출물을 고려한 효율성 점수가 대체로 높게 나타났으며, 부산항 컨테이너터미널의 효율성이 광양항과 비교하여 높게 나타났다. 그리고 광양항은 항만시설을 바탕으로 컨테이너 처리실적을 높이지 못하면 막대한 경제적 손실이 불가피하다고 설명하였다.

Lee(2017)는 체선이 항만의 운영 효율성에 미치는 영향을 알아보려 DEA-SBM 분석을 진행하였다. 투입변수로는 항만하역능력을 선정하였으며, 유익산출물로 컨테이너처리량, 비컨테이너처리량, 유해산출물로 체선선박척수를 선정하였다. 분석결과, 체선선박척수의 잔여물을 제거한다면 3년 간 인천항은 11.9억원, 여수·광양항은 65.5억 원의 비용보존이 가능한 것으로 나타났다.

Na et al.(2017)은 2005년부터 2014년까지 이산화탄소(CO₂) 배출량을 고려한 8개 중국 컨테이너 항만의 효율성을 측정하고자 inseparable input-output SBM model 분석을 진행하였

다. 투입변수로는 선석길이, 항만면적, 갠트리크레인 개수, 야드 크레인 개수를 선정하였으며, 유익산출물로 컨테이너물동량, 유해산출물로 이산화탄소(CO₂) 배출량을 선정하였다. 분석결과 Bohai Bay Rim 항만 클러스터가 가장 높은 효율성을 보였으며, 지역에 따라 효율성 차이가 있는 것으로 나타났다.

Lin et al.(2019)은 유해산출물을 고려한 중국 16개 주요 항만의 효율성을 측정하고자 IDEA(Inverse data envelopment analysis) 분석을 진행하였다. 투입변수로는 선석길이, 장비 자산, 고용인원, 비용을 선정하였으며, 유익산출물로 컨테이너 물동량, 이익, 유해산출물로 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NO_x) 배출량을 선정하였다. 분석결과, DEA-CCR 모형에서 중국 항만 4개가 효율적으로 나타났으며, 항만 관리자는 항만개발과 환경보호 간 적절한 균형을 갖추어야 한다고 설명하였다.

Liu et al.(2021)은 2010년부터 2017년까지 Pilot Free Trade Zones(PFTZs) 내 중국의 6개 항만에 대한 효율성을 알아보려 Super-SBM 분석을 진행하였다. 투입변수로는 선석수, 선석길이, 순자산, 매출원가, 종사자수를 선정하였으며, 유익산출물로 화물 물동량, 컨테이너물동량, 매출액, 유해산출물로 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 배출량을 선정하였다. 분석결과, 상하이 항만이 친환경적으로 나타났으며, PFTZs 요인은 항만 효율성 증진에 긍정적인 역할을 한다고 설명하였다.

2.2.2 선행연구와의 차별점

2010년대부터 유해산출물을 고려한 컨테이너터미널 효율성 분석이 활발하게 진행되고 있다. 하지만, 국내 컨테이너터미널을 대상으로 효율성을 분석한 연구는 부족한 실정이다. 그리고 대부분 KMI(2009)에서 발표한 Tier 1에 따라 이산화탄소 배출량을 측정하였다(Chang, 2013; Na et al., 2017; Lin et al., 2019). 이에 본 연구에서는 가장 최근에 KMI(2022)에서 발표한 Tier 3 방식으로 산출된 이산화탄소 배출량 지표를 활용하여 보다 정확한 환경 효율성 분석을 진행하였다. 그리고 DEA-SBM 모형과 Undesirable Outputs 모형 분석을 동시에 진행하여 유해산출물 고려 전후의 효율성 변화를 파악하였다.

Table 2 Summary of Variable in the previous studies that considered undesirable outputs

Author	Input Variable	Output Variables	Undesirable Output Variables
Chang (2013)	Labor, Quay length, Terminal area, Energy consumption	Vessel, Cargo handled	CO ₂ emission
Shin and Jeong (2013)	Quay length, Number of C/C, CY area	Container throughput	CO ₂ emission
Lee (2017)	Handling Capacity	Throughput (Container, Non-container)	Number of delayed ship
Na et al. (2017)	Berth length, Port area, Gantry cranes, Yard cranes	Container throughput	CO ₂ emission
Lin et al. (2019)	Berth length, Equipment asset, Number of Employees, Cost	Container throughput, Profit	CO ₂ emission, NO _x emission
Liu et al. (2021)	Number of berths, Length of berths, Net asset, Cost of goods sold, Number of employees	Cargo throughput, Container throughput, Sales revenue	SO _x emission, NO _x emission

3. 연구 설계

3.1 분석 개요

본 연구에서는 유해산출물인 이산화탄소 배출량을 고려한 국내 컨테이너터미널 간 상대적 효율성을 비교하고자 DEA-SBM 모형과 Undesirable Outputs 모형 분석을 진행하였다. 분석을 위해 DEA-Solver Professional version 13.1 프로그램을 사용하였다.

