

선박 디젤 엔진에서 발생하는 대기오염물질 실측에 관한 연구

박진규* · 임승훈** · 오정모****

*, ** 목포해양대학교 산학협력단 연구원, *** 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수

A Study on the Actual Measurement of Air Pollutants from a Diesel Engine of Ship

Jinkyu Park* · Seunghun Lim** · Jungmo Oh****

*, ** Researcher, Industry-University Cooperation Foundation of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

**** Professor, Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 국내 대기오염물질 배출량 통계에 따르면 상당한 대기오염물질이 선박에 의해 발생하고 있다. 따라서 선박으로부터의 대기오염물질 배출 제한과 항만지역 대기질 개선을 위해 다양한 정책들이 시행되고 있고, 국제적으로도 선박에 의한 해양오염 방지를 위해 국제 협약 등이 이루어지고 있다. 하지만 실제 운항하는 선박에서 배출되는 대기오염물질 측정에 관한 연구와 실험은 거의 이루어지고 있지 않아, 본 연구는 이동식배출가스측정장비(PEMS)를 사용하여 실제 운항하는 9,169톤급 선박에서 발생하는 대기오염물질 배출량 평가에 대한 방법과 가능성을 제시하였다. RPM과 부하에 따라 배출량의 차이가 있었으며, NO_x 배출량은 497-2,060ppm, CO₂는 1.55-6.9%, CO는 0.002-0.14% 수준이다. 엔진 제조사에서 제공하는 Shop Test에 명시된 배출량과 실제 측정된 배출량에 차이가 있음을 확인하였다. 대상선박의 전 항해구간에서 발생하는 각 대기오염물질 최대 배출량이 PEMS 측정 구간에 포함되는 것을 확인하여, 총톤수 10,000톤급 이내 선박에 PEMS 활용 가능성을 검증하였다.

핵심용어 : 대기오염물질, 배출계수, 이동식배출가스측정장비, 선박 디젤 엔진, 배출특성

Abstract : According to domestic air pollutant emission statistics, a considerable amount of air pollutants is generated by ships. Therefore, various policies are being implemented to limit air pollutant emissions from ships and improve the air quality in ports. In addition, international conventions are carried out for the prevention of marine pollution by ships. However, because few studies and experiments have been conducted on the measurement of air pollutants emitted from actually operating ships, this study presented a method and possibility for evaluating air pollutant emissions from a 9,196GT ship actually operating using a portable emission measurement system (PEMS). A difference in emission occurred depending on the RPM and load, and the emission of NO_x was 497-2,060ppm, CO₂ was 1.55-6.9%, and CO was 0.002-0.14%. The emission specified in the shop test provided by the engine manufacturer differed from the actual emission measured. This study proved that the maximum emission of each air pollutant generated in the entire sailing section of the ship was included in the PEMS measurement range, and the possibility of using PEMS for ships within 10,000GT was verified.

Key Words : Air pollutants, Emission factor, Portable emission measurement system, Ship's diesel engine, Emission characteristics

* First Author : jobjk2001@naver.com, 061-240-7207

† Corresponding Author : jmoh@mmu.ac.kr, 061-240-7207

1. 서론

최근 선박을 통한 해상운송으로 인해 발생하는 환경오염의 심각성이 대두되고 있다. 특히 최근 연구에 따르면 항만 지역의 환경오염 주된 요인이 선박인 것으로 밝혀졌다 (Galbraith et al., 2008).

2022년 환경부 미세먼지정보센터에서 제공하는 「국가대기오염물질 배출량 산정방법 편람(V)」에서 현재 국내 대기오염물질 배출원을 13개로 대분류하고 있으며, 그중 선박은 비도로이동오염원에 포함된다. 또한 Table 1과 같이 2022년도에 발표한 「2019년 국가 대기오염물질 배출량 통계」와 온실가스종합정보센터에서 발표한 「2021년 지역별 온실가스 인벤토리」에 따르면 선박에 의해 발생하는 CO 배출량은 약 111.8×10^3 tonne, NO_x는 163.4×10^3 tonne, SO_x는 36.3×10^3 tonne이고 CO₂ 배출량은 $1,209.9 \times 10^3$ tonne으로 전체 오염원 중 각각 14.7%, 15.0%, 13.3%, 0.19%를 차지한다(ME, 2022; ME, 2021).

