Check for updates

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 37, No. 2, April 2021, pp. 324-337
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.324
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

기술자료

선박 대기오염물질 배출량 산정 및 배출 기여도 분석연구

Estimation of Air Pollutant Emissions from Ships and Their Contributions in Korea

설성희, 정성운*, 성미애, 임재현, 여소영, 진형아
국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과

Sunghee Seol, Sungwoon Jung*, Miae Seong, Jaehyun Lim, Soyoung Yeo, Hyungah Jin
Global Environment Research Division, Climate and Air Quallity Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

접수일 2021년 1월 26일
수정일 2021년 3월 29일
채택일 2021년 4월 4일

Received 26 January 2021
Revised 29 March 2021
Accepted 4 April 2021

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)32-560-7301
E-mail : actual77@korea.kr

Abstract In Korea, seaports are located alongside the coastal lines, as the peninsula is mostly surrounded by water along three seas geographically. Majority of ships coming in and out of its course with diverse purposes are ocean-going air pollutants to coastal environment. This study estimated air pollutant emissions from ships in each port and its course, and analyzed their contributions considering domestic status in 2015 with the use of specifications of passenger ships, cargo ships, and fishing vessels. Emissions from ships were estimated to be 54,365 ton/yr for CO, 151,693 ton/yr for NO_x, 38,467 ton/yr for SO_x, 6,931 ton/yr for PM-10, 6,378 ton/yr for PM-2.5 and 18,003 ton/yr for VOC. Fishing vessels are attributable to 84% of total CO emission and 82.1% of total VOC emission, while cargo ships represent higher contributions on NO_x (56.5%), SO_x (95.4%), PM-10 (70.8%) and PM-2.5 (69.7%). On the other hand, passenger ships have a relatively low contributions to emissions by pollutants compared to other ships. When it comes to coastal environment, CO, NO_x, and VOC are analyzed to represent the highest contributions, whereas SO_x and PM-10, PM-2.5 have shown higher contributions in coastal cities. In coastal cities, SO_x emissions are 7,487 ton/yr in Busan, 6,172 ton/yr in Jeonnam, and 3,468 ton/yr in Ulsan and each accounts for 26.5%, 21.8%, and 12.3% of total emission demonstrating higher contributions in that order. The expected outcomes of this study will provide guidance for establishing measures to reduce air pollution by ships and will analyze its effect.

Key words: Air pollutant emissions, Ship emissions, Maritime navigation

1. 서 론

세계 상품 무역량의 80%가 선박 운송으로 이뤄지고 있는 가운데(UNCTAD, 2019), 선박으로 인한 배출은 인위적으로 발생하는 전체 배출량에 기여하며 국제 해상무역의 확대와 함께 증가할 가능성이 있다고 보고되었다(Becagli *et al.*, 2017; Aksoyoglu *et al.*, 2016; Endresen *et al.*, 2003). 선박 배출에 포함된 주요 대기오염물질은 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 이산화황(SO_2) 미세먼지(PM), 휘발성유기화합물(NMVOCs)이 있고(EEA, 2013), 이러한 물질은 인체건강과 전 지구적인 기후변화에 부정적인 영향을 초래한다고 알려져 있다(Firlag *et al.*, 2018; Aksoyoglu *et al.*, 2016; Winther *et al.*, 2014; Jalkanen *et al.*, 2012; Capaldo *et al.*, 1999; Corbett *et al.*, 1999). 2015년 전 세계적 NO_x, SO_2 선박 배출량은 각각 17% (20.88×10^6 tons), 9% (9.69×10^6 tons)를 차지하며 (Crippa *et al.*, 2018; Johansson *et al.*, 2017), 약 70%가 해안을 따라 배출되어 연안지역과 항만도시 대기질 저하에 기여한다고 보고되었다(Andersson *et al.*,

2009; Endresen *et al.*, 2003; Corbett *et al.*, 1999). 이러한 환경적 요인으로 인해 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 해양오염 방지협약을 통해 선박에서 발생하는 NO_x, SO_x, PM의 배출 규제를 강제화하였다(IMO, 2019). 국내에서도 IMO 규제기준을 반영하여 2020년 1월부터 시행한「항만지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」에 따라 배출규제해역(ECA, Emission Control Area)에서 선박 연료의 황 함유 기준을 일반해역의 0.5%보다 강한 0.1%를 적용(MOF, 2019)함으로써, 선박 배출 대기오염 관리를 위해 노력하고 있다.

선박 배출에 대한 관심이 높아지면서 유럽과 미국, 일부 아시아 국가에서는 선박 배출량 산정 연구가 활발히 수행되어졌다. 특히, 자국의 대표 항만을 선정하여 선박 운항 상태 및 다양한 조건에 따른 연구(LA, 2019; Wan *et al.*, 2019; Ledoux *et al.*, 2018; Nunes *et al.*, 2017; Maragkogianni and Papaefthimiou, 2015; Tichavska and Tovar, 2015; Yau *et al.*, 2013; Berechman and Tseng, 2012; Deniz and Kilic, 2009; Saxe and Larsen, 2004)가 중점적으로 진행되었다. 국내에서는 선박 제원자료를 활용하여 부산항과 인천항, 광양항 및 울산항 등 무역항 중심의 연구들(Zhao *et al.*, 2019; Khan *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2014; Kim and Shin, 2014; Song and Shon, 2014; Park *et al.*, 2011)이 다수 수행되었다. 그러나 국내·외 선박 배출량 산정 연구는 특정 항만을 중심으로 분석한 경우가 많은 편이라 선박에서 기인한 국가 배출 총량 측면에서 다양한 분석을 통한 배출 기여도 연구는 부족한 실정이다.

우리나라는 삼면이 바다인 지리적 요건으로 인해 연안을 따라 항만이 위치하고 있어 다양한 해상활동이 가능하다. 특히 여객을 승·하선시키는 여객항, 화물·우편물 등을 적양하는 무역항, 수산업 활동을 하는 어항 등이 국내 연안지역에 분포되어 있다. 이에 다수의 선박들이 운항목적에 따라 복잡하게 활동하면서 항만뿐 아니라 항로를 운항하며 해상권역에서 대기오염물질을 배출하고 있다. 따라서 전국의 항만과 해상 배출을 모두 포함하고, 선박의 다양성까지 고려한 국가 수준의 선박 대기오염물질 배출량 산정 연구가 반드시 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 활동하는 여객선, 화물선, 어선의 전체 제원정보를 활용하여 2015년 기준 국내 실정을 반영한 선박 대기오염물질 배출량을 산정하고 현행화하였다. 이를 위하여 항만 간 운항시간 및 운항항로, 실제 해상에서의 연료소비량 등을 분석하고 배출계수를 선종별·유종별로 적용하는 방법론을 새롭게 마련하였다. 또한 각 항만과 운항항로의 배출량을 분석하여 항만 배출량과 실제 해역 운항을 바다 배출량으로 구분하고 배출 기여도를 분석하였다.