투입변수 및 산출변수는 DEA 분석결과에 중요한 영향을 미치기 때문에 시사점의 가치가 있는지 판단하여 선정해야 한다. 따라서 변수의 적정성 및 신뢰성을 확보하기 위하여 선행 연구를 통해 살펴본 투입변수 중 다음 3가지 원칙에 부합하는 변수를 선정하였다. 첫째, DEA 분석 시 DMU는 투입변수 및 산출변수 합이 2배 이상이 되어야 신뢰성이 있다고 판단한다 (Golany and Roll (1989); Homburg(2001); Dyson et al. (2001)). 따라서 DMU를 고려한 적절한 변수 개수를 선정하였다. 둘째, DEA는 DMU를 대상으로 변수를 선정하여 분석한 뒤 상대적으로 비효율적인 변수를 파악하고 산출을 극대화하는 것이 목적이므로 개선이 가능한 변수를 선정할 필요가 있다. 셋째, 변수는 DMU와 직접 연관이 있어야 하며 주관적 판단은 배제되어야 한다. 따라서 컨테이너터미널 효율성 관련 선행연구에서 검토한 뒤, 해당 내용을 근거로 변수를 선정하여 연구의 객관성을 확보하였다.

앞서 선행연구와 3가지 원칙에 부합하는 변수를 <Table 3>과 같이 선정하였다. 투입변수는 선석길이, 하역능력 2가지로 구성하였다. 산출변수는 컨테이너물동량과 이산화탄소 배출량을 선정하였다. 기존 선행연구에서는 컨테이너터미널의 성과를 나타내는 대표적인 산출물로 컨테이너물동량을 선정하고 있다. 하지만, 본 연구에서는 컨테이너물동량과 유해산출물인 이산화탄소 배출량을 산출변수로 선정하여 다양한 시사점을 도출하고자 하였다.

Table 3 Input and output variables for the DMUs

Input variables	Output variable	Undesirable Output
Berth length, Handling Capacity	Container throughput	CO ₂ emission

3.2 분석 대상

본 연구에서는 부산항, 광양항, 인천항, 평택당진항, 군산항에 위치한 총 17개 컨테이너터미널 운영사를 DMU(Decision Making Units)로 선정하였다. 그리고 앞서 선정된 4가지 변수 중 3가지 변수(선석길이, 하역능력, 컨테이너물동량)는 각 항만공사 홈페이지 및 해양수산부에서 발표한 통계자료를 활용하였다. 또한, 이산화탄소(CO₂) 배출량은 KMI(2022)가 발표한 2021년 항만별 컨테이너 단위 당 이산화탄소 배출량을 적용하여 산출하였다. 자세한 내용은 <Table 4>와 같다.

Table 4 Performance of South Korea's container terminal operators in 2021

Container terminal operators		Berth Length (m)	Handling Capacity (million TEU)	Container throughput (thousand TEU)	CO ₂ emission (kg)
Busan Port	PNIT	1,200	209	2,737	22,287
	PNC	2,000	379	5,087	41,423
	HJNC	1,100	231	2,939	23,932
	HPNT	1,150	193	2,238	18,224
	BNCT	1,400	244	2,315	18,851
	HBCT	1,447	172	1,983	16,148
	BPT	2,900	383	3,875	31,554
	DPCT	826	82	1,017	8,281
Incheon port	SNCT	800	110	977	2,518
	HJIT	800	105	1,096	2,824
	ICT	600	55	505	1,301
	EICT	259	21	268	691
Gwangyang port	KIT	1,150	112	824	3,858
	GWCT	1,400	160	1,301	6,091
Pyeongtaek Dangjin Port	PCTC	1,040	60	519	677
	PNCT	720	36	288	376
Gunsan Port	GCT	480	28	201	5,334