2022년 7월 기준 국내 등록된 자동차는 약 2,527만대이고, 매년 해양수산부에서 발간하는 해양수산 통계연보에 명시된 선박은 2021년 기준으로 화물선, 여객선 등은 8,800척이며 동력 어선은 64,987척이다(Molit, 2022; MOF, 2021). 도로이동오염원인 자동차에 비해 규모는 적지만 대형 엔진이 탑재되어 있는 선박에서 결코 적지 않은 양의 대기오염물질이 배출되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Annual air pollutant emissions statistics

	($\times 10^3$ tonne)				
	CO	NO _x	SO _x	PM ₁₀	CO ₂
Year	2019				2021
Vessel	111.8	163.4	36.3	9.2	1,209.9
Non-road	187.5	311.7	37.5	17.2	-
Total	7,578	1,086.8	2,728	2,078	643,766.9

세계적으로 저명한 학술지인 Nature에서 2016년에 전 세계적으로 미세먼지가 가장 심각한 10대 항만 중 하나로 부산항을 선정하기도 하였다(Oh, 2017).

현재 국내의 경우 선박으로부터의 대기오염물질 배출 제한과 항만지역의 대기질 개선을 위해 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」과 「항만지역등 대기질 개선에 관한 특별법」 등과 같은 다양한 정책을 시행하고 있다. 또한 유럽환경청(Europe Environment Agency : EEA), 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO) 등과 같은 국제기구는 선박으로부터 해양오염 방지를 위한 국제 협약(International

Convention for the Prevention of Pollutants from Ship : MARPOL)과 같은 국제협약을 통해 선박으로부터 발생하는 오염물질을 규제하고 있다.

하지만 국·내외적으로 실제 운항하는 선박의 주 추진 엔진에서 발생하는 대기오염물질을 측정하고 평가하는 연구와 실험은 활발하게 이루어지고 있지 않다.

자동차의 경우 현재 국립환경과학원 교통환경연구소에서 실도로 주행 기반의 배출가스 인증시험을 진행하고 대기오염물질 배출량 산정, 측정방법 등에 관한 연구를 활발하게 진행하고 있다. 하지만 현재까지 선박의 경우 관심 밖의 분야로 간주되어 대기오염물질 배출량을 실제 운항 중에 측정을 통해 평가하지 않고, 엔진 제조사에서 Shop Test를 통해 측정된 대기오염물질 배출량을 기준으로 IMO에서 인증하는 실정이다.

2. 관련연구

Agrawal et al.(2010)은 중유를 연료로 사용하는 운항 선박(Occangoing Vessels : OGVs)의 주 추진 엔진에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 파악하기 위해 Panamax급 컨테이너 선박의 54,840 kW 출력을 가진 저속 2행정 엔진으로부터 배출되는 배기가스를 측정하였다. CO₂와 NO_x 측정을 위해 HORIBA사의 PG-250 휴대용 멀티 가스 분석기를 사용하였으며, 측정 결과를 이전 연구(Agrawal et al., 2008) 및 EEA, 미국환경보호청(Environmental Protection Agency : EPA)에서 제시하는 배출계수(Emission Factor)와 비교하였다. CO와 NO_x를 포함한 대부분의 대기오염물질 배출계수가 이전 연구 및 EEA, EPA에서 제시하는 배출계수보다 높게 나타나 현재 배출계수가 실제 운항하는 선박의 배출 특성을 나타내지 못함을 확인하였고, 현행 배출계수 개선 필요성을 제시하였다.

Zhang et al.(2016)은 중국이 최근 국제 무역, 조선 산업의 급속한 발전 중에 있어 중국 대기 환경에 대해 측정 데이터에 기초한 선박의 배출가스 배출기여도를 확인하기 위한 연구를 진행하였다. 엔진 회전수가 각각 다른 3척의 디젤 선박을 대상으로 CO₂, NO_x 등을 측정하기 위한 가스분석기, PM 측정을 위한 3종 미립자 샘플러를 포함한 복합 시스템을 구성하여 주 추진 엔진으로부터 배출되는 대기오염물질을 측정하였다. 엔진의 형식, 회전수에 따라 배출량의 차이가 있음을 확인하였고, 이전 선행 연구 및 EPA, IMO에서 제시하는 배출계수와도 일부 차이가 있음을 확인하였으며, 화물선 및 컨테이너선과 같은 대형 선박으로부터 다량의 대기오염물질이 배출되므로 대형 선박을 대상으로한 연구 필요성을 제시하였다.

Corbett(2002), Zhang et al.(2014) 및 Song(2014)을 포함한 대

선박 디젤 엔진에서 발생하는 대기오염물질 실측에 관한 연구

부분의 연구는 선급에서 제공하는 제한된 데이터를 기반으로 한 것으로 벤치 연구 사례가 실제 작동 조건을 완전하게 나타내지 못하고 있다. 그리하여 Peng et al.(2016)은 실제 선박의 운항 모드와 속도에 따른 가스상 배출물과 입자상 물질에 대한 입자 크기 분포(PSD)에 관한 연구를 진행하였다. 4척의 컨테이너선, 예인선 1척, 여객선 1척을 대상으로 이동식배출가스측정장비(Portable Emission Measurement System : PEMS)를 사용하여 주 추진 엔진으로부터 발생하는 배출가스를 측정하였고, 이전 연구 및 EPA에서 제시하는 g/kg_{fuel} 단위의 배출계수와 측정 결과에 일부 차이가 있음을 확인하였다. 또한 선박에 의한 대기오염물질 배출량에 대한 이해와 선박 배출 제고를 개선하기 위해서는 실제 측정을 통해 취득한 데이터를 기반으로 할 필요가 있음을 제시하였다.

본 연구는 주로 자동차 등 소형 엔진의 배출가스 인증평가에 사용되는 이동식배출가스측정장비(PEMS)를 사용하여 실제 운항하는 선박의 주 추진 엔진으로부터 배출되는 대기오염물질 중 가스상 물질(CO_2 , CO , NO_2 , NO)의 배출농도를 측정함으로써 실제 운항하는 선박에서 배출되는 대기오염물질 배출 수준을 평가하고, 엔진 제조사에서 발행한 Test Report와 비교하는 것을 목적으로 하였다.

본 연구의 결과와 Test Report상에 제시된 배출농도 결과를 비교하여 벤치 테스트가 실제 운항 중 주 추진기관으로부터 배출되는 대기오염물질 특성을 정확하게 반영하고 있는지 확인하고자 한다. 또한, 현재 선박 엔진 인증 방식을 기존의 방식이 아닌 실 운항 조건에서 인증 평가하기 위해 이동식배출가스측정장비 활용 가능성을 확인하는 것을 목적으로 하였다.

3. 실험 방법

목포해양대학교에서 운용 중인 실습선을 대상으로 이동식배출가스측정장비를 활용하여 선박 배기가스 측정 가능성을 검토하였다.

3.1 대상선박

Table 2와 같은 사양의 2018년도에 건조된 총톤수 9,196t급 실습선의 주 추진 엔진이 실제 운항 조건에서 배출하는 대기오염물질 배출농도를 실측하였다.

대상선박은 1개의 주 추진 엔진과 4개의 발전기 엔진이 탑재되어 있으며, 각 엔진에 NO_x 배출 저감장치인 SCR (Selective Catalytic Reduction)이 설치되어 있어 IMO의 Tier 3 규제 기준을 만족한다. 평소 운항 중에는 SCR을 작동시키지 않으며, 배출 제한 구역 항해 시 SCR을 사용하여 배출 규제를 충족시킨다.

Table 2. Ship's specifications

Length Over All	133.00 m	Gross Tonnage	9,196 ton
Breadth	19.40 m	Net Tonnage	2,758 ton
Design Draft	6.40 m	Sea Trial Speed	18.50 Kn
Depth	11.05 m	Complement	239 persons

선박에 탑재된 주 추진 엔진은 HYUNDAI-MAN B&W 6S40ME로 전자식 제어 엔진이 탑재되어 있고, 146 rpm에서 최대 6,618 kW의 추진력을 낼 수 있다. 또한 사용 연료는 경유(Diesel) 70%와 중유(Bunker C) 30%를 혼합한 황 함유량 0.18%의 경질 중유(Bunker A)를 사용하였다.

3.2 이동식배출가스측정장비(PEMS) 장비 사양 및 설치

주로 자동차, 건설기계 등과 같은 소형 엔진의 배출가스 인증평가에 사용되는 이동식배출가스측정장비인 SENSORS사의 SEMTECH DS+를 사용하여 대상선박의 주 추진 엔진으로부터 발생하는 가스상 대기오염물질 중 CO_2 , CO , NO , NO_2 의 농도를 측정하였다.

CO_2 와 CO 는 비분산 적외선 방식(NDIR) 방식으로 측정하고, 비분산 자외선 방식(NDUV)으로 NO 와 NO_2 를 측정할 수 있으며, 상세 사양은 Table 3과 같다.

측정장비 사용 시간에 따른 오차 발생률을 최소화하기 위해 제조사에서 권고에 따라 연속 측정 시간을 4시간 이내로 하였으며, 배기가스 측정 전·후마다 공인기관에서 인증받은 교정가스(CO_2 : 13.2%, CO : 4,824 ppm, NO : 945 ppm, NO_2 : 240 ppm)로 PEMS 장비를 교정하였다.

Table 3. PEMS's specifications

Component	CO_2	CO	NO_2	NO
Model	SEMTECH DS+			
Range	18 % vol	8 % vol	0-1,000 ppm	0-3,000 ppm
Resolution	0.01 % vol	10 ppm	0.1 ppm	0.1 ppm
Accuracy	$\pm 2\%$ of Point or $\leq \pm 1\%$ of Span, Whichever is larger			
Data Rate	5 Hz			

대상선박에는 Fig. 1과 같이 NO_x 배출량 측정을 위한 IMO Flange가 각 엔진의 배기가스 라인에 1개소씩 설치되어 있다. PEMS 장비의 Probe를 IMO Flange에 연결하기 위해 IMO Flange Size(25A)에 적합한 크기의 Flange를 제작하여 PEMS 장비를 연결하였고, Sensor 설치 외에도 GPS, 온·습도계를 설치하여 추가적인 데이터 수집에 활용하였다.

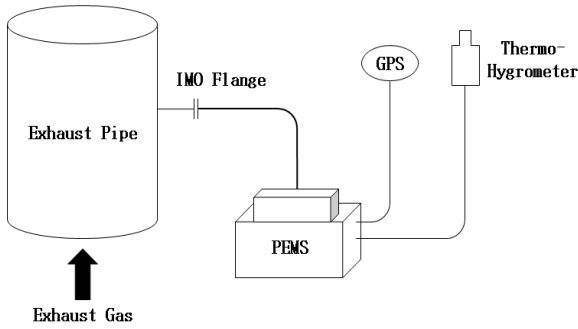


Fig. 1. PEMS connection diagram.

3.3 실험 조건

선박은 자동차와 달리 변속기가 존재하지 않고, 엔진과 추진에 직접적으로 사용되는 Propeller가 감속 기어 없이 직접 연결되어 있다. 일반적인 대형 상선은 고정피치프로펠러(Fixed Pitch Propeller : FPP)가 장착되어 있어 Telegraph라 일컫는 Lever를 사용하여 엔진 RPM을 변동시키며, 엔진 RPM 변동에 따라 Propeller의 회전 속도가 변화하여 선박의 속도가 제어된다.

대상선박의 경우 가변피치프로펠러(Controllable Pitch Propeller : CPP)가 탑재되어 있어, Propeller의 Blade 각도를 변경함으로써 Pitch를 제어하여 해당 Telegraph 단계에서 RPM 변동 없이 일정 이하의 속도 범위 내에서 속도를 제어할 수 있다.

실험 조건은 Table 4와 같으며, 실습선 부두에서 출항하여 인근 해역을 항해하는 과정에서 Maneuvering 모드와 Cruising 모드에서 발생하는 대기오염물질을 측정하였다.

전·후진마다 5개 단계로 RPM을 설정할 수 있고, 각 단계 사이의 RPM을 수동으로 조정할 수 있다. 통상적으로 RPM을 즉각 변경할 수 있는 Dead Slow~Full까지를 Maneuvering 모드, 정속 운항 시 사용하는 Navigation Full을 Cruising 모드로 칭한다.

Table 4. Experimental conditions

Mode	Maneuvering				Cruising
	Dead Slow	Slow	Half	Full	Navi' Full
Fuel	Bunker A (Diesel 70% + Bunker C 30%)				
Measured Emission	CO ₂ , CO, NO ₂ , NO				
Measured Time (s)	8,017	1,205	1,419	646	10,224
RPM (rpm)	0-73	74-88	89-97	98-116	117-141

4. 결과 및 고찰

4.1 엔진 운용에 따른 대기오염물질 배출 특성

통상적으로 선박은 공해(Open Sea)상에서는 Navigation Full 모드로 정속 항해를 주로 한다. Fig. 2는 정속 항해 중인 선박이 Navigation Full에서 RPM을 감소시켜 닻을 내려 묘박하고, 이후 항구로 입항하는 구간에서의 엔진의 RPM 및 출력을 나타낸다.

Fig. 2와 같이 RPM 변동에 따라 출력도 변화하고, 같은 RPM이지만 선속에 따라 부하의 차이가 일부 발생한다.

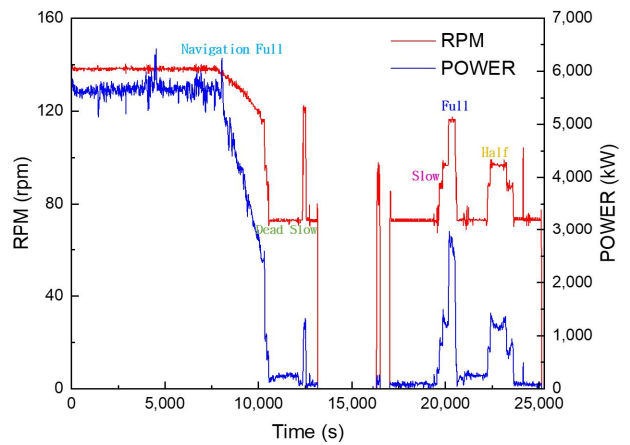


Fig. 2. Engine operation condition.

RPM을 감소시키는 동안에 주 추진 엔진으로부터 발생하는 배출가스 중 CO₂, CO 및 NO_x 배출농도는 Fig. 3과 같다.

약 140 rpm인 Navigation Full 단계에서 Full 단계인 116 rpm 까지 RPM을 낮추면 NO_x 배출농도는 평균 1,153 ppm에서 1,386 ppm으로, CO는 0.008%에서 0.012%로 증가하고, CO₂는 4.85%에서 4.65%로 감소한다.

Full 단계에서 약 97 rpm인 Half 단계로 RPM을 낮추면 NO_x 배출농도는 1,434 ppm으로 증가하나, CO₂ 및 CO는 3.2%, 0.005%로 감소한다.

Half 단계에서 Slow(87 rpm)을 거쳐 Dead Slow(72 rpm)으로 낮추는 동안 NO_x 배출농도는 1,434 ppm → 989 ppm → 563 ppm으로 감소하고, CO₂는 3.2% → 2.4% → 1.7%로 감소한다. 반면 CO 배출농도는 0.005% → 0.006% → 0.008%로 증가한다.

NO_x 및 CO 배출 경향으로 보았을 때 대상선박에 탑재된 엔진은 Half 모드에서 완전 연소가 최적화되어 있는 것으로 판단되고, 비교적 낮은 RPM을 사용하는 Dead Slow 및 Slow에서 불완전 연소가 상대적으로 많이 발생하는 것으로 판단된다. CO₂의 경우 연료 중의 탄소 성분(C)이 완전 연소되어 공기 중 산소와 결합하여 발생하는 물질로써 연료 소모량에

따라 CO₂ 배출농도가 선형에 가깝게 비례하여 배출되는 것을 확인하였다.

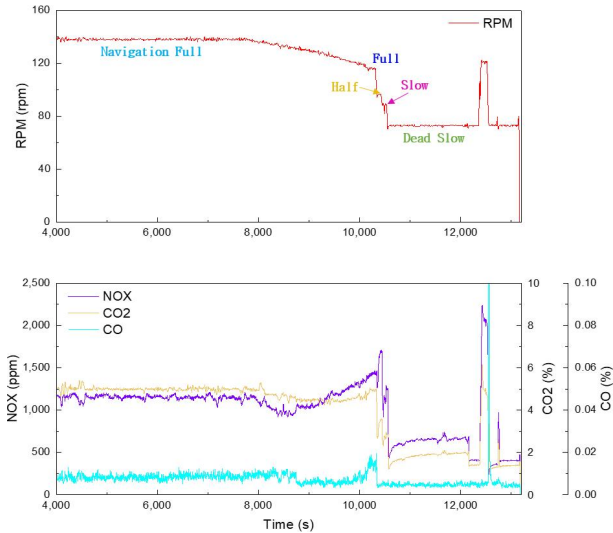


Fig. 3. Tendency of emissions according to decrease of RPM

Fig. 4는 앵커링 이후 항구로 입항하기 위해 RPM을 증가시키는 구간에서의 주 추진 엔진의 RPM 변동에 따른 대기오염물질 배출 특성을 나타낸다. Dead Slow에서 Slow로 RPM을 증가시키면 NO_x와 CO₂ 및 CO 배출농도는 497 ppm, 1.55%, 0.002%에서 1,402 ppm, 3.06%, 0.003%로 증가한다. 이후 Slow에서 Full까지 RPM을 증가시키는 동안 NO_x 배출농도는 1,402 ppm → 1,860 ppm → 1,488 ppm으로 변화하고, CO₂ 배출농도는 3.06% → 4.20% → 5.23%, CO 배출농도는 0.003% → 0.025%로 변화한다.

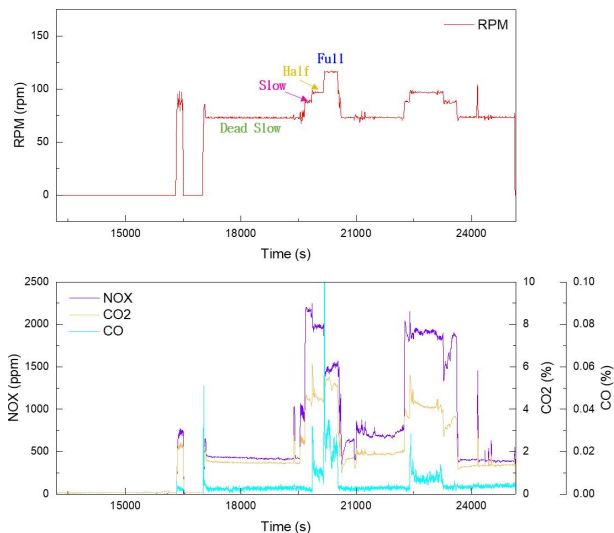


Fig. 4. Tendency of emissions according to increase of RPM.

RPM을 증가시키거나 감소시키는 과정에 따라 대기오염물질 배출농도의 차이가 있음을 확인하였다. 전반적으로 RPM을 증가시키는 Increasing 구간에서 발생하는 대기오염물질 양이 RPM을 감소시키는 경우보다 높게 나타났다.

이는 Fig. 5와 같이 동일한 RPM에서도 선속에 따라 부하의 차이가 있어, 연료 소모량 및 연소 상태가 상이하여 대기오염물질 배출농도에 영향을 미치는 것으로 판단된다. RPM을 상승시키는 구간에서 선속을 높이기 위해 요구되는 연료와 출력이 RPM을 감소시키는 구간보다 많아 대기오염물질 배출량에 차이가 발생하는 것으로 사료된다.

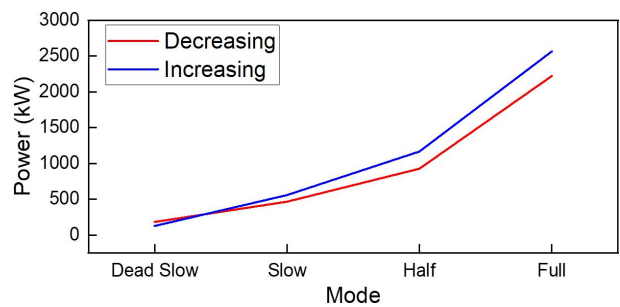


Fig. 5. Output difference according to operating mode.

4.2 Test Report와의 배출 수준 비교

이동식배출가스측정장비를 통해 측정된 대기오염물질 배출농도 결과와 선박 주 추진 엔진의 Shop Test Report 상 표기된 대기오염물질 배출농도 결과를 Table 5와 같이 비교하였다.

50% 부하 조건에서 두 결과의 오차가 CO₂는 4%, CO 6%, NO_x의 경우는 14% 정도로 큰 차이를 나타내지 않으나, 25% 조건에서는 CO₂의 경우 18%, CO는 500%, NO_x는 23% 정도 차이가 있고, 75% 조건에서는 CO₂는 5%, CO 22%, NO_x 32% 정도 매우 큰 차이를 보였다.

Shop Test Report에 명시된 대기오염물질 배출농도의 경우 엔진 제조사에서 엔진 제조 후 동력계(Dynamometer)를 통해 얻은 결과이다. 본 연구 결과를 통해 벤치 테스트의 정확성 여부를 판단할 수 없으나 실제 선박이 운항하는 동안 발생하는 배출량과 다소 차이가 있는 것으로 나타났으므로 이를 검증하기 위한 추가 실험이 필요할 것으로 판단된다.

현재 디젤 자동차의 경우 환경부에서 「대기환경법시행규칙」 제62조에 따라 RDE(Real Driving Emission)를 통해 실제 다양한 주행 조건을 통해 배출가스를 측정하고 인증한다. 따라서 향후 IMO 등에서 제시하는 테스트 모드를 준수하여 추가적인 실험을 통해 실 운항 조건에서 대기오염물질 배출량 인증평가 방법을 수립하고, 선박에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 평가가 필요할 것으로 판단된다.

Table 5. A comparison of measured result with those of shop test report

Load	Test Report			Measured Result		
	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	NO _x (ppm)
25 %	4.12	26	1,316	4.88	146	1,625
50 %	4.68	53	1,346	4.41	55	1,163
70 %	4.69	105	868	4.96	82	1,146

4.3 PEMS 적용 가능성 검증

자동차와 같은 도로이동오염원과 발전소 및 건설장비의 배기가스 중 CO, CO₂, NO_x 등 측정에 주로 사용하는 PEMS 장비를 이용하여 9,196급의 선박의 6,618 kW급 주 추진 엔진에서 발생하는 대기오염물질 배출농도 측정 시험을 진행하였다.

Cooper(2003)의 실험 결과 및 Table 6과 같이 본 연구를 통해 대상선박의 전 항해 구간을 포함한 각 배출물의 최대 배출농도가 PEMS 장비의 측정 구간에 포함되는 것을 확인함으로써 PEMS 장비를 사용하여 약 10,000t급의 선박에서의 활용 가능성을 검증하였다.

Table 7과 같이 해양수산부에서 발간하는 해양수산 통계 연보에 따르면 2020년도 기준 국내에 입항하는 연안 및 외항 선박 중 10,000t 이하의 선박이 79% 이상임을 고려하면, 국내 선박 부문 배출계수 산정을 위해 비교적 측정 방법이 간단하고 실용성이 높은 PEMS장비의 활용 가치가 높다고 판단된다.

Table 6. Emission quantities per unit time

	PEMS Measuring Range	Vessel's Maximum Emission
CO	8 % Vol	0.14 % Vol
CO ₂	18 % Vol	6.9 % Vol
NO	0 - 3,000 ppm	2,060 ppm
NO ₂	0 - 1,000 ppm	176 ppm

Table 7. Vessel traffic by ship size (2020)

Ton	(unit : number)			
	~ 3,000	3,000 ~ 10,000	10,000 ~ 50,000	50,000 ~
Number	101,078	39,817	25,114	10,882
Sum	140,895		35,996	

5. 결 론

본 연구는 자동차, 건설장비 등 비교적 소형 엔진에서 발생하는 CO₂, CO, NO_x 등과 같은 대기오염물질 배출량 측정에 주로 사용되는 이동식배출가스측정장비(PEMS)를 사용하여 선박 디젤 엔진에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 측정하고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 엔진 RPM 및 선박의 가감속에 따라 연료 소모량 및 부하 차이로 인해 불완전 연소 등과 같은 연소 상태 차이로 가스상 대기오염물질(CO₂, CO, NO_x) 배출농도의 차이가 발생하는 것을 확인하였고, 특히 RPM을 증가시키는 구간에서의 배출농도가 RPM을 감소시키는 구간보다 전반적으로 높음을 확인하였다.
2. 엔진 제조사에서 발행한 Shop Test Report와 비교하였을 때 50% 부하를 제외하고 전반적으로 높은 차이를 나타냈다. 본 연구 결과로 벤치 테스트의 정확성을 판단할 수 없으나 향후 추가적인 실험을 통해 실제 운항 조건에서 발생하는 대기오염물질 배출량 인증평가 수립의 필요성을 제시하였다.
3. 대상선박의 전 항해 구간에서 배출되는 대기오염물질의 배출농도가 PEMS의 측정 범위 내에 포함되는 것을 확인하였고, 국내에 입항하는 79% 이상의 선박이 10,000t급 이하임을 고려하면, 국내 선박 부문 배출계수 산정을 위해 비교적 측정 방법이 간단하고 실용성이 높은 PEMS를 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Agrawal, H., Q. G. J. Malloy, W. A. Welch, J. W. Miller and D. R. Cocker III(2008), In-use gaseous and particulate matter emissions from a modern ocean going container vessel, Journal of Atmospheric Environment, Vol. 42, pp. 5504-5510.
- [2] Agrawal, H., W. A. Welch, S. Henningsen., J. W. Miller, and D. R. Cocker III(2010), Emission from Main Propulsion Engine on Container Ship at Sea, Journal of Geophysical Research, Vol. 115, D23205.
- [3] Agrawal, H., W. A. Welch, J. W. Miller and D. R. Cocker (2008), Emission Measurement from a Crude Oil Tanker at Sea, Journal of Environmental science & technology, Vol. 42, pp. 7098-7103.
- [4] Cooper, D. A.(2003), Exhaust Emission from Ships at Berth, Journal of Atmospheric Environment, Vol. 37, No. 27, pp. 3817-3830.
- [5] Corbett, J. J.(2002), Emissions from Ships in the Northwestern

- United States, Journal of Environmental Science & Technology, Vol. 36, No. 6, pp. 1299-1306.
- [6] Galbraith, V., L. Curry, and C. Loh(2008), Green Harbours: Hong Kong & Shenzhen, Civic Exchange, 1.
- [7] ME(2021), National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- [8] ME(2022), Clean Air Policy Support System.
- [9] MOF(2021), Statistical Yearbook of Oceans and Fisheries.
- [10] Molit(2022), Total Registered Motor Vehicles.
- [11] Oh, H. K.(2017), <https://news.naver.com/main/read.naver?oid=277&aid=0004002452>.
- [12] Peng, Z., Y. Ge, J. Tan, M. Fu, X. Wang, M. Chen, H. Yin, and Z. Ji(2016), Emission from Several in-use Ships Tested by Portable Emission Measurement System, Journal of Ocean Engineering, Vol. 116, pp. 260-267.
- [13] Song, S.(2014), Ship Emissions Inventory, Social Cost and Eco-efficiency in Shanghai Yangshan Port, Journal of Atmospheric Environment, Vol. 82, pp. 288-297.
- [14] Zhang, F., Y. Chen, C. Tian, D. Lou, J. Li, G. Zhang, and V. Matthias(2016), Emission Factors for Gaseous and Particulate Pollutants from Offshore Diesel Engine Vessels in China, Journal of Atmospheric Chemistry and Physics, Vol. 16, No. 10, pp. 6319-6334.
- [15] Zhang, F., Y. Chen, C. Tian, X. Wang, G. Huang, Y. Fang, and Z. Zong(2014), Identification and Quantification of Shipping Emissions in Bohai Rim, China, Journal of Science of the Total Environment, Vol. 497, pp. 570-577.

Received : 2022. 08. 09.

Revised : 2022. 09. 05. (1st)

: 2022. 09. 29. (2nd)

Accepted : 2022. 10. 28.