

선박 배기가스 배출량 및 환경비용 산출에 관한 연구

: 부산항을 중심으로

이민우* · 이향숙**

Estimation of Ship Emissions and Environmental Costs

: focusing on Port of Busan

Min-woo Lee · Hyang-sook Lee

Abstract

Port of Busan is Korea's largest trading port processing over 18,000 TEU a year. This rapid growth causes air pollution problems in Busan. Ship emissions are significant air pollution sources and port area is relatively close to the business district, therefore it may have serious effects to the health of local people and environment. In this study, ship emissions are estimated, especially on hotelling large vessels. As a result, Port of Busan has 50,686, 48,842 ship calls and 2,343,037 and 2,297,118 tons of ship emissions in 2011 and 2012 respectively. Also, the environmental cost in Port of Busan is approximately 1.2 trillion won per year. This study emphasizes the necessity of ship emissions regulation, hence, it is expected to make a significant contribution in setting up ship emission management system.

Key words: Port of Busan, Air pollution, Large vessel, Ship emission, Environmental cost

▷ 논문접수: 2016. 09. 09. ▷ 심사완료: 2016. 12. 21. ▷ 게재확정: 2016. 12. 26.

* 인천대학교 동북아물류대학원 석사과정, 제1저자, lmw520@naver.com

** 인천대학교 동북아물류대학원 교수, 교신저자, hslee14@inu.ac.kr

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

세계화로 인한 국제 무역의 급속한 성장은 국가 간 교역량을 증가시켰다. 이로 인한 항만 물동량의 증가는 한편으로 선박으로부터 발생하는 배기가스 및 환경비용의 증대를 유발하였다. 이러한 현상은 지구 온난화를 가속화하고, 환경 및 건강에 악영향을 미치고 있어 그 심각성이 매우 크다고 할 수 있다. 전 세계적으로 이러한 현상에 주목하고 있으며, 주로 항만 도시들을 대상으로 항만의 선박들로부터 발생하는 배기가스의 배출량과 환경 비용을 산정하며, 나아가 배출량 감소를 위한 방안을 마련하기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이들 연구들은 해상 운송으로 인한 심각한 환경오염을 증명하고, 이러한 해상 환경의 변화가 오늘날 대기오염에 큰 영향을 미치는 주요 대기오염원 중 한가지로 인식되도록 하였다.

현재까지 국내에서는 선박으로부터 배출되는 배기가스 산출에 관한 연구가 국외에 비해 다소 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 제 1의 항만인 부산항을 사례로, 이곳에 정박하는 대형 선박들로부터 발생하는 배기가스 산출에 초점을 맞추어 연구를 진행하고자 한다. 이를 위해 2011년부터 2년 간 이곳에 입출항한 모든 선박들의 입항 횟수 및 정박 시간에 대한 자료를 수집하였으며, 대부분의 선박에서 사용되는 디젤엔진에서 발생하는 배기가스 배출량 및 환경비용을 산출하고, 이를 세계 주요 항만들과 비교하여 부산항이 상대적으로 얼마나 더 큰 환경위험에 노출되어 있는지를 비교해보고자 한다.

수집한 자료에 의하면 부산항에 정박하는 선박은 벌크선(Bulk Carrier), 컨테이너선(Container Ship), 여객선(Passenger Ship), 일반화물선(General Cargo), 잡역선(Miscellaneous), Roll-On/Roll-Off선(이하 RORO

선), 유조선(Tanker), 냉동화물선(Refrigerated Cargo), 어선(Fishing Boat)의 9종으로 분류되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 선박의 디젤엔진으로부터 발생하는 배기가스의 주성분인 CO, CO₂, SO₂, NO_x, PM, HC, VOC를 대상으로 각 배출량을 산출하고, 이를 환경비용으로 환산한다.

본 연구는 우리나라 최대의 항만이자 2014년 기준으로 세계 6위권의 컨테이너 물동량을 기록한 부산항의 환경오염 정도를 측정한다는 데에 의의가 있으며, 연구결과를 토대로 환경문제의 심각성에 대한 인식이 증대와 함께 향후 체계적인 선박오염물 관리체계를 구축하기 위한 밑거름이 될 수 있을 것으로 기대한다.

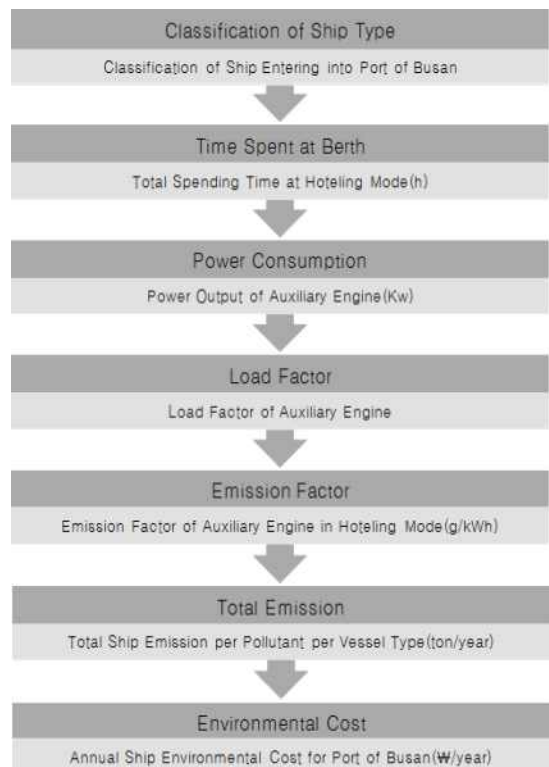


그림 1. 선박의 배기가스 및 환경비용 산출 절차

2. 연구의 범위

본 연구는 우리나라 부산항으로 공간적인 범위를 설정하였다. 시간적 범위는 자료수집상의 이유로 2011년 1월부터 2012년 12월까지의 2년간으로 설정하였고, 이 기간 동안 부산항에 입출항한 선박들의 활동 자료를 사용하여 분석을 수행하였다.

본 연구에서 선박 배기가스의 배출량을 산출하기 위한 흐름은 <그림 1>과 같다. 우선 분석년도의 선박 활동 자료를 통해 항만에 정박하는 선박들의 종류별 입출항 횟수를 파악한 뒤, 선종별 부두에서의 총 정박시간과 선종별 해당 보조엔진의 Power Output 및 Load Factor 그리고 배기가스별 Emission Factor 값을 이용하여 선박 배기가스 배출량을 산출한다. 여기에 배기가스별 원단위를 적용하면 최종적으로 환경비용이 산정되게 된다.

II. 선행 연구 및 이론 검토

전 세계적으로 대기오염에 대한 관심이 고조되면서 도로운송, 철도운송, 해상운송 시 배출되는 배기가스와 더불어 시설의 건설 및 운영 시에 발생하는 대기오염을 수치로 산정하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 최근에는 세계적인 주요 항만 도시들을 중심으로 항만에서 발생하는 대기가스 배출량 및 환경비용을 산출하고, 이를 비교·분석 하는 연구가 주를 이루고 있다.

해상운송에서 배출되는 배기가스 산출의 경우, 정박, 조종, 항해와 같은 선박의 여러 모드에 따른 각각의 배출량을 산출하는 연구들이 국내외로 다양하게 진행되었다. 노영훈 외(2015)는 항만의 하역장비에서 발생하는 대기오염물질의 배출량을 산정하기 위해 대한민국의 인천항을 사례로 연구를 진행하였다. 연구에서는 항만 하역장비의 연식을 고려하여 배출량을 산정할 수 있는 미국 환경보건국의 NONROAD 모델을 사용하여 분석하였고, 질

소산화물과 이산화탄소를 오염원으로 설정하여 Crane, Loader, F/L, Excavator, RTGC 등의 다양한 하역 장비에서 배출되는 배기가스를 산출하였다. 그 결과 인천항 항만하역장비에서 838.4톤의 질소산화물과 82,747톤의 이산화탄소가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 수치는 미국의 선진항만인 LA항만에서 발생하는 질소산화물 수치의 2.4배, 이산화탄소 배출량의 1.3배가 더 많이 발생하는 것으로 연구되었다. 정광현(2005)의 연구에서는 울산항을 사례로 선박의 연료판매 자료와 운항자료를 활용하여 선박의 모드별로 대기오염 배출량을 비교하였다. 분석에 사용한 오염원은 질소산화물, 황산화물, 휘발성 유기화합물의 3가지로 선정하였고, 그 결과 황산화물의 경우에는 연간 4,048~5,004톤이, 질소산화물의 경우 연간 5,530~6,566 톤이, 휘발성 유기화합물의 경우 3,143톤이 산출되었다. 본 연구의 결과를 통해 선박 배기가스의 심각성을 인지하고 울산지역의 대기질 개선을 위한 적극적인 저감 노력이 중요함을 피력하였다. D. Q. Yang et al. (2007)은 2003년 한 해 동안 중국 Shanghai Port 에 입항했던 선박들로부터 발생하는 선박 배기가스 배출량을 산출하기 위한 연구를 진행하였다. 산출을 위해 선박의 모드를 Hotelling, Cruising, Maneuvering의 3가지로 구분하여 분석을 진행하였고, 16가지의 선종을 구분하여 NOx, SO₂, PM, PM₁₀, CO₂, HC의 각 6가지 오염원별로 선박 배출물을 산출하였다. E. Marmer et al.(2005)은 지역적인 대기 화학 모델과 방사선 모델을 적용한 여름철 지중해 지역의 선박 배기가스 배출량 산출에 대해 연구를 진행하였다. 연구에서는 황산 에어로졸과 오존에 초점을 맞추어 분석하였고, 이를 통해 대기 오염의 주범인 선박 배기가스가 이 지역에 미치는 심각성에 대해 각인시키고자 하였다. F. Adamo et al.(2014)은 이탈리아 Port of Taranto 에 정박하는 선박들로부터 발생하는 배기가스 배출량을 산출하고 이에 대한 적절한 해결 방안으로

환경적인 측면과 경제적인 측면을 고려한 적절한 Cold-Ironing시스템 이용을 제안하였다. G. Villalba et al.(2011)은 스페인 Barcelona지역의 항만으로부터 발생하는 온실가스 배출량에 대한 연구를 진행하였다. 특히 CO₂의 배출에 초점을 맞추어 Land Base Emission과 Vessel Movement Emission의 2가지 구분을 통해 이동 중인 선박과 정박 중인 선박의 배출량 분석을 비교하였다. 그 결과 이 지역에서는 정박 중인 선박보다 이동 중인 선박에서 약 4만 톤의 CO₂가 더 많이 발생하였고, 이러한 분석 결과를 통해 선박 배기가스에 대한 심각성 재고와 배출량을 줄이기 위한 방안들을 권고해야 함을 제시하였다. Halil Saraçoğlu et al.(2013)은 선박 활동에 기반을 둔 Bottom-Up Methodology를 적용하여 터키의 관문인 Izmir Port에서 발생하는 선박의 배기가스 배출에 대한 연구를 진행하였다. 항만에 입항하는 선박의 종류를 크게 6종으로 분류하였고, 오염원을 NO_x, SO₂, CO₂, HC, PM의 5종으로 분류하여 정박, 조종, 항해에 따라 발생하는 배기가스 배출량을 산출하였다. J. J. Corbett et al.(2007)은 연안운송에서 발생하는 다량의 미세먼지 배출량 산출에 대한 연구를 진행하였다. 이렇게 산출된 미세먼지는 전 세계적으로 또는 지역적으로 심장과 폐에 심각한 암을 유발하는 것으로 나타났고 이로 인한 연간 사망률은 2012년에 40%에 이를 것으로 분석하였다. J. Joseph et al.(2009)은 항만의 환경 친화적이고 지속 가능한 운영을 위해 인도 Mumbai지역에 정박하는 선박들로부터 발생하는 배기가스 배출량을 산출하였다. 이 지역에서 이뤄지는 해안 운송, 육상 운송 및 항만에서의 건설 활동 등 다양한 원인들을 고려하여 TSP·PM₁₀·SO₂·NO_x의 배출량을 산출함으로써 환경 친화적인 항만 운영을 위한 배출물 관리체계 마련을 제안하였다. M. J. Dolphin et al.(2008)은 해양 산업에서 발생하는 배기가스 배출량 산출에 사용하는 Entec과 EPA의 2가지 모델을 기반으로