2. 선박 배출량 산정방법

2.1 선박 산정 범위

본 연구에서는 국내에서 활동하는 선박을 대상으로 통계자료에 등록된 여객선, 화물선, 어선의 2015년 자료 기준 배출량을 산정하였으며, 강과 호수 등 내륙을 운항하는 선박은 배출원에서 제외하였다.

2.2 배출계수

선박 배출계수는 국내 선박을 대상으로 개발된 자료가 부재하여 국외 배출계수(EEA, 2013)를 적용하였다. 선박 연료소비량 자료와 매칭하기 위해 경유는 MDO (Marine Diesel Oil)/MGO (Marine Gas Oil), 중유는 BFO (Bunker Fuel Oil)를 활용하였다(표 1). SO_x 황함량은 NIER (2018)에 제시된 2015년 기준 무연보통휘발유, 경유(0.05%), 중유는 B-A유(2.0%), B-B유(3.0%), B-C유(4.0%)의 유종별 황함량을 각각 반영하였다(표 2).

2.3 선박 종류별 배출량 산정방법

선박 배출량 기본 산정방법은 국외 방법론(EEA, 2013)을 준용하였으며, 산정식은 다음과 같다(Eq. 1).

Table 1. Emission factors for ship emissions. (Unit: kg/ton fuel)

Fuel type	CO	NO_x	SO_x	PM-10	PM-2.5	VOC
Gasoline	573.9	9.4	20S*	9.5	9.5	181.5
MDO/MGO	7.4	78.5	20S*	1.5	1.4	2.8
BFO	7.4	79.3	20S*	6.2	5.6	2.7

*S: Sulfur content in fuel (%)

Table 2. Sulfur content by fuel types.

Fuel type	Sulfur content (wt %)
Gasoline	0.00058
Diesel (0.05%)	0.03517
B-A (2.0%)	1.48500
B-B (3.0%)	3.00000
B-C (4.0%)	3.01056

$$E_i = \sum_m (FC_m \times EF_{i,m}) \quad \text{(Eq. 1)}$$

E_i = 오염물질 i의 배출량(kg)
FC_m = 선박부문 유종 m의 연료소비량(ton)
$EF_{i,m}$ = 오염물질 i, 유종 m에 대한 배출계수 (kg/ton)
m = 유종

2.3.1 여객선

여객선은 국내 연안여객선을 대상으로 한국해운조합의 제원과 연료소비량 자료를 활용하였다. 여객선 제원 자료는 여객선별 운항항로에 대한 총 운항시간 등을 포함하고 있고, 연료소비량 자료는 여객선별 총 연료소비량이 제시되어 있으므로 총 운항시간과 연료소비량을 연계하여 선박운항항로별 연료소비량을 산정하였다. 다만, 운항항로는 기점(승선)과 종점(하선) 사이 다수의 중간기항지가 있으며, 기점에서 중간기항지, 중간기항지에서 종점까지의 계류시간과 운항시간이 분리되어 있지 않아 운항 배출량이 과다 산정될 가능성이 있으므로 운항항로 기점별 소요시간을 구분하여 이에 따른 연료소비량을 산출할 필요가 있다.

본 연구에서는 기점에서 종점까지 103개 여객 항로를 기점에서 중간기항지, 중간기항지에서 종점까지 386개 항로로 재분류하여 운항형태를 분석하였으며 기점과 종점에 머무르는 시간 약 20분, 중간기항지는 약 5분 계류하는 것으로 확인하였다. 따라서 총 운항시간에서 기점과 종점은 20분씩 추가하고, 중간기항지는 총 운항시간에서 5분의 계류시간을 포함시켜 운항항로 기점별 소요시간을 산출하였다. 또한 운항 시 최대출력 80% (EEA, 2013)를 적용하고, 계류 시 20%로 가정하여 연료소비량을 산정하였다. 이에 따라 계류지점인 기점/중간기항지/종점은 여객항이 근접한 항만 배출량으로, 운항은 바다 배출량으로 산정하였다.

2.3.2 화물선

화물선은 국내 연안화물선과 국적선 및 외국선을 포함한 외항선을 대상으로 하였다. 접안 및 정박은 항만 배출량으로 산정하고, 항로에 대한 배출량은 바다 배출량으로 구분하였다. 다만, 연료소비량 부재로 접안 및 정박은 국내 방법론(NIER, 2013)을 활용하고 운항은 EEA (2013)의 연료소비량 추정식을 적용하였다. 연료는 B-C유(4.0%) 기준으로 산정하였다.

접안 시 연료소비량(ton) (Eq. 2)

$$= \sum(\text{톤급별 입출항대수} \times \text{운항거리(km)}) / \text{톤급별 연료경제(km/kL)}$$

Eq. 2는 통계청에서 제공하는 톤급별 입출항대수에 운항거리를 적용하였다. 국내 방법론에서 제시한 운항거리는 항구기준이 아닌 해풍 영향거리 35 km를 일괄 적용하므로 정박모드 시와 차이가 없어 배출량이 과다 산정될 가능성이 있다.

본 연구에서는 도선사협회의 항만별 도선구의 도

선구간별 거리를 활용하였으며, 도선거리가 없는 항구는 바다 권역 중 서해, 동해, 남해(제주 포함) 구역에 속한 도선자료의 평균값을 적용하였다. 톤급별 연료경제는 톤급별 평균 주행거리에 평균 연료소비량을 나눈 값으로, 표 3과 같이 NIER (2018)에 제시된 자료를 활용하였다.

정박 시 연료소비량(ton) (Eq. 3)

= 톤급별 입출항대수 × 연료소비계수(ton/일)
× 정박시간(일/회) × 보정계수(0.2)

Eq. 3은 톤급별 입출항대수에 국내 방법론(NIER, 2013)에서 제시한 연료소비계수, 정박시간, 보정계수를 적용하였다. 연료소비계수는 표 4를 활용하였고 정박시간은 0.79일/회, 보정계수는 정박 중 최대 출력 연료소비량의 20%로 가정한 값을 사용하였다.

최종적으로 산출된 접안 및 정박 연료소비량과 배출계수를 곱하여 항만 배출량을 산정하였다.

화물선 운항배출량은 한국선급과 한국해양교통안전공단에서 관리하고 있는 연안화물선 제원과 운항정보를 포함하고 있는 항만운영정보시스템(PORT-MIS, PORT Management Information System) 자료를 활용하여 산정하였다. 다만, 외항선 운항 배출량은 자료 부재로 적용하지 못하였으며, 자료 조사 등에 대한 후속 연구 진행이 필요하다고 판단된다.

운항 시 연료소비량(ton) (Eq. 4)

= 엔진출력(kW)
× 엔진출력에 대한 연료소비계수(g/kWh)
× 운항 엔진부하율(%) × 운항시간(hr)

Eq. 4에 따라 제원자료에서 엔진출력과 진수년도를 확인하고, 표 5의 IMO (2009)에 제시된 주 엔진의 연료소비계수(SFOC, Specific Fuel Oil Consumption)

Table 3. Fuel efficiency of ship gross tonnage.

Gross tonnage	Fuel efficiency (km/L)
≤100	0.157
100~1,000	0.157
1,000~10,000	0.065
10,000~20,000	0.026
20,000~50,000	0.026
Above 50,000	0.012

Table 4. Fuel consumption coefficient of ship gross tonnage.

Gross tonnage	Fuel consumption coefficient (ton/day)	Gross tonnage	Fuel consumption coefficient (ton/day)
≤100	16.363	15,000~20,000	33.763
100~500	16.563	20,000~25,000	38.763
500~1,000	17.013	25,000~30,000	43.763
1,000~3,000	18.263	30,000~50,000	56.263
3,000~5,000	20.263	50,000~60,000	71.263
5,000~7,000	22.263	60,000~75,000	83.763
7,000~10,000	24.763	75,000~100,000	103.763
10,000~15,000	28.763	Above 100,000	116.263

Table 5. Specific fuel oil consumption of main engine using the inventory model. (Unit: g/kW·h)

Engine age	>15,000 kw	15,000~5,000 kw	≤5,000 kw
≤1983	205	215	225
1984~2000	185	195	205
2001~2007	175	185	195

를 활용하였으며, 운항 엔진부하율은 EEA (2009)에서 제시한 운항모드 80%를 적용하였다.

운항시간 산출을 위해 PORT-MIS 자료의 입항 및 출항일시, 전출항지, 차항지 등을 분석하였다. 항만간 운항의 경우, 입출항이 정확하며 항만/차항지/출항시간/입항시간 등의 정보가 포함되어 있고, 나머지는 차항지에 대한 입항정보가 상이하거나 차항지가 불분명 또는 기타항 등으로 구성되어 있다.

PORT-MIS 자료의 운항항로 동향을 확인하기 위해 표 6과 같이 2013~2015년 자료를 분석한 결과, 3개년의 항만 간 운항 건수가 유사한 것으로 나타났다. 2015년 기준 항만 간 운항 53,377건 분석 시 각 화물선 항로에 따른 톤급별 최빈시간대를 1시간 단위로 추출하고, 최빈시간대 출현 선박의 평균값을 산정하여 388개 항로에 대한 톤급별 운항시간을 산출하였으며, 그 예시를 표 7과 같이 나타내었다. 나머지 불분명한 53%의 자료에 대해서는 3개년 동안 53~56%를 점유하고 있는 것으로 보아 차항지 정보에 대한 시스템 개선이 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. PORT-MIS data analysis of 2013 to 2015.

Year	Total data	Port-to-Port	Uncertain
2013	111,209 (100%)	50,356 (45%)	60,844 (55%)
2014	111,814 (100%)	48,721 (44%)	63,093 (56%)
2015	113,568 (100%)	53,377 (47%)	60,191 (53%)

2.3.3 어선

어선은 국내 연·근해 어선을 대상으로 수협중앙회의 지역조합별로 구분된 연료소비량 자료와 한국해양교통안전공단의 선박검사자료를 매칭하고, 배출계수를 적용하였다. 어선의 운항시간은 항만(포구)에서 조업지까지 이동과 조업지에서의 작업으로 구성된다고 알려져 있으나(NIER, 2015), 이는 바다 배출만을 포함한 것이다.

따라서 본 연구에서는 항만의 계류에 대한 배출을 고려하기 위해 연료소비량 중 5%를 가정하여 방법론에 반영하였다. 또한 어선별 항로 정보가 없어 어선이 직접 활동하는 구역을 선정하기 위해 국내 연구결과(NIER, 2015)의 어장형성정보를 활용하여 어장 348개의 배출량을 산정하였다.

3. 선박 배출량 및 기여도 분석 결과

2015년 기준 여객선, 화물선, 어선에 대한 배출량 산정 결과 CO 54,366 ton/yr, NO_x 151,693 ton/yr, SO_x 38,467 ton/yr, PM-10 6,931 ton/yr, PM-2.5 6,378 ton/yr, VOC 18,002 ton/yr로 분석되었다(표 8). CO와 VOC 배출량은 어선에서 각각 45,641 ton/yr (84.0%), 14,773 ton/yr (82.1%), NO_x, SO_x, PM-10, PM-2.5 배출량은 화물선에서 각각 85,768 ton/yr (56.5%), 36,699

Table 7. Operating hours by course/gross tonnage of cargo ships.

Gross tonnage	Operating hours (hr)				
	Busan-Ulsan	Gwangyang-Donghae	Ulsan-Pohang	Incheon-Pyeongtaek	Daesan-Yeosu
≤100	4.45	–	5.35	4.49	–
100~500	3.54	19.79	6.41	4.47	19.79
500~1,000	3.46	–	5.33	4.39	37.17
1,000~3,000	3.44	28.44	6.46	2.28	34.49
3,000~5,000	4.63	25.51	5.59	7.36	31.33
5,000~7,000	3.28	24.37	6.37	5.35	25.00
7,000~10,000	4.50	25.48	–	–	24.83
10,000~15,000	–	–	–	–	–
15,000~20,000	–	21.52	–	–	–
20,000~25,000	–	22.24	–	–	–
25,000~30,000	–	20.40	–	–	–

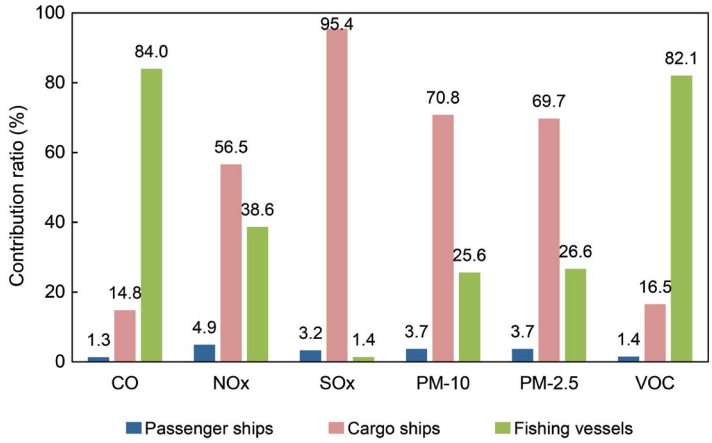

Fig. 1. Distribution of the ship emissions by ship types.

