



## 선박 중형 디젤 엔진으로부터 배출되는 온실가스 실측을 통한 국내 배출량 산정법에 따른 결과 비교에 관한 연구

박진규<sup>1)</sup> · 임승훈<sup>1)</sup> · 신명환<sup>2)</sup> · 이동인<sup>2)</sup> · 오정모<sup>3)</sup>

목포해양대학교 기관시스템공학과<sup>1)</sup> · 국립환경과학원 교통환경연구소<sup>2)</sup> · 목포해양대학교 기관시스템공학부<sup>3)</sup>

### A Study on a Comparison of Greenhouse Gas Emission Results According to Actual Measurement and Domestic Calculation Method for Medium-sized Diesel Engine of Vessel

Jinkyu Park<sup>1)</sup> · Seunghun Lim<sup>1)</sup> · Myunghwan Shin<sup>2)</sup> · Dongin Lee<sup>2)</sup> · Jungmo Oh<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeonnam 58628, Korea

<sup>2)</sup>Transportation Pollution Research Center, National Institute of Environmental Research, 42 Hwangyeong-ro, Seo-gu, Incheon 22689, Korea

<sup>3)</sup>Division of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Jeonnam 58628, Korea

(Received 13 July 2022 / Revised 11 October 2022 / Accepted 25 October 2022)

**Abstract** : Most cross-border trades are carried out by vessels, and a significant amount of greenhouse gas caused by international transport vessels is emitted into the atmosphere. So, the European Commission and the International Maritime Organization are enacting relevant regulations to reduce the greenhouse gas emissions of vessels. CO<sub>2</sub> in exhaust gas from a 9,196-ton vessel was measured by using PEMS, and calculated by using a domestic CO<sub>2</sub> emission equation. Each of the calculated and measured results was compared to identify the accuracy of the current CO<sub>2</sub> emission equation. As a result of the comparison, the calculated emissions were about 7.67 % lower than the measured values. Thus, it was suggested that calculation equations must be advanced through additional experiments.

**Key words** : Greenhouse gas(온실가스), Air pollution(대기오염), Portable emission measurement system(이동식배출가스측정장비), Vessel(선박), Emission factor(배출계수)

#### Subscripts

CO <sub>2</sub>	: carbon dioxide
L.O.A	: length over all
L.B.P	: length between perpendiculars
Mlb	: moulded breadth
G.T	: gross tonnage
N.T	: net tonnage
P <sub>max</sub>	: maximum explosive pressