Journal of Korea Port Economic Association
Vol.37, No.1, 2021, pp.143-157.
https://doi.org/10.38121/kpea.2021.03.37.1.143

인천항의 대기오염물질 배출량 산정 연구*

이정욱** · 이향숙***

A Study on Estimating Air Pullution in the Port of Incheon

Abstract

International organizations such as the World Health Organization, the Organization for Economic Development and Cooperation, and major developed countries recognize the seriousness of air pollution. International organizations such as the International Maritime Organization have also implemented various regulations to reduce air pollution from ships.

In line with this international trend, the government has also enacted a special law on improving air quality in port areas, and is making efforts to reduce air pollution caused by ports. The purpose of the Special Act is to implement comprehensive policies to improve air quality in port areas.

This study sought to identify the emissions of each source of air pollutants originating from the port and prepare basic data on setting the policy priorities. To this end, the analysis was conducted in six categories: ships, vehicles, loading and unloading equipment, railways, unloading/wild ash dust, road ash dust, and the methodology presented by the European Environment Agency(EEA) and the United States Environmental Protection Agency(EPA). The pollutants subject to analysis were analyzed for carbon monoxide(CO), nitrogen oxides (NOX), sulfur oxides(SOX), total airborne materials(TSP), particulate matter(PM10, PM2.5), and ammonia(NH3).

The analysis showed a total of 7,122 tons of emissions. By substance, NOX accounted for the largest portion of 5,084 tons, followed by CO (984 tons), SOX (530 tons), and TSP (335 tons). By source of emissions, ships accounted for the largest portion with 4,107 tons, followed by vehicles with 2,622 tons, showing high emissions. This proved to be the main cause of port air pollution, with 57.6% and 36.8% of total emissions, respectively, suggesting the need for countermeasures against these sources.

Key words: Port of Incheon, Air pollutants, Emissions, particulate matter

▷ 논문접수: 2021. 02. 26. ▷ 심사완료: 2021. 03. 29. ▷ 게재확정: 2021. 03. 29.

* 『본 논문은 해양수산부 제4차 해운항만물류 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임』
** 인천대학교 동북아물류대학원 박사과정, 주저자
*** 인천대학교 동북아물류대학원 부교수, 교신저자, hslee14@inu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

1. 연구의 배경 및 목적

세계보건기구(World Health Organization, WHO), 경제개발협력기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD) 등의 국제기구 및 주요 선진국에서는 대기오염의 심각성을 인지하고 있다. WHO에서는 '2019년 건강을 위협하는 10대요인'의 첫 번째로 대기오염을 지정하였다. 또한 OECD가 발간한 '2020 삶의 질'보고서에 따르면 한국 인구의 55.1%가 WHO의 권고치보다 2배가 높은 20㎍/㎥이상의 초미세먼지에 노출되어 있으며, 이는 OECD회원국 중 가장 높은 수준임을 밝혔다.

국내에서도 최근 미세먼지에 의한 문제가 지속적으로 대두되고 있으며, 국내 요인으로써 항만에서 기인하는 대기오염이 심각한 것으로 분석되고 있다. 국립환경과학원(CAPSS)에 따르면 2017년 기준 국내 대기오염 배출량 중 선박에 기인하는 배출량이 CO, NOX, SOX, PM2.5 각각 12.5%, 13.7%, 11.0%, 8.4%를 차지하고 있음이 밝혀졌다.

이렇게 항만의 대기오염의 심각성에 대한 인식이 고조됨에 따라 유관기관이 연이어 대책을 마련하고 있다. 우선 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 전 세계 해상에서 선박연료의 황함유량을 0.5%까지 줄이는 것을 목표로 하는 황산화물 배출규제를 2020년 1월 1일에 발효하였다. 또한 선박통행이 많은 주요해역의 경우 배출규제해역(Emission Control Area, ECA)을 지정하여 보다 엄격한 기준으로 대기오염 배출규제를 시행하고 있다.

이러한 국제적인 흐름에 따라 국내에서도 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」(이하 특별법)을 제정하며, 항만에서 기인하는 대기오염을 감소시키려는 노력을 보이고 있다. 특별법의 목적은 항만지역등의 대기질을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하고, 항만배출원을 체계적으로 관리함으로써 항만지역등 및 인근 지역 주민의 건강을 보호하고 쾌적한 생활환경을 조성하는 것이다. 선박배출규제해역(ECA), 선박저속운항(Vessel Speed Reduction, VSR), 비산먼지의 규제, 하역장비의 규제, 노후자동차의 출입제한, 육상전원공급설비(Alternative Maritime Power, AMP)의 보급 등 다양한 정책을 포함하는 종합적인 시책이다. 특별법의 발효를 통해 국내의 주요항만들도 친환경 항만으로 거듭나기 위한 기틀을 마련하였다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 정책적 방향에 맞도록 인천항에서 배출된 오염물질의 총량을 파악하고, 이를 친환경 항만으로 도약하기 위한 기초자료로써 제공하는 것을 목적으로 한다.

2. 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 인천항에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 산정하는 것으로 시간적 범위는 2020년 한해동안 배출된 양을 산정하였다. 내용적 범위로는 선박, 차량, 하역장비, 철도, 하역/야적재 비산먼지, 도로재비산먼지, 6개 부문으로 분류하여 산정하였다. 분석대상 오염물질은 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOX), 황산화물(SOX), 총부유분진(TSP), 미세먼지 및 초미세먼지(PM10, PM2.5), 암모니아(NH3)를 분석하였다. 배출량 산정 방법은 유럽환경청(European Environment Agency, EEA)과 미국환경보호국(United States Environmental Protection Agency, EPA)에서 제시하는 방법을 이용하였으며, 자세한 방법은 Ⅴ장에 제시하였다.

Ⅱ. 선행연구 검토

1. 선박기인 배출량 분석에 대한 연구

김화영 외(2020)의 연구에서는 광양항에 입항하는 선박 중 컨테이너선을 대상으로 대기오염물질 배출량 산정에 대한 연구를 진행하였다. 도선사 면담 등을 통해 선박의 활동정보를 수집하였으며, 선박의 활동량을 기준으로 배출량을 산정하는 (activity-based)방법으로 배출량을 산정하였다. 분석결과 NOX 5,010톤, SO2 4,377톤, 탄화수소(HC) 204톤, PM10 466톤의 오염물질이 배출된 것으로 나타났으며, 이를 환경비용으로 환산하여 약 1,187억원의 비용이 발생하는 것으로 분석하였다.

조정정 외(2019)의 연구에서는 광양항과 울산항을 중심으로 선박에 기인한 대기오염물질 배출량 산정에 대한 연구를 진행하였다. 해운항만물류정보시스템(Port-mis)에서 선박의 활동시간 데이터를 수집하고, 미국과 유럽환경기관인 EPA와 EEA에서 제시하는 방법론을 이용하였으며, activity-based방법으로 배출량을 산정하였다. 분석결과 광양항은 3,078톤/년, 울산항은 2,628톤/년의 배출량이 발생한 것으로 분석하였다.

Ernestos Tzannatos(2010)는 그리스 Priaeus 항만을 대상으로 선박의 대기오염물질 배출량을 산정하고 이에 대한 외부효과를 분석하였다. 배출량을 산정하기 위해 EPA에서 제시하는 activity-based 방법을 이용하였으며, 배출물질에 대한 원단위를 이용하여 환경비용을 산정하였다. 2008~2009년 총 2개년도 동안 NOX, SO2, PM2.5 각각 15,720톤, 19,520톤, 88,030톤이 배출된 것으로 분석하였으며, 이로 인한 환경비용은 각각 2,655유료/톤, 1,690유로/톤, 253,470유로/톤으로 나타났다.

Joseph Berechman 외(2012)는 대만의 Kaohsiung 항만을 대상으로 선박에서 기인하는 대기오염물질 배출량을 산정하고, 이로인한 환경비용을 분석하였다. 방법론은 activity-based방법을 통해 배출량을 분석하였으며, NOX 501톤, CO 51톤, CO2 34,531톤, PM10 122톤, PM2.5 4,008톤, SOX 1,717톤, HC 2,290톤, VOC 3,721톤의 결과를 도출하였다. 이를 통해 최종적으로 환경비용을 산정하여 $119.2 million의 환경비용이 발생한다는 결과를 발표하였다.

Hoang T. Pham외(2020)인천항에서 선박에 의해 발생되는 대기오염물질 배출량을 분석하였다. activity-based 방법론을 이용하였으며, CO 375톤, NOX 4,918톤, SOX 1,454톤, PM10 170톤 등의 배출량이 발생하는 것으로 분석하였다.

2. 항만 기타부문 배출량 분석에 대한 연구

김환성 외(2008)의 연구에서는 부산항을 대상으로 항만에서 발생하는 CO2의 배출량에 대해 분석하였다. 부산항 42개 부두에 대해 선박, 하역, 트럭별로 산출하였으며, 1TEU 및 1톤 처리시 발생하는 이산화탄소량을 계산하였다. 분석결과 1TEU 처리시 22.9kg 및 1Ton처리시 2.1kg의 이산화탄소가 배출되는 것으로 분석하였다.

한세현 외(2011)는 인천항 항만시설에서의 대기오염물질 배출량을 분석하였다. 산정부문은 항만하역장비, 비산먼지, 차량, 철도 부문으로 나누어 분석을 시행하였다. EPA에서 제공하는 방법론을 기초로 분석하였으며, 인천항 항만하역장비의 배출량 산정결과, HC, CO, NOX, PM10, SO2의 2007년 배출량은 각각 약 29.4톤, 120.5톤, 382.0톤, 10.4톤, 0.9톤으로 계산되었다. 장비별로는 RTGC의 배출량이 약 25~37%로 가장 큰 비중을 차지하고 있는 것으로 나타났다.

Hoang Thai Pham외(2019)는 인천항에서 화물트럭에 의해 발생되는 대기오염물질 배출량을 EPA에서 제공하는 activity-based방법을 통해 분석하였다. 분석결과 CO 966톤, NOX 3,687톤, SOX 5.8톤, TSP 258톤 등의 배출량이 발생하는 것으로 분석하였다.

Zhao ting-ting(2020)외는 인천항의 하역장비에 기인하는 대기오염물질 배출량에 대해 산정하였다. 하역사로부터 하역장비의 가동시간에 대한 데이터를 수집하고 EPA에서 제시하는 방법론을 통해 분석하였다. 분석결과, CO 105.6톤, NOX 243.2톤, SOX 0.005톤, PM 22.8톤, VOC 26.0톤, NH3 0.2톤이 발생한 것으로 나타났다.