해양 운송 시에 발생하는 배출량을 산출하고, 이를 비교·분석하였다. 그 결과, NO_x의 경우 두 모델에서 비슷한 산출량을 나타내었고, SO₂와 CO₂의 경우 EPA모델을 이용하여 산출하였을 때 더 큰 값이 나왔다. 반대로 HC의 경우는 Entec모델을 사용하였을 때 더 큰 값을 보였다. P. S. Yau et al.(2013)은 홍콩의 Kwai Chung and Tsing Yi Port에서 배출되는 PM_{2.5}의 배출량 분석에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 항만으로부터 발생한 미세먼지가 지역의 풍속과 바람의 영향에 따라 지역 주변에 어떠한 미치는 영향에 대해 분석하였다. S. Vutukuru et al.(2008)은 미국 Los Angeles, Long Beach Ports, Pacific Ocean지역을 사례로 항해하는 선박에서 배출되는 배기가스 배출량을 추정하고 이것이 해안지역 대기오염에 미치는 영향에 대해 분석하였다. UCT-CIT 모델을 적용하여 분석을 진행하였으며, 산출된 선박의 배기가스가 해안지역에 미치는 심각한 악영향을 입증하여 배기가스 배출에 대한 적절한 규제가 해안지역의 대기오염을 완화시키는데 큰 영향을 미칠 것이라는 의견을 제시하였다.

해상운송을 통해 항만으로 운반된 화물들을 육상 운송과 연계하여 운반하는 과정에서 발생하는 배기가스 배출량을 산출한 연구들도 다양하게 진행되었다. 김상겸·홍종호(2003)는 화물 운송 시 연안운송과 육상운송을 연계하여 발생하는 배기가스의 배출량 추정에 대한 연구를 진행하였다. 다속성효용기법(MAUA)을 적용하여 발생하는 배출량 및 환경비용의 산출을 통해 운송 수단별로 환경에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 그 결과, 수출입 컨테이너 화물의 운송경로 선택 시 환경비용을 고려하는 경우 연안운송의 분담률 증대를 통한 효율적인 방안을 제시하였다. C. H. Liao et al.(2009)은 대만의 Kaohsiung Port를 사례로 연안운송과 도로운송에서 발생하는 배기가스를 산출하였다. Activity-Based Methodology를 적용하여 이산화탄

표 1. 세계 주요 항만 도시들의 선박/트럭 배기가스 산출에 관한 논문

저자	년도	분석 지역	대상	배기가스
F. Adamo et al.	2014	Taranto, Italy	선박	SO ₂ , NO _x , CO ₂ , PM
H. SaraçoLlu et al.	2013	Izmir, Turkey	선박	NO _x , SO ₂ , PM, CO ₂ , HC
P. S. Yau et al.	2013	Kwai Chung and Tsing Yi, Hong Kong	선박	PM _{2.5}
J. Berechman et al.	2012	Kaohsiung, Taiwan	선박 트럭	NO _x , CO, CO ₂ , PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂ , HC, VOC
G. Villalba et al.	2011	Barcelona, Spain	선박	CO ₂
E. Tzannatos	2010	Piraeus, Greece	선박	NO _x , SO ₂ , PM
P. T. W. Lee et al.	2010	Taiwan	선박 트럭	PM ₁₀ , NO _x , VOC, SO ₂ , CO ₂
C. H. Liao et al.	2009	Kaohsiung, Taiwan	선박 트럭	CO ₂
J. Joseph et al.	2009	Mumbai, India	선박	TSP, PM ₁₀ , SO ₂ , NO _x
D. Q. Yang et al.	2007	Shanghai, China	선박	NO _x , SO ₂ , CO ₂ , HC, PM

소의 배출에 초점을 맞춰 연구를 진행하였으며, 트럭 운송만을 유지한 경우와 연안 운송과 트럭 운송의 연계한 경우를 비교하여 연안 운송과의 적절한 연계가 대만의 CO₂ 감축을 위한 방안이 될 수 있음을 제시하였다. L. Browning et al.(2006)은 현재 많은 국가에서 연구 중인 선박 및 이와 연계한 육상 운송의 배기가스 배출량 산출에 관한 다양한 사례와 방법론을 연구하였다. 연구에서는 선박의 모드에 따른 각각의 접근 방법과 다양한 사례를 통해 다양한 지역의 항만에서 적용할 수 있는 분석 방법론을 제시하였다.

이러한 배기가스의 산출을 통해 요즘 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 환경적 비용 추정까지 연결시킨 연구들도 다수 진행되었다. E. Tzannatos (2010)는 항만에 정박하는 선박에 초점을 맞추어 인간에게 직접적인 영향을 미치는 대형선박으로부터 발생하는 배기가스의 산출에 대해 분석을 진행하였다. 연구에서는 선박의 활동에 초점을 맞추어 배출량을 산출할 수 있는 Ship Activity-Based Methodology를 적용하여 지중해 지역에 위치하여 상

대적으로 많은 관광객들이 집중되는 그리스의 Piraeus Port에서 배출되는 선박의 배기가스와 이에 따른 환경 비용을 산출하였다. 배출량 산출 시 3가지 오염원인 NO_x, SO₂, PM_{2.5}를 주 오염원으로 선정하여 배출량을 산출한 결과, 약 2,600톤의 대기 오염 배출량이 배출되고 이를 환산하면 연간 약 5천1백만 유로의 환경비용이 발생함을 알 수 있었다. 특히 이를 통해 여름철 여객과 관련되어 발생하는 많은 양의 선박 배기가스에 대한 엄격한 조치와 규제가 필요함을 제시하였다. J. Berechman et al.(2012)은 미세 먼지와 휘발성 유기 화합물에 초점을 맞추어 대만의 관문인 Port of Kaohsiung에서 배출되는 선박과 트럭의 배기가스 및 환경 비용을 추정하였다. 선박의 배기가스 산출시 Bottom-Up Methodology를 적용하여 8종의 선종과 8종의 배기가스 각각에 대해 배출량을 산출하였다. P. T. W. Lee et al.(2010)은 대만을 사례로 현재 컨테이너 화물의 O/D 분석을 통한 외부비용 산출에 대한 연구를 진행하였다. 연구에서는 Top-Down Methodology를 적용하여 트럭 운송과 짧은 연안

운송을 대상으로 발생하는 배기가스를 산출하였고 이를 비용으로 환산 시 연간 8,500만 달러의 외부 비용을 유발하는 것으로 나타났다.