Table 8. 2015 emissions according to ship types. (Unit: ton/yr)

Sources	CO	NO_x	SO_x	PM-10	PM-2.5	VOC
Passenger ships	692	7,361	1,249	255	233	259
Cargo ships	8,033	85,768	36,699	4,904	4,447	2,970
Fishing vessels	45,641	58,564	519	1,772	1,698	14,773
Total	54,366	151,693	38,467	6,931	6,378	18,002

Table 9. 2015 emissions according to port and marine of ships. (Unit: ton/yr)

Port/Marine	CO	NO_x	SO_x	PM-10	PM-2.5	VOC
Gangwon	257	2,130	857	118	107	92
Gyeonggi	547	5,442	2,322	311	282	200
Gyeongnam	835	6,052	2,239	319	290	295
Gyeongbuk	241	2,529	926	130	118	89
Busan	1,790	17,994	7,487	1,011	917	657
Ulsan	781	8,147	3,468	464	421	288
Incheon	409	3,868	1,584	215	196	149
Jeonnam	2,289	15,219	6,172	854	776	801
Jeonbuk	406	1,265	498	73	67	135
Jeju	157	1,579	580	82	75	58
Chungnam	804	5,252	2,161	298	270	281
Port total	8,516	69,479	28,293	3,875	3,519	3,044
Marine	45,850	82,214	10,174	3,056	2,859	14,958
Total	54,366	151,693	38,467	6,931	6,378	18,002

ton/yr (95.4%), 4,904 ton/yr (70.8%), 4,447 ton/yr (69.7%)을 차지하고 있는 것으로 나타났다(그림 1).

표 9에서는 항만 배출량을 시도로 구분하였고, 운항 배출량은 실제 해역인 바다로 분류하였다. 항만의 총 배출량은 CO 8,516 ton/yr, NO_x 69,479 ton/yr, SO_x 28,293 ton/yr, PM-10 3,875 ton/yr, PM-2.5 3,519 ton/

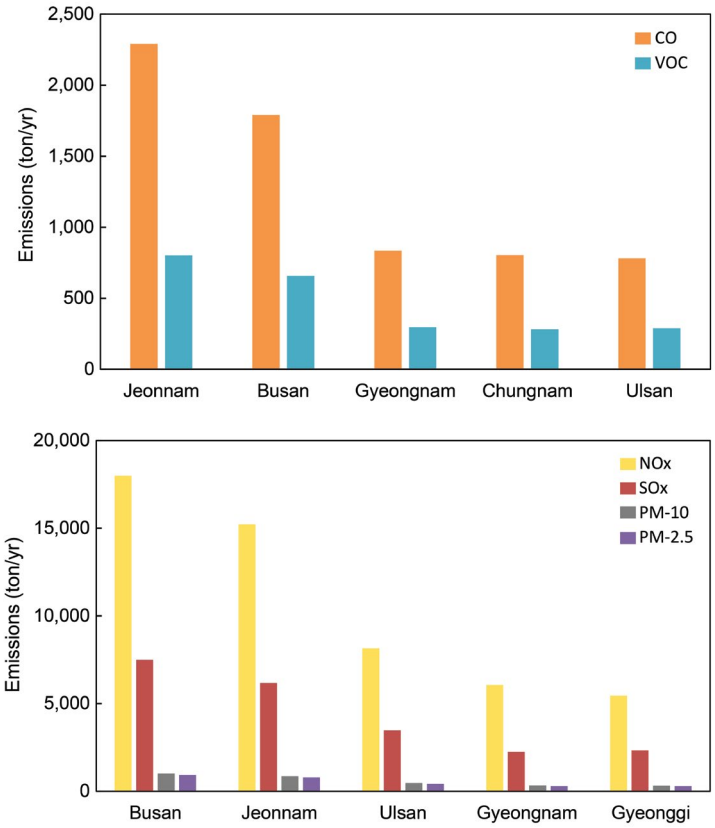

Fig. 2. 2015 emissions according to port (coastal city) of ships.

yr, VOC 3,044 ton/yr으로 분석되었고, 운항에 의한 바다 배출량은 CO 45,850 ton/yr, NO_x 82,214 ton/yr, SO_x 10,174 ton/yr, PM-10 3,056 ton/yr, PM-2.5 2,859 ton/yr, VOC 14,958 ton/yr으로 나타났다. CO와 NO_x, VOC 배출량은 항만보다 바다 배출량의 기여도가 높은 반면, SO_x 및 PM-10, PM-2.5 배출량은 바다보다 항만의 배출량이 크게 나타났다. SO_x 배출량을 지역별로 살펴보면, 부산 7,487 ton/yr (26.5%), 전남 6,172 ton/yr (21.8%), 울산 3,468 ton/yr (12.3%) 순으로 분석되어 주요 항구 도시의 배출 비중이 큰 것으로 나타났다(그림 2).

Yeo *et al.* (2019)에 따르면 2015년 기준 국가 대기오염물질 비도로 부문(건설기계, 농업기계, 철도, 항공) 배출량은 CO 75,210 ton/yr, NO_x 152,641 ton/yr, SO_x 957 ton/yr, PM-10 8,225 ton/yr, PM-2.5 7,567 ton/yr, VOC 19,341 ton/yr로 보고되었다. 비도로 부문에서 본 연구 배출량이 차지하는 비율은 SO_x 97.6%, 그 외 물질은 42~49.8%로 나타났고 건설기계 배출량과 비슷한 수준을 보이고 있어 주요 배출원임을 확인할 수 있다(표 10).

그 간 대기오염물질 배출량 관련 연구는 육상 배출원에 집중된 것으로 알려져 있다(Ledoux *et al.*, 2018). 그 중에서 건설기계 부문은 대기오염물질 관리를 위한 배출계수 개발과 산정체계 고도화 등의 연구들(Jin *et al.*, 2014; Lim *et al.*, 2009)이 진행되어 배출 기여도뿐 아니라, 저감 정책 분석까지 가능한 단계로 발전하였으므로 선박 배출 또한 집중 관리할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Table 10. Comparison of 2015 national non-road emissions of this study. (Unit: ton/yr)

Sources	CO	NO_x	SO_x	PM-10	PM-2.5	VOC
Construction machineries	57,540	121,686	53	6,354	5,846	15,613
Agricultural machineries	7,097	16,209	4	1,348	1,240	1,933
Railroads	2,734	6,688	171	433	399	1,095
Aircrafts	7,838	8,058	729	90	83	700
Non-road total	75,210 (58.0%)	152,641 (50.2%)	957 (2.4%)	8,225 (54.3%)	7,567 (54.3%)	19,341 (51.8%)
This study (ships)	54,366 (42.0%)	151,693 (49.8%)	38,467 (97.6%)	6,931 (45.7%)	6,378 (45.7%)	18,002 (48.2%)
Total	129,576 (100%)	304,334 (100%)	39,424 (100%)	15,156 (100%)	13,945 (100%)	37,343 (100%)

Table 11. Emissions of NO_x for passenger ships by major course (passenger harbor).

