

국내 주요 항구도시의 선박 배기가스 배출량 산정 및 사회적 비용 추정

최정길* · 김명원** · 이효진*** · 강태순**** · 이강웅*****

* ㈜지오시스템리서치 환경화학생태부 선임, ** ㈜지오시스템리서치 연안관리부 책임,

*** ㈜지오시스템리서치 환경화학생태부 책임, **** ㈜지오시스템리서치 1본부 본부장, ***** 한국의국어대학교 환경학과 교수

Estimation of Atmospheric Pollutant Emissions from Vessels in Major Harbor Cities in Korea and related Social Cost

Jung-kil Choi* · Myung-won Kim** · Hyo-jin Lee*** · Tea-soon Kang**** · Kang-wung Lee*****

* Senior Engineer, Geosystem Research Corporation, Department of Environmental Chemistry and Ecology, Gunpo, 15807, Korea

** Principal Engineer, Geosystem Research Corporation, Department of Coastal Management, Gunpo, 15807, Korea

*** Principal Engineer, Geosystem Research Corporation, Department of Environmental Chemistry and Ecology, Gunpo, 15807, Korea

**** Chief, Geosystem Research Corporation, 1 Headquarters, Gunpo, 15807, Korea

***** Professor, Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, 17035, Korea

요 약 : 본 연구는 국내 항구도시 인천, 목포, 광양, 부산, 울산의 대기오염물질 배출특성, 대형선박 배기가스 배출량 및 사회적 비용을 산정하여 배기가스 저감방안의 필요성을 제시하였다. 부산은 선박 입항수가 많고 목포는 선박 입항수는 적지만 선박 배기가스에 의한 배출기여도는 두 항구도시 모두 높았다. 울산은 세계적 수준의 중화학공업, 광양은 제철소, 인천은 제조업과 선박 입항수가 목포보다 많았지만 배출기여도는 낮았다. 선박 배기가스 배출량 산정 결과, CO₂의 배출량이 가장 많고 다음으로는 NO_x, SO_x으로 배출량이 많았다. 선종별로는 부산, 울산, 인천은 유조선, 광양은 일반화물선, 목포는 여객선에서 각각 많았다. 사회적 비용 결과, 부산은 배출량이 많은 영향으로 사회적 비용이 높았으며, 항목별로는 PM이 높았다. 저황유 사용으로 PM, SO_x 배출량을 직접적으로 줄이고, NO_x의 배출량을 간접적으로 줄 일수 있다. 하지만 선박 배기가스 중 가장 많은 배출량을 보인 CO₂를 저감하기 위해서는 저황유의 보급만으로는 부족하다. CO₂ 배출량 감축을 위해서는 육상전원공급장치(Alternative Maritime Power)를 사용하는 등 화석연료를 사용하지 않는 저감방안 수립의 필요성을 제기하였다.

핵심용어 : 선박 배기가스, 선박 배출량, 사회적 비용, 항만도시 대기오염, 선박 배출기여도

Abstract : Atmospheric pollutant emissions, mainly exhaust gas emissions from vessels, and the resultant social costs of pollution in the Korean harbor cities of Incheon, Mokpo, Gwangyang, Busan and Ulsan, are examined in this study, and the need for an emissions reduction plan is highlighted. Busan had several vessels entering its port, while Mokpo had few vessels, yet the vessels emission contribution was high in both the cities. Ulsan had world-class heavy-chemical industries, Gwangyang had steel mills and Incheon had a manufacturing industry and more vessels entering its port than Mokpo, yet the emission contribution was low in these cities. By calculating exhaust gas emissions from the vessels, it was found that CO₂ was the highest, followed by NO_x and SO_x. By vessel type, Busan, Ulsan, and Incheon had more oil tank vessels, Gwangyang had more cargo vessels, and Mokpo had more ferries. As a result of social cost, Busan paid the highest, while the highest emission was PM. The use of low-sulfur oil can directly reduce PM and, SO_x emissions and indirectly reduce NO_x emissions. However, in order to reduce high CO₂ emissions, only low-sulfur oil will not help. Therefore, the study suggested the need for reduction plan that use of fossil fuels, by using alternative maritime power (AMP).

Key Words : Vessels exhaust, Vessels emission, Social costs, Harbor city atmospheric pollution, Vessels emission contribution

* First Author : jkchoi@geosr.com, 031-5180-5852

† Corresponding Author : gwlee@hufs.ac.kr, 031-330-4273

1. 서론

선박을 이용한 국제교역이 활발해짐으로써 항만 화물 처리량이 증가하고, 선박 및 항만이 대형화됨에 따라 항만의 대기오염이 이슈화되고 있다(Cho, 2010; Bailey and Solomon, 2004). 선박은 화석연료인 벙커C와 MDO(Marine Diesel Oil)를 사용하는 디젤엔진을 통해 운항에 필요한 동력과 정박 중 필요한 전기를 생산하고(Ahn et al., 2019), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 이산화탄소(CO₂), 입자상물질(PM), 아산화질소(N₂O) 및 유해물질 등의 대표적인 지구온난화 물질을 배출한다(Lee et al., 2016). 그 중 N₂O는 CO₂에 비하여 배출량이 미량임에도 불구하고 지구온난화 계수가 CO₂의 310배에 달하는 것으로 나타났다(IPCC, 2007). 또한 선박에서 배출된 대기오염물질은 천식, 알레르기성 비염, 아토피 등의 환경성질환을 유발하는 것으로 밝혀졌고(Seo and Lee, 2019), 이러한 영향은 항만노동자 뿐만 아니라 인근 지역 주민의 건강에도 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Song and Han, 2007; Wu et al., 2007; Bailey et al., 2004). 대기오염과 더불어 선박의 입출항이 많은 지역에서 유출유와 오염물질의 유출사고가 빈번하게 발생하는 것으로 나타나(Jung and Son, 2018), 해양 생태계에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

OSPAR(2009)의 보고서에 따르면, 2008년 선박에서 배출된 SOx, NOx, PM은 2000년 대비 각각 40%, 45%, 55% 증가하였으며, 이는 각각 318만6천톤, 482만8천톤, 39만6천톤에 해당하는 규모이다. 또한 아무런 규제가 이루어지지 않았을 경우, 2020년에는 선박 기원 대기오염물질의 배출량이 급격히 늘어날 것으로 예상하였다(Hong and Pak, 2011).

최근 대기오염물질 저감방안에 관한 국제적인 배출규제가 시행됨에 따라, 국외를 중심으로 항만도시 내 대기오염물질 배출량을 산정하는 연구가 수행되었다. 예를 들어 미국의 대표적인 항만지역인 캘리포니아 산 페드로만의 LA항(Port of Los Angeles)과 LB항(Port of Long Beach)의 경우, 각각 2001년과 2002년도부터 선박뿐만 아니라 항만하역장비, 물류수송 트럭, 기관차에 대한 대기오염물질 배출량을 산정하고 있으며, 항만 대기오염 관리를 위한 다양한 대책들을 수립하여 시행하고 있다(ICF International, 2009; Bailey et al., 2004).

다른 한편, 우리나라는 전체 수출입 물량의 99.7%를 해운이 담당하고 있으며(Liu and Lee, 2019), 선박수송 화물량은 2007년 57,762천ton에서 2017년 91,787천ton으로 10년간 약 63% 증가하는(National Logistics Information Center, www.nlic.go.kr) 추세임에도 불구하고, 선박에 의한 항구도시 내 대기오염에 관한 연구는 활발하지 않았다. 비록 인천항 항만시설의 대기오염물질 배출량 산정(Han et al., 2011)과 2011년 부산항 배

기가스 배출량 및 사회적 비용 산출(Lee and Lee, 2016)을 연구한 바가 있지만 울산, 광양, 목포와 같은 다른 주요 항만들에 대한 연구는 수행되지 않았다.