3. 배출량 산정 방법론에 대한 연구

국내 국립환경과학원에서는 선박 운송의 경우, 톤급별 입·출항 자료가 관리되는 외항선 및 연안선만을 배출량 산정대상으로 지정하고 있다. 항만에서 선박운송에 의한 오염물질 배출은 정박시의 배출과 부두 접안시 배출로 구분하고, 추정된 연료소비량을 바탕으로 배출량을 산정한다. 선박의 접안시 연료소비량을 평가하기 위해서는 선박의 정박지로부터 접안지점까지 선박의 운행특성에 따른 연료소비 특성을 파악해야 한다. 하지만 자료의 수집이 어렵기 때문에 에너지 센서스에서 3년마다 조사하고 있는 톤급별 연료경제와 운항거리 추정값을 이용하여 연료소비량을 산정하며, 운항거리는 해풍의 영향거리인 35km를 적용한다. 순항시에 발생하는 대기오염물질 배출계수는 EEA와 EPA에서 제공하는 배출계수를 사용한다.

유럽환경청(EEA)는 유럽연합의 기관으로 환경 정보를 제공하는 것을 목표로 하고 있으며, 환경 정책을 개발, 채택, 실행 및 평가하는 사람들과 일반대중을 위해서 주요 정보를 제공하고 있다. 모든 배출원의 배출량을 측정하는 것은 비실용적이기 때문에 가장 일반적인 추정 접근법은 배출계수(EF)라고 불리는 단위 활동 당 배출계수를 사용하여 활동이 발생하는 정도(AD)에 대한 정보를 결합하여 배출량을 산정(배출량 = AD x EF)한다. EEA의 배출량 산정 가이드북은 분석을 위한 계층화 된 방법론을 설명하고 있으며, 분석의 정교함 단계에 따라 Tier1~Tier3의 방법을 제공하고 있다. 또한 분석 방법론은 크게 연료소모량(Fuel-based)을 기초로 하는 하향식(Top-down)방식과 활동선박의 활동(activity-based)을 기준으로 산정하는 상향식(bottom-up)방식을 제공하였다.

EPA는 선박, 항만 선박 및 화물 취급 장비를 비롯한 항구의 이동 배출원 및 기관차와 고속도로 차량과 같은 항구의 기타 육상 이동 배출원에 초점을 맞추고 있으며, EEA와 마찬가지로 오염 배출원에 대한 배출계수를 제공한다.

4. 시사점 및 연구의 차별성

선박 및 항만 기타부문에 대해 대기오염물질 배출량을 산정하는 연구는 국내·외 적으로 다수의 연구가 존재하였다. 이는 최근 전세계적으로 대두되고 있는 대기오염에 대한 문제와 무관하지 않다. 대부분의 연구에서 activity-based방법을 이용하였다. 근거리이동이 많은 항내에서 Fuel-based방법을 이용하면 오차가 발생할 가능성이 크기 때문이다. 본 연구에서는 인천항을 대상으로 선박 및 기타오염배출원을 포함한 항만전체의 배출량 산정을 분석하는 것으로 차별성을 지닌다.

Ⅲ. 인천항 현황

1. 인천항 개요

인천항은 인천광역시 중구, 남구, 연수구 일원에 위치하고 있으며, 내항, 남항, 연안항 등 총 8개 항으로 구성되어 있다. 부산항에 이어 국내 2위 규모의 항만이며, 수도권의 관문항으로써 중국과의 교역에서 중요한 역할을 한다. 131선석의 접안능력이 있으며, 총 부두길이는 27,407m이다. 인천 신항의 컨테이너 터미널 개장에 따라 대형 컨테이너선의 접안이 가능해졌고, 이를 기반으로 지속적인 성장을 도모하고 있다.

2. 물동량 현황

컨테이너 물동량은 코로나19사태에도 불구하고 2020년 3,264,681TEU로써 역대 최대 물동량을 기록하며, 상승세를 이어나가고 있다. 인천항의 2016~2020년도 컨테이너 물동량은 아래의 〈표1〉와 같다.

표 1. 인천항 컨테이너 물동량

년도	TEU	전년대비 증감율(%)
2016	2,679,504	-
2017	3,048,233	13.8%
2018	3,121,368	2.4%
2019	3,091,955	-0.9%
2020	3,264,681	5.6%

자료 : Port-mis

반면 화물 물동량은 2017년 이후 지속적으로 하락하고 있는 추세이다. 인천항의 2016~2020년도 화물물동량은 〈표2〉와 같다.

표 2. 인천항 화물 물동량

년도	화물물동량 (톤/RT)	전년대비 증감율(%)
2016	161,577,448	-
2017	165,871,136	2.7%
2018	163,863,679	-1.2%
2019	157,736,921	-3.7%
2020	152,137,006	-3.6%

자료 : Port-mis

3. 인천항 친환경 정책

대기오염배출을 저감하기 위해 다양한 제도를 도입하고 있으나 대표적으로는 다음의 정책이 있다.

첫째, ECA제도를 운영중이다. ECA제도는 IMO에서 도입한 제도로써 ECA로 지정된 해역에서는 더욱 엄격한 기준으로 선박의 오염물질 배출을 규제한다. 한국에서도 2020년 특별법을 시행함으로써 국내 5대 항만 지역을 ECA로 규정하여 황산화물 배출을 규제하기 시작하였다.

둘째, 항만 인근에서 운항하는 선박의 속도를 감소하여 대기오염물질을 저감시키기 위한 정책으로 선박이 일정 속도 이하로 운항할 시 항만시설 사용료 감면 등의 인센티브를 제공하는 VSR제도를 운영하고 있다.