Port NO_x emissions (ton/yr)						Marine NO_x emissions (ton/yr)	
Start point		Mid point		End point		Ocean-going	
Mokpo	18			Jeju	18	Mokpo-Jeju	1,002
Jeju	25			Wando	25	Jeju-Wando	565
Incheon	10	Socheong	2.5	Baengnyeongdo	10	Incheon-Socheong	459
		Daecheong	2.5			Socheong-Daecheong	17
			(5)			Daecheong-Baengnyeongdo	37
							(513)
Pohang	11			Ulleung	11	Pohang-Ulleung	422
Mokpo	0.2	Docho	2	Hongdo	2	Mokpo-Docho	0.1
		Heuksan	2			Docho-Heuksan	94
		Bigeum	8			Bigeum-Docho	1
		Damul	2			Heuksan-Hongdo	48
		Manjae	2			Hongdo-Damul	47
		Sangjoongtae	2			Damul- Sangjoongtae	73
		Hatae	2			Sangjoongtae-Hatae	9
		Gageodo	8			Hatae-Manjae	50
			(28)			Manjae-Gageodo	67
							(389)

( ): Sum

4. 선박 종류별 배출량과 기여율

4.1 여객선 배출량

여객선은 NO_x 기준 항만 배출량 603 ton/yr (8.2%), 바다 배출량 6,758 ton/yr (91.8%)로 운항에서 배출 기여도가 절대적으로 높은 것으로 나타났다. 특히, 벙커유 배출량이 1,860 ton/yr (27.5%), 경유 4,898 ton/yr (72.5%)로 분석되어 운항 시 사용되는 다량의 경유가 바다 배출량에 영향을 준 것으로 판단된다. Becken and Hay (2007)에 따르면 여객선 운항과 숙박 및 서비스를 위한 전기 생산에서 경유가 소비된다고 보고되고 있다.

여객선 시도별 NO_x 배출량은 전남 313 ton/yr, 제주 82 ton/yr, 인천 64 ton/yr 순이며, 전남 완도/신안/여수/목포, 제주 서귀포, 인천 옹진 등 주요 여객항이 인접한 시도에서 배출되는 것으로 나타났다. 여객 운항 항로 386개 중 목포항-제주항 1,002 ton/yr (13.6%), 제주항-완도항 565 ton/yr (7.7%), 인천항-백령도 513

ton/yr (7.0%), 포항-울릉항 422 ton/yr (5.7%), 목포항-홍도항 389 ton/yr (5.3%) 순으로 바다 배출량 부분에서 상위를 차지하는 것으로 분석되었다(표 11).

4. 2 화물선 배출량

화물선은 SO_x 기준 항만 배출량 28,219 ton/yr, 바다 배출량 8,480 ton/yr로 각각 76.9%, 23.1%를 차지하였다(표 12). 항구도시는 접안과 정박에 의해 대기오염이 상당히 많이 발생한다고 알려져 있다(Monterio *et al.*, 2018; Murena *et al.*, 2018). 선박이 배출하는 주요 오염물질은 SO_2 (Romagnoli *et al.*, 2017)로, 해양 벙커유의 황 함량이 높기 때문이며 CO와 PM 배출량 또한 품질기준을 만족하지 못한 연료의 불완전 연소로 인해 높게 나타난다고 보고되고 있다(Fameli *et al.*, 2020).

항만의 접안 및 정박에 따른 연안선의 배출량이 10,674 ton/yr (29.1%), 외항선의 배출량이 17,545 ton/yr (47.8%)로 나타나 국내에서 활동하는 연안선보다 무역을 목적으로 입항하는 선박의 영향을 더 크게 받는 것으로 분석되었다. 국내 무역 의존도는 2019년 기준 63.7% (KITA, 2020)이고, 전체 해상을 통해 운송되는 수출입화물 교역량의 99.7% (KSA, 2020)를 점유하고 있어 지속적으로 외항선 배출량 기여도가 증가할 것으로 판단된다. 연안선에서는 100톤~500톤급 3,873 ton/yr (36.3%), 100톤 미만급 2,208 ton/yr (20.7%), 1,000톤~3,000톤급 1,541 ton/yr (14.4%)에서 배출 기여도가 높고, 외항선에서는 30,000톤~50,000톤급 2,320 ton/yr (13.2%), 7,000톤~10,000톤급 1,739 ton/yr (9.9%), 100,000톤급 이상 1,628 ton/yr (9.3%)가 배출되는 것으로 나타났다.

주요 항만 도시의 SO_x 배출량을 살펴보면 연안선 대비 외항선 배출량 기여율이 부산 5,644 ton/yr (75.4%), 전남 3,709 ton/yr (60.4%), 울산 2,193 ton/yr (63.3%)를 차지하였으며, 주로 톤급이 높은 외항 화

Table 12. Emissions according to port and marine of cargo ships. (Unit: ton/yr)

Sources	CO	NO_x	SO_x	PM-10	PM-2.5	VOC
Port	6,176	65,949	28,219	3,771	3,419	2,284
Marine	1,857	19,819	8,480	1,133	1,028	686
Total	8,033	85,768	36,699	4,904	4,447	2,970

Table 13. Port emissions of SO_x for major coastal city by cargo ships gross tonnage.

Busan	SO_x (ton/yr)	Jeonnam	SO_x (ton/yr)	Ulsan	SO_x (ton/yr)
Coastal ship	1,839	Coastal ship	2,433	Coastal ship	1,274
100~500	714	100~500	826	100~500	425
≤100	440	1,000~3,000	417	500~1,000	335
500~1,000	344	≤100	415	1,000~3,000	257
1,000~3,000	185	500~1,000	364	≤100	145
3,000~5,000	77	3,000~5,000	188	5,000~7,000	54
Other	79	Other	222	Other	57
Overseas ship	5,644	Overseas ship	3,709	Overseas ship	2,193
75,000~100,000	709	30,000~50,000	624	30,000~50,000	253
>100,000	675	60,000~75,000	427	1,000~3,000	251
7,000~10,000	670	>100,000	404	7,000~10,000	232
30,000~50,000	570	75,000~100,000	361	3,000~5,000	227
60,000~75,000	467	1,000~3,000	350	25,000~30,000	184
Other	2,553	Other	1,544	Other	1,048

물선에 영향을 받는 것으로 분석되었다(표 13). 항만별로는 부산-부산항 7,483 ton/yr (26.5%), 전남-광양항 4,129 ton/yr (14.6%), 울산-울산항 3,467 ton/yr (12.3%) 순으로 상위를 차지하였다(표 14).

