

논문

# 소형 선박에서 배출되는 대기오염물질의 배출 특성 분석과 배출량 추정

## Analysis of Emission Characteristics and Estimation of Air Pollutants Emitted from Small Ship

김민수, 김정호<sup>1),2)</sup>, 이용일<sup>3)</sup>, 박세찬, 오병훈<sup>4),5)</sup>, 차재두<sup>6)</sup>, 김종범\*

충남연구원 서해안기후환경연구소, <sup>1)</sup>(주)EMA엔지니어링, <sup>2)</sup>(주)미세먼지연구소,  
<sup>3)</sup>한강유역환경청 환경감시단, <sup>4)</sup>(주)APM엔지니어링, <sup>5)</sup>안양대학교 환경공학과,  
<sup>6)</sup>한국산업기술시험원 환경사업개발센터

Minsu Kim, Jeongho Kim<sup>1),2)</sup>, Yongil Lee<sup>3)</sup>, Sechan Park, Byeonghun Oh<sup>4),5)</sup>,  
Jae-Doo Cha<sup>6)</sup>, Jong Bum Kim\*

Seohaean Research Institute, ChungNam Institute, Hongseong, Republic of Korea

<sup>1)</sup>EMA Engineering Co., Ltd., Bucheon, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Fine Particle Lab. Co., Ltd., Incheon, Republic of Korea

<sup>3)</sup>Environmental Inspection, Han River Basin Environmental Office, Hanam, Republic of Korea

<sup>4)</sup>APM Engineering Co., Ltd., Incheon, Republic of Korea

<sup>5)</sup>Department of Environmental Engineering, Anyang University, Anyang, Republic of Korea

<sup>6)</sup>Environmental New Business Center, Korea Testing Laboratory, Seoul, Republic of Korea

접수일 2022년 2월 18일  
수정일 2022년 3월 11일  
채택일 2022년 3월 15일

Received 18 February 2022  
Revised 11 March 2022  
Accepted 15 March 2022

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)41-630-3924  
E-mail : kjb0810@cni.re.kr

**Abstract** Regulations on domestic ports and ships have been in progress in accordance with regulations established by IMO (International Maritime Organization), but most of them have only aimed at large vessels more than 400 tons or a capacity of 130 kW. However, the IMO regulations are hardly applied to a port situation in Korea because more than 90% of the ships registered in Korea are considerably small less than 10 tons. The air pollutants emission released from the ships are estimated only based on regional fuel consumption and emission factors, but it is also noted that the emission characteristics of automobiles show various emission characteristics depending on the operating conditions. Thus, it is assumed that the emission characteristics of the ships are also determined by the operating conditions, but the associated data in this aspect are still insufficient. This study aimed to investigate the effect of the operating conditions of the ships less than 10 tons on the characteristics of the air pollutants emission. The results showed that more amount of NO<sub>x</sub> and particle material were discharged in the low-speed regions whereas high-speed regions emitted more amount of CO and CO<sub>2</sub>. Moreover, the NO<sub>x</sub> emissions estimated by the field study were approximately 20 times higher than the NO<sub>x</sub> emissions of fishing ship in South Chungcheong Province based on CAPSS (Clean Air Policy Support System). This indicated that the previous activity-based data were underestimated compared with the actual emissions. Future studies should collect more data to verify the accuracy of these results. Furthermore, emission factors should be estimated for each operation condition based on the collected data to calculate the national emissions as accurately as possible.

**Key words:** Small ship, Air pollutants, Emission factor, CAPSS, IMO

### 1. 서 론

우리나라는 대기질 관리가 시작된 20세기 후반부터

최근까지 총부유분진 (total suspended particulate, TSP),  
미세먼지 (particulate matter less than 10 μm, PM<sub>10</sub>), 초  
미세먼지 (particulate matter less than 2.5 μm, PM<sub>2.5</sub>)와

같은 입자상 오염물질의 농도는 감소했지만 2차 생성 에어로졸 (secondary aerosol, SA), 오존 (ozone, O<sub>3</sub>), 이산화질소 (nitrogen dioxide, NO<sub>2</sub>), 휘발성유기화합물 (volatile organic compounds, VOCs)은 증가하고 있다 (Kim, 2013). 범국가적 차원에서 미세먼지 개선을 위하여 2019년 미세먼지 관리 종합계획이 수립되었고 (MOE, 2019), 같은 해에 “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 (이하 미특별)”; 2020년에는 “대기관리권역의 대기 환경 개선에 관한 특별법 (이하 대기권역법)”이 제정되었다. 환경부에서는 대기오염물질 배출관리 강화를 위해 국가미세먼지정보센터를 신설하여 배출량 산정과 자료 관리를 일원화하였다. 국가미세먼지 정보센터에서는 국가 정책 방향 설정 및 배출량 관리를 위해 대기정책지원시스템 (clean air policy support system, CAPSS)의 자료를 정리하여 발간하고 있다 (NIER, 2007). CAPSS에서는 대기오염물질 배출량을 지역별, 부문별로 구분하여 보고하고 있는데, 2018년 기준 지역별로는 경기도가 15.3%로 가장 많은 배출량을 나타냈고, 경상북도 11.2%, 충청남도 10.8% 순으로 나타났다. 부문별로는 도로이동오염원이 16.0%로 가장 높고, 비도로이동오염원 14.7%, 유기용제 사용 12.9% 순이었다 (NAEIR, 2021).