이와 같이 해상운송에서 발생하는 배기가스 관련 연구들은 자료의 특성 및 필요에 따라 정박, 조종, 항해와 같은 선박의 여러 모드를 고려하여 분석되었고, 연계수단인 육상운송으로까지 확장이 진행되었다. 국내에서도 이와 같이 항만의 대기오염 배출량 산출에 관심을 갖고 하역장비에 대한 배출량 산정이나 연료판매 및 소요에 대한 자료를 이용한 배출량 산정에 대한 연구가 진행되었지만, 아직까지 이와 관련하여 선박의 활동자료를 이용하여 모드별로 상세한 분석을 진행하고 이를 환경적인 비용으로 환산한 연구들은 미흡한 것을 알 수 있었다. 특히 선박의 여러 모드 중에서도 대기 오염에 가장 많은 부분을 차지하는 접안하는 선박을 대상으로 국내 선박 물동량의 75% 이상을 차지하는 부산항에서의 배출량을 산정한다는 점에서 본 연구는 차별성과 그 의의를 갖는다. 즉 본 연구에서는 한국해양수산개발원(이하 KMI)으로부터 수집한 부산항의 2011년부터 2년 간 선박 활동자료를 이용하여 미국 환경보전국에서 제안하고 기존

선행연구에서 정박하는 선박의 배기가스 배출량을 산출하는데 사용되었던 산출 식을 적용하여 부산항의 선박 배기가스 배출량 및 이에 따른 환경비용을 산출하고자 한다. 또한 도출된 결과를 해외 주요 항만들과 비교 및 분석하여 시사점을 도출해 보고자 한다.

Ⅲ. 부산항 선박 입·출항 현황

부산항은 1876년 개항한 우리나라 최초의 항만으로, 국제 해상교역의 대부분을 담당하고 있는 무역항이다. 부산항의 컨테이너 물동량은 2011년 이후로 최근 5년 동안 꾸준한 증가 추세를 보이고 있으며, 우리나라 전국 화물 물동량의 75% 이상이 이곳에서 처리되고 있다. 2015년도 컨테이너 물동량은 전년대비 4.2% 증가한 약 19,469천 TEU를 기록했으며, 이는 세계 6위 수준에 해당한다. 품목별 화물 처리 실적을 살펴보면 2015년도를 기준으로 방직용 섬유가 가장 많은 약 77,274천 TEU를 차지하고 있으며 기계류, 철강, 화학공업 생산품, 전자 기기, 식품 및 음료 등이 그 뒤를 잇는다.

본 연구에서는 부산항의 선박 배기가스를 산출

표 2. 부산항의 입항하는 선박들의 선종별 입항 횟수

선종	2011년도	2012년도
컨테이너선	14,880	14,581
유조선	12,137	11,704
잡역선	10,011	8,680
일반화물선	7,082	6,719
여객선	2,724	3,239
냉동화물선	1,277	1,228
어선	1,047	1,156
벌크선	1,006	1,079
RORO선	522	456
총 입항 횟수	50,686	48,842

자료: KMI 부산항 선박 및 물동량 자료(2013)

하기 위해 KMI로부터 선박 활동 자료를 수집하였다. 자료는 2011년 1월부터 2012년 12월까지 2년간 북항과 신항을 포함한 부산항 전체에 입출항한 선박들의 선종, 총톤수, 접안 시설명, 입출항일시, 양적하 물량 등의 정보를 포함하고 있다. 부산항만공사의 선종별 선박입출항통계에 의하면 부산항에 입항하는 선박들은 세부적으로 16종으로 구분이 되나 산출식과 산출인자를 고려하여 본 연구에서 구분한 선종은 벌크선, 컨테이너선, 여객선, 일반화물선, 잡역선, RORO선, 유조선, 냉동화물선, 어선의 9종으로 재분류하였다. 2년간 부산항에 입항한 선박들을 선종별로 살펴보면, <표 2>와 같이 컨테이너선이 평균 약 1만 4천 회로 가장 많은 부분을 차지하였고, 그 뒤를 이어 유조선, 잡역선, 일반 화물선, 여객선, 냉동화물선, 어선, 벌크선, RORO선 순으로 많은 입항횟수를 기록하였다. 부산항에 입항한 선박들의 연도별 변화를 살펴보면 컨테이너선, 유조선, 잡역선, 냉동화물선, RORO선의 경우 각각 299, 433, 1331, 363, 49, 66 척으로 감소하는 경향을 보였고, 여객선과 벌크선 그리고 어선의 경우는 각각 515, 109, 73척으로 증가하는 경향을 보였다.

IV. 배기가스 및 환경비용 산출

본 연구에서 배출량 산출시 사용한 배기가스의 분류는 선박의 디젤엔진이 연소하면서 발생하는 배기가스의 주성분인 NO_x, SO₂, CO, PM, HC, VOC와 함께 지구온난화의 심각성으로 인해 전 세계적으로 많은 관심을 받고 있는 CO₂를 포함하여 총 7가지로 분석을 진행하였다.

산출에 사용된 방법론은 정박하는 선박의 대기 오염 배출량을 산출하기 위해 U.S Environmental Protection Agency(이하 EPA)에서 제안하고 World Ports Climate Initiative(이하 WPCI)에서 보고한 산출식을 적용하여 분석하였다. 산출식은 선종별

입항횟수, 총 등록톤수, 각 선종별 부두에서의 총 정박시간과 함께 선종별 보조엔진의 출력, 선종별 보조엔진의 Load Factor, 배기가스별 Emission Factor 등을 고려하여 배기가스 산출량을 산정한다.

$$E = P_j \times \sum_j T_j \times LF_j \times EF_i \quad (\text{식1})$$

여기서,

E : 총 배출량(톤)

j : 선박의 종류

i : 배기가스의 종류

P_j : 선종별 보조엔진의 평균 출력(kW)

T_j : 선종별 부두에서의 총 정박시간(시간)

LF_j : 선종별 보조엔진의 Load Factor

EF_i : 배기가스별 보조엔진의 Emission Factor(g/kWh)

E 는 산출하고자하는 특정 선박 및 오염원에 따라 선박이 부두에 정박하는 동안 발생하는 배기가스의 배출량이며, 단위는 톤을 사용한다.

i 는 분석하고자하는 배기가스의 종류를 의미하고, 본 연구에서는 선박의 디젤엔진으로부터 발생하는 주요 7가지 배기가스에 초점을 맞추어 분석을 진행하였다.

j 는 선박의 종류의 의미하고, 본 연구에서는 부산항에 입항하는 9가지 선종에 따라 분석을 진행하였다.