셋째, 선박은 부두에 접안하는 동안에도 필수적인 전기장치를 가동하기 위해 자체엔진을 가동시키고 이는 불필요한 연료소비를 유발한다. 선박이 접안하는 동안 육상의 전원을 연결하고, 선박의 엔진을 정지하여 오염물질 배출을 방지하기 위한 장치로써 AMP를 설치하여 운영중이다.

이 외에도 노후트럭진입규제, 친환경하역장비로의 교체, LNG(Liquefied Natural Gas)선박운영 등의 정책을 통해 대기오염물질 배출을 저감하려는 움직임을 보이고 있다.

IV. 자료 수집

1. 선박

본 연구에서는 Port-mis를 통한 선박의 이동정보와 한국선사협회 등에서 제공받은 선박의 제원자료를 활용하였다. 2020년 기준 인천항에는 총 16,482척의 선박이 입항하였으며, 선종별, 항별 입항선박수 통계는 〈표3〉과 같다.

표 3. 입항선박 통계

(단위: 척)

구분	북항	내항	연안항	남항	신항	기타항	합계
벌크선	193	279	-	99	-	111	682
컨테이너선	16	9	13	857	2,028	-	2,923
여객선	3	3	2	-	-	-	8
일반화물선	1,139	668	150	1,765	43	231	3,996
RoRo선	0	426	319	276	641	-	1,662
냉장화물선	0	-	-	-	-	-	0
유조선	3,650	411	495	805	389	1,087	6,837
잡역선	57	27	57	219	6	28	394
합계	5,058	1,823	1,036	4,001	3,107	1,457	16,482

자료 : Port-mis

표 4. 선종별 평균 접안시간

선종별	평균 접안시간(시간)
벌크선	85.4
컨테이너선	13.5
여객선	105.2
일반화물선	35.7
RoRo선	22.6
유조선	24.8
잡역선	71.8

자료 : Port-mis

표 5. 항별 평균 순항시간

항별	평균 순항시간(시간)
북항	2.21
내항	2.96
연안항	1.61
남항	1.70
신항	1.44
송도	1.39

자료 : Port-mis

또한 평균 접안시간은 24.8시간~105.2시간의 분포로 나타났으며, 선종별 접안시간은 〈표4〉와 같다. 또한 항계로부터 각 항별 접안까지 평균 순항시간은 〈표5〉와 같다.

2. 차량

각 하역사 및 부두운영사를 통해 출입차량의 통계를 수집하였다. 2020년 기준 4,412,573대의 차량이 인천항을 출입한 것으로 나타났으며, 항별, 차종별 분포는 〈표 6〉과 같다.

3. 하역기계

차량출입자료와 동일하게 각 하역사 및 부두운영사를 통해 출입차량의 통계를 수집하였다. 각 장비별 운용시간은 〈표7〉과 같다.

표 6. 항별 차종별 출입대수

단위: 대

항별	승합(버스)	승용	컨테이너	화물대형	화물중형	화물소형	합계
북항	665	89,170	7,089	610,877	5,236	3,452	716,488
내항	32,839	587,335	77,152	363,311	36,415	33,035	1,130,087
남항	2,927	85,310	811,847	163,061	26,300	14,058	1,103,839
신항	35,136	2,228	1,301,960	12,551	10,186	4,288	1,366,349
기타	569	54,244	19,770	14,256	5,989	701	95,810
합계	72,136	818,287	2,217,818	1,164,055	84,126	55,534	4,412,573

표 7. 하역장비 운용시간

장비분류	장비대수(대)	운용시간(시간)
RTGC	0	-
Crane	40	67,261
CtHE	26	81,047
Y/T	125	381,572
Fork lift	56	94,255
Loaders	23	28,860
Excavator	28	58,364
Sweeper	13	17,501
합계	311	728,860

표 8. 비산먼지 발생 품목별 물동량

장비분류	물동량(톤)
기타 광석 및 생산품	3,551,132
모래	8,164,804
무연탄	42,500
비료	254,990
시멘트	4,523,928
유연탄	25,875,243
고철	1,694,803
철광석	192,282
합계	44,299,682

항내 차량이동거리는 북항, 내항, 남항, 신항, 기타항이 각각 0.37, 0.91, 0.35, 0.43, 0.71km로 나타났다. 화물트럭의 사용연료는 디젤을 사용하는 경우가 95%였으며, LPG를 이용하는 차량이 4.9%로 뒤를 이었다.

4. 하역/야적 재비산먼지

하역/야적 재비산먼지 부문은 재비산먼지가 발생하는 품목의 물동량에 기초하여 산정하였다. 비산먼지 발생 품목별 물동량은 다음 〈표8〉과 같다.

5. 도로 재비산먼지

도로 재비산 먼지는 차량의 수와 이동거리, 강수일수를 토대로 계산하였다. 계산을 위해 앞서 언급하였던 차량의 자료를 이용하였으며, 강수일수는 기상청의 자료를 이용하였다.

6. 철도

철도는 남항의 인입선을 통해 1일(평일) 1회 운행되었으며, 배출량은 항만내 철도의 거리를 기초로 계산하였다. 항만내 철도의 길이는 약 500m로 조사되었다.