2020년 4월에 신설된 대기권역법은 2003년부터 수도권을 대상으로 시행되어 오던 “수도권 대기환경개선에 관한 특별법”을 확대하여 전국을 4개 권역으로 구분하여 기존 수도권을 포함하여 중부권 (대전, 세종, 충남, 충북, 전북), 남부권 (전남, 광주), 동남권 (부산, 대구, 울산, 경북, 경남)의 4개 권역으로 묶어 권역별로 대기질을 관리하고 있다 (MOE, 2020). 여기서 그동안 관리 사각지대에 놓여있던 비도로이동오염원에 대한 관리 필요성을 언급하였다. 선박은 비도로이동오염원의 전체 배출량 중 58.4%를 차지하고 있으며, 전체 대기오염물질 배출량의 8.2%를 차지하는 등 배출원 관리 부분에서 매우 중요한 부분이다. 환경부에서는 선박 부문 배출량 산정을 위해 외항선관 연안선을 기준으로 사용 연료에 대해 배출계수를 적용하여 산정하고 있으나 (NIER, 2015a), 이는 엔진 종류, 엔진 규모,

연료 및 활동도 자료를 활용하는 국제해사기구 (International Maritime Organization, IMO)나 유럽연합 환경청 (European Environment Agency, EEA)보다 턱없이 열악한 수준이다 (Ahn *et al.*, 2019, 2017). 국립환경과학원 (National Institute of Environmental Research, NIER)과 부산시와 같은 일부 지자체에서 활동도 자료 기반의 배출량 산정 및 고도화 연구를 수행하였으나, 이 또한 배출계수를 세분화하거나 일부 활동도 자료를 보완한 것일 뿐 기존 연구와 특별한 차별성을 보이지 못했다 (Zaho *et al.*, 2019; NIER, 2016, 2015b; Kim *et al.*, 2014).

전 세계적으로 선박 배출 대기오염물질은 IMO의 MARPOL73/78 기준을 준용하여, NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub>를 관리물질로 설정하고 있다. NO<sub>x</sub>의 경우 선박의 배출량을 규제하고 있으며, SO<sub>x</sub>는 연료의 황 함유량을 기준으로 2020년 1월 기준 황 함유량을 0.5% 미만으로 설정하고 있다 (IAMU, 2016). IMO의 조사에 따르면 전 세계적으로 선박에서 배출되는 질소산화물 (nitrogen oxide, NO<sub>x</sub>)의 양은 미국 전역에서 방출되는 양의 50%에 이르며, 유럽에서 배출된 대기오염물질의 74% 정도인 것으로 추정하였다 (Lee *et al.*, 2005). 또한, 주연료로 사용되는 병커C유와 MDO (marine diesel oil)의 연소로 배출되는 배기가스에는 발암물질로 알려진 벤조피렌을 포함하여 황산화물 (sulfur oxides, SO<sub>x</sub>), NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub> 등이 배출된다 (Lee *et al.*, 2016). 국내 선박 배출에 의한 미세먼지 기여농도는 0.57 µg/m<sup>3</sup>로 전국 석탄화력발전소의 연평균 기여도인 0.51 µg/m<sup>3</sup>와 유사한 수준으로 국내 최대 항만을 보유하고 있는 부산의 경우 2배에 가까운 0.97 µg/m<sup>3</sup>로 선박에 의한 미세먼지 배출 기여도가 상당한 것으로 나타났다 (Moon and Seo, 2019). 국내에서는 2019년 수립된 “미세먼지 관리 종합대책”에 의거하여 2020년 1월에 “항만 지역 등 대기질 개선에 관한 특별법”과 “환경친화적 선박의 개발 및 보급 촉진에 관한 법률”이 신설되었다. 해양수산부 (Ministry of Oceans & Fisheries, MOF)에서는 2019년부터 4년간 선박 배출 미세먼지 저감을 위해 소형 선박용 PM-NO<sub>x</sub> 동시 저감 시스템 개발, 중형



Fig. 1. View of ship's body and engine.

선박용 집진장치 개발, 대형 선박용 고효율 스크러버 개발 등을 추진하고 있다(Lee and Oh, 2019). 2019년 기준 전국에 등록된 선박은 65,835척으로 그중 61,955척(94.1%)이 10 ton 이하의 소형 선박인 만큼 소형 선박에 대한 관리가 중요하나(MOE, 2019), 대부분 연구가 100 ton 이상의 대형 선박 위주로 배출량 산정 및 저감기술 적용 분야에 집중되고 있다(MOE, 2020). 이에 본 연구에서는 10 ton 이하의 소형 선박을 대상으로 실측을 통해 운행 중에 배출되는 대기오염물질의 특성을 알아보고, 향후 미세먼지 관리대책 마련을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 대상 선박 선정 및 특징

소형 선박에서 배출되는 대기오염물질을 측정하기 위해 10 ton 이하의 선박을 선정하였다. 대상 선박은 중량 7.93 ton, 선축 길이는 15 m, 선체 재질은 섬유강화플라스틱(fiber reinforced plastics, FRP)으로 이루어져 있다. 선박의 엔진(DA6135SFA, John Deere, U.S.A)은 4기통 디젤엔진이며, 최대 출력은 366 kW (497 ps)에서 1,900 rpm이다. 엔진의 무게는 1.49 t이고, 정격출력 조건에서 시간당 93L의 연료를 소비한다. 그림 1은 본 연구에 활용된 선박과 엔진의 모습을 나타낸 것이다.

그림 2는 본 연구에서 선택된 선박의 엔진 성능곡

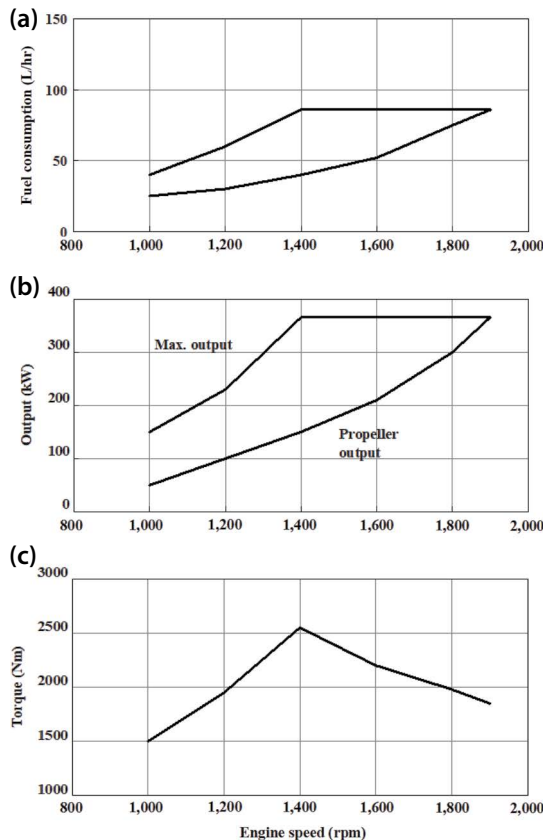


Fig. 2. Performance curves of ships's engine.