따라서 본 연구는 항구도시의 대기오염현황 중 선박에 의한 배출기여도 파악과 실제 선박 배기가스 배출량을 산정 후 선박 배기가스로 유발되는 사회적 비용을 추정하여 도로 이동오염원의 사회적 비용과 비교를 통해 선박 배기가스 배출현황의 심각성을 밝히고, 선박 배기가스 배출량 감소의 필요성을 제기하고자 한다. 나아가 배기가스 배출량과 저감을 위한 요인들과 국가적인 관리 대책을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구범위

연구범위는 우리나라 동,서,남해 주요 항만도시인 인천, 광양, 목포, 부산, 울산을 공간적 범위로 선정하였다. 2016년 기준 우리나라 전체 선박 화물처리량은 4,168백만톤이며, 그 중 부산항 32%(1,325백만톤), 광양항 17%(723백만톤), 울산항 11%(444백만톤), 인천항 9%(387백만톤), 목포항 2%(83백만톤)를 각각 처리한 것으로 나타났다(해운항만물류정보시스템, PORT-MIS).

2.2 연구대상 대기오염물질

연구대상 대기오염물질은 NOx, SOx, PM, CO₂이다.

NOx는 N₂O, NO, NO₂, NO₃, N₂O₃, N₂O₄, N₂O₅ 등이 있다. 이러한 질소산화물 중에서 NO, NO₂가 가장 중요한 산화물로, 일반적으로 NOx이라 하면 두 물질을 의미한다. 자연상태에서 상당량의 NOx가 생물학적으로 발생되나, 배출농도가 적고 주변지역으로 거의 확산되지 않아, 무시할 만한 수준이나 인위적으로 발생하는 NOx는 화석연료의 연소과정에서 주로 발생한다. 연료의 연소 과정에서 발생한 NOx는 대기 중에서 2차 오염물질을 형성하는 특징이 있으며, 중요한 2차 오염물질은 질산, 오존과 광화학 스모그 등을 들 수 있으며, 황산화물과 같이 산성비의 원인이 된다.

SOx는 대부분 연료 중 황(Sulfur)이 연소시 공기 중의 산소와 결합하여 생성되고 대기중으로 배출된다. 황이 산화되면 먼저 SO₂가 되고 더 산화되면 SO₃가 되는데 이를 통틀어 SOx로 나타낸다. SOx는 NOx와 함께 산성비(Acid Rain)를 내리게 하는 원인이다. SOx는 주로 발전소 제련(Smelting) 산업과 수송기관에서 석탄과 석유를 연소시킬 때 발생한다. Lee et al.(2016)에 의하면 사람이나 동물이 아황산가스에 노출되면 기관지 수축현상이 일어날 수 있으며, 식물의 경우는 해면조직과 색소조직을 파괴하여 죽게 만드는 것으로 밝혀졌다.

국내 주요 항구도시의 선박 배기가스 배출량 산정 및 사회적 비용 추정

PM은 직경의 크기가 10 μm (PM₁₀)와 2.5 μm (PM_{2.5})이하의 미세입자로 정의하고, 0.1 μm 미만은 극미세먼지로 구분한다. 국내 PM은 대부분 사업장, 경유차, 선박, 발전소 등에서 화석연료를 연소하는 과정에서 발생된다. PM이 호흡기를 통해 흡입되면 천식, 만성기관지염 등을 유발할 수 있어 2013년에 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group 1)로 지정하였다(Lee et al., 2016).

CO₂는 화석연료가 불안전 연소시 발생하며, 특별한 경우 고온에서 이산화탄소와 탄소가 함께 분해되어 CO를 생성하는 경우도 있다. 화력발전소는 연소관리가 철저하여 CO 배출량이 적기에, 주요 배출원은 주택난방, 교통 기관이다. CO₂는 산소보다 헤모글로빈에 대한 친화력이 약 200배 높기 때문에 인체 내 산소 운반량을 감소시켜 산소결핍 현상이 나타날 수 있다(Lee et al., 2016).

VOC는 석유, 알코올, 기타 유기산 등의 불안전연소로 알데히드, 케톤류와 벤젠, 각종 다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons)가 포함되며, 일부는 발암물질에 속한다. VOC는 NO_x와 함께 햇빛을 받으면 광화학반응을 일으켜 2차적으로 오존, PAN(Peroxy Acetyl Nitrate) 등의 오염물질을 생성하여 시정장애, 눈병, 호흡기장애와 식물에 손상을 초래한다(Lee et al., 2016).

2.3 대기오염물질 배출 특성

각 항만도시에서 배출원별 대기오염물질 배출량은 국립환경과학원(NIER, National Institute of Environment Research)의 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)의 2016년 배출량 자료를 활용하였다. 대기오염물질 배출원은 점오염원, 생산공정연소, 제조공정연소, 에너지산업연소, 도로이동오염원, 비도로이동오염원을 대상으로 하였으며, 선박은 비도로이동오염원에 포함되지만 본 연구에서는 따로 구분하였다. 선박 배출기여도는 각 항구도시별 총 배출량 중 선박 배출량이 차지하는 비중으로 나타내었다.

2.4 선박 입항 현황

각 항의 선종별 입출항 현황은 해양수산부의 해운항만물류정보시스템(PORT-MIS, www.new.portmis.go.kr)의 2016년 자료를 분석하였다.

2.5 선박 배기가스 배출량 산정

산출에 사용된 방법론은 정박하는 선박의 대기오염 배출량을 산출하기 위해 US EPA(2009)에서 제안하고 World Ports Climate Initiative(WPCI)에서 보고한 산출식을 적용하였다. 산출식은 선종별 입항횟수, 부두에서 정박시간과 함께 선종별 보조엔진의 출력, 선종별 보조엔진의 Load Factor, 배기가스

별 Emission Factor 등을 고려하여 배기가스 산출량을 산정하였다.

$$E = P_i \times \sum_j T_j \times LF_j \times EF_i \quad (1)$$

여기서, E: 총 배출량(ton)

j: 선박의 종류

i: 배기가스의 종류

P: 선종별 보조엔진의 평균 출력(kW)

T_j: 선종별 부두에서 총 정박시간(h)

LF_j: 선종별 보조엔진의 Load Factor

EF_i: 배기가스별 보조엔진의 Emission Factor(g/kWh)

E는 산출하고자하는 특정 선박 및 오염원에 따라 선박이 부두에 정박하는 동안 발생하는 배기가스의 배출량이다.

i는 배기가스의 종류(NO_x, SO_x, PM, CO₂)이다.

j는 선박의 종류이며, 컨테이너선(Container), 벌크선(Bulk carrier), 여객선(Ferry), 일반화물선(Cargo), 자동차운반선(RORO cargo), 유조선(원유, LNG, LPG 운반선(Oil tank)), 냉동화물선(Refrigerated cargo)으로 구분하여 보조엔진출력, Load factor, Emission factor, 정박시간 값을 각각 적용하였다.

P_i는 특정선박이 부두에 정박해 있는 동안 사용되는 보조엔진의 평균출력을 의미하고, US EPA(2009)의 자료를 인용하였다. 보조엔진의 평균출력은 선종별로 차이를 보이며, 여객선과 컨테이너선에서 상대적으로 높은 출력을 보였다(Table 1).

LF_j는 선종별 보조엔진의 Load factor로 US EPA(2009)와 Berechman and Tseng(2012), Browning and Bailey(2006)의 자료를 인용하였음. 선종별 보조엔진의 Load factor는 여객선과 유조선에서 가중치가 높았다(Table 1).

T_j는 선박이 부두에 접안하여 화물 및 사람을 하역하기 위해 정박한 시간을 의미한다. 선박의 정박시간은 PORT-MIS의 선박 입출항 자료로 산출하였다. 동일 선종이라도 정박시간이 다양하여, 본 연구에서는 각 선종별 정박시간은 전체 정박시간 중 50%에 해당하는 중앙값(Q2=D50)을 사용하였다. 부두이 3척 이하의 입항건수를 보인 선박의 정박시간은 평균 정박시간 또는 1회 정박시간을 적용하였다(Table 2).

EF는 배기가스별 보조엔진의 Emission Factor를 의미한다. 본 연구에서는 NO_x, SO_x, CO₂, PM은 Lee et al.(2016)의 선박의 유형을 고려한 Emission Factor, VOCs는 Berechman and Tseng(2012)을 각각 인용하였다(Table 3).

2.6 사회적 비용 추정

사회적 비용은 2.5장에서 산정된 선박 배기가스 배출량에 배기가스별 사회적 비용 원단위를 곱하여 추정하였다. NO_x와 VOC, PM은 KMI(2016)의 연구결과를, CO₂, SO_x는 Lee and

Choi(2013)의 원단위를 각각 적용하였다(Table 4).

Table 4의 KMI(2016)와 Lee and Choi(2013)의 사회적 비용 원단위는 2015년과 2009년 화폐가치로 산출한 사회적 비용 임에 따라 2016년 소비자물가지수로 보정한 Table 5의 원단

위로 사회적 비용을 산출하였다. PM의 사회적 비용 산출시, 각 연구지역의 인구수와 면적으로 확인한 결과 인천과 부산은 “Urban area”, 광양과 울산은 “Suburban area”, 목포는 “Rural area”의 사회적 비용을 각각 적용하였다.

Table 1. Auxiliary engine average power(P_i) and load factor(LF_j) by vessel type

Item	Bulk carrier	Con- tainer	Ferry	Cargo	RORO cargo	Oil tank	Refrigerated cargo
P _i (kW)	1,776	6,800	11,000	1,776	2,850	1,985	3,900
LF _j	0.22	0.17	0.64	0.22	0.30	0.67	0.34

※ US EPA(2009)

Table 2. Vessels median in port time(T_j)

(Unit: day)

Vessel type	Port														
	Incheon			Busan			Gwangyang			Ulsan			Mokpo		
	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3	Q1	Q2	Q3
Cotainer	0.38	0.53	0.75	0.48	0.67	0.97	0.19	0.28	0.41	0.17	0.28	0.43	0.25	0.27	0.31
bulk carriers	1.01	1.63	3.91	0.31	0.72	1.42	1.08	2.12	3.71	0.93	1.43	4.49	2.99	5.62	9.04
Ferry	0.29	0.34	0.39	0.09	0.57	0.63	-	10.17	-	0.41	0.42	0.43	0.77	28.26	29.29
Cargo	0.77	1.40	2.56	0.39	0.84	1.96	0.90	1.72	3.50	0.86	2.06	4.52	0.54	3.35	7.48
RORO cargo	0.53	0.93	1.83	0.43	1.04	1.42	0.39	0.64	1.37	0.36	0.72	1.55	-	-	-
Oil tank	0.67	1.07	1.98	0.31	0.99	2.73	0.11	0.21	0.44	0.51	1.03	2.15	0.22	0.48	1.40
Refrigerated cargo	0.57	0.83	0.91	0.77	1.97	5.75	-	16.90	-	-	12.26	-	0.36	0.92	7.23

※ PORT-MIS(new.portmis.go.kr)

※ Q1 = D25%, Q2 = D50%, Q3 = D75%

Table 3. Emission factor of auxiliary engines by exhaust gas(EF_i)

(Unit: g/kWh)

Vessel type	NO _x *	SO _x *	CO ₂ *	PM*	VOC**
Bulk carriers	14.00	11.90	698	1.84	0.4
Cotainer	13.80	12.00	705	1.73	0.4
Ferry	11.80	12.60	747	1.71	0.4
Cargo	13.20	12.10	715	1.59	0.4
RORO cargo	12.80	12.20	719	1.68	0.4
Oil tank ship	12.50	12.70	745	1.82	0.4
Refrigerated cargo	13.70	12.00	707	1.58	0.4

※ * Lee et al.(2016), ** Berechman and Tseng(2012)

Table 4. Social unit costs in KRW for atmospheric pollution in exhaust gas

(Unit: ₩/kg)

Atmospheric Pollutant	Average Social Unit Cost
NO _x *	10,196
CO ₂ **	79
SO _x **	11,452
VOC*	1,855
PM _{2.5} *	Suburban area(300people/km ²)
	Urban area(1,500people/km ²)

※ * KMI(2016), ** Lee and Choi(2013)

국내 주요 항구도시의 선박 배기가스 배출량 산정 및 사회적 비용 추정

Table 5. Customer price index for 2009 through 2016

(Unit: Korea Won(₩))

Year	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Customer Price Index (2009=100%)	100.00%	101.03%	101.07%	101.09%	101.11%	101.12%	101.13%	101.14%
(NOx)	₩10,196	₩10,300	₩10,305	₩10,308	₩10,309	₩10,311	₩10,311	₩10,312
(CO ₂)	₩79	₩80	₩80	₩80	₩80	₩80	₩80	₩80
(SOx)	₩11,452	₩11,569	₩11,575	₩11,577	₩11,579	₩11,581	₩11,582	₩11,583
(PM _{2.5})	-	-	-	-	-	-	₩83,255	₩83,264
	-	-	-	-	-	-	₩320,101	₩320,136
(VOC)	₩1,855	₩1,874	₩1,875	₩1,875	₩1,876	₩1,876	₩1,876	₩1,876

※ Statistics Korea, Consumer price index(www.kostat.go.kr)

3. 연구결과

3.1 항만도시 대기오염물질 배출 특성

항만도시별 입항 선박수와 CAPSS의 대기오염물질 배출원별 상대적 기여도를 Fig. 1에, 선박 입항수를 Table 6에 각각 제시하였다.

선박의 배출기여도를 살펴보면, 선박 입항이 가장 많은 부산에서 선박 배출량은 NOx 19.2 ton(43.9%), SOx 7.6 ton(81.1%), CO 2.5 ton(12.1%), PM 2.1 ton(57.3%), VOC 0.9 ton(20.8%)로, 선박 배출량이 많은 것은 NOx이며, CO, VOC를 제외하면 대체로 선박에 의한 배출기여도가 높았다. SOx는 대부분 선박에서 배출되는 것으로 나타났으며, NOx와 PM의 배출기여도는 선박이 도로이동오염원보다 높았다.

울산의 선박 배출량은 NOx 8.2 ton(18.3%), SOx 3.3 ton(7.0%), PM 0.9 ton(18.1%), CO 0.8 ton(2.7%), VOC 0.3 ton(0.5%)로, NOx의 배출량이 많았지만, CO, SOx, VOC는 생산공정연소, NOx는 제조업공정연소, PM은 생산과 제조업 공정연소에서 배출 기여도가 각각 높아 선박 배출기여도는 미미하였다.

광양의 선박 배출량은 NOx 5.9 ton(13.5%), SOx 2.4 ton(8.8%), PM 0.6 ton(2.6%), CO 0.6 ton(6.3%), VOC 0.2 ton(2.2%)로, NOx의 배출량이 많았다. 광양도 대기오염물질별 다양한 배출기여도를 보였는데, VOC는 생산공정연소의 기여도가 높고, PM과 CO는 각각 제조공정연소 및 에너지산업연소의 기여도가 각각 높아 선박 배출기여도는 미미하였다.

인천의 선박 배출량은 NOx 4.0 ton(8.8%), SOx 1.5 ton(13.1%), CO 1.5 ton(4.6%), VOC 0.7 ton(3.4%), PM 0.5 ton(16.0%)로, NOx의 배출량이 많았지만, CO와 NOx는 도로이동오염원, SOx와 PM은 에너지산업연소, VOC는 생산공정연소의 배출기여도가 각각 높아 선박 배출기여도는 미미하였다.

목포의 선박 배출량은 NOx 1.0 ton(37.1%), SOx 0.4 ton(84.2%), CO 0.7 ton(36.5%), VOC 0.3 ton(61.3%), PM 0.1 ton(60.9%)로, 배출량은 다른 지역보다 적었지만 배출기여도는 NOx와 CO를 제외한 모든 항목에서 선박 배출기여도가 높았다. NOx와

CO는 도로이동오염원 다음으로 높았으며, 생산공정연소, 에너지산업연소, 제조업공정연소에서 배출되는 대기오염물질은 목포 대기환경에 미치는 영향은 미약하였다.

항구도시와 배출특성 비교를 위해서 서울을 살펴보면, CO 37.7 ton(81.7%), NOx 38.1 ton(73.1%), VOC 7.7 ton(80%)이 도로이동오염원인 자동차에서, SOx 0.1 ton(71.2%), PM 1.3 ton(47.8%)이 비도로이동오염원인 건설장비 등에서 각각 배출 양과 기여도가 높았다. 항구도시가 아닌 서울은 선박에 의한 배출량은 없었다.

CAPSS의 선박에서 배출된 대기오염물질 중 NOx와 SOx의 배출량이 상대적으로 많았으며, 대기오염물질은 인천을 제외하면 대체로 선박 입항수가 많은 지역에서 배출량이 많았다. 인천은 연구대상지역 중에서 부산과 울산 다음으로 선박 입항수가 많았지만 배출량은 부산, 울산, 광양, 인천, 목포 순으로 나타났다.