3.3 분석기법

3.3.1 DEA-SBM Model

전통적인 DEA(Data Envelopment Analysis) 모형은 효율성 분석에 널리 사용되는 기법이며 상대적 효율성을 분석하기 위한 연구모형으로 주로 사용된다. 전통적인 DEA 분석은 여러가지 투입요소 및 산출요소의 가중크기 비교를 통하여 사업단위(Decision Making Unit: DMU) 당 효율성을 비교분석하며 각 DMU의 투입요소와 산출요소의 가중합 비율을 통해 상대적 효율성을 측정한다. DEA 모형은 규모수익불변(Constant Returns to Scale: CRS)을 다루는 CCR 모형과 규모수익가변(Variable Returns to Scale: VRS)을 가정하는 BCC모형으로 구분할 수 있다. 또한, CCR 모형과 BCC 모형의 효율성을 비교하여 규모의 효율성(Scale Efficiency: SE)을 파악할 수 있다. 하지만, 전통적인 DEA 모형은 투입변수와 산출변수의 여유분(Slack)을 무시하고 효율성을 측정하며, 투입물이나 산출이 비례적으로 증감한다는 가정 아래서 설정된 방사형(Radial)모형이다. 방사형 모형의 경우 효율성이 높게 나온 DMU들 간 순위를 결정할 수 없는 단점을 가지고 있다. 그리고 전통적인 DEA는 산출을 고정시키고 투입을 줄이는 투입기준(Input-oriented), 투입을 고정시키고 산출을 늘리는 산출기준(Output-oriented)과 같이 특정한 방향성을 가지고 있는 방향모형(Oriented model)이다. 방향모형은 투입 또는 산출에 대한 개별적인 효율성 정보를 제공하지 못한다는 단점이 있다(Park and Kim, 2014).

DEA-SBM(Slack based measure of efficiency) 모형은 잔여 요소가 존재하는 비효율적인 상태임에도 불구하고 효율성 값을 1로 계산하는 전통적인 DEA모형의 문제점을 보완할 수 있다(Park, 2011). DEA-SBM 모형은 Tone(2001)이 발표한 모형으로 전통적인 DEA 모형과 동일하게 거리 개념으로 DMU 간 효율성을 측정하지만, DEA에서 간과하는 잔여분(Slack)을 고려할 수 있다. 비방사적 모형(Non-radial)의 SBM-DEA 분석은 투입물이나 산출물의 비례적인 증감을 가정하지 않는 모형으로, 투입요소 잔여분 및 산출요소 부족분을 동시에 고려하여 최적의 효율성을 도출할 수 있다. 이로 인하여 DEA-SBM은 DMU 간의 순위를 명확하게 밝혀내는 장점이 있다(Park, 2008). 또한, 비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented)은 투입요소 및 산출요소의 개선폭을 동시에 고려하고 아울러 방사적 및 비방사적 잔여(Radial and Non-radial slacks)를 모두 반영하여 특정 방향성을 갖지 않고 투입물과 산출물을 동시에 최적화하는 분석을 진행할 수 있다. 따라서 SBM-DEA 모형은 전통적인 DEA 모형보다 효율성을 합리적으로 측정할 수 있는 방법으로 볼 수 있다.

DEA-SBM 모형의 계산식은 아래 식 (2)와 같다(Tone, 2001). 효율성 척도인 ρ_k 는 0과 1사이의 값으로 투입요소의 잔여분 s_i^- 와 산출요소의 부족분 s_r^+ 이 모두 0이 될 때 효율적인

상태 1이 된다. 이와 같이 DEA-SBM 모형은 투입요소의 잔여분과 산출요소의 부족분이 모두 0이 될 때만 효율적인 상태로 판명되어 전통적인 DEA 모형의 문제점을 보완할 수 있다(Park, 2011).

$$Min \rho_k = \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (s_i^- / x_{ik})}{1 + \frac{1}{s} \sum_{r=1}^s (s_r^+ / y_{rk})}$$

$$s.t. x_{ik} = \sum_{k=1}^n x_{ik} \lambda_k + s_i^-, \quad y_{rk} = \sum_{k=1}^n y_{rk} \lambda_k - s_r^+ \quad (2)$$

$$\lambda_k, s_i^-, s_r^+ \geq 0, \forall k, i, r$$

3.3.2 Undesirable Outputs Model

Cooper et al.(2006)은 Tone(2001)가 제안한 SBM(Slack based measure) 모형에서 유해산출물을 고려할 수 있도록 Undesirable Outputs Model을 제안하였다(Wang et al., 2019). Undesirable Outputs Model은 전통적인 DEA 분석에서 다루는 투입변수 및 산출변수 외에 유해산출물(Undesirable Output)을 추가로 고려하여 효율성을 도출하는 방식이다(Jung et al., 2020).