화물선 운항 SO_x 총 배출량은 8,480 ton/yr으로 나타났다. 이 중 일반화물선 4,725 ton/yr (55.7%), 석유제품수송선 3,128 ton/yr (36.9%), 예인선 및 화학제품수송선, 시멘트수송선 등 기타 화물선박이 627 ton/yr (7.4%)를 차지하였다. 톤급별로는 일반화물선 중 3,000톤~5,000톤급 2,242 ton/yr (47.4%), 5,000톤~7,000톤급은 1,374 ton/yr (29.1%)를 차지하였으며, 석유제품수송선에서는 1,000톤~3,000톤급에서 1,161 ton/yr (37.1%), 500톤~1,000톤급에서 798 ton/yr (25.5%)의 기여율을 나타냈다.

화물선 388개 국내 운항항로 중 광양항-평택항 501 ton/yr, 인천항-제주항 361 ton/yr, 울산항-인천항 356 ton/yr, 광양항-동해항 343 ton/yr, 목포항-제주항 321 ton/yr 순으로 해당 항로에서의 바다 배출량이 큰 것으로 나타났다(표 15).

4. 3 어선 배출량

어선은 CO 기준 항만 배출량 2,282 ton/yr (5.0%), 바다 배출량 43,359 ton/yr (95.0%)로 분석되었다. 전체 배출량에서 휘발유 사용에 따른 배출량이 40,182 ton/yr로 88.0%를 차지하였다. 실제 연료소비량은 휘발유보다 경유가 약 8.9배 많으나 이와 같은 상반된 결과는 배출계수 차이로 인한 것으로 사료된다.

시도별 CO 배출량은 전남 915 ton/yr (40.1%), 경남 341 ton/yr (14.9%), 충남 330 ton/yr (14.4%) 순이며, 전남 완도/고흥/여수, 경남 창원/통영/거제, 충남 서천/태안/보령 등 주요 어장이 형성된 도시에서 배출되는 것으로 분석되었다(표 16). 또한 어장 348개 중 경남 창원-수치항 84 ton/yr, 부산-다대포항 47 ton/yr, 전남 무안-톱머리항 44 ton/yr, 전남 무안-도리포항 43 ton/yr, 전남 완도-보옥항 41 ton/yr 순으로 배출량 기여도가 나타났다.

Table 14. Port emissions of SO_x for major trade port by cargo ships.

Rank	Port	Trade port	SO_x (ton/yr)	Ratio (%)
1	Busan	Busan	7,483	26.5
2	Jeonnam	Gwangyang	4,129	14.6
3	Ulsan	Ulsan	3,467	12.3
4	Incheon	Incheon	1,542	5.5
5	Gyeonggi	Pyeongtaek	1,069	3.8
6	Chungnam	Daesan	1,063	3.8
7	Jeonnam	Mokpo	944	3.3
8	Gyeongnam	Masan	935	3.3
9	Jeonnam	Yeosu	923	3.3
10	Gyeongbuk	Pohang	922	3.3
	Other		5,741	20.3
	Total		28,219	100

Table 15. Marine emissions of SO_x for cargo ships by major course (ocean-going) of trade port.

Rank	Trade port	SO_x (ton/yr)	Rank	Trade port	SO_x (ton/yr)
1	Gwangyang-Pyeongtaek	501	6	Busan-Jeju	255
2	Incheon-Jeju	361	7	Yeosu-Incheon	227
3	Ulsan-Incheon	356	8	Busan-Ulsan	204
4	Gwangyang-Donghae	343	9	Yeocheon-Incheon	203
5	Mokpo-Jeju	321	10	Donghae-Incheon	202

Table 16. Port emissions of CO for major fishery by fishing vessels.

Jeonnam			Gyeongnam			Chungnam		
Fishery	CO (ton/yr)	Ratio (%)	Fishery	CO (ton/yr)	Ratio (%)	Fishery	CO (ton/yr)	Ratio (%)
Tommeori	44	4.8	Suchi	84	24.6	Dasa	37	11.3
Doripo	43	4.7	Okgye	19	5.7	Songsuk	37	11.3
Bo-ok	41	4.4	Wonjeon	18	5.4	Wolhaseong	31	9.5
Dojang	36	3.9	Gwangam	15	4.4	Hongwon	31	9.5
Sadong	36	3.9	Yepo	12	3.6	Nanjido	15	4.6
Dongo	36	3.9	Neukdo	11	3.3	Jango	15	4.6
Sepo	23	2.6	Shinsoo	11	3.3	Kanwoldo	10	3.1
Dongcheon	22	2.4	Joongpyeong	11	3.1	Bangpo	10	3.1
Imok	22	2.4	Noryang	11	3.1	Baeksajang	10	3.1
Sumoon	17	1.9	Nakjipo	6	1.9	Yeongmok	10	3.1
Sub-total	321	35.0	Sub-total	199	58.4	Sub-total	209	63.3
Other 91 fishery	594	65.0	Other 58 fishery	142	41.6	Other 28 fishery	121	36.7
Total	915	100	Total	341	100	Total	330	100

어선은 여객선 및 화물선과 달리 항로 정보가 없어 운항특성에 따른 운항항로기점별 배출량을 산정하는데 한계가 있었다. 국내 어선부문의 경우 항로와 조업패턴 등을 포함한 자료 관리가 어려워 세부적인 배출통계 작성이 미약한 실정이고, 선박 등록대수 중 어선이 차지하는 비율은 약 94%를 차지하고 있어 (Choi *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2014), 다양한 제원자료가 구축된다면 다른 선박보다 대기오염물질 배출기여도가 커질 것으로 추정된다.

5. 결 론

본 연구는 여객선, 화물선, 어선을 대상으로 2015년 자료 기준 전국 항만과 해상 배출을 포함한 선박 대기오염물질 배출량 산정 및 배출 기여도를 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 선박 대기오염물질별 배출량 산정 결과, CO, NO_x, VOC는 바다 배출량의 기여도가 높은 반면, SO_x 및 PM-10, PM-2.5는 항만에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 총 배출량 중 어선은 CO 84%, VOC 82.1%를 차지하며, 화물선은 NO_x 56.5%, SO_x 95.4%, PM-10 70.8%, PM-2.5 69.7%의 높은 비율로 나타났다.

(2) 2015년 국가 대기오염물질 비도로 부문에서 본 연구 배출량이 차지하는 비율은 SO_x 97.6%, 그 외 물질은 42~49.8%로 나타났다. 또한 건설기계 배출량과 비슷한 수준을 보이고 있어 주요 배출원임을 확인할 수 있다.