P 는 특정 선박이 부두에 정박해있는 동안 사용되는 보조엔진의 평균 출력을 의미한다. <표 3>에서와 같이 선종별로 사용되는 엔진의 특성에 따라 각각 다른 값을 가지며, 상대적으로 여객선과 컨테이너선에 사용되는 엔진이 높은 출력을 갖고 있다. 이때 출력의 단위는 kW를 사용한다.

LF 는 선종별 보조엔진의 Load Factor를 의미하며, 각 선박에 사용되는 보조엔진의 특징에 따라 종류별로 다른 값을 갖는다. 분석에 사용된 Load Factor는 U.S. EPA에서 공표한 <표 4>의 Factor값을 적용하였고, 이 값은 유조선과 여객선에서 상

표 3. 선종별 보조엔진의 최대 출력(kW)

벌크선	컨테이너선	여객선	일반화물선	잡역선	RORO선	유조선	냉장화물선	어선
1,776	6,800	11,000	1,776	1,680	2,850	1,985	3,900	55

자료: U.S. Environmental Protection Agency(2009)

표 4. 선종별 보조엔진의 Load factor

벌크선	컨테이너선	여객선	일반화물선	잡역선	RORO선	유조선	냉동화물선	어선
0.22	0.17	0.64	0.22	0.22	0.30	0.67	0.34	0.27

자료: U.S. Environmental Protection Agency(2009), J. Berechman et al.(2012), L. Browning(2006)

표 5. 배기가스별 보조엔진의 Emission Factor(g/kWh)

NOx	CO	CO2	PM	SO2	HC	VOC
10.8	1.1	745	2.4	12.7	1.5	0.4

자료: Joseph Berechman et al.(2012), Deniz et al.(2010), ENTEC(2010)

표 6. 배기가스별 원단위(w/kg)

NOx	CO	CO2	PM	SO2	HC	VOC
10,196	8,475	79	33,289	11,452	9,849	9,849

자료: 이규진 외(2013), Korea Environment Institute(2002), IPCC(1995)

대적으로 높은 가중치를 갖고 컨테이너선에서 상대적으로 낮은 가중치를 갖는 것을 알 수 있다.

T는 선박의 종류별로 특정 선박이 부두에 정박해있는 동안의 시간을 의미한다. KMI의 선박활동 자료를 이용하여 부산항에 재항하는 선박들의 선종별 연간 총 정박시간을 산출하였고, 단위는 시간을 사용한다.

EF는 7가지 배기가스별 보조엔진의 Emission Factor를 의미한다. <표 5>에서 알 수 있듯이 상대적으로 지구온난화에 가장 큰 영향을 미친다고 알려진 이산화탄소에 가장 높은 가중치가 부여된 것을 알 수 있으며, 선박의 배기가스에서 중요한 비중을 차지하여 규제 대상으로 고려되는 황산화

물, 질소산화물 등이 뒤를 이어 높은 가중치를 갖는 것을 알 수 있다. EF의 단위는 g/kWh을 사용한다.

이렇게 산출한 각각의 배출량을 환경비용으로 환산하기위해 한국환경정책평가연구원의 연구결과에 소비자물가지수를 반영한 <표 6>의 각 배기가스별 원단위를 적용하면 최종적으로 환경비용의 산정이 가능하다.

IV. 분석 결과

<표 7>과 <표 8>은 이렇게 산출한 2011년도와 2012년도에 각각 부산항에 정박한 선박들로부터

표 7. 2011년도 부산항의 연간 배기가스 배출량 및 환경비용(톤/년)

	NOx	CO	CO2	PM	SO2	HC	VOC
벌크선	191.62	19.52	13,218.23	42.58	225.33	26.61	7.10
컨테이너선	3,617.97	368.50	249,572.94	803.99	4,254.46	502.50	134.00
여객선	5,594.21	569.78	385,896.65	1,243.16	6,578.37	776.97	207.19
일반화물선	1,350.88	137.59	93,185.78	300.20	1,588.54	187.62	50.03
잡역선	4,417.77	449.96	304,744.17	981.73	5,194.97	613.58	163.62
RORO선	221.87	22.60	15,305.24	49.31	260.91	30.82	8.22
유조선	11,639.14	1,185.47	802,885.30	2586.48	13,686.77	1,616.55	431.08
냉동화물선	4,084.68	416.03	281,767.20	907.71	4,803.28	567.32	151.28
어선	79.98	8.15	5,517.32	17.77	94.05	11.11	2.96
배기가스 배출량	31,198.12	3,177.59	2,152,092.83	6,932.92	36,686.68	4,333.07	1,155.49
환경비용 (1000₩)	318,096,075	26,930,048	170,015,333	230,789,857	420,135,895	42,676,434	11,380,382

표 8. 2012년도 부산항의 연간 배기가스 배출량 및 환경비용(톤/년)

	NOx	CO	CO2	PM	SO2	HC	VOC
벌크선	159.87	16.28	11,028.39	35.53	188.00	22.20	5.92
컨테이너선	3,616.52	368.35	249,473.04	803.67	4,252.76	502.29	133.95
여객선	4,417.99	449.98	304,759.59	981.78	5,195.23	613.61	163.63
일반화물선	1,334.32	135.90	92,043.56	296.52	1,569.06	185.32	49.42
잡역선	4,221.95	430.01	291,236.51	938.21	4,964.70	586.38	156.37
RORO선	103.21	10.51	7,119.47	22.94	121.37	14.33	3.82
유조선	12,872.46	1,311.08	887,961.43	2,860.55	15,137.06	1,787.84	476.76
냉동화물선	4,035.66	411.04	278,385.72	896.81	4,745.64	560.51	149.47
어선	91.37	9.31	6,302.54	20.30	107.44	12.69	3.38
배기가스 배출량	30,853.36	3,142.47	2,128,310.24	6,856.30	36,281.26	4,285.19	1,142.72
환경비용 (1000₩)	314,580,824	26,632,446	168,136,509	228,239,419	415,493,011	42,204,821	11,254,619