Undesirable Outputs Model의 계산식은 아래 식 (3)과 같다(Cooper et al., 2007). y_o^g 와 y_o^b 에서 y 는 산출물, g 는 유익산출물, b 는 유해산출물, o 는 평가대상 DMU를 의미한다. X 는 $m \times n$ 투입물 행렬, Y^g 는 $s_1 \times n$ 유익산출물 행렬, Y^b 는 $s_2 \times n$ 유해산출물 행렬, λ 는 $n \times 1$ 가중치 벡터이다. s_i^-, s_r^g, s_r^b 는 각각 투입물 초과분, 유익산출물 부족분, 유해산출물 초과분이다. 효율성 척도인 ρ_k 는 0과 1 사이의 값으로 투입물의 추가분 s_i^- 와 유익산출물의 부족분 s_r^g , 유해산출물 s_r^b 의 초과분이 모두 0으로 나타날 때 효율적인 상태 1이 된다.

$$\rho = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_i^-}{x_{io}}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_r^g}{y_{ro}^g} + \sum_{r=1}^{s_2} \frac{s_r^b}{y_{ro}^b} \right)}$$

$$s.t. \quad x_o = X\lambda + s^-$$

$$y_o^g = Y^g\lambda - s^g$$

$$y_o^b = Y^b\lambda + s^b$$

$$s^-, s^g, s^b, \lambda \geq 0 \quad (3)$$

4. 실증 분석

4.1 DEA-SBM 모형 분석결과

국내 주요 컨테이너터미널의 효율성을 분석하고자 DEA-SBM 모형을 이용하여 분석을 진행하였다. 방향모형(Oriented model)은 투입변수 또는 산출변수에 대한 개별적인 효율성 정보를 제공하지 못하므로 비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented)을 사용하여 투입물과 산출물을 동시에 최적화하였다. 투입변수는 선석길이(Input 1)와 하역능력(Input 2)을 사용하였으며, 산출변수로는 컨테이너물동량(Output 1)을 선정하였다.

비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented) CCR 모형 분석결과, CCR 모형의 전체 평균 효율성은 0.643으로 나타났다. 가장 효율적으로 분석된 컨테이너터미널 운영사는 PNC(1.000), HJNC(1.000)로 나타났으며, 그 다음으로 PNIT(0.936), HPNT(0.815), DPCT(0.704), HBCT(0.699), E1CT(0.679), BNCT(0.679), HJIT(0.658), BPT(0.640), SNCT(0.571), ICT(0.508), GWCT(0.486), PCTC(0.420), KIT(0.415), PNCT(0.377), GCT(0.350) 순으로 나타났다.

다음으로 비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented) BCC 모형 분석결과, BCC 모형의 전체 평균 효율성은 0.697로 나타났다. 가장 효율적으로 분석된 컨테이너터미널 운영사는 PNC(1.000), HJNC(1.000), E1CT(1.000)로 나타났으며, 그 다음으로 PNIT(0.959), HPNT(0.831), DPCT(0.781), HBCT(0.723), HJIT(0.715), BNCT(0.682), BPT(0.640), SNCT(0.617), ICT(0.594), GWCT(0.506), PCTC(0.468), PNCT(0.448), GCT(0.447), KIT(0.444) 순으로 나타났다.

부산항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 BPT를 제외하고 효율성이 평균보다 높은 것으로 나타났으며, 특히 PNC와 HJNC가 전체 운영사 중 가장 높은 효율성을 보이고 있다. 부산항은 우리나라를 대표하는 컨테이너 전용 항만으로서 가장 많은 컨테이너물동량을 처리하기 때문에 효율성이 높게 나온 것으로 판단된다.

인천항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 평균 수준의 효율성을 나타내고 있으며, BCC 모형에서 E1CT의 경우 가장 높은 효율성(1.000)을 보이고 있다. 이는 E1CT의 경우 규모를 고려하지 않을 시 높은 수준의 순수기술효율성(Pure Technical Efficiency: PTE)을 보이고 있다는 것을 의미한다.

이외의 컨테이너터미널 운영사(광양항, 평택당진항, 군산항)는 평균 보다 효율성이 낮은 것으로 나타났으며, 이는 산출변수로 컨테이너물동량을 고려 시 컨테이너 전용항만으로서 경쟁력이 낮은 수준임을 의미한다.