선박 배출기여도는 첫째, 부산과 같이 선박 배출량이 절대적으로 많아 선박 배출기여도가 높은 지역과 둘째, 울산, 광양 그리고 인천과 같이 배출량이 많지만 기여도가 낮은 지역, 마지막으로 목포와 같이 절대적 배출량이 적지만 기여도가 높은 지역으로 구분되었다. 이러한 원인은 항구도시의 산업 특성에 따라 선박 배기가스 배출량에 의한 기여도의 차이를 보였다. 인천은 영흥도에 위치한 영흥화력발전소, 중국과의 지리적 인접성으로 인한 오염물질의 이전과 지역내총생산 대비 제조업 비중(27.2%, 2016년 기준)이 높은 지역이고(Seo and Lee, 2019), 울산은 세계적인 중화학공업도시로 발전해 석유화학산업, 자동차산업, 조선산업의 3대 주력산업을 구조가 고착화된 지역이며(Kim and Ryu, 2017), 광양도 단일 기준으로 세계 최대 규모의 광양제철소가 있는 공업도시(Lee, 2016)인 특성으로 인해 선박 배출기여도 낮은 것으로 판단된다. 반면 목포는 해방 후 산업 구조의 변화로 인한 인구 감소로 연령층이 고령화되고, 산업구조가 제조업, 공업보다는 농업과 어업에 종사하는 인구가 많은 도시로(Shin et al., 2015), 선박 배출량에 의한 대기오염 기여도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

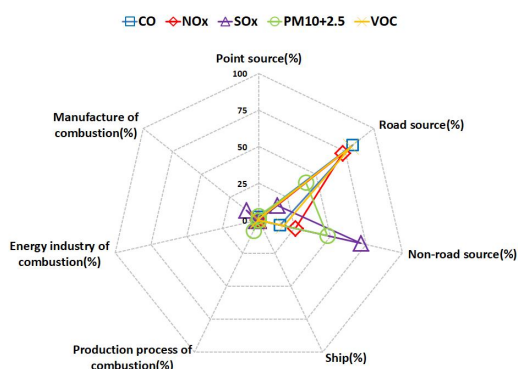
Table 6. Vessels entered port in 2016

(Unit: ea)

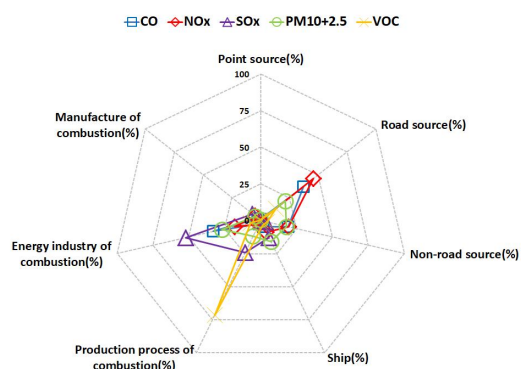
Port	Cotainer	Bulk carrier	Ferry	Cargo	RORO cargo	Oil tank	Refrigerated cargo	SUM
Incheon	20	2,116	2,607	4,689	632	3,820	13	15,452
Busan	15,346	1,481	3,634	5,141	360	8,734	1,196	35,892
Gwangyang	4,309	1,728	2	4,427	514	1,440	1	12,421
Ulsan	1,764	657	11	1,531	512	16,416	1	20,892
Mokpo	288	46	170	177	-	363	40	1,084

※ PORT-MIS(new.portmis.go.kr)

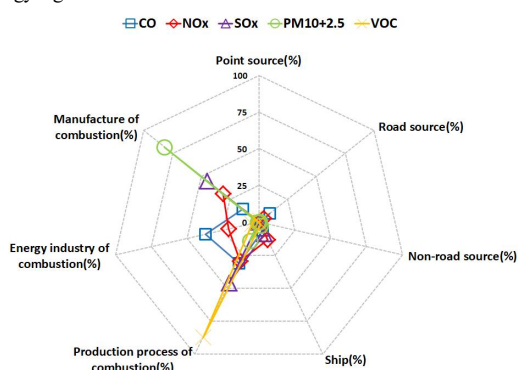
a) Seoul



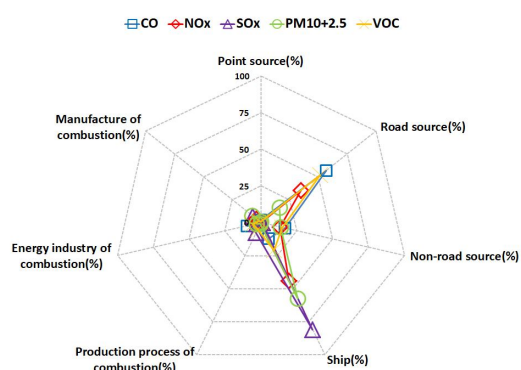
b) Incheon



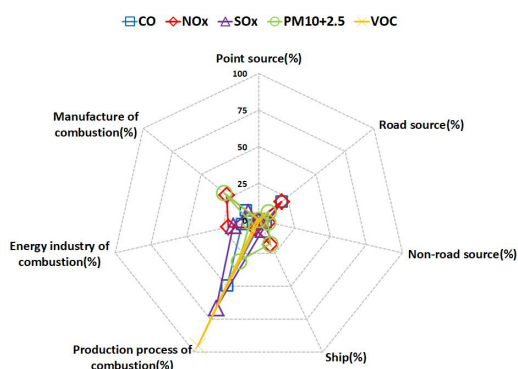
c) Gwangyang



d) Busan



e) Ulsan



f) Mokpo

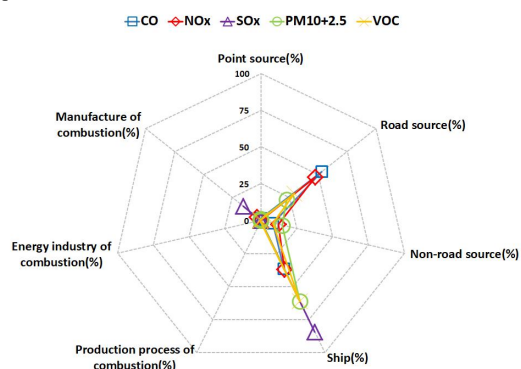


Fig. 1. Relative contribution of atmospheric pollutant emission sources in cities, Korea (Unit : %).

※ CAPSS(Clean Air Policy Support System, 2016)

3.2 선박 배기가스 배출량 산정

선박 배기가스별 배출량은 NOx 272,062 ton, SOx 221,372 ton, CO₂ 13,012,456 ton, PM 31,366 ton, VOC 6,744 ton으로 CO₂의 배출량이 가장 많았다(Fig. 2). 국내 경유를 사용하는 전체 도로이동오염원의 배출량은 NOx 319,248 ton, SOx 85 ton, CO₂ 66,449 ton, PM 9,122 ton, VOC 14,479 ton으로, SOx, CO₂, PM은 5개 항구도시의 선박에서 배출된 양이 많았다(Table 7). 선박 적당 배출량과 도로이동오염원 대당 배출량을 비교한 결과, 선박 적당 배출량은 NOx 3.2 ton, SOx 2.6 ton, CO₂ 154.6 ton, PM 0.4 ton, VOC 0.1 ton으로, 도로이동오염원 중 가장 많은 배출량을 보인 경유 버스는 NOx 590.8×10^3 ton, SOx 0.23×10^3 ton, CO₂ 145.0×10^3 ton, PM 5.6×10^3 ton, VOC 15.4×10^3 ton으로, 5개 항구도시의 선박 적당 배출량이 모든 항목에서 많았다(Table 8).

지역별 선박 배출량을 살펴보면, 부산은 NOx 88,176 ton, SOx 83,081 ton, CO₂ 4,882,398 ton, PM 11,794 ton, VOC 2,679 ton으로 총 5,068,143 ton 중 CO₂의 배출량이 가장 많았으며, 선박별 배출량은 유조선 2,304,077 ton(45%), 컨테이너선 1,653,875 ton(33%), 일반화물선 500,987 ton(10%), 냉동화물선 232,093 ton(5%), 벌크선 164,377 ton(3%), 여객선 161,478 ton(3%), RORO선 51,256 ton(1%)로 유조선과 컨테이너선의 배출량이 가장 많았다. 부산으로 입항한 선박 중 컨테이너선이 전체 43%로 가장 많은 비중을 차지하였지만, PORT-MIS 결과에서 유조선의 정박시간이 컨테이너선보다 2배 이상 길기 때문에 배출량에 영향을 미친 것으로 판단된다.