(3) 여객선은 NO_x 기준 바다 배출량이 91.8%를 차지하였으며, 운항 시 사용되는 경유 사용이 배출량에 기여한 것으로 판단된다. 여객선 항로 386개 중 목포항-제주항 1,002 ton/yr (13.6%), 제주항-완도항 565 ton/yr (7.7%), 인천항-백령도 513 ton/yr (7.0%) 순이고, 항만은 전남 313 ton/yr, 제주 82 ton/yr, 인천 64 ton/yr로 나타나 주요 여객항이 인접한 도시에서 배출되는 것으로 분석되었다. 여객선은 외항선 제원정보가 없어 본 연구에서 활용하지 못한 바, 국적선 및 외국선을 포함한 자료조사와 활동자료 확보 시 배출원 사각지대 보완이 가능할 것으로 사료된다.

(4) 화물선은 SO_x 기준 항만 배출량이 76.9%를 차지하였으며 무역을 목적으로 입항하는 선박의 영향을 더 크게 받는 것으로 분석되었다. 항만별로는 부산항 26.5%, 광양항 14.6%, 울산항 12.3% 순으로 상위를 차지하였고, 화물선 388개 국내 운항항로 중 광양

항-평택항 501 ton/yr, 인천항-제주항 361 ton/yr, 울산항-인천항 356 ton/yr 순으로 배출량이 큰 것으로 나타났다. 단, 본 연구결과의 운항 배출량은 PORT-MIS 자료의 47%만 활용한 것으로 53%의 불분명한 자료 개선과 외항선 운항에 대한 시스템 체계를 구축한다면 운항 배출량의 해상도가 상당부분 개선될 것으로 판단된다.

(5) 어선은 CO 기준 바다 배출량에서 휘발유 사용에 따른 배출량이 88.0%를 차지하였다. 실제 연료소비량은 휘발유보다 경유가 약 8.9배 많으나 이와 같은 상반된 결과는 배출계수 차이로 인한 것으로 사료된다. 항만의 CO 배출량은 전남 915 ton/yr (40.1%), 경남 341 ton/yr (14.9%), 충남 330 ton/yr (14.4%) 순으로 주요 어장이 형성된 시도에서 배출되는 것으로 나타났고, 어장 348개 중 경남 창원-수치항 84 ton/yr, 부산-다대포항 47 ton/yr, 전남 무안-톱머리항 44 ton/yr 순으로 나타났다. 다만, 어선은 항로 정보가 없어 운항항로기점별 배출량을 산정하는데 한계가 있었으므로, 제원자료 조사가 정책적으로 필요할 것으로 판단된다.

본 연구는 국가 수준의 선박 대기오염물질 배출량을 산정하고 항만과 바다를 구분하여 배출 기여도를 분석하였다. 방법론 적용 시 실제 제원정보와 운항항로를 분석하여 배출량 산정방법을 구체적으로 명시하고 선박종류별, 항로별, 항만별 등 다양한 관점에서 기여도를 제시했다는 점에서 연구의 차별성이 있다고 판단된다. 실제 국내 실정을 반영한 주요 인자를 활용하여 배출량을 산정하였으며, 본 연구에서 도출한 자료는 선박 부문의 대기오염 저감 대책 및 시행효과 분석을 위한 기초자료로서 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER 2015-01-01-067).

References

Aksoyoglu, S., Baltensperger, U., Prévôt, A.S.H. (2016) Contribution of ship emissions to the concentration and deposition of air pollutants in Europe, Atmospheric Chemistry and Physics, 16, 1895-1906. https://doi.org/10.5194/acp-16-1895-2016

Andersson, C., Bergstrom, R., Johansson, C. (2009) Population exposure and mortality due to regional background PM in Europe - Long-term simulations of source region and shipping contributions, Atmospheric Environment, 43, 3614-3620. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.040

Becagli, S., Anello, F., Bommarito, C., Cassola, F., Calzolai, G., Di Iorio, T., Sarra, A., Gomez-Amo, J-L., Lucarelli, F., Marconi, M., Meloni, D., Monteleone, F., Nava, S., Pace, G., Severi, M., Sferlazzo, D.M., Traversi, R., Udisti, R. (2017) Constraining the ship contribution to the aerosol of the central Mediterranean, Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 2067-2084. https://doi.org/10.5194/acp-17-2067-2017

Becken, S., Hay, J.E. (2007) Tourism and Climate Change-Risks and Opportunities. Channel View Publications, Clevedon (UK).

Berechman, J., Tseng, P.-H. (2012) Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung, Transportation Research, Part D, 17, 35-38. https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.09.009

Capaldo, K., Corbett, J.J., Kasibhatla, P., Fischbeck, P., Pandis, S.N. (1999) Effects of ship emissions on sulphur cycling and radiative climate forcing over the ocean, Nature, 400(6746), 743-746. https://doi.org/10.1038/23438

Chang, Y.T., Roh, Y.H., Park, H.S. (2014) Assessing noxious gases of vessel operations in a potential Emission Control Area, Transportation Research, Part D, 28, 91-97. https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.003

Choi, S.J., Kim, P.S., Park, S.K., Park, G.J., Kim, J.S., Kim, J.H., Son, J.H. (2014) A study on greenhouse gas emissions calculation method based on the classification system of emission sources of domestic fishing vessel, Proceeding of Korean Society of Climate Change Research in Summer, p. 144.

Corbett, J.J., Fischbeck, P.S., Pandis, S.N. (1999) Global nitrogen and sulfur inventories for oceangoing ships, Journal of Geophysical Research, 104(D3), 3457-3470. https://doi.org/10.1029/1998JD100040

Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Dentener, F.,

van Aardenne, J.A., Monni, S., Doering, U., Oliver, J.G.J., Pagliari, V., Janssens-Maenhout, G. (2018) Gridded emissions of air pollutants for the period 1970-2012 within EDGAR v4.3.2, Earth System Science Data, 10, 1987-2013. https://doi.org/10.5194/essd-10-1987-2018

Deniz, C., Kilic, A. (2009) Estimation and assessment of shipping emissions in the region of Ambarli Port, Turkey, Environmental Progress & Sustainable Energy, 29(1), 107-115. https://doi.org/10.1002/ep.10373

Endresen, Ø., Sørgard, E., Sundet, J.K., Dalsøren, S.B., Isaksen, I.S.A., Berglen, T.F., Gravir, G. (2003) Emission from international sea transportation and environmental impact, Journal of Geophysical Research, 108(D17), 4560. https://doi.org/10.1029/2002JD002898, 2003

European Emission Agency (EEA) (2009) EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009.

European Emission Agency (EEA) (2013) EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013.

Fameli, K.M., Kotrikla, A.M., Psanis, C., Biskos, G., Polydoropoulou, A. (2020) Estimation of the emissions by transport in two port cities of the northeastern Mediterranean, Greece, Environmental Pollution, 257, 113598. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113598

Firlag, S., Rogulski, M., Badyda, A. (2018) The influence of marine traffic on particulate matter (PM) levels in the region of Danish straits, north and Baltic seas, Sustainability 10(11), 4231. https://doi.org/10.3390/su10114231

International Maritime Organization (IMO) (2009) Second IMO GHG Study 2009.