Table 5 Domestic container terminal operators efficiency based on the DEA-SBM(Non-oriented) model

Operators	CCR				BCC			
	Score	Slack			Score	Slack		
		Input 1	Input 2	Output 1		Input 1	Input 2	Output 1
PNIT	0.936	97.1	0.0	68.2	0.959	98.1	0.0	0.0
PNC	1.000	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0
HJNC	1.000	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0
HPNT	0.815	270.1	26.3	0.0	0.831	202.2	0.0	217.7
BNCT	0.679	112.4	0.0	960.0	0.682	220.9	0.0	812.7
HBCT	0.699	539.3	0.0	325.6	0.723	583.3	0.0	205.6
BPT	0.640	1376.5	94.3	0.0	0.640	900.0	4.0	1212.0
DPCT	0.704	393.3	0.0	83.6	0.781	270.4	0.0	72.1
SNCT	0.571	219.5	0.0	499.4	0.617	184.6	0.0	423.0
HJIT	0.658	245.9	0.0	313.3	0.715	204.6	0.0	240.4
ICT	0.508	309.8	0.0	233.2	0.594	175.7	0.0	220.7
E1CT	0.679	148.2	0.0	13.9	1.000	0.0	0.0	0.0
KIT	0.415	559.0	0.0	679.3	0.444	448.5	0.0	668.9
GWCT	0.486	555.7	0.0	846.5	0.506	584.4	0.0	734.9
PCTC	0.420	723.4	0.0	286.3	0.468	591.3	0.0	274.0
PNCT	0.377	606.8	14.5	0.0	0.448	388.1	0.0	181.9
GCT	0.350	332.2	0.0	174.8	0.447	187.0	0.0	161.2
Average	0.643	-			0.697	-		

4.2 Undesirable Outputs 모형 분석결과

다음으로 국내 주요 컨테이너터미널의 효율성을 분석하고자 Undesirable Outputs 모형을 이용하여 분석을 진행하였다. DEA-SBM 모형과 동일하게 비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented)을 사용하여 투입물과 산출물을 동시에 최적화하였다. 투입변수는 선석길이(Input 1)와 하역능력(Input 2)을 사용하였으며, 유익산출물은 컨테이너물동량(Output 1), 유해산출물은 이산화탄소 배출량(Output 2)으로 선정하였다.

비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented) CCR 모형 분석결과, CCR 모형의 전체 평균 효율성은 0.783으로 나타났다. 가장 효율적으로 분석된 컨테이너터미널 운영사는 PCTC(1.000), EICT(1.000), PNC(1.000), HJNC(1.000), HJIT(1.000)로 나타났으며, 그 다음으로 PNIT(0.936), SNCT(0.871), PNCT(0.863), HPNT(0.815), ICT(0.747), DPCT(0.704), HBCT(0.699), BNCT(0.678), BPT(0.640), GWCT(0.595), KIT(0.501), GCT(0.260) 순으로 나타났다.

다음으로 비방향 SBM 모형(SBM Non-oriented) BCC 모형 분석결과, BCC 모형의 전체 평균 효율성은 0.806으로 나타났다. 가장 효율적으로 분석된 컨테이너터미널 운영사는 PNCT(1.000), PCTC(1.000), PNC(1.000), HJNC(1.000), EICT(1.000), HJIT(1.000)로 나타났으며, 그 다음으로 PNIT(0.949), SNCT(0.874), HPNT(0.829), ICT(0.754), DPCT(0.732), HBCT(0.714), BNCT(0.689), BPT(0.643),

GWCT(0.615), KIT(0.503), GCT(0.403) 순으로 나타났다.

부산항 신항에 위치한 컨테이너터미널 운영사(PNIT, PNC, HJNC, HPNT, BNCT)는 여전히 높은 수준의 효율성을 보이고 있는 반면, 부산항 북항에 위치한 컨테이너터미널 운영사(HBCT, BPT, DPCT)는 평균보다 효율성이 낮아진 것을 알 수 있다. 부산항의 컨테이너 단위 당 이산화탄소(CO₂) 배출량은 8.143kgCO₂/TEU로 타 항만과 비교하여 높은 수준이다. 이는 부산항 신항 컨테이너터미널 운영사의 경우 유해산출물을 고려하더라도 높은 효율성으로 인하여 경쟁력을 갖추고 있는 반면, 부산항 북항 컨테이너터미널 운영사는 효율성을 향상시키기 위한 전략을 수립할 필요가 있다는 것을 의미한다.

인천항과 평택당진항은 DEA-SBM(Non-oriented) 모형과 비교하여 효율성이 두드러지게 향상된 것으로 나타났다. 인천항과 평택당진항의 컨테이너 단위 당 이산화탄소(CO₂) 배출량은 각각 2.577kgCO₂/TEU, 1.305kgCO₂/TEU로 낮은 수준이다. 인천항과 평택당진항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 타 운영사와 비교하여 컨테이너물동량이 다소 부족할지라도 높은 효율성을 보이는 것으로 나타났다.