발생된 선박의 배기가스 및 환경비용을 나타낸다. 부산항에 정박하는 선박으로부터 발생하는 배기가스 7종의 배출량 산출 결과, 2011년의 NOx, CO, CO2, PM, SO2, HC, VOC 배출량은 각각 31,198톤, 3,178톤, 2,152,093톤, 6,933톤, 36,686톤, 4,333

톤, 1,156톤이었다. 배기가스별 배출량을 살펴보면 CO2가 96%로 가장 많은 양을 차지하였으며, SO2와 NOx가 각각 1.6%와 1.4%로 그 뒤를 이었다. 선박의 종류별 배출량을 분석해보면 유조선에서 37%로 가장 많은 발생되었고, 다음으로 여객선과

표 9. 세계 주요 항만도시들의 배기가스 배출량 비교(톤/년)

지역(국가)	연간 입항횟수	NOx	SO2	HC	PM	CO	CO2	자료
Busan(Korea)	48,842	30,853	36,281	4,285	6,856	3,143	2,128,310	
Aberdeen(UK)		376	52		14	77	36,720	Marr et al.(2007)
Copenhagen (Denmark)		743	162		13			Saxe et al.(2004)
Oakland(US)	1,916	2,484	1,413		219.5			ENVIRON International Corporation(2013)
Los Angeles(US)		19,245	4,791		999	3,967		Port of Los Angeles(2005)
Izmir(Turkey)	2,806	1,923	1,405	74	165		84,753	H. Saraçoğlu et al.(2013)
Izmit(Turkey)	11,645	5,356	4,305	232	487		254,261	A. Kiliç et al.(2010)
Ambarli(Turkey)	5,432	845	242	504	36		78,590	C. Deniz et al.(2010)
Candarli(Turkey)	7,520	632	574	32	57		33,848	C. Deniz et al.(2010)
Kaohsiung(Taiwan)	16,042	501	589	70	122	51	34,531	J. Berechman et al.(2012)
Shanghai(China)		58,160	51,180	4,560	6,960		3,012,780	D. Q. Yang et al.(2007)
Piraeus(Greece)		1,790	722		99			E. Tzannatos(2010)

잡역선에서 각각 18%, 14%로 많은 양의 선박 배출물이 유발되었다. 2012년에 발생한 NOx, CO, CO2, PM, SO2, HC, VOC 배출량은 각각 30,853톤, 3,142톤, 2,128,310톤, 6,856톤, 36,281톤, 4,285톤, 1,143톤으로 유사한 패턴을 보였다. 배기가스별로는 마찬가지로 CO2가 절대적으로 많은 96%를 차지하였고, 뒤를 이어 SO2, NOx가 각각 1.6%, 1.4%로 많이 배출되었다. 또한 선박별로는 유조선에서 가장 많은 42%가 배출되었고, 다음으로 여객선과 잡역선에서 각각 14%, 13%가 배출되었다.

부산항의 연도별 배기가스 배출량의 증감을 비교해 본 결과, 2011년에서 2012년 2년간 NOx, CO, CO2, PM, SO2, HC, VOC 는 각각 345톤, 35톤, 23782톤, 77톤, 405톤, 48톤, 13톤이 감소하였다. 이는 2011년에 비해 2012년에 부산항에 입항한 선박수 및 재항시간 감소가 직접적으로 영향을 미친 것으로 판단해볼 수 있다.

이렇게 산출한 배기가스별 배출량에 각각의 원단위를 적용하여 환경비용으로 환산한 결과, 2011

년도에 발생한 총 1조 5천억의 환경비용에서 SO2가 4천 2백억 원으로 가장 많은 비용을 발생시켰고, 뒤를 이어 NOx와 PM이 각 3천 2백억 원과 2천 3백억 원의 환경비용을 유발하였다. 또한 선종별로는 유조선, 여객선, 잡역선의 순서로 많은 환경비용을 발생시키는 것으로 나타났다. 2012년에도 전년도에 비해 다소 감소한 총 1조 4천억 원의 환경비용이 산출되었다. 마찬가지로 총 환경비용 중 SO2가 4천 1백억 원으로 가장 많은 비용을 발생시켰고, 뒤를 이어 NOx와 PM이 각각 3천 1백억 원과 2천 3백억 원을 차지하였다. 선종별로 발생하는 환경비용 역시 전년도와 마찬가지로 유조선, 여객선, 잡역선의 순서로 높은 것으로 나타났다.

〈표 9〉은 이렇게 산출한 부산항의 2012년도 선박 배기가스 배출량을 해외 주요 항만도시들을 중심으로 진행된 기존의 선행연구들과 비교한 것이다. 항만마다 시설과 운영형태 및 특징에 따라 산출하는 방식 및 산출 년도가 조금씩 상이하여 직접적인 비교는 불가능하나, 입항횟수 및 물동량에

다른 배출량을 비교해보면, 일반적으로 입항횟수와 물동량이 늘어남에 따라 배출량도 함께 늘어나는 것을 알 수 있었다. 그 결과, 최근 5년간 전 세계적으로 가장 많은 컨테이너 처리 실적을 기록하고 있는 Shanghai Port에서 가장 많은 배출량을 발생시켰고, 이어서 부산항이 두 번째로 많은 양의 선박 배기가스를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 최근 5년간 세계적으로 5, 6위권 규모의 컨테이너 화물 처리실적을 기록하고 있는 부산항에서도 선박 배기가스가 미치는 환경적문제의 심각성을 인식하고 항만에 접안하는 선박들에 대한 배출량 저감을 위한 노력이 절실함을 시사하고 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 우리나라 최대의 항만인 부산항에 정박한 선박들로부터 발생하는 선박 배기가스의 배출량과 환경비용을 산출하고, 이어서 해외 주요 항만들과의 비교·분석을 진행하였다. 배출량 산정은 부산항에 입·출항한 선박 세부 자료를 이용하여 미국 환경보전국의 산출식을 적용함으로써 분석할 수 있었다.