International Maritime Organization (IMO) (2019) Marine Environment, Prevention of air pollution from ships, December 2019. https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx

Jalkanen, J.-P., Johansson, L., Kukkonen, J., Brink, A., Kalli, J., Stipa, T. (2012) Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 2641-2659. https://doi.org/10.5194/acp-12-2641-2012

Jin, H.A., Lee, T.W., Park, H.N., Son, J.H., Kim, S.K., Hong, J.H., Jeon, S.H., Kim, J.S., Choi, K.H. (2014) An Estimation of Age-, Power-, and Type-Specific Emission Inventories for Construction Equipments Using Improved Methodologies and Emission Factors, Korean Society for Atmospheric Environment, 30(6), 555-568, (in Korean with English abstract).

Johansson, L., Jalkanen, J.-P., Kukkonen, J. (2017) Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, Atmospheric Environment, 167, 403-415, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042

Kim, J.G., Shin, K.W. (2014) Estimating greenhouse gas emissions from marine vessels in the port of Busan using PORT-MIS and vessel specification databases, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 34(4), 1251-1259, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.12652/Ksce.2014.34.4.1251

Kim, P.S., Kim, J.H., Son, J.H., Kim, J.S., Choi, S.J., Park, S.K., Park, G.J. (2014) A Study on the method of estimating the greenhouse gas emissions base on the classification of fishing boat, Journal of Climate Change Research, 5(4), 301-311, (in Korean with English abstract), https://doi.org/10.15531/KSCCR.2014.5.4.301

Khan, S., Chang, Y.T., Lee, S.H., Choi, K.S. (2018) Assessment of greenhouse gas emissions from ships operation at the Port of Incheon using AIS, Journal of Korea Port Economic Association, 34(1), 65-80.

Korea International Trade Association (KITA) (2020) https://stat.kita.net/main.screen (accessed on December 2020).

Korea Shipowners' Association (KSA) (2020) https://www.shipowners.or.kr:4432/about/industry.php. (accessed on December 2020).

LA, The Port of Los Angeles (2019) Port of Los Angeles inventory of air emissions - 2018, Technical Report.

Ledoux, F., Roche, C., Cazier, F., Beaugard, C., Courcot, D. (2018) Influence of ship emissions on NO_X, SO_2, O_3 and PM concentrations in a North-Sea harbor in France, Journal of Environmental Sciences, 71, 56-66. https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.03.030

Lim, J.H., Jung, S.W., Lee, T.W., Kim, J.C., Seo, C.Y., Ryu, J.H., Hwang, J,W., Kim, S.M., Eom, D.S. (2009) A study on calculation of air pollutants emission factors for construction equipment, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(3), 188-195, (in Korean with English abstract).

Maragkogianni, A., Papaefthimiou, S. (2015) Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of Greece, Transportation Research, Part D, 36, 10-17. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.014

Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2019) https://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=26592&searchSelect=title&searchValue=%ED%99%A9&boardKey=10&menuKey=971&currentPageNo=3 (accessed on June 2019).

Monteiro, A., Russo, M., Gama, C., Borrego, C. (2018) How important are maritime emissions for the air quality: at European and national scale, Environmental

Pollution, Part A, 242, 565-575. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.011

Murena, F., Mocerino, L., Quaranta, F., Toscano, D. (2018) Impact on air quality of cruise ship emissions in Naples, Italy. Atmospheric Environment, 187, 70-83. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.05.056

National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Handbook of estimation methods for national air pollutant emissions III, (in Korean).

National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) A Study on the Development of air pollutants and greenhouse gases emission factor and emission estimation from the domestic coastal shipping II, (in Korean).

National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Standard operations procedure for the construction of supporting data for national air pollutant emissions, (in Korean).

Nunes, R.A.O., Alvim-Ferraz, M.C.M., Martins, F.G., Sousa, S.I.V., (2017) Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal, Environmental Pollution, 231, 1370-1379. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.112

Park, D.Y., Hwang, C.W., Jeong, C.H., Shon, Z.H. (2011) Estimate of ships emission in Busan Port during 2009 based on activity, Journal of the Environmental Sciences, 20(5), 599-610, (in Korean with English abstract). https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.5.599

Romagnoli, P., Vichi, F., Balducci, C., Imperiali, A., Perilli, M., Pacicucci, L., Petracchini, F., Cecinato, A. (2017) Air quality study in the coastal city of Crotone (Southern Italy) hosting a small-size harbor, Environmental Science Pollution Research, 24, 25260-25275. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0126-8

Saxe, H., Larsen, T. (2004) Air pollution from ships in three Danish ports, Atmospheric Environment, 38, 4057-4067. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.05

Song, S.K., Shon, Z.H. (2014) Current and future emission estimates of exhaust gases and particles from shipping at the largest port in Korea, Environmental Science Pollution Research, 21, 6612-6622. https://doi.org/10.1007/s11356-014-2569-5

Tichavska, M., Tovar, B. (2015) Port-city exhaust emission model: An application to cruise and ferry operations in Las Palmas Port, Transportation Research, Part A, 78, 347-360. https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.05.021

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (2019) Review of Maritime Transport 2019. https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2019_en.pdf

Wan, Z., Zhang, Q., Xu, Z., Chen, J., Wang, Q. (2019) Impact of emission control areas on atmospheric pollutant emissions from major ocean-going ships entering the Shanghai Port, China, Marine Pollution Bulletin, 142, 525-532. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.053

Winther, M., Christensen, J.H., Plejdrup, M.S., Ravn, E.S., Eriksson, O.F., Kristensen, H.O. (2014) Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data, Atmospheric Environment, 91, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.006

Yau, P.S., Lee, S.C., Cheng, Y., Huang, Y., Lai, S.C., Xu, X.H. (2013) Contribution of ship emissions to the fine particulate in the community near and international port in Hong Kong, Atmospheric Research, 124, 61-72, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.12.009

Yeo, S.Y., Lee, H.K., Choi, S.W., Seol, S.H., Jin, H.A., Yoo, C., Lim, J.Y., Kim, J.S. (2019) Analysis of the national air pollutant emission inventory (CAPSS 2015) and the major cause of change in Republic of Korea, Asian Journal of Atmospheric Environment, 13(3), 212-231. https://doi.org/10.5572/ajae.2019.13.3.212

Zhao, T-T., Yun, K.J., Lee, H.S. (2019) A Study on Estimating Ship Emission Focusing on Gwangyang Port and Ulsan Port, Journal of Korea Port Economic Association, 35(2), 93-108, (in Korean with English abstract).

Authors Information

설성희 (국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 전문연구원)

정성운 (국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 환경연구사)

성미애 (국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 전문연구원)

임재현 (국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 과장)

여소영 (국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 환경연구사)

진형아 (국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과 환경연구관)