광양항의 컨테이너 단위 당 이산화탄소(CO₂) 배출량은 4.682kgCO₂/TEU로 타 항만과 비교하여 낮은 수준이지만, 여전히 평균보다 낮은 효율성을 보이고 있다.

마지막으로 군산항은 가장 높은 컨테이너 단위 당 이산화탄소(CO₂) 배출량 26.536kgCO₂/TEU를 보이고 있으며, 효율성이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 6 Domestic container terminal operators efficiency based on the Undesirable Outputs model

Operators	CCR					BCC				
	Score	Slack				Score	Slack			
		Input 1	Input 2	Output 1	Output 2		Input 1	Input 2	Output 1	Output 2
PNIT	0.936	123.9	5.1	0.0	0.0	0.949	98.1	0.0	0.0	464.3
PNC	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
HJNC	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
HPNT	0.815	270.1	26.3	0.0	0.0	0.829	270.7	17.1	0.0	391.5
BNCT	0.678	489.8	71.5	0.0	0.0	0.689	496.5	62.1	0.0	348.5
HBCT	0.699	667.4	24.3	0.0	0.0	0.714	568.4	23.6	0.0	960.8
BPT	0.640	1,376.5	94.3	0.0	0.0	0.643	1,337.9	94.0	0.0	375.2
DPCT	0.704	426.2	6.2	0.0	0.0	0.732	296.4	5.4	0.0	1,259.8
SNCT	0.871	86.9	16.4	0.0	0.0	0.874	77.8	17.1	0.0	0.0
HJIT	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
ICT	0.747	231.4	6.6	0.0	0.0	0.754	186.1	10.0	0.0	0.0
EICT	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
KIT	0.501	548.5	33.1	0.0	1,734.5	0.503	527.7	34.6	0.0	1,734.5
GWCT	0.595	450.4	35.4	0.0	2,738.6	0.615	538.4	40.9	0.0	1,284.2
PCTC	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
PNCT	0.863	142.9	2.7	0.0	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0
GCT	0.260	401.0	13.0	0.0	3,697.0	0.403	221.0	7.0	67.0	4,643.1
Average	0.783	-				0.806	-			

5. 결 론

5.1 결론 및 시사점

지난 수십 년간, 글로벌 기후변화는 사람들로 하여금 온실가스 배출량 저감의 필요성을 인식하게 하였다. 지구온난화와 기후변화에 대한 관심이 많아지면서, 많은 항만들은 친환경적인 시설을 통해 환경친화적인 운영을 하고자 노력하고 있다(Chang, 2013). 그리고 많은 연구에서 컨테이너터미널의 효율성을 측정 시 온실가스 배출량을 중요한 고려요인으로 인식하고 있다(Na et al. 2017, Lin et al. 2019). 이에 본 논문은 이산화탄소 배출량(CO₂)을 고려한 국내 컨테이너터미널 간 효율성을 비교하고자 DEA-SBM 모형 및 Undesirable Outputs 모형 분석을 진행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 국내 컨테이너터미널 운영사를 대상으로 DEA-SBM 모형 분석결과, 전체 평균 효율성은 0.643으로 나타났다. 효율성이 가장 높게 나온 컨테이너터미널 운영사는 부산항의 PNC, HJNC로 나타났다. 인천항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 평균 수준의 효율성을 나타내고 있으며, 광양항, 평택당진항, 군산항에 위치한 컨테이너터미널 운영사의 효율성은 평균보다 낮은 것으로 나타났다.

둘째, 국내 컨테이너터미널 운영사를 대상으로 Undesirable Outputs 모형 분석결과, 전체 평균 효율성은 0.697로 나타났다. 효율성이 가장 높게 나온 컨테이너터미널 운영사는 부산항의 PNC, HJNC, 인천항의 HJIT, EICT, 평택당진항의 PCTC로 나타났다. 광양항과 군산항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 이산화탄소 배출량을 고려했음에도 불구하고 DEA-SBM 모형 분석과 동일하게 효율성이 평균보다 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 컨테이너물동량과 이산화탄소 배출량을 동시에 고려하였을 때 항만의 특성에 따라 컨테이너터미널의 효율성이 변할 수 있다는 것을 나타낸다.