울산은 NOx 75,522 ton, SOx 75,793 ton, CO₂ 4,448,044 ton, PM 10,827 ton, VOC 2,399 ton으로 총 4,612,584 ton 중 CO₂의 배출량이 가장 많았으며, 선박별 배출량은 유조선 4,168,738 ton(90%)로, 울산으로 입항한 전체 선박 중 79%를 차지한 유조선의 배출량이 많았다. 그 외 선박의 배출량은 각각 5% 이하로 나타났다. 울산으로 입항한 선박보다 부산으로 입항한 선박이 1.7배 많았지만, 두 도시간 선박 배출량의 차이는 1.1배로 상대적으로 크지 않았다. 이러한 결과는 울산으로 입항한 선박이 대부분 정박시간이 상대적으로 긴 유조선이 대부분으로 나타나, 선박 입항수 대비 배출량의 차이는 작은 것으로 판단된다. 이와 같이 선박 배기가스 배출량에 영향을 미치는 주요 인자 중 하나가 정박시간이며, 이러한 결과는 Lee and Lee(2016)의 결과와 일관 된다.

인천은 NOx 32,360 ton, SOx 31,301 ton, CO₂ 1,840,949 ton, PM 4,418 ton, VOC 1,008 ton으로 총 1,910,037 ton 중 CO₂의 배출량이 가장 많았으며, 선박별 배출량은 유조선 1,007,737 ton(53%), 일반화물선 456,940 ton(24%), 벌크선 234,855 ton(12%)로 나타났으며, 그 외 선박은 각각 6% 이하의 배출량을 보였다. 인천의 선박 배출량은 다른 항구도시와 상이한 패턴

을 보였다. 정박시간이 긴 일반화물선의 입항수가 많았지만, 배출량은 정박시간이 상대적으로 짧은 유조선의 배출량이 높았다. 이러한 결과는 선박 제원의 차이로 배기가스 배출량 산정에 적용한 보조엔진 배출계수 값이 상이하여 나타난 결과로 판단된다. 대형선박은 주로 Bunker-C 등 중질유를 사용하며, 엔진 출력이 높기 때문에 동일한 선박 입항수를 보였어도 선박의 재원에 따라 배출량의 차이를 보이는 것으로 나타났다(Lee et al., 2020b; Kim and Shin, 2014).

광양은 NOx 21,039 ton, SOx 18,902 ton, CO₂ 1,113,112 ton, PM 2,650 ton, VOC 250 ton으로 총 1,155,952 ton 중 CO₂의 배출량이 가장 많았으며, 선박별 배출량은 일반화물 529,844 ton(46%), 벌크선 249,364 ton(22%), 컨테이너선 245,258 ton(21%)로 나타났으며, 그 외 선박은 각각 6% 이하의 배출량을 보였다.

목포는 NOx 11,805 ton, SOx 12,295 ton, CO₂ 727,953 ton, PM 1,678 ton, VOC 392 ton으로 총 754,123 ton 중 CO₂의 배출량이 가장 많았으며, 선박별 배출량은 여객선 627,872 ton(83%)로 나타났으며, 그 외 선박은 각각 6% 이하의 배출량을 보였다.

광양과 목포는 정박시간이 긴 일반화물선과 여객선의 배출량이 많았으며, 두 항구도시의 전체 선박 입항수 차이에 비해 배기가스 배출량의 차이는 작았다.

각 항구도시에서 산출한 선박 배출량을 CAPSS의 선박 배출량과 비교·분석하고자 하였으나, CAPSS는 연안선, 외항선, 모터보트, 고무보트, 동력요트, 수상오토바이만 산출한 결과로 본 연구에서 산정한 선박과 상이하여 직접적인 비교·분석이 불가하여 국외 결과와 비교·분석 하였다. 중국 Shanghai는 NOx 58,160 ton, SOx 51,180 ton, CO₂ 3,012,780 ton, PM 6,960 ton(Yang et al., 2007), 터키 Izmit는 NOx 5,356 ton, SOx 4,305 ton, CO₂ 254,261 ton, PM 487 ton(Kilic and Deniz, 2010), 미국 LA는 NOx 19,245 ton, SOx 4,791 ton, PM 999 ton (Port of Los Angeles, 2005)로, 항만마다 시설과 운영형태 및 특징에 따라 산출하는 방식과 연도가 상이하여 직접적인 비교는 불가하지만, 본 연구의 배출량과 같이 CO₂의 배출량이 가장 많고 다음으로 NOx, SOx 순으로 나타났다. 최근 5년간 세계적으로 5, 6권 규모의 컨테이너 화물 처리실적을 기록하고 있는 부산과 상하이의 배출량이 많은 것으로 나타나, 선박 배기가스가 미치는 환경문제의 심각성을 인식하고 항만에 접안하는 선박들에 대한 배출량 저감을 위한 노력이 절실함을 나타내는 결과로 사료된다.

3.3 선박 배기가스에 의한 사회적 비용 추정

본 연구에서 추정된 선박 배기가스별 사회적 비용을 Table 9와 Fig. 3에 각각 제시하였다. 사회적 비용은 NOx

Table 7. Atmospheric pollutant emissions from vessels and diesel-powered cars (Unit: ton)

Type	NOx	SOx	CO ₂	PM	VOC	
Diesel*	Car(Suv+Van)	94,120	9	14,821	2,625	2,802
	Bus	21,805	8	5,352	205	567
	Truck	203,323	68	46,276	6,292	11,110
	Sum	319,248	85	66,449	9,122	14,479
Vessel(This Study)	272,062	221,372	13,012,456	31,366	6,744	

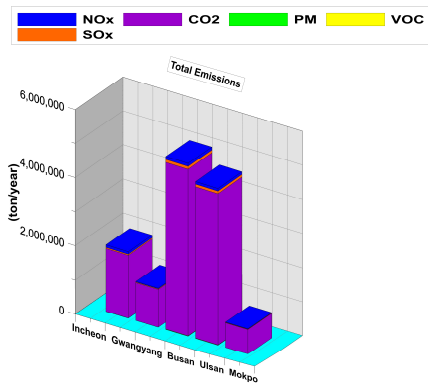
※ * BRIEF, 2017

Table 8. Comparison to atmospheric pollutant emissions from vessel and diesel-powered car (Unit: ton/ea)

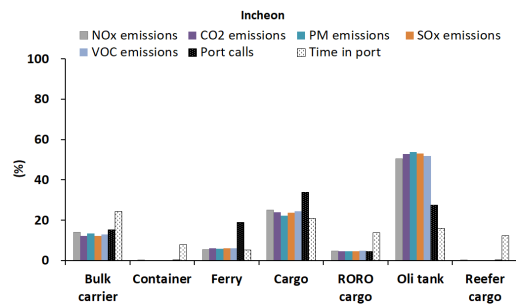
Type	NOx	SOx	CO ₂	PM	VOC	
Diesel*	Car(Suv+Van)	67.5×10^{-3}	0.07×10^{-3}	8.6×10^{-3}	1.4×10^{-3}	2.0×10^{-3}
	Bus	590.8×10^{-3}	0.23×10^{-3}	145.0×10^{-3}	5.6×10^{-3}	15.4×10^{-3}
	Truck	63.3×10^{-3}	0.02×10^{-3}	14.4×10^{-3}	2.0×10^{-3}	3.5×10^{-3}
Vessel(This Study)	3.2	2.6	154.6	0.4	0.1	