본 연구의 결과는 다음과 같다. 2011년도와 2012년도에 부산항에 입항한 선박의 수는 각각 50,686척과 48,842척이었으며, 이로부터 발생된 선박의 연간 배기가스 배출량은 각각 2,343,037톤과 2,297,118톤으로 나타났다. 이는 기존 선행연구에서의 다른 항만들의 배출량과 비교할 때, 중국의 상해항에 이어 모든 오염원에서 두번째로 높은 수치에 해당한다. 물론 연구마다 산출하고자하는 분석 기간과 적용한 산출식이 조금씩 다르기 때문에 정확한 비교는 힘들지만, 본 연구를 통해 부산항에서 배출되는 배기가스 배출량이 상당한 수치라는 사실을 확인할 수가 있었다. 전체 선박 중에서는 유조선과 여객선 그리고 잠역선 순으로 많은 양의 배기

가스를 배출했으며, 배기가스 중에서는 CO₂가 96%로 월등하게 많은 부분을, 뒤를 이어 SO₂와 NO_x가 많은 비중을 차지하고 있다는 것도 알 수 있었다. 그리고 오염원별 원단위를 적용하여 환경적인 비용으로 환산한 결과, 선박의 접안시 연간 약 1조 4~5천억 원으로 상당한 수준의 비용이 매년 발생하는 것으로 분석되었다.

기존 연구의 검토를 통해 현재 전 세계적으로 지구온난화 및 대기 오염에 많은 관심을 갖고 있고, 국내에서도 육상 운송 및 시설물에서 발생하는 배출물 산출에 대한 연구들이 수행되었다는 것을 알 수 있었지만, 이에 비해 항만 및 선박으로부터 발생하는 배출물 산출에 대한 연구는 다소 미흡한 것을 알 수 있었다. 특히 세계적인 항만들을 중심으로 관련 연구들이 활발하게 진행되고 있는 반면, 국내에서는 세계 5~6위권의 항만인 부산항을 보유하고도 이러한 연구가 제대로 진행된 사례가 거의 없었다는 점에서 본 연구는 의의를 갖는다고 할 수 있다. 이러한 산출 결과를 통해 부산항에 접안하는 동안 발생하는 배기가스의 심각성을 증명하였으며, 항만 내 노동자 및 거주 시민들에게 건강상의 심각한 영향을 미칠 수 있기 때문에 향후 체계적인 선박 배출물 관리를 통해 엄격한 조치와 규제가 필요함을 시사하고 있다. 실제로 부산지역은 부산항을 중심으로 반경 20km 이내에 대부분의 생활권이 포함되고, 약 360만의 인구가 거주하는 대도시이기 때문에 항만의 대기오염에 대해 더욱 철저히 관리해야 할 필요성이 있는 것이다. 또한 최근 5년간 꾸준히 세계 5~6위권의 물동량을 기록하며 세계적인 항만들과 어깨를 나란히 하는 부산항이 중국 및 주변 항만들과의 치열한 경쟁 속에서 지속가능한 그린포트로서의 경쟁력을 갖기 위해서도 항만의 환경오염에 대한 인식과 제도적·시설적인 실행이 반드시 필요하다.

그린포트 구축에 앞장서고 있는 선진 항만들의 경우 일찍이 이러한 환경문제의 중요성을 인식하

고, 국가적인 차원의 다양한 정책 마련과 저감 시설의 구축을 통해 해상운송으로 인한 환경오염에 적극적으로 대처하고 있다. 우리나라의 경우도 2009년, 항만의 개발과 운영 전반에 걸쳐 저탄소, 친환경 그린포트를 구축하기 위한 방안을 마련하기 위해 철도와 연안 해운 이용을 확대하고, 항만 내 탄소배출을 저감하기 위해 하역시스템의 동력장치를 개선하고, 대형 선박에 대해 육상전원공급 장치의 확대하는 등의 계획을 수립해 단계별로 사업을 추진하기로 하였다. 그러나 주요 선진 항만들의 경우 적극적으로 환경정책을 수립하여 이러한 환경문제가 해결되지 못하면 국제적인 경쟁이 불가피하다는 인식을 갖고 있는 반면, 우리나라의 항만 관련 정책은 개발 이용에 유발되는 환경오염을 방지한다는 다소 소극적인 차원의 정책을 제시하고 있다. 현재 부산항의 경우에도 그린포트를 구축하기 위해 항만 내 LED조명의 활용, 태양광 시스템의 도입, 육상녹화사업, 야드트랙터의 연료를 LPG에서 LNG로 바꾸는 등의 몇몇 사업들을 시행중에 있었다. 하지만 항만으로부터 유발되는 대기오염에서 상당한 비중을 차지하는 선박의 접안에 대해서는 구체적인 저감 대책이 없는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구는 우리나라의 항만 정책도 환경친화적인 항만의 구축을 마련하기 위해서는 선박의 접안 시 전기에너지로 육상에서 전원을 공급해주는 육상전원장치(이하 AMP)등의 저감 시설 도입을 적극적으로 고려하고, 체계적인 선박 배출물 관리 등을 위한 엄격한 조치와 제도적인 규제가 반드시 적용되어야 함을 시사하고 있다. 실제로 그린포트에 앞장서고 있는 선진 국가들의 경우 친환경항만을 구성하기 위해 사용되는 전기요금에 대해서는 일반 산업용 전력비와 다르게 특별 요금을 책정하여 국가적인 지원을 하고 있는 반면, 국내에서는 이러한 부분이 전혀 고려되지 않고 있었다. 따라서 우리나라도 정부와 항만이 앞장서서

제도적인 방안을 적극 모색해야 할 것이며, AMP의 도입을 위해 항만의 전기용량 선로 증가와 함께 민간 기업들의 적극적인 기술 협력을 권장해야 할 것이다.

본 연구는 자료수집의 어려움으로 인해 2011년도와 2012년도 부산항의 선박 활동자료를 통해 선박의 대기오염 배출물을 추정하였다. 또한 산출시 선박의 노후도와 같은 세부적인 요소를 고려하지 못하였다는 점에서 한계점을 가진다. 향후 보다 최근자료의 수집을 통해 연도별 추이를 지속적으로 비교·분석해 볼 필요가 있으며, 또한 최근 활발한 연구주제인 대기확산모형의 적용을 통해 본 연구에서 산출된 부산항의 선박 배기가스가 기온, 풍속 등에 따라 주변지역으로 어떻게 확산되는지를 분석함으로써 항만 주변 생활권에 미치는 구체적인 영향까지 보다 면밀히 규명할 수 있을 것이다.