분석결과에 대한 시사점으로 첫째, 인천항과 평택당진항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 환경친화적인 운영을 강조한 마케팅 전략을 수립할 필요가 있다. 인천항과 평택당진항의 컨테이너 당 이산화탄소 배출량은 타 항만과 비교하여 낮은 수준이며, 이로 인하여 Undesirable Outputs 모형 분석결과 부족한 컨테이너물동량을 극복하고 효율성이 크게 상승한 것으로 나타났다. 2018년 10월 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Inter-governmental Panel on Climate Change, IPCC)가 탄소중립(Net-zero 2050)을 제안하면서 항만의 친환경적인 운영을 위한 노력이 요구되고 있다. 특히, 인천항만공사(IPA)는 친환경 항만을 조성하고자 중장기 미세먼지 저감 목표를 설정하였으며, 하역장비 친환경화, 노후예선에 대한 친환경 연료전환, AMP 설비 구축 등을 진행하고 있다. 따라서 인천항 및 평택당진항에 위치한 컨테이너터미널 운영사는 컨테이너 당 이산화탄소 배출량이 적다는 점과 Undesirable Outputs 모형

을 통해 크게 향상된 컨테이너터미널 효율성을 부각시키며 컨테이너물동량을 유지하기 위한 마케팅 전략을 세울 필요가 있다.

둘째, 부산항 북항 컨테이너터미널 운영사는 항만 장비의 친환경 전환, 항만 내 재생에너지 발전, 수소 전원 도입 등 탈탄소화를 위한 다양한 접근을 시도할 필요가 있다. 부산항 북항에 위치한 컨테이너터미널 운영사(HBCT, BPT, DPCT)는 DEA-SBM 모형 분석결과 대체로 평균 보다 높은 효율성을 나타내었지만, 이산화탄소 배출량(CO₂)을 고려한 Undesirable Outputs 모형 분석 시 효율성이 평균보다 낮아졌다. 2021년 BCC 모형을 기준으로 부산항 북항 컨테이너터미널 운영사(HBCT, BPT, DPCT)는 각각 960.8kgCO₂/TEU, 375.2kgCO₂/TEU, 1,259.8kgCO₂/TEU의 이산화탄소 배출량을 줄여야 하는 것으로 나타났다. 이는 부산항 북항 컨테이너터미널 운영사들은 컨테이너물동량과 환경적인 운영 측면을 동시에 고려 시 타 운영사와 비교하여 경쟁력을 갖추지 못한다는 것을 의미한다. 지금까지 선사들의 항만선택요인을 살펴보면, 항만시설(Murphy 1991), 항만효율성(Tai and Hwang, 2005), 지리학적 위치(Nir et al., 2003), 배후단지와의 연계성(Wiegman et al., 2008) 등이 중요하게 고려되었다. 그리고 부산항은 미주항로와 구주항로와 같은 기간항로의 중심에 위치하여 있다는 지리적 위치와 항만시설 등의 장점으로 경쟁력 있는 컨테이너 환적항만으로 성장하였다. 하지만, 친환경적인 항만운영의 기조에 따라 항만에서 발생하는 온실가스 배출량은 새로운 문제로 주목받고 있으며(Liao et al., 2010, Li et al., 2019), 컨테이너터미널의 지속가능한 운영 및 경쟁력을 확보하기 위해서는 탈탄소화를 위한 다양한 방안을 도입할 필요가 있다.

마지막으로, 광양항과 군산항은 유해산출물 고려 전후의 효율성 변화를 파악한 결과 두 가지 분석에서 모두 효율성이 낮은 것으로 나타났다. 이는 컨테이너터미널로서 경쟁력을 갖추지 못하고 있으며, 친환경적인 항만운영의 기조에도 부합하지 않다는 것을 의미한다.

5.2 연구의 한계점 및 향후 연구방향

본 연구는 2021년 국내 컨테이너터미널 운영사를 대상으로 유해산출물 고려 전후의 효율성 변화를 파악하여 다양한 시사점을 도출하였다. 하지만, 국내외 컨테이너터미널 간 유해산출물을 고려한 효율성을 비교분석하지 못하였다. 또한, 이산화탄소 외 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x) 등과 같은 유해산출물을 고려하지 못하였다는 한계점이 있다. 따라서 향후에는 여러 가지 유해산출물을 고려하여 국내외 컨테이너터미널 간 효율성을 비교분석하는 연구가 진행되길 기대한다.