※ * BRIEF, 2017

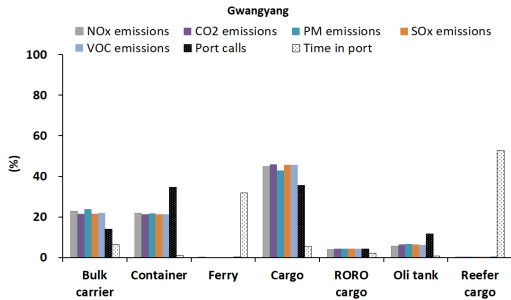
a) Total



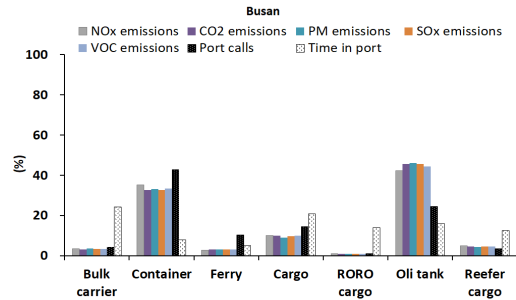
b) Incheon



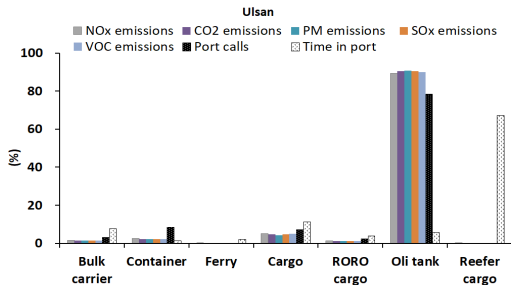
c) Gwangyang



d) Busan



e) Ulsan



f) Mokpo

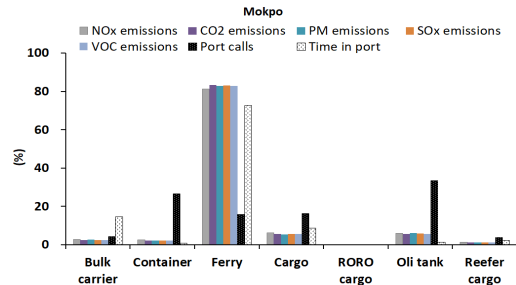


Fig. 2. Relative contribution of vessel types to atmospheric pollutant emissions.

국내 주요 항구도시의 선박 배기가스 배출량 산정 및 사회적 비용 추정

236,053만원, SOx 256,410만원, CO₂ 103,972만원, PM 636,789만원 VOC 1,265만원으로 PM의 사회적 비용이 가장 높고 VOC가 낮았다(Table 9). 선박 배기가스에 의한 사회적 비용을 도로이동오염원과 비교하기 위해 Table 10에 경유 트럭의 사회적 비용을(Hahn, 2020) 제시하였다. 선박 배기가스에 의한 총 사회적 비용은 대형 트럭보다 높고, SOx의 사회적 비용은 선박이 큰 비중을 차지하는 것으로 나타나, IMO(2020)의 황 함유량을 3.5%에서 0.5%로 대폭 낮추는 규제에 당위성을 충분히 드러내고 있으며, 이러한 결과는 Lee et al.(2020a)의 결과에서도 동일하게 나타났다. 본 연구의 배기가스별 사회적 비용은 Lee et al.(2010)과 Lee and Lee(2010)의 경향과 동일하였다. OECD(2014)는 선박 배기가스 배출량이 2011년보다 2050년에 NOx, CO₂는 약 270%, PM는 약 20% 증가하고 SOx는 25% 감소할 것으로 예측하고 있으며, 지역적으로는 선박의 이동량이 많은 아시아의 증가폭이 클 것으로 예상하고 있어, 선박 배기가스에 의한 사회적 비용은 지속적으로 증가할 것으로 판단된다.

연간 지역별 선박 배기가스에 의한 사회적 비용은 부산 604,244만원, 울산 291,807만원, 인천 225,948만원, 광양 74,565만원, 목포 37,894만원으로 배출량이 많은 항구도시에서 높은 사회적 비용이 발생하는 것으로 나타났다. 인천, 광양, 부산, 울산은 PM의 사회적 비용이, 목포는 SOx의 사회적 비용이 각각 높았다. 목포에서 PM의 사회적 비용이 낮은 것은 목포에 적용한 원단위 비용이 다른 지역보다 낮았기 때문으로 판단된다. KMI(2019)는 응답자 1,000명을 대상으로 한 설문조사에서 약 35%가 항만구역에서 발생하는 미세먼지가

매우 심각하고, 항만에서 발생하는 환경오염이 부정적 이미지 형성에 영향을 미친다고 밝혔다. 반면 도로이동오염원에서 배출된 미세먼지는 2011년에 11,988톤에서 2016년에 9,748톤으로 배출량이 감소하는 것으로 나타났는데, 이러한 원인은 강력한 배출 규제와 친환경 차량의 보급, 미세먼지 저감장치 의무화 등의 효과로 판단된다(KOSTAT, 2019). 따라서 항구도시에서 우선적으로 저감해야 할 오염물질은 PM으로 판단되며, PM은 황 함유량이 증가할수록 크게 증가하여 ULSD(Ultra Low Sulphur Diesel)에 비해 일반 선박유인 MGO는 약 1.12배 더 많은 PM을 배출하는 것으로 확인되었으며, 이는 증가된 황성분에 의해 Sulfate 성분이 증가해 PM 생성에 기여하는 것으로 나타나(Lee et al., 2018), IMO(2020)의 황 함유량을 대폭 낮추는 규제로 인해 PM의 배출량 감소가 기대된다.

해양수산부는 2020년에 “항만지역 대기질 개선에 관한 특별법(대통령령 제30261호)”시행으로 주요 항만 15곳에서 항만대기환경을 모니터링하고 있지만, 항만의 배출특성을 고려하지 않은 것으로 판단된다. 환경부의 국가대기측정망은 도시의 규모, 산업시설의 다양성, 인구 등이 복잡할수록 모니터링 정점이 많지만, 항만대기측정망은 선박 배출에 의한 사회적 비용이 높은 부산도 낮은 목포와 동일하게 1곳의 정점만 운영되고 있다. 향후 입항 선박의 특성, 입항 선박 횟수, 배기가스 배출특성을 고려하고, 본 연구 결과에서 부산과 같이 선박 배기가스에 의한 사회적 비용이 높은 지역과 PM과 같이 사회적 비용이 높은 항목을 중점적으로 모니터링하는 시스템의 재구축이 필요하다고 판단된다.

Table 9. The social cost by vessels exhaust gas in harbor cities

(Unit: 10,000won)

Port	NOx	SOx	CO ₂	PM	VOC	Sum
Incheon	33,371	36,256	14,710	141,423	189	225,948
Gwangyang	21,696	21,893	8,894	22,064	47	74,565
Busan	90,931	96,231	39,011	377,566	505	604,244
Ulsan	77,881	87,789	35,541	90,146	450	291,807
Mokpo	12,174	14,241	5,817	5,590	74	37,894
Sum	236,053	256,410	103,972	636,789	1,265	1,234,489

Table 10. Comparison of social cost of vessel exhaust gas and diesel-powered truck exhaust gas

(Unit: won/ea)

Type	NOx	SOx	CO ₂	PM	VOC	SUM	
Truck*	Small type	61,441	14	5,111	1,401	1,051	69,018
	Middle type	50,569	28	16,395	1,322	4,815	73,129
	Large type	99,203	29	17,980	3,260	4,817	125,289
Vessel(This Study)	28,039	30,458	12,350	75,641	150	146,638	