참고문헌

- 김상겸·홍종호(2003), “교통부문 개발 사업에 대한 환경비용 추정과 사례분석: 유지비용접근법의 적용”, 『공공경제』, 제8집, 189-219.
- 노영훈·장영태(2015), “인천항 육상하역 작업에 따른 온실가스 및 유해가스 발생 추정”, 『한국항만경제학회지』, 제31집 제4호, 133-150.
- 부산항만공사(2014), 2014 부산항 컨테이너 화물 처리 및 수송 통계.
- 부산항만공사(<http://www.busanpa.com/>).
- 이규진·최기주(2013), “교통량 배정 방법에 따른 대기질의 사회적 비용 분석”, 『대한토목학회』, 제33집 제3호, 1087-1094.
- 정광현·김성주·박홍석(2005), “울산항 선박으로부터의 대기오염 배출량 산정에 관한 연구”, 『해양환경안전학회 2005년도 춘계학술발표회』, 111-118.
- 한국해양수산개발원(2013), 『항만 수요 예측센터 요구자료』 (부산항의 선박 및 물동량 자료).
- 한국환경정책평가연구원(2002), 『육상교통 수단의 환경성 비교분석』.
- A. Kiliç, and C. Deniz(2010), “Inventory of shipping emissions in Izmit gulf Turkey,” *Environmental progress & sustainable energy*, Vol.29 No.2,

- 221-232.
- C. Deniz, and A. Kilic(2010), "Estimation and assessment of shipping emissions in the region of Ambarlı Port Turkey," *Environmental progress & sustainable energy*, Vol,29 No,1, 107-115.
- C. H. Liao, P. H. Tseng, and C. S. Lu(2013), "Comparing carbon dioxide emissions of trucking and intermodal container transport in Taiwan," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol,14 No,7, 493-496.
- D. Q. Yang, S. H. Kwan, T. Lu, Q. Y. Fu, J. M. Cheng, D. G. Streets, Y. M. Wu, and J. J. Li(2007), "An emission inventory of marine vessels in Shanghai in 2003," *Environmental science & technology*, Vol,41 No,15, 5183-5190.
- E. Marmer, and B. Langmann, "Impact of ship emissions on the Mediterranean summertime pollution and climate: A regional model study," *Atmospheric Environment*, Vol,39 No,26, 4659-4669.
- ENTEC(2010), *Defra UK Ship Emissions Inventory*.
- ENVIRON International Corporation(2013), *Port of Oakland 2012 seaport air emissions inventory*.
- E. Tzannatos(2010), "Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus-Greece," *Atmospheric Environment*, Vol,44 No,3, 400-407.
- F. Adamo, G. Andria, G. Cavone, C. De Capua, A. M. L. Lanzolla, R. Morello, and M. Spadavecchia(2014), "Estimation of ship emissions in the port of Taranto," *Measurement*, Vol,47, 982-988.
- G. Villalba and E. D. Gemechu(2013), "Estimating GHG emissions of marine ports—the case of Barcelona," *Energy Policy*, Vol,39 No,3, 1363-1368.
- H. Saraçoğlu, D. Cengiz, and K. Alper(2013), "An investigation on the effects of ship sourced emissions in Izmir Port Turkey," *The Scientific World Journal*.
- H. Saxe, and T. Larsen(2004), "Air pollution from ships in three Danish ports," *Atmospheric Environment*, Vol,38 No,24, 4057-4067.
- I. L. Marr, D. P. Rosser, and C. A. Meneses(2007), "An air quality survey and emissions inventory at Aberdeen Harbour," *Atmospheric Environment*, Vol,41 No,30, 6379-6395.
- IPCC(1995), *Second Assessment Report: Climate Change*.
- J. Berechman and P. H. Tseng(2012), "Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol,17 No,1, 35-38.
- J. J. Corbett, J. J. Winebrake, E. H. Green, P. Kasibhatla, V. Eyring and A. Lauer(2007), "Mortality from ship emissions: a global assessment," *Environmental science & technology*, Vol,41 No,24, 8512-8518.
- J. Joseph, R. S. Patil, and S. K. Gupta(2009), "Estimation of air pollutant emission loads from construction and operational activities of a port and harbour in Mumbai India," *Environmental monitoring and assessment*, Vol,159 No,1-4, 85-98.
- L. Browning and K. Bailey(2006), "Current methodologies and best practices for preparing port emission inventories," *ICF Consulting report to Environmental Protection Agency*.
- M. J. Dolphin and M. Melcer(2008), "Estimation of ship dry air emissions," *Naval Engineers Journal*, Vol,120 No,3, 27-36.
- Port of Los Angeles(2005), *Port of Los Angeles baseline air emissions inventory-2001*.
- P. T. W. Lee, K. C. Hu, and T. Chen(2010), "External Costs of Domestic Container Transportation: Short-Sea Shipping versus Trucking in Taiwan," *Transport Reviews*, Vol,30 No,3, 315-335.
- U. S. Environmental Protection Agency(2009), *Current methodologies in preparing moile source port related emission inventories*.

선박 대기오염 배출량 및 환경비용 산출에 관한 연구

: 부산항을 중심으로

이민우 · 이향숙

국문요약

대한민국 제2의 도시인 부산에 위치한 부산항은 연간 18,000천 TEU 이상의 물동량을 처리하는 초대형 글로벌 컨테이너 항만이다. 이러한 부산항의 급격한 성장으로 인한 선박 물동량의 증가는 동시에 대기오염문제를 야기시켰고, 특히 항구는 인구가 밀집되어 있는 도심과 인접해있기 때문에 시민들은 대기오염으로 인한 건강상의 문제에 쉽게 노출되어 있는 것이다. 본 연구에서는 2011년부터 2년간 부산항의 선박 활동 자료를 통해 정박하는 대형 선박으로부터 발생하는 배기가스 배출량 및 연간 환경비용을 추정하였다. 그 결과 2011년도와 2012년도에 부산항에 입항한 50,686척과 48,842척의 선박으로부터 각각 2,343,037톤과 2,297,118톤의 배기가스가 배출되었고, 선종별로는 유조선이, 오염원 중에는 CO₂가 가장 많은 부분을 차지하였다. 또한 이러한 배출량을 비용으로 환산한 결과, 연간 약 1조 2천억 원의 환경비용이 추정됨을 알 수 있었다. 본 연구는 이러한 분석을 통해 선박 대기오염 배출에 대한 엄격한 조치와 규제의 필요성을 제시하고, 부산항의 체계적인 선박 배출물 관리 체계를 구축하는데 적절하게 활용이 가능할 것으로 기대해본다.

주제어: 부산항, 대기오염, 대형 선박, 선박 배출물, 환경 비용