References

- [1] Chang, Y. T.(2013), “Environmental efficiency of ports: a data envelopment analysis approach”, *Maritime Policy and Management*, Vol. 40, No. 5, pp. 467-478.
- [2] Cooper, W. W., Seiford, L. M. and Tone, K.(2006) “Introduction to Data Envelopment Analysis and Its Uses: With DEA-Solver Software and References”, Springer Science and Business Media.
- [3] Cooper, W. W., Seiford, L. M. and Tone, K.(2007), “Data envelopment analysis: a comprehensive text with models”, references and DEA-solver software, Vol. 2.
- [4] IPCC(2021), “Climate Change 2021: The physical science basis”
- [5] Jung, K. O. and Chung, Y. K.(2004), “The pollution and economic growth based on the multi-country comparative analysis”, *Journal of Industrial Economics and Business*, Vol. 17, No. 4, pp. 1077-1098.
- [6] Jung, K. S., Park, S. H., Lee, H. C., Kim Y. N. and Yeo, G. T.(2020), “A Study on the Efficiency of Container Terminal Considering Undesirable Variables”, *Journal of The Korean Association of Shipping and Logistics*, Vol. 36, No. 4, pp. 509-531.
- [7] KMI(2009), “Port Areas: Response to the Climate Change Regime”
- [8] KMI(2021), “A Study on Carbon Reduction Effects following the Smartization of Maritime Ports -Focusing on Power Conversion-”
- [9] KMI(2022), “A Study on the Improvement of Carbon-neutral Port Management System”
- [10] Li, X., Kuang, H. and Hu, Y.(2019), “Carbon mitigation strategies of port selection and multimodal transport operations—A case study of northeast China”, *Sustainability*, Vol. 11, No. 18.
- [11] Liao, C. H., Tseng, P. H., Cullinane, K. and Lu, C. S.(2010), “The impact of an emerging port on the carbon dioxide emissions of inland container transport: An empirical study of Taipei port”, *Energy Policy*, Vol. 38, No. 9, pp. 5251-5257.
- [12] Lin, Y., Yan, L. and Wang, Y. M.(2019), “Performance evaluation and investment analysis for container port sustainable development in china: An inverse DEA approach”, *Sustainability*, Vol. 11, No. 17.
- [13] Liu, Y. and Lee, C. B.(2019), “A Study on the structural changes of import & export containers between South Korea and Chines ports”, *Korea Logistics Review*, Vol. 29, No. 2, pp. 1-12.
- [14] Liu, J., Wang, X. and Guo, J.(2021), “Port efficiency and its influencing factors in the context of Pilot Free Trade Zones”, *Transport Policy*, Vol. 105, pp. 67-79.
- [15] Murphy, P. R., Dalenberg, D. R. and Daley, J. M.(1991), “Analyzing international water transportation: the perspectives of large US industrial corporations”, *Journal of Business Logistics*, Vol. 12 No. 1, pp. 169-190.
- [16] Nir, A. S., Lin, K. and Liang, G. S.(2003), “Port choice behaviour—from the perspective of the shipper”, *Maritime Policy and Management*, Vol. 30 No. 2, pp. 165-173.
- [17] Park, C. M. and Kim, T. S.(2014), “A Study on the Efficiency of Logistics Industry in Korea using DEA-SBM”, *Korean Journal of Logistics*, Vol. 22, No. 4, pp. 27-46.
- [18] Park, H. G.(2011), “The Efficiency of e-Logistics on the Global Logistics Providers Using the SBM Model”, *Journal of Korea Port Economic Association*, Vol. 27, No. 4, pp. 37-49.
- [19] Park, N. G.(2008), “An Empirical Measurement Way of Efficiency Prediction for Korean Seaports: SBM and Wilcoxon Signed-Rank Test Approach”, *Journal of Korea Port Economic Association*, Vol. 24, No. 4, pp. 313-327.
- [20] Shin, C. H. and Jeong, D. H.(2013), “Data envelopment analysis for container terminals considering an undesirable output-Focus on Busan port & Kwangyang port”, *Journal of navigation and port research*, Vol. 37, No. 2, pp. 195-201.
- [21] Tai, H. H. and Hwang, C. C.(2005), “Analysis of hub port choice for container trunk lines in East Asia”, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, pp. 907-919.
- [22] Wang, C. N., Le, A. L. and Hou, C. C.(2019), “Applying undesirable output model to security evaluation of Taiwan”, *Mathematics*, Vol. 7, No. 11.
- [23] Wiegmans, B. W., Hoest, A. V. D. and Notteboom, T. E.(2008), “Port and terminal selection by deep-sea container operators”, *Maritime Policy and Management*, Vol. 35, No. 6, pp. 517-534.

Received 13 February 2024

Revised 28 February 2024

Accepted 04 March 2024