※ * Hahn, 2020

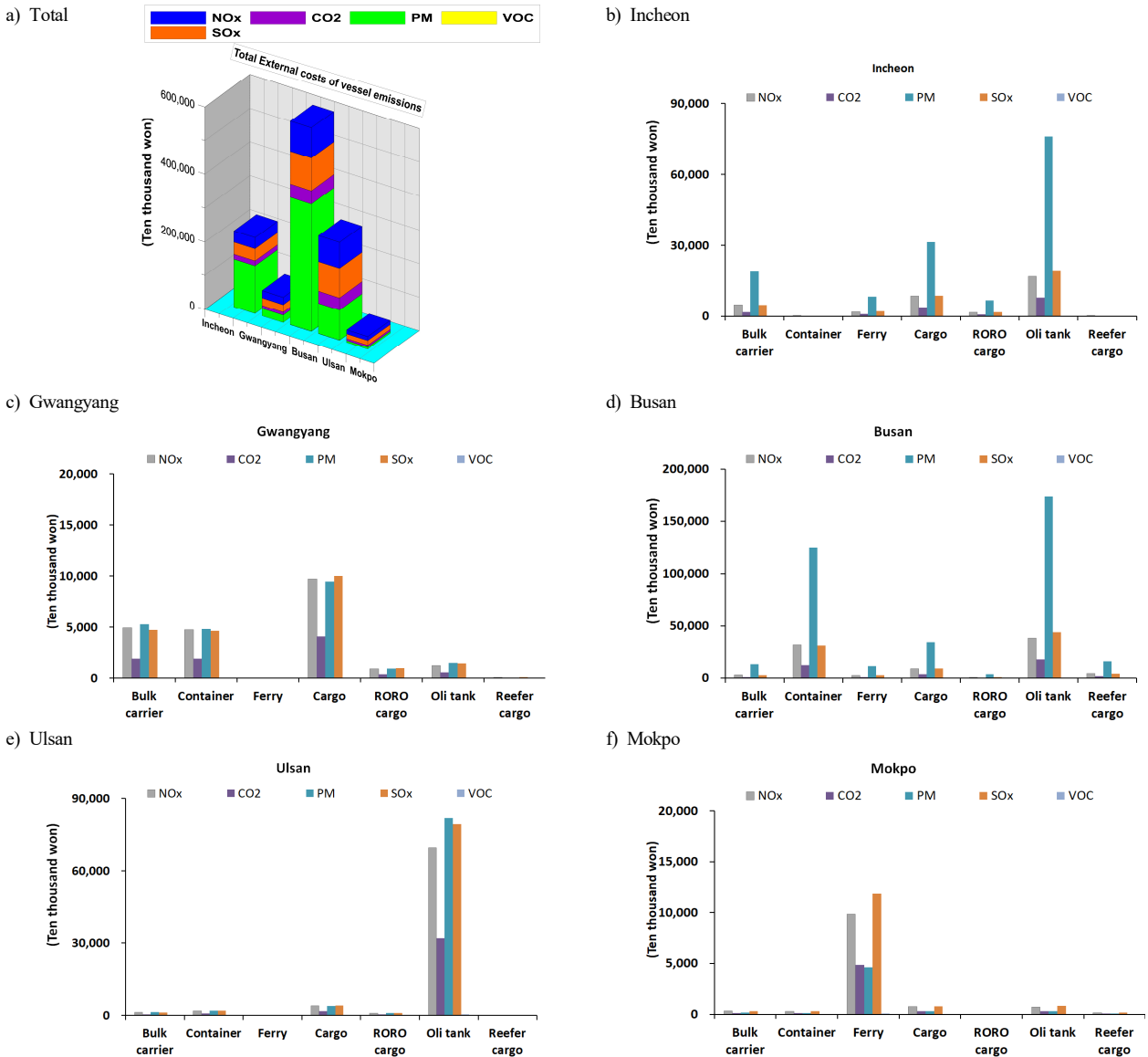


Fig. 3. The social costs of vessels emissions in harbor cities.

4. 결론 및 고찰

항구도시의 대기오염물질 배출특성 결과, 선박에서 배출된 배기가스는 항구도시의 산업구조에 따라 배출기여도의 차이를 보였다. 입항 선박수가 많은 부산과 입항수는 적지만 기반 산업시설이 상대적으로 열악한 목포는 선박 배출기여도가 높았지만, 세계적인 중화학공업도시인 울산과 광양 제철소가 있는 광양, 지리적으로 중국과 인접하고 제조업이 발달한 인천의 경우는 선박 배출량이 목포보다 많았지만 배출기여도는 낮았다.

선박 배기가스 배출량 산정 결과, CO₂의 배출량이 가장 많았으며 NO_x, SO_x 순으로 배출량이 높았는데, 기존 국외

연구 사례에서도 동일한 경향을 보였다. 배기가스 배출량은 입항선박 수보다 정박시간이 길고 대형 선박일수록 배출량이 증가하였는데, 부산, 울산, 인천은 유조선, 광양은 일반화물선, 목포는 여객선에서 각각 배출량이 많았다. 선박 배기가스 중 SO_x, CO₂, PM은 5개 항구도시의 선박에서 배출된 양이 경유를 사용하는 승용차(Suv, Van 포함), 버스, 트럭의 총 배출량보다 많았고, 그 격차는 선박 적당 배출량에서 더 크게 나타났다.

선박 배기가스에 의한 사회적 비용 결과, 배출량이 많은 부산에서 사회적 비용이 높았으며, 항목별로는 CO₂가 배출량은 많았지만, 사회적 비용은 대체로 PM이 높았다. 선박 배기가스에 의한 사회적 비용을 경유 트럭과 비교시 SO_x는 약

1,000배, PM은 약 20배 이상 선박 배기가스에 의한 사회적 비용이 높게 나타나, 본 연구를 통해 선박에서 배출되는 SOx와 PM의 배출 관리의 필요성을 시사하였다.

Jung et al.(2012)는 대기오염물질 배출원으로부터 가까울수록 토양오염도가 증가하는 것으로 밝혔으며, Choi et al.(2018)는 수체로 유입된 질소 중 11.1~11.9%(평균 11.5%)가 대기로부터 건식 또는 습식으로 유입된다고 밝혔다. 따라서 선박 배기가스는 풍향, 풍속 그리고 강우 등 기상환경에 따라 항만도시 인근 수질과 토양에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 2019년 수도권 지역에서 대기오염물질이 환경성질환에 미치는 영향에 대해 연구한 결과, SOx와 미세먼지 배출량이 서울과 경기권보다 많았던 인천에서 천식, 알레르기성 비염 등의 환경성질환자의 발병률이 높은 것으로 나타나(Seo and Lee, 2019), 항만노동자와 인근 지역주민의 건강한 삶을 위해 선박 배기가스 배출량 감소의 필요성을 본 연구를 통해 밝혀졌다.

선박용 엔진과 같은 압축착화 엔진에서는 연료의 착화 특성을 나타내는 세탄가(Cetane index)의 값이 커질수록 압축착화가 용이하게 일어나 연소 특성이 좋아지면서 소음 및 연비가 향상되는데, 세탄가는 선박유에 S 함유량이 높을수록 증가하는 것으로 밝혀졌다. 하지만 선박유 중 S 함유량이 증가할수록 선박 배기가스를 통해 SOx와 PM의 배출량이 증가하는 것으로 나타났다(Lee et al., 2018; Yoo, 2015). NOx 배출량은 선박유의 S 함유량과 직접적인 관계는 없지만 간접 영향이 있는 것으로 밝혀졌다. 최근의 NOx 규제의 대처방안으로 주목받고 있는 배기가스 재순환(EGR, Exhaust Gas Recirculation) 시스템에서 배기에서 흡기로 연결되는 재순환 가스에 SO₂의 농도가 높을수록 N₂O의 배출율이 증가하는 것으로 나타났으며, SO₂는 선박유 중 S 함유량이 높을수록 배출량이 증가하는 것으로 나타났다(Lee et al., 2018). 따라서 선박유의 황 함유량을 대폭 낮추는 규제에 직접적으로는 SOx와 PM, 간접적으로는 NOx의 배출량 저감에 큰 효과가 있을 것으로 사료된다. 하지만 선박 대기오염물질 점검과정에서 기준치를 초과하는 선박들이 발견되는 것으로 나타나(Lee et al., 2020a), 선박유 유통 과정의 철저한 관리가 추가적으로 필요하다.

선박 배출기여도가 높았던 SOx, 배출량은 적지만 높은 사회적 비용을 유발하는 PM, CO₂ 다음으로 선박 배출량이 많은 NOx의 관점에서는 저황유 사용이 도움이 될 수 있지만, 선박에서 가장 많은 배출량을 보인 CO₂의 관점은 위의 배출가스와 다르다. 선박유가 저황유로 변경될 경우, 세탄가(Cetane index)의 값이 낮아져 압축착화가 고험유보다 용이하지 않아 엔진내 불완전 연소가 발생하여 CO의 배출량이 증가할 가능성이 있으며, 실제 Lee et al.(2018)은 고험유에서

CO가 감소하는 것으로 연구되었다. 따라서 중·장기적으로는 선박이 정박 중에 육상전원을 사용할 수 있는 육상전원 공급장치(AMP, Alternative Maritime Power)의 보급 확대가 절실히 필요하다.

마지막으로 본 연구 결과에서 선박에서 배출된 대기오염물질 중 대부분이 탄소로 나타났다. 우리나라는 아시아에서 세 번째로 2050년 탄소중립 목표를 공식 선언했다. 우리나라와 함께 전 세계가 탄소중립 목표 달성을 위해 선박 배기가스 배출량 감소의 노력이 절실히 필요함을 시사한다.

References

- [1] Ahn, Y. S., K. S. Kim, and S. M. Jeong(2019), A Study on Assessment and Certification System for Reduction Technology of Emission from Ship, Korea Maritime Institute, p. 258.
- [2] Bailey, D. and G. Solomon(2004), Pollution prevention at ports: clearing the air, Environmental Impact Assessment Review, Vol. 24, pp. 749-774.
- [3] Bailey, D. T., G. M. Plenys, T. R. Solomon, and J. Campbell(2004), Harboring pollution; Strategies to clean up U.S. ports, Natural Resources Defence Council, p. 109.
- [4] Berechman, J. and P. H. Tseng(2012), Estimating the environmental costs of costs of port related emissions: The case of Kaohsiung, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 17, No. 1, pp. 35-38.
- [5] BRIEF(2017), Review of reasonable adjustment plan for the relative price of energy for transportation, Vol. 3, p. 18.
- [6] Browning, L. and K. Bailey(2006), Current methodologies and best practices for preparing port emission inventories, ICF Consulting report to Environmental Protecting Agency.
- [7] Cho, D. O.(2010), A comparative study on low-carbon port management of Busan and LA/LB-On the basis of port management cost, J. KSME, Vol. 16, No. 2, pp. 223-228.
- [8] Choi, J. K., H. J. Lee, T. H. Kim, J. H. Choi, J. S. Woo, and K. W. Lee(2018), Estimation of Nitrogen Mass Balance in Sihwa-ho Watershed, 2010, Journal of Environmental Science International, Vol. 27, No. 3, pp. 179-193.
- [9] Hahn, J. S.(2020), Solution to improve the Gas Tax Subsidy to Reduce Pollution from Freight Trucks, Korea Environmental Policy and Administrations Society, Vol. 6, pp. 1-20.
- [10] Han, S. H., J. S. Youn, W. J. Kim, Y. H. Seo, and Y. W. Jung(2011), Estimation of Air Pollution Emissions from

- Port-Related Sources in the Port of Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 27, No. 4, pp. 460-471.
- [11] Hong, R. J. and M. S. Park(2011), A Study on the Controls of Air Pollutant Emissions by International Shipping in the North Sea, *Journal of International and Area Studies*, Vol. 15, No. 2, pp. 177-139.
- [12] ICF International(2009), Current methodologies and best practices in preparing port emission inventories, final report, prepared for U.S. Environmental Protection Agency.
- [13] IPCC(2007), *Climate Change 2007 Synthesis Report*, pp. 1-52.
- [14] Jung, J. H., S. W. Cho, and H. S. Lim(2012), Distribution Characteristics of Environmental Contaminant at Soil in an Industrial Complex Area, *Clean Technology*, Vol. 18, No. 2, pp. 200-208.
- [15] Jung, T. H. and S. Y. Son(2018), Oil Spill Simulation by Coupling Three-dimensional Hydrodynamic Model and Oil Spill Model, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 32, No. 6, pp. 474-484.
- [16] Kilic, A. and C. Deniz(2010), Inventory of Shipping Emissions in Izmit gulf Turkey, *Environmental progress & Sustainable energy*, Vol. 29, No. 2, pp. 221-232.
- [17] Kim, J. J. and K. G. Shin(2014), Estimating Greenhouse Gas Emissions from Marine Vessels in the Port of Busan using PORT-MIS and Vessels Specification Databases, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 1251-1259.
- [18] Kim, S. Y. and S. Ryu(2017), A Study on Analyzing Structural Changes and Growth Factors of the Three Main Industries in Ulsan Metropolitan City using Regional Input-Output Tables, *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-15.
- [19] KMI(2016), Environmental impact assessment consultation project Environmental benefit/cost analysis, Ministry of Environment, p. 179.
- [20] KMI(2019), A study on improvement measures for air pollutants management system and policy Korean ports, p. 277.
- [21] KOSTAT(2019), *Korean Social Trends 2019*, Statistics Korea, p. 8.
- [22] Lee, J. R.(2016), Change in Migration and Population Structure of the Firm City : The Case of Gwangyang City in Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 51, No. 6, pp. 837-851.
- [23] Lee, S. H., B. Y. Kang, B. H. Jeong, and J. Y. Gu(2020a), National Management Measures for Reducing Air Pollutant Emissions from Vessels Focusing on KCG services, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 26, No. 2, pp. 163-174.
- [24] Lee, H. C., J. H. Hwang, H. S. Park, and H. Y. Ryu(2016), A study on the systematic management of air pollutant from ships in Korea, Korea maritime institute, p. 225.
- [25] Lee, J. S., S. I. Choi, C. D. Lee, K. I. Bang, M. J. Kwon, and J. I. Dong(2020b), A Study on the Improvement of Temporal Resolution and Application of CAMQ Simulations for Quantitative Assessment on Cargo Ships Focused on PM_{2.5}, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 36, No. 1, pp. 93-107.
- [26] Lee, K. J. and K. Choi(2013), Social Cost Comparison of Air-Quality based on Various Traffic Assignment Frameworks, *Journal of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 1087-1094.
- [27] Lee, K. Y., B. S. Rho, W. J. Lee, and J. H. Choi(2018), A Study on the Effect of Sulfur Content in Fuel Oil on the Emissions of Air Pollutants According to Operating Conditions of Small Ships Engines, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 24, No. 6, pp. 834-840.
- [28] Lee, M. W. and H. S. Lee(2016), Estimation of Ship Emissions and Environmental Costs : focusing on Port of Busan, *Journal of Korea Port Economic Association*, Vol. 32, No. 4, pp. 15-28
- [29] Lee, P. T. W., K. C. Hu, and T. Chen(2010), External costs of domestic container transportation: short-sea shipping versus trucking in Taiwan, *Transport Reviews*, Vol. 30, pp. 315-335.
- [30] Liu, Y. and C. B. Lee(2019), A Study on the structural changes of import & export containers between South Korea and Chinese ports, *Korea Logistics Review*, Vol. 29, No. 2, pp. 1-12.
- [31] OECD(2014), *Shipping Emissions in Port*, International Transport Forum, p. 37.
- [32] OSPAR(2009), *Assessment of the Impacts of Shipping on the Marine Environment. Monitoring and Assessment Series*. London. U.K.: OSPAR Commission.
- [33] Port of Los Angeles(2005), *Port of Los Angeles baseline Air Emissions Inventory-2001*, p. 258.
- [34] Shin, E. J., C. G. Yoo, and S. J. Cho(2015), A Study on Local Residents' Evaluation of the Planned Indicator Value for Urban Regeneration - Targeting Local Residents in Mokpo

- , Journal of the Korean Housing Association, Vol. 26, No. 6, pp 71-81.
- [35] Song, G. E. and C. H. Han(2007), A study on the strategies for the reduction of port pollution, Journal of Korea PORT Economic Association, Vol. 23, pp. 95-113.
- [36] Seo, H. J. and H. S. Lee(2019), How air pollutants influence on Environmental diseases? : Focused on Seoul Metropolitan Area, The Seoul Institute, Vol. 20, No. 3, pp. 39-59.
- [37] US EPA(2009), Current methodologies in preparing mobile source port related emission inventories.
- [38] Wu, J., D. Houston, F. Lurmann, P. Ong, and A. Winer(2007), Exposure of PM_{2.5} and EC from diesel and gasoline vehicles in communities near the ports of Los Angeles and Long Beach, California, Atmospheric Environment, Vol. 43, p. 19.
- [39] Yang, D. Q., 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. 39, No. 26, pp. 4659-4669.
- [40] Yoo, D. H.(2015), A Experimental Study on Nitrous Oxide Formation in Direct Injection Diesel Engine, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 21, No. 2, pp. 188-193.

Received : 2021. 09. 15.

Revised : 2021. 11. 01. (1st)

: 2021. 11. 26. (2nd)

Accepted : 2021. 12. 28.