선을 나타낸 것이다. 성능곡선의 x축은 엔진 속도(rpm)를 나타내며, (a)는 연료소비량, (b)는 출력, (c)는 토크 변화량을 보여준다. 이상적인 조건에서 토크

는 저속 및 고속 조건에 상관없이 항상 일정하지만, 그림 2(c)와 같이 실제 조건에서는 연소상태가 가장 좋은 중속 (1,400 rpm)에서 최대치를 나타내고, 저속에서는 흡기 행정 시 낮은 엔진 속도에 의해 가스의 관성효과가 떨어지기 때문에 체적효율이 감소하게 된다. 고속에서는 연소속도가 피스톤의 속도를 따라가지 못해 발생하는 연소압력 저하 현상, 고속 회전으로 인한 기계적 손실 및 가스 펌핑 손실 증가 등의 영향으로 토크가 저하되는 특징을 나타낸다.

2.2 측정 방법

선박에서 배출되는 대기오염물질 배출량 산정 방법에는 연료소모량 산출법, 물동화물량 산출법, 개별선

박 배출량 산출법 등 3가지로 구분된다. 연료소모량 산출법은 활동도와는 관계없이 선박의 운행과정에서 사용된 연료량에 배출계수를 활용하여 간접적으로 산출하는 방법이고, 물동화물량 산출법 역시 활동도 자료에 엔진 부하에 따른 배출계수를 활용하여 산출하는 간접 산출방식이다 (KEITI, 2011). 본 연구에서는 직접 산출방식인 개별선박 배출량 산출법을 활용하였다. 이 방법은 굴뚝 배출구에 측정 공을 연결하여 실시간으로 측정할 수 있는 직독식 장비를 연결하여 측정하는 방식으로 가장 현실에 근접한 데이터를 확보할 수 있으나 측정이 번거롭고, 비용 및 인력 소모가 커 다수의 데이터를 얻기 어렵다는 단점이 있다. 그림 3은 측정 장비 설치를 위해 고안된 측정 공과 장비의

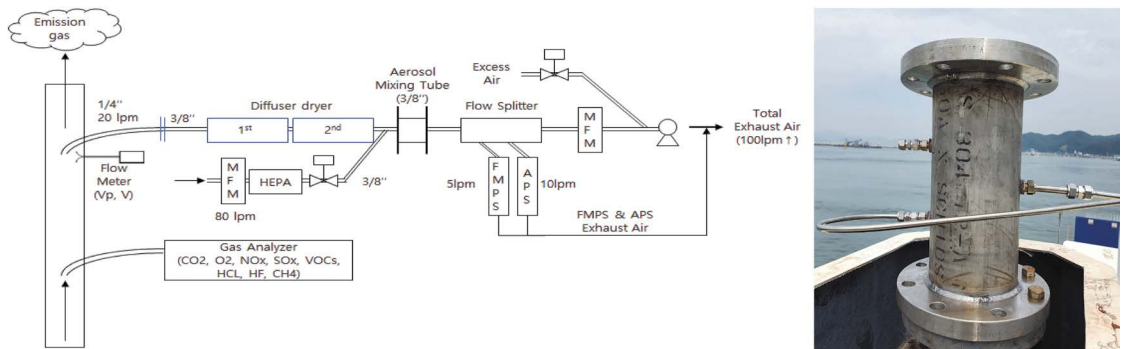


Fig. 3. Schematic diagram of set-up instrument and photo of ship's sampling stack.

rpm (engine loading)							1900 (100%)	Break time	1900 (100%)							
						1700 (90%)				1700 (90%)						
					1500 (80%)						1500 (80%)					
				1400 (75%)								1400 (75%)				
			1200 (63%)										1200 (63%)			
		950 (50%)												950 (50%)		
		650 (35%)													650 (35%)	
Speed (knot)	5	7	9	12	12	15	17		17	15	13	12	10	7	4	
Fuel consumption (L/hr)	2.5	4	8	9.5	11.5	16	22.5		20	16	12	9.5	7.5	3.5	3	

Fig. 4. Operational profile of the engine loading, speed and fuel consumption.

연결 모습이다. 굴뚝에서 배기되는 가스를 직접 포집하기 위해 연결 플랜지를 설치하였다. 연결 플랜지는 직경 150 mm, 높이 300 mm이며, 재질은 STS304로 설계하였고, 에어로졸 노즐은 각각 외경 3/8 inch와 1/5 inch 노즐을 부착할 수 있도록 제작하였다.

그림 4는 선박의 엔진 부하에 따른 시험 일정을 나타낸 것이다. 선박에 부착된 엔진의 사양을 조사하여 운행에 따라 바뀌는 엔진 부하를 단계별로 분류하였고, 1,900 rpm (100%)을 최대 부하로 하였을 때 최저를 650 rpm (35%)으로 설정하여 7단계의 엔진 부하 변동에 따른 배출 특성을 검토하였다. 부하별 측정은 단계별로 15분씩 수행하여 10분 이상의 안정적인 자료를 수집하였고, 이를 2회 반복 시행하였다. 1회 측정은 저속부터 고속으로 가속하면서, 2회 측정은 고속부터 저속으로 감속하면서 측정하였다.

### 2.3 측정 장비

선박 운행과정에서 배출되는 오염물질을 측정하기 위해 실시간 측정 장비들을 활용하였다. 선박 배출 오염물질은 엔진 부하에 따라 배출량이 달라지기 때문에 부하 변동에 따른 배출 특성 변화를 검토하기 위해서는 실시간 측정과 분석이 필요하다. 배출가스 중에 포함된 CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 측정을 위해 gas analyzer (PG-250, HORIBA)를, 입자상 오염물질의 입경 분포와 개수농도 변화 특성 분석을 위해 fast mobility particle sizer (FMPS, 3091, TSI)와 aerodynamic particle sizer (APS, 3321, TSI)를 사용하였다. 또한, 입자상 오염물질 중 PM<sub>2.5</sub>의 중량농도 변화를 보기 위해 DustTrak II (8530, TSI)를 사용하였다. 각 장비는 측정 전 표준시각을 대상으로 측정시간을 동기화하였으며, 측정 전

등속 흡인 조건 확인을 위해 유량계(4100, TSI)를 사용하여 유량을 확인하였다. 또한, 배출구에서 배출되는 배기가스의 결로현상(dew condensation)으로 인한 수분 영향을 최소화하기 위해 수분 제거 장치(diffusion dryer)를 설치하였다. 측정된 데이터는 저장 최소단위인 1초 단위로 데이터를 저장하여 분석하였다.

### 2.4 선박 관련 대기오염물질 배출계수 산정

선박은 <어선법> 제13조 제1항 및 같은 법 시행규칙 제21조에 준하여 등륜한 선박으로 정의할 수 있다. 2019년 기준 충남에 등록된 선박은 총 5,565척이며, 배출량은 우리나라 선박에서 배출되는 대기오염물질의 8.2%를 차지한다(NAEIR, 2021). 충남에 등록된 선박 중에 10 ton 미만의 선박은 5,327척이며, 약 95%가 소형 선박이다. 하지만 환경부와 해양수산부는 공동으로 100 ton 이상의 대형 선박을 대상으로 선박 배출량 산정과 관리가 되고 있으며, 100 ton 이하 선박들은 관리 사각지대에 놓여있다. 또한 소형 선박에 적합한 배출계수가 제시되지 않아 배출량 산정에 어려움이 있다. 현재 환경부 2014년 대기오염물질 배출량 산정의 Tier 1 방법의 선박에 대한 대기오염물질 배출량(E, kg/year)은 식 (1)을 적용한다.

$$E = \sum FC \times EF \quad (1)$$

여기서 실제 연료소모량은 한국해운조합과 수산업협동조합에서 공급받고 있는 선박 연료유의 공급자료를 수집하여 이용하는데, 선박 연료유의 공급량이 실제 연료소모량(FC, ton/year)과 같다는 전제조건이다. 그리고 여기에 배출계수(EF, kg/ton)를 곱하여 최종 배출량을 산출하게 된다.

**Table 1.** Emission factor of air pollutants by fuel and ship's type.

(unit: kg/ton·fuel)

Ship	Oil	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	VOC	NH <sub>3</sub>
Passenger, Cargo, Fishing	Gasoline	573.9	9.4	205	9.5	9.5	181.5	0.003
	Diesel	7.4	78.5	205	1.5	1.4	2.8	0.007
	Heavy oil	7.4	79.3	205	6.2	5.6	2.7	0.007
Leisure	Gasoline	481	4.27	-	12.6	12.6	233	0.003

현재 우리나라에서 사용되고 있는 배출계수는 유럽 경제지역 (European Economic Area, EEA)과 미국환경 보호청 (United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA)의 정보를 채용하여 사용 중이므로(표 1), 소형 선박의 배출량을 산정하기에는 다소 한계가 있다. 그러므로 국내 연근해 어선에 적용할 수 있는 배출계수는 국내 소형 선박을 기준으로 사용하는 연료의 양과 엔진의 부하 및 특성 등에 따른 대기오염물질 배출량을 직접 측정하여 적용하는 것이 바람직하다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 선박 운항에 따른 속도, 엔진 출력과 연료소모량의 관계

그림 5는 측정에 사용된 선박의 운항에 따른 속도, 엔진 출력 그리고 연료소모량의 관계를 나타내었다. 가속과 감속 때 상관관계를 각각 분석한 것으로 엔진 출력은 토크에 엔진의 속도(V)를 곱한 값으로 나타난다. 엔진의 출력은 최대 토크 이후에 토크는 저하되지만, 엔진 속도 증가에 따라 출력값에서는 최대 출력을 유지하였다. 일정한 연료에서 얻어지는 출력은 엔진의 종류와 운전 상태에 따라 다르나 일반적으로 연료소모량은 엔진의 출력에 정비례하여 나타난다. 선박의 저항(R)은 속도와 비례하여 나타나며, 선박이 저항받으면서 일정 속도로 항해하는 데 필요한 동력(P)은 선박의 저항(R)과 속도(V)로 정의되며, 식 (2)와 같다.

$$P \text{ (kW)} = R \times V \tag{2}$$

여기서, V는 선박의 운항 평균속도이고, R은 마찰저항(FR)과 조파저항(WR), 와류저항(ER), 공기저항(AR)의 합으로 나타난다(식 (3)).

$$R \text{ (k}\Omega\text{)} = \text{frictional resistance (FR)} \\ + \text{wave resistance (WR)} + \text{eddy resistance (ER)} \\ + \text{air resistance (AR)} \tag{3}$$

여기서, 선박의 항해에 필요한 동력은 속도와 비례하는 것을 알 수 있다. 또한, 엔진 출력은 속도와 비례하고, 엔진 출력은 연료소모량에 비례하므로 속도와 비례하는 관계가 성립된다(Maeda and Kim, 2013).

#### 3.1.1 가스상 물질의 배출 특성

그림 6은 운항조건 변화에 따른 가스상 오염물질의 배출 특성을 나타낸 것이다. 배출가스 중 산소농도는 연료 소모가 적은 저속구간이 연료 소모가 많은 고속 구간보다 높게 나타났으며, 이것은 고속구간에서 연료소모량이 증가함에 따라 연소에 소모되는 산소량이 증가하기 때문이다. 그러나 가속 실험에서 엔진 출력 1,400 rpm 구간을 넘어서자 산소농도가 증가하는 경향을 보였는데, 이는 최대 토크 값이 최대 출력 대비 약 70% 수준인 1,400 rpm 구간에서 구동되는 것과 연관이 있다. 이러한 원인으로 산소농도는 엔진 출력을 높일수록 감소하지만, 1,400 rpm 이상 구간에서는 다시 증가하고, 이후 과부하의 영향으로 산소농도가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 디젤엔진의 폭발행정 중 특히 연료가 실린더 내에서 급격히 연소가 진행되는 초기 고온의 연소 분위기에서 연소 공기 중에 포함된 질소가 산소와 반응하여 fuel NOx를 생성한다.

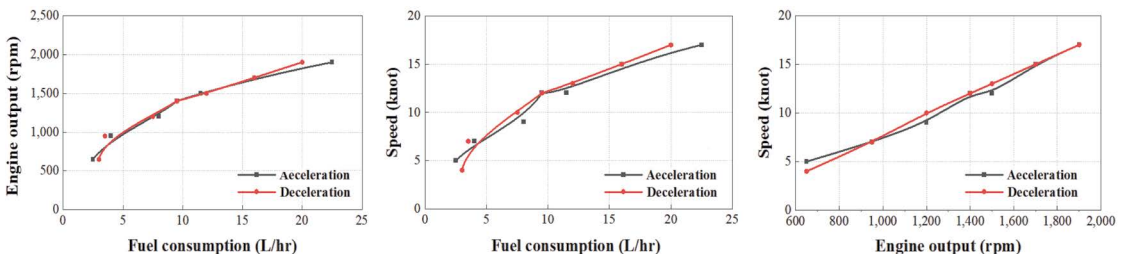


Fig. 5. Variations in engine output, speed and fuel consumption with operation conditions.

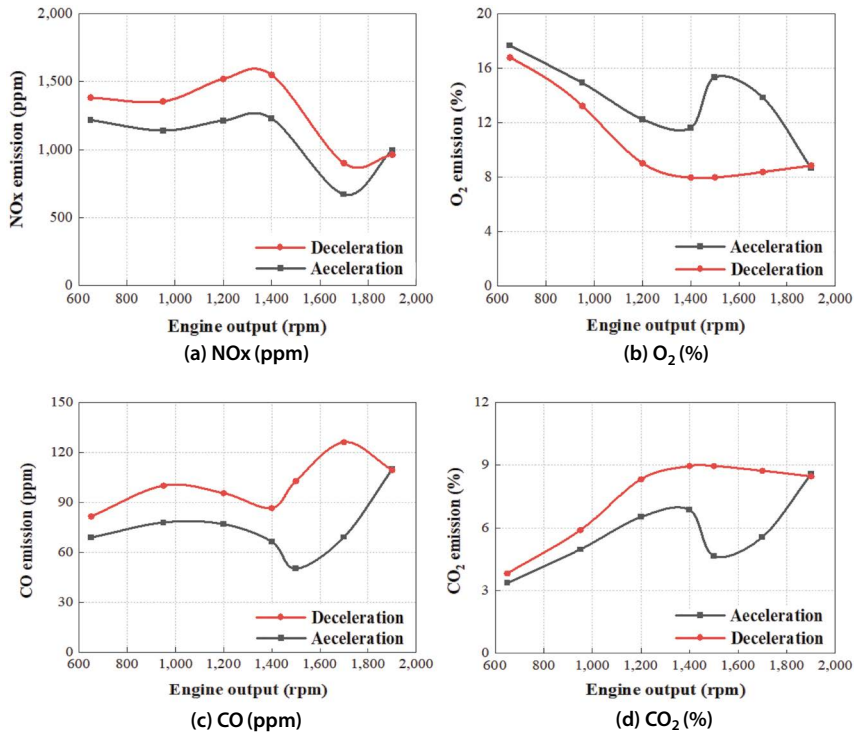


Fig. 6. Analysis of actual gases emitted from small ship (NO<sub>x</sub>, CO were measured in ppm; O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> were in vol%).

NO<sub>x</sub>는 연소온도가 높을수록, 고온의 연소 분위기에 서 체류 시간이 길수록, 그리고 산소농도가 높을수록 thermal NO<sub>x</sub>를 추가로 생성시켜 결국 총 NO<sub>x</sub>의 양은 급격하게 증가하게 된다. 산소농도의 증가는 연소 반응 온도의 증가로 이어지며, 연소반응 온도가 높을수록 질소(N<sub>2</sub>)가 더욱 많이 단원자 질소(N)로 분해되며 더 많은 질소산화물이 생성되기에 산소농도가 높은 저속 주행 구간에서 많은 양의 NO<sub>x</sub>가 발생하는 것으로 판단된다(Son, 2001).

일반적으로 연료소모량이 증가할수록 CO, CO<sub>2</sub> 배출량이 증가하지만, 운행 시 연료의 연소조건에 따라 CO, CO<sub>2</sub>의 배출량이 변화할 수 있다. 그림 6의 가속 구간인 1,400 rpm에서 확인할 수 있는 산소농도의 증가와 NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub>의 감소 현상은 최대 토크로 인한 완전연소에 도달한 양이 감소했기 때문으로 판단된다. 1,400 rpm 이후에는 엔진 부하 증가와 토크 값의

감소로 NO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 배출량이 증가하는 경향을 나타내었다. 일산화탄소의 배출농도는 엔진 부하량이 커질수록 증가하였다. 일반적으로 엔진 시스템에서는 완전연소 물질인 CO<sub>2</sub>에 의존한 연소온도 변화가 NO<sub>x</sub> 발생량을 감소시키지만, 본 연구에서는 CO<sub>2</sub> 농도의 증가보다는 산소농도의 감소에 따른 영향으로 보인다.

가속과 감속 구간에서의 측정치를 분석한 결과 연료소모량에 따른 배출 특성은 비슷한 경향을 나타내었다. NO<sub>x</sub>는 고속구간보다 저속구간에서 고농도로 배출되었고, CO, CO<sub>2</sub>는 저속구간보다 고속구간이 고농도로 배출되는 특징을 보였다. 감속 및 가속 실험을 비교한 결과, 감속 구간이 가속 구간보다 배출량이 더 높게 나타나는 것으로 파악되었다. 감속 및 가속 실험 조건을 통해, 출력을 단계적으로 상승시키면서 측정 한 가속 구간보다 빠른 가속을 통하여 엔진 출력이 최

대인 과부하 조건에서 단계적으로 감속한 실험에서 오염물질이 높게 배출된 것임을 알 수 있다.

### 3.1.2 입자상물질 배출 특성

일반적으로 대기 중 나노입자(100 nm 이하)는  $\text{cm}^3$  당 청정지역은 1,000~10,000개, 일반적인 도시 대기 환경에서는 10,000~50,000개 수준이다 (Oberbek *et al.*, 2019). 표 2에 운행조건에 따라 측정된 입자 및 가스상 오염물질의 평균 농도를 나타냈다. 선박 배출구에서 측정 결과, 나노 범위의 입자들은 2,983,202~9,956,129  $\#/\text{cm}^3$ 로 일반 대기 환경보다 300~1,000배 많은 개수농도를 보였다. 특히 650 rpm에서 가장 높은 개수농도를 보이는데 디젤기관의 점화지연 방식에서 초기 예혼합연소로 인한 급격한 연소 구간이 형성됨에 따라 발생한 현상으로 판단된다. 이후 다른 배출물질과 같이 최대 정격출력 1,400 rpm을 기점으로 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 그리고 선박 배출구에서  $\text{NO}_x$ 와 입자상물질의 배출이 비슷한 경향을 보였으며, 이는 디젤엔진은 연소 특성상 국부적인 고온 반응구간에서  $\text{NO}_x$ 가 생성되고 확산 연소 구간에서 입

자상물질의 생성이 수반되기 때문에 판단된다 (Kang, 2015). 입자상물질의 성분 분석을 통하여 발생 입자의 성분에 관해 추가적인 연구가 진행된다면, 엔진 성능 및 연료에 따른 입자상물질의 생성 기여도를 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 기존 상향식 배출량 산정방식의 중요한 오류의 원인인 선박의 특성 자료가 미비하다는 부분을 보완하여 실제 소형 선박의 운항조건에서 부하와 엔진 출력에 따른  $\text{NO}_x$  배출량 실측을 통해 배출계수를 산정하였다. 배출계수는 단위 연료 사용량 (ton)과 질소산화물 배출량 (kg)의 비로 산정하였으며, 엔진의 출력 및 연료소모량을 측정하여 사용하였다. 실측된 데이터로부터 산출된  $\text{NO}_x$  배출계수를 표 3에 나타내었다.

저속구간의 배출계수는 고속구간의 배출계수에 비하여 약 10배 이상 높게 산정되었다. 이는 배출량이 선박의 운항조건에 따라 큰 차이가 날 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러므로 현재 방식의 배출계수를 사용하는 상향식 배출량 산정방식은 큰 오차 범위를 가질 수 있으므로 국제해사기구 (IMO)에서 제시하는 선박에

**Table 2.** Summary of particulate and gaseous pollutants measured in this study.

	NO <sub>x</sub> (ppm)		CO (ppm)		CO <sub>2</sub> (%)		O <sub>2</sub> (%)		PM <sub>2.5</sub> (mg/m <sup>3</sup> )		MP (#/cm <sup>3</sup> )		NP (#/cm <sup>3</sup> )	
	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.	Mean	S.D.
650 rpm	1,299	8	75	6	4	-	17	-	1.0	0.1	326	56	9,956,129	367,717
950 rpm	1,337	8	89	10	5	0	14	0	0.9	0.1	327	42	9,662,879	351,611
1,200 rpm	1,365	12	86	11	7	0	11	0	1.4	0.2	325	24	7,594,052	827,033
1,400 rpm	1,388	12	76	8	8	0	10	0	1.0	0.1	365	55	6,928,781	911,027
1,500 rpm	698	129	77	15	7	1	12	2	1.2	0.1	243	23	2,923,636	359,353
1,700 rpm	869	124	103	22	8	1	10	2	0.7	0.1	336	10	6,300,606	2,048,282
1,900 rpm	948	8	118	14	9	-	9	0	0.7	0.1	322	16	4,925,076	620,319
Break time	420	7	136	10	2	-	21	-	0.4	1.3	279	100	2,983,202	3,526,972

\* Measurement range of MP and NP: MP 0.3~20  $\mu\text{m}$ /NP 5.6~560 nm

**Table 3.** Estimated NO<sub>x</sub> emission factor suggested in this study.

	650 rpm	950 rpm	1,200 rpm	1,400 rpm	1,500 rpm	1,700 rpm	1,900 rpm
Fuel consumption (kg/year)	86.7	118.3	244.4	299.6	370.5	504.6	670.14
NO <sub>x</sub> emission (kg/year)	14,747	15,178	15,496	15,757	7,924	9,865	10,765
EF (kg/ton)	170.0	182.3	63.4	52.6	21.4	19.6	16.1



**Table 4.** Summary of NO<sub>x</sub> estimated by non-road mobile source in ChungNam.

(unit: ton/year)

Source	Non-road mobile source (CAPSS, 2019)	Ship (CAPSS, 2019)	Small ship (CAPSS, 2019)	Small ship (this study)
Emission	15,716	6,509	192	4,238

의한 대기오염물질 배출계수에 대해 저속엔진과 증속 엔진을 구분한 것과 같이 보완이 필요할 것으로 판단된다(Ahn *et al.*, 2017).

선박의 실제 배출량을 기반으로 계산된 배출계수를 적용하여 NO<sub>x</sub> 배출량을 계산하였으며, 실제 배출량과 CAPSS 배출량 통계와 비교하였다. 연근해 선박은 등록할 때 해당 지자체로부터 선적항을 지정받게 되며, 일반적으로 해당 선적항에서 출항하여 조업하기까지 이동하는 패턴을 보인다. 연근해 어선의 연료소모량은 기존 연구에서 활동도를 기반으로 이전 연구에서 추정된 2019년 69,972 kL를 사용하였고, 배출계수는 평균값인 67.3 kg/ton을 사용하였다(Ahn *et al.*, 2017).

식 (1)을 이용하면 소형 선박에서 배출되는 NO<sub>x</sub>는 4,238 ton/year이며, 이는 2019년 충남지역 NO<sub>x</sub> 배출량 중 비도로이동오염원의 약 27%, 선박의 65%를 차지하는 것으로 파악되었다. 또한, CAPSS 배출량 통계의 선박 전체의 NO<sub>x</sub> 배출량 192 ton/year와 비교하면 본 연구에서 산정된 소형 선박 배출량이 약 22배 높은 수준으로 이에 대한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

이처럼 배출계수를 활용한 산정 방법은 연료소모량과 배출계수만을 가지고 지역에서 배출되는 오염물질의 양을 정량화할 수 있다는 장점이 있지만, 선박마다 다른 엔진 출력과 노후화, 운전조건, 유류 상태 등을 고려했을 때 정확한 값을 유추하기 힘들다는 단점이 있다.

국내 소형 선박은 여객선 및 화물선과 달리 항로 정보가 없어 운항 특성에 배출량을 산정하는 데 한계가 있고, 항로와 조업패턴 등을 포함한 자료 관리가 어려워 세부적인 배출 통계 작성이 미약한 실정이다(Seol *et al.*, 2021). 본 연구에서는 소형 선박 한 척을 이용하여 제한된 실험 범위에서의 오염물질 측정을 통한 배출량 산정은 한계점이 있어 모든 운항조건에 대한 배

출계수의 대푯값으로 사용하기에는 어려울 것으로 판단된다. 그러나 현재 국가에서 사용하고 있는 선박 배출계수 또한 국내 현실을 반영한 계수가 아닌 유럽과 미국에서 개발한 계수를 그대로 사용하고 있는 수준이라 현실과 많은 차이가 있다. 본 연구에서 실제 운항 중인 선박의 운항 특성에 따른 농도를 측정하여 NO<sub>x</sub>의 배출계수를 산정하였고, 현재 사용되고 있는 배출계수와 비교한 결과, 실측된 데이터를 기반으로 산정한 선박 배출량이 CAPSS 방식의 산정값보다 매우 높은 수준임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

미세먼지에 대한 국민적 관심과 우려가 증가하면서 국가 차원의 대기오염물질 관리가 요구되고 있으며, 이에 대한 대책으로 배출량 산정 및 오염 현황 조사가 진행되고 있다. 국가 정책추진의 근간 마련을 위해 국가 차원의 배출량 산정체계인 CAPSS를 산정, 운영하고 있는데 많은 부분이 가장 정확한 Tier 4 방식의 실측 기반이 아닌 Tier 1~3 기반의 배출계수 산정방식을 채택하여 사용하고 있다. 과거 배출원 체계가 갖춰지기 전 국제적인 배출계수인 Tier 1의 계수를 기반으로 산정되었고, 최근에는 다수의 물질에 대해 국가 표준을 산정 Tier 2로 전환되고 있으나 아직 고도화된 Tier 3으로의 전환은 어려운 실정이다. 현재 선박에서 배출되는 대기오염물질 배출량은 연료소모량에 배출계수를 활용하여 산정하고 있다. 하지만 대부분의 이동오염원이 그러하듯이 선박과 마찬가지로 운항조건에 따라 배출량에 차이를 보일 수 있는데, 이에 대한 고려가 전혀 반영되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 소형 선박을 대상으로 운전조건 변화에 따른 대기오

염물질 변화 특성을 조사하였고, 그 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. IMO에서는 운행 조건(2단계, slow and medium)에 따른 배출계수를 제시하고 있지만, 아직 국내에서는 획일화된 배출계수를 사용하고 있으며, 실측 결과 저속과 고속 운행조건에 따라 약 10배 정도의 배출량 차이를 보였다. 기존 통계가 단순 연료소모량에 배출계수를 적용하여 일괄 적용하기 때문에 현실적인 운전조건이 반영되지 못한 결과로 판단되며, 이는 추후 운전조건에 따라 구체적인 배출계수 개발과 적용이 필요하다는 것을 의미한다.
2. 2019년 기준 CAPSS에서 제공하고 있는 NO<sub>x</sub> 배출 통계자료와 비교하였을 때, 본 연구 결과와 약 22배 정도의 차이를 보였다. 이는 선박에 의한 배출량 산정이 과소 평가되고 있음을 의미하며, 이에 대한 배출계수 고도화 및 현실화를 통해 배출량 재산정이 필요함을 시사한다.
3. 국내 선박의 95%를 10 ton 이하의 소형 선박이 차지할 정도로 그 비중이 높은 현실임에도 불구하고 국내 선박 관리는 100 ton 이상, 130 kW 등 대형 선박에 맞춰져 관리가 이루어지고 있다. 연구 결과 소형 선박에서 발생하는 대량의 입자 및 가스상 대기오염물질이 관리 없이 배출되고 있다는 것을 확인하였다.

아직 미세먼지 관리 사각지대에 놓여있는 소형 선박에 의한 대기오염물질 배출현황을 검토하였다. 단편적이긴 하지만 NO<sub>x</sub>는 기존 배출량 대비 22배 높은 수준을 보였고, 입자상 오염물질 또한 도로변 입자의 배출 수준보다 수십~수백 배 높은 수준을 보였으나(Cho *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2008), 이에 대한 관리는 전혀 없는 상태이다. 본 연구에서 나타난 최소한 단일 배출량을 고려했을 때 현재 1급 발암물질 배출원으로 지정되어 관리되는 디젤 차량에 적용된 선택적촉매환원장치(selective catalytic reduction, SCR)나 디젤미립자필터(diesel particulate matter, DPF)와 후처리 장치가 개발·적용이 필요할 것으로 보이며, 향후 이에 대한 정책적 뒷받침과 기술개발이 추진되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 충청남도의 “소형 어선에 의한 충남지역 대기오염물질 배출 및 영향분석 기초 연구”의 지원을 받아 수행된 연구이며, 측정에 협조해 주신 (주)APM엔지니어링 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

- Ahn, Y.S., Yook, G.H., Kim, J.Y. (2017) Improvements in estimation of air pollutant emissions from ship, Korea Maritime Institute, 62-73.
- Ahn, Y.S., Yook, G.H., Kim, D.K., Lee, H.Y. (2019) A study on improvement measures for air pollutants management system and policy in Korean ports. Korea Maritime Institute, 113-130.
- Cho, B.Y., Shin, S.H., Jung, C.S., Ju, M.H., Yoon, M.H., Ahn, J.E., Bae, G.S. (2018) Characteristics of particle size distribution at the roadside of Daegu, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 35(1), 16-26, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.016>
- International Association of Maritime Universities (IAMU) (2016) Development of a methodology to measure and assess ship emissions.
- Kang, W.S. (2015) A study on hybrid catalytic converter system for simultaneous reduction of PM and NO<sub>x</sub>, Doctoral dissertation, Chonnam National University, 1-24.
- Kim, D.S. (2013) Air pollution history, regulatory change, and remedial measures of the current regulatory regimes in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(4), 353-368, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.353>
- 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 in 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>
- Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) (2011) A study on prediction program development and contribution evaluation of secondary air pollutants by ship emission, 87-104.
- Lee, H.C., Hwang, J.H., Park, H.S., Ryu, H.Y. (2016) A study on the

- systematic management of air pollutants from ship in Korea, 1-7.
- Lee, H.K., Lee, I.H., Song, J.H., Lim, Y.S. (2005) Development of system for management of Air pollutants emitted ship in Incheon area, 23.
- Lee, S.W., Oh, C.S. (2019) Audit Implications and Management status of air pollutants emitted from shipping in Korea. Audit and Inspection Research Institute Report, 15-22.
- Maeda, K., Kim, Y.U. (2013) The study on reduction method of CO<sub>2</sub> emission from ship, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 25(3), 705-715, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2013.25.3.705>
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Comprehensive plan for fine dust management.
- Ministry of Environment (MOE) (2020) Special act about improvement of atmospheric environment in air quality control area.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2019) Statistical Yearbook of Oceans & Fisheries.
- Ministry of Oceans and Fisheries (MOF) (2020) Marine Environment Management Act.
- Moon, N.K., Seo, J.H. (2019) Analysis system for regional environmental status to support environmental assessment: PM<sub>2.5</sub> contributions for shipping and power plant, Korea Environment Institute Report, 21-36, (in Korean with English abstract).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2007) National air pollutants emission trends, 1999-2005.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015a) Emission factor of air pollutants.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015b) A study on the development of air pollutants and greenhouse gases emission factor and emission estimation from the domestic coastal shipping (II).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Data book of air pollutants emission in domestic port.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAEIRC) (2021) National air pollutants emission.
- Oberbek, P., Kozikowski, P., Czarnačka, K., Sobiech, P., Jakubiak, S., Jankowski, T. (2019) Inhalation exposure to various nanoparticles in work environment - contextual information and results of measurement, Journal of Nanoparticle Research, 21, 222, <https://doi.org/10.1007/s11051-019-4651-x>
- Seol, S.H., Jung, S.W., Seong, M.A., Lim, J.H., Yeo, S.Y., Jin, H.A. (2021) Estimation of Air Pollutant Emissions from Ships and Their Contributions in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 37(2), 324-337, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.324>
- Son, J.L. (2001) Regulations for the prevention of air pollution from ship - for NOx emission from marine diesel engines, Journal of the Korean Society of Marine Engineering, 25(3), 57-70.
- Wang, Y., Zhy, Y., Salinas, R., Ramirez, D., Karnae, S., John, K. (2008) Roadside Measurements of Ultrafine Particles at a Busy Urban Intersection, Journal of the Air & Waste Management Association, 58, 1449-1457. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.11.1449>
- 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

- 김민수 (충남연구원 서해안기후환경연구소 연구원)  
(kms1482@cni.re.kr)
- 김정호 ((주)EMA엔지니어링 이사, (주)미세먼지연구소 소장)  
(jeonghoflux@naver.com)
- 이용일 (한강유역환경청 환경감시단 환경연구사)  
(freego83@korea.kr)
- 박세찬 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)  
(psc89@cni.re.kr)
- 오병훈 ((주)APM엔지니어링 대리, 안양대학교 환경공학과 석사과정)  
(byeonghun.oh@apm.co.kr)
- 차재두 (한국산업기술시험원 환경사업개발센터 센터장)  
(jdcha@ktl.re.kr)
- 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)  
(kjb0810@cni.re.kr)