Ⅴ. 배출량 산정 방법론

1. 선박

선박의 경우 선박의 이동, 엔진 제원에 대한 데이터가 존재할 경우 EEA에서 제안한 Tier3 방법이 주로 이용되고 있다. 본 연구는 선종별 입항횟수, 총 톤수, 각 선종별 부두에서의 총 정박시간과 함께 선종별 보조엔진의 출력, 선종별 보조엔진의 Load Factor, 배기가스별 Emission Factor 등을 종합적으로 고려하여 배기가스 산출량을 산정하였다. 선박부문의 배출량 산정식은 다음과 같다.

$$E = P_j \times \sum_j T_j \times LF_j \times EF_i \quad \text{(식 1)}$$

E = 대기오염물질 배출량(톤)

j = 선박의 종류

i = 배기가스의 종류

P_j = 선종별 보조엔진의 평균 출력(Kw)

T_j = 선종별 활동시간(Hour)

LF_j = 선종별 보조엔진의 Load factor

EF_i = 배기가스별 보조엔진의 Emission factor(g/kWh)

보조엔진의 제원은 주엔진 제원과 보조엔진 제원의 비율을 통해 산정하였다. 산정에 이용한 비율을 다음 〈표 9〉와 같다.

표 9. 선박종류별 주엔진에 보조엔진의 비율

선박 종류	주엔진-보조엔진 비율
벌크선	0.222
컨테이너선	0.220
여객선	0.278
일반화물선	0.191
RORO선	0.259
유조선	0.211
잡역선	0.100

자료: Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories, EPA(2009)

또한 보조엔진의 부하계수는 〈표 10〉의 값을 각각 적용하였다.

표 10. 보조엔진의 부하계수

선박 종류	접안시
벌크선	0.10
컨테이너선	0.19
여객선	0.64
일반화물선	0.22
RORO선	0.26
유조선	0.26
잡역선	0.22

자료 : Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories, EPA(2009)

보조엔진의 배출계수는 다음〈표11〉과 같다.

2. 차량

EEA에서는 차량종류별 이동거리, 주행속도 데이터가 존재할 경우 차량활동기반모형에 기반한 방법을 이용할 것을 권고하고 있다. 차량부문의 배출량 산정식은 다음과 같다.

표 11. 보조엔진의 배출계수

구분	CO	NOx	SOx	PM10	PM2.5	VOC	NH^3
MSD	7.4	59.7	20	1.4	1.31	1.8	0.007

자료: Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories, U.S. EPA (2009)

$$E_{veh} = \sum E_{exh} + E_{evap} + E_{att} \quad \text{(식 2)}$$

$E_{exhaust}$ = 배기 가스 배출

E_{evap} = 연료 증발로 인한 배출

E_{att} =타이어 및 브레이크에서 배출된 PM

3. 하역기계

하역기계 역시 가동시간과 엔진의 제원에 따른 배출계수를 적용하여 산출하였으며, 산정식은 다음과 같다.

$$E_{e,i} = \sum_{n}(T_e \times P_{e,j} \times LF_e \times EF_{e,i,j})$$

(식 3)

E = 대기오염물질 배출량(톤)
P = 평균 최대 마력(HP)
EF = 대기오염물질 배출계수(kg/hp-hr)
T= 가동시간(hour)
LF = 엔진부하율
e = 장비종류
i = 대기오염물질 종류
j = 대기오염물질 tier
n = 장비 개수

4. 하역/야적 재비산먼지

물동량을 기초로 계산하였으며, 산정식은 다음과 같다.

$$E_{i,m} = EF_{i,m} \times TP_m \times \frac{1-EC}{100}$$

(식 4)

E = 대기오염물질 배출량(톤)
EF = 대기오염물질 배출계수(kg/톤)
TP = 화물량(톤)
EC = 대기오염물질 제어 계수
m = 화물 종류
i = 대기오염물질 종류

5. 도로 재비산먼지

도로 재비산 먼지는 차량의 수와 이동거리, 강수일수를 기초로 계산하며, 산정식은 다음과 같다.

$$E_i = EF_i \times VKT \times (1 - \frac{P}{4N})$$

(식 5)

E = PM 대기오염물질 배출량(톤)
EF = 대기오염물질 배출계수(kg/km)
P = 강우 일 수
N = 평균 일 수(연간 : 365일)
VKT = 차량 이동 거리(km)
i = 대기오염물질 종류

6. 철도

철도의 운행거리와 운행횟수에 따른 분석을 시행하였으며, 산정식은 다음과 같다.

$$E_{l,i} = \sum_{ph} FC_{l,ph} \times EF_{l,i,j,ph}$$

(식 6)

E = 대기오염물질 배출량(톤)
EF = 대기오염물질 배출계수
FC= 연료소비량(톤)
l = 철도
i = 대기오염물질 종류
j = 대기오염물질 tier
ph = 철도활동 유형

VI. 배출량 산정 결과

1. 선박

선박부문에서 배출된 대기오염물질은 총 4,107톤으로 추정되었으며, 이중 NOX가 가장 많은 것으로 나타났다.

선박 활동별로는 접안시의 배출량이 가장 많은 것으로 나타났으며, 선종별로는 유조선에서 배출된 대기오염물질이 가장 많은 것으로 나타났다.

표 12. 선박부문 배출량(선박 활동별)

단위 : 톤/년

구분	CO		NOx		SOx		TSP(PM10)		PM2.5		VOC		NH^3	
	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율
정박	31.7	8.3%	241.1	7.9%	31.3	5.9%	3.3	6.7%	3.1	6.7%	7.7	7.7%	0.03	8.3%
순항	154.6	40.4%	1,282.6	42.1%	298.1	56.5%	25.1	51.1%	23.5	51.1%	44.4	44.5%	0.15	40.4%
접안	196.2	51.3%	1,523.1	50.0%	198.3	37.6%	20.7	42.1%	19.3	42.1%	47.7	47.8%	0.19	51.3%
합계	382.5	100%	3,046.8	100%	527.8	100%	49.1	100%	45.9	100%	99.9	100%	0.36	100%

표 13. 선박부문 배출량(선박 종류별)

단위: 톤/년

구분	CO		NOx		SOx		TSP(PM10)		PM2.5		VOC		NH_3	
	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율
벌크선	36.5	9.5%	324.5	10.7%	48.8	9.2%	4.7	9.7%	4.4	9.7%	10.7	10.7%	0.03	9.6%
컨테이너	77.4	20.2%	615.0	20.2%	100.9	19.1%	9.6	19.5%	8.9	19.5%	20.2	20.2%	0.07	20.2%
여객선	1.2	0.3%	9.5	0.3%	1.5	0.3%	0.1	0.3%	0.1	0.3%	0.3	0.3%	0.00	0.3%
일반화물	83.0	21.7%	660.1	21.7%	124.8	23.6%	11.2	22.9%	10.5	22.9%	22.1	22.1%	0.08	21.6%
RoRo선	71.8	18.8%	571.3	18.8%	90.1	17.1%	8.7	17.6%	8.1	17.6%	17.9	18.0%	0.07	18.8%
냉장화물	0.0	0.0%	0.1	0.0%	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0.0%
유조선	110.0	28.8%	845.9	27.8%	158.6	30.0%	14.5	29.4%	13.5	29.4%	28.0	28.0%	0.10	28.8%
잡역선	2.5	0.7%	20.4	0.7%	3.2	0.6%	0.3	0.6%	0.3	0.6%	0.7	0.7%	0.00	0.7%
합계	382.5	100%	3,046.8	100%	527.8	100%	49.1	100%	45.9	100%	99.9	100%	0.36	100%

2. 차량

차량부문에서 배출된 대기오염물질은 총 2,622톤으로 추정되었으며, 선박과 동일하게 NOX가 가장 많은 것으로 나타났다.

대형화물차에서 배출된 오염물질이 절대적인 비중을 차지하는 것으로 나타났으며, 황이 함유되지 않은 연료를 사용하기 때문에 선박과 달리 SOX는 극소량만 배출되었다.

표 14. 차량부문 배출량(차량 종류별)

단위: 톤/년

구분	CO		NOx		SOx		TSP(PM10)		PM2.5		VOC		NH_3	
	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율
승용/승합차	2.0	0.4%	5.2	0.3%	0.0	-	0.5	0.3%	0.4	0.3%	0.2	0.3%	1.2	2.1%
소형/중형화물	2.0	0.4%	6.9	0.4%	0.0	-	1.1	0.7%	0.8	0.7%	0.4	0.5%	0.2	0.3%
대형화물	539.2	99.3%	1,830.2	99.3%	2.5	100%	166.7	99.0%	120.3	99.0%	72.9	99.2%	56.1	97.6%
합계	543.2	100%	1,842.2	100%	2.5	100%	168.4	100%	121.5	100%	73.5	100%	57.5	100%

3. 하역기계

하역기계 부문에서 배출된 대기오염물질은 총 212.4톤으로 추정되었으며, 선박과 동일하게 NOX가 가장 많은 것으로 나타났다.

하역기계 종류별로는 가동시간이 많은 Y/T에서 발생하는 배출량이 가장 많았다. 차량과 마찬가지로 SOX는 거의 배출되지 않는 모습을 보였다.

표 15. 하역기계부문 배출량(하역기계 종류별)

단위: 톤/년

구분	CO		NOx		SOx		TSP(PM10)		PM2.5		VOC		NH_3	
	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율	배출량	비율
RTGC	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.0	-	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.0	0.0%	0.00	0.0%
Crane	13.6	27.0%	55.7	41.0%	0.0	-	2.7	28.6%	2.6	28.6%	3.4	20.0%	0.02	15.7%
CtHE	5.8	11.6%	10.6	7.8%	0.0	-	0.9	10.0%	0.9	10.0%	1.9	11.1%	0.01	7.9%
Y/T	17.6	35.0%	39.7	29.2%	0.0	-	3.2	34.8%	3.1	34.9%	7.7	45.6%	0.07	55.1%
Fork lift	8.8	17.6%	20.8	15.3%	0.0	-	1.8	19.2%	1.7	19.1%	1.7	10.1%	0.01	7.9%
Loaders	2.1	4.2%	4.6	3.4%	0.0	-	0.3	3.7%	0.3	3.7%	0.8	4.5%	0.00	0.0%
Excavator	1.6	3.1%	2.3	1.7%	0.0	-	0.2	2.4%	0.2	2.4%	1.1	6.4%	0.01	7.9%
Sweeper	0.7	1.5%	2.3	1.7%	0.0	-	0.1	1.3%	0.1	1.3%	0.4	2.3%	0.00	0.0%
합계	50.2	100%	136.0	100%	0.0	-	9.3	100%	9.0	100%	16.8	100%	0.13	100%

4. 하역/야적 재비산먼지

하역/야적 재비산먼지 부문에서는 19.2톤의 TSP가 배출된 것으로 나타났다. 다음으로 9.1톤의 PM10과 5.2톤의 PM2.5가 배출된 것으로 나타났다.

표 16. 하역/야적 재비산먼지 배출량

단위: 톤/년

구분	TSP	PM10	PM2.5
하역/야적 재비산 먼지	19.2	9.1	5.2

5. 도로 재비산먼지

도로 재비산먼지 부문에서는 87.3톤의 TSP가 배출된 것으로 나타났다. 다음으로 16.8톤의 PM10과 4.1톤의 PM2.5가 배출된 것으로 나타났다.

표 17. 도로 재비산먼지 재비산먼지 배출량

단위: 톤/년

구분	TSP	PM10	PM2.5
도로 재비산먼지	87.3	16.8	4.1

6. 철도

철도부문에서는 총 74.5톤의 오염물질이 배출된 것으로 나타났다. NOX가 58.8톤으로 가장 많은 비중을 차지하였다.

표 18. 철도부문 배출량

단위: 톤/년

구분	CO	NOx	SOx	TSP	PM10	PM2.5	VOC	NH_3
철도	8.5	58.8	0.03	2.2	2.1	2.0	5.0	0.01

Ⅶ. 결론 및 정책제언

1. 결론

본 연구에서는 2020년 기준 인천항에서 배출된 대기오염물질의 총량을 산정하였다. 유럽환경청과 미국환경보호국에서 제시하는 방법론을 통하여 분석을 하였으며, 항만 배출원 별로는 선박, 차량, 하역기계, 하역/야적 재비산먼지, 도로 재비산먼지, 철도 총 6개 부문에 걸쳐 배출량을 조사하였다.

분석결과 총 7,122톤의 배출량이 발생한 것으로 나타났다. 물질별로는 NOX가 5,084톤으로 가장 많은 비중을 차지하는 것으로 나타났으며, CO(984톤), SOx(530톤), TSP(336톤)의 순으로 나타났다. 〈표19〉

배출원 별로는 선박에서 발생한 배출량이 4,107톤으로써 가장 많은 비중을 차지하며, 선박 활동별로 볼 때, 접안시의 배출물질이 가장 많은 것으로 나타났다. 다음으로 차량이 2,622톤의 대기오염물질을 배출한 것으로 나타났다. 선박과 트럭은 각각 전체 배출량의 57.6%와 36.8%로써 항만 대기오염을 유발하는 주요 원인으로 판명되어 이들 배출원에 대한 대책이 필요함을 시사한다.

전세계적으로 대기오염물질의 심각성에 대한 인식이 증대되고, 특히 미세먼지 · 초미세먼지에 대한 경각심이 빠르게 확산되고 있는 추세이다. 특히 항만지역은 선박으로 인한 환경오염이 매우 심각하다. 미세먼지·초미세먼지의 농도가 타 도시에 비해 높게 측정되고 있어, 이를 감축하는 것이 주요 현안으로 인식되고 있다.

인천항은 수도권에 위치한 항만으로써 대기오염배출물질이 인구밀집지역으로 영향을 미칠 가능성이 매우 크며, 이를 예방하기 위한 대책마련이 필요하다. 본 연구의 결과는 친환경정책수립의 기초자료로 활용될 수 있는 근거자료로써 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 정책제언

총 6개의 배출원 중 선박부문의 배출량이 가장 많은 것으로 분석되었다. 선박부문의 배출량은 현재 특별법에서 시행된 ECA, VSR의 시행과 AMP사용확대 등의 정책을 통해 대기오염물질 배출감소를 도모할 수 있다.

특히 선박의 활동별로 구분할 때, 선박이 접안하는 동안 발생하는 오염물질이 가장 많은 것으로 나타났다. 이는 AMP의 도입이 중요함을 시사한다. AMP를 이용하기 위해서는 선박에 추가적인 수전장비가 필요한데, 이를 설치하기 위해서는 추가적인 비용이 발생하기 때문에 선사들이 이용을 꺼리는

표 19. 인천항 부문별 대기오염물질 배출량

단위: 톤/년

구분	CO	NOx	SOx	TSP	PM10	PM2.5	VOC	NH_3
선박	382.5	3,046.8	527.8	49.1	49.1	45.9	99.9	0.36
차량	543.2	1,842.2	2.5	168.4	121.5	73.5	57.5	8.54
하역기계	50.2	136	0.0	9.3	9.3	9.0	16.8	0.13
하역/야적재비산먼지	-	-	-	19.2	9.1	5.2	-	-
도로재비산먼지	-	-	-	87.3	16.8	4.1	-	-
철도	8.5	58.8	0.0	2.2	2.1	2.0	5.0	0.01
합계	984.4	5,083.8	530.3	335.5	207.9	139.7	179.2	9.04

주요원인이 되고 있다. 비용지원, 인센티브지급 등을 이용하여 AMP이용율을 높이는 정책을 도입할 수 있을 것이다.

차량의 경우 엄격한 배출기준이 적용된 최근년식의 차량보다 노후차량에서의 오염물질이 심각하며, 이는 노후차량의 운행규제, 국가차원에서의 노후차량 조기폐차지원이 필요함을 시사한다.

이외에도 LNG선박을 위한 벙커링 시설 도입, 친환경 하역장비도입 등을 통해 항만에서의 대기오염물질 배출감소를 도모할 수 있다.

항만에서 발생하는 대기오염물질 배출을 관리하기 위해서는 일회성의 정책이 아닌 지속적으로 모니터링 및 관리 할 수 있는 시스템 구축이 필요하다고 볼 수 있다.

추가적으로 대기확산모형을 통한 분석을 시행하여 인천항에서 배출된 대기오염물질이 기온, 풍향, 풍속등에 따라 주변지역으로 어떻게 확산되는지를 분석함으로써 항만 주변 생활권 및 수도권 전체에 미치는 구체적인 영향까지 보다 면밀히 규명할 수 있을 것이다.

참고문헌

김화영 · 부이 하이 당(2020), 선박 입출항 데이터 기반 항계 내 선박 배기가스 배출량 산정, 한국지능시스템학회 논문지, 30(6), 453-458.

김환성 · 조민지(2008), 항만의 CO2 배출량 산정에 관한 연구, 한국항해항만학회 학술대회논문집, 137-139.

조정정 · 윤경준 · 이향숙(2019), 선박에 기인한 대기오염물질 배출량 산정 연구-광양항과 울산항을 중심으로, 제35집 제2호, 93-108.

한세현 · 윤종상 · 김우중 · 서윤호 · 정용원(2011), 인천항 항만시설에서의 대기오염물질 배출량 산정, 한국대기환경학회지, 27(4), 460-471.

Zhao, Ting-Ting · Pham, Thai-Hoang · Lee, Hyang-Sook(2020), 인천항 하역장비 대기오염물질 배출량 산정 연구, 한국항만경제학회지, 제36집 제3호, 21-38.

EEA, 2016. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Ernestos Tzannatos(2010), Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus e Greece, Atmospheric Environment 44, 400-407.

Hyang-sook Lee · Dong-joo Park · Sang-ho Choo · Hoang T. Pham(2020), Estimation of the Non-Greenhouse Gas Emissions Inventory from Ships in the Port of Incheon, Sustainability, 12(19), 8231.

Hyang-sook Lee · Hoang Thai Pham · Chi-hoon Kim · Kang-dae Lee(2019), A Study on Emissions from Drayage Trucks in the Port City-Focusing on the Port of Incheon, Sustainability, 11(19), 5358.

Joseph Berechman · Po-Hsing Tseng(2012), Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung, Transportation Research Part D 17 (2012) 35–38 .

U.S. EPA(2002). Methodology for developing modal emission rates for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System. EPA-420-R-02-027. Washington, DC: Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality.

U.S. EPA(2003). User's guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2: Mobile source emission factor model. Technical report, United States Environmental Protection Agency, USA.

U.S. EPA(2009). Current methodologies in Preparing Mobile Source Port-Related Emission Inventories. ICF International Final report to Environmental Protection Agency.

U.S. EPA(2010a). Median life, annual activity, and load factor values for nonroad engine emission modeling. EPA-420-R-10-016.

U.S. EPA(2010b). Exhaust and crankcase emission factors for non-road engine modeling—compression-ignition. EPA-420-R-10-018.

U.S. EPA(2010c) MOVES2010 Highway Vehicle Population and Activity Data. EPA-420-R-10-026. Washington, DC: Assessment and Standards Division, Office of Transportation and Air Quality.

U.S. EPA. (2012). Motor vehicle emission simulator (MOVES): User's guide for MOVES 2010. Technical report, United States Environmental Protection Agency.

인천항의 대기오염물질 배출량 산정 연구

이정욱 · 이향숙

국문요약

세계보건기구(World Health Organization, WHO), 경제개발협력기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)등 국제기구 및 주요 선진국에서는 대기오염의 심각성을 인지하고 있다. 또한 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO) 등의 국제기구에서도 선박에서 발생하는 대기오염을 감소시키 위해 다양한 규제를 시행하고 있다.

이러한 국제적인 흐름에 따라 국내에서도 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」(이하 특별법)을 제정하며, 항만에서 기인하는 대기오염을 감소시키려는 노력을 보이고 있다. 특별법의 목적은 항만지역 등의 대기질을 개선하기 위하여 종합적인 시책을 추진하는 것이다.

본 연구는 이러한 정책적 움직임에 맞추어 항만에서 기인하는 대기오염물질 배출원별 배출량을 파악하여 정책의 우선순위 설정에 기초자료를 마련하고자 하였다. 이를 위해 선박, 차량, 하역장비, 하역/야적재비산먼지, 도로재비산먼지, 철도 6개 부문으로 분류하여 분석을 시행하였으며, 유럽환경청(European Environment Agency, EEA)과 미국환경보호국(United States Environmental Protection Agency, EPA)에서 제시하는 방법론을 이용하였다. 분석대상 오염물질은 일산화탄소(CO), 질소산화물(NOX), 황산화물(SOX), 총부유물질(TSP), 미세먼지 및 초미세먼지(PM10, PM2.5), 암모니아(NH3)를 대상으로 분석하였다.

분석결과 총 7,122톤의 배출량이 발생한 것으로 나타났다. 물질별로는 NOX가 5,084톤으로 가장많은 비중을 차지하는 것으로 나타났으며, 다음으로 CO(984톤), SOx(530톤), TSP(335톤)의 순으로 나타났다. 배출원 별로는 선박이 4,107톤으로써 가장 많은 비중을 차지하며 다음으로 차량이 2,622톤으로써 높은 배출량을 보였다. 이는 각각 전체 배출량의 57.6%와 36.8%로써 항만 대기오염을 유발하는 주요원인으로 판명되어 이들 배출원에 대한 대책이 필요함을 시사하였다.

주제어: 인천항, 대기오염물질, 배출량, 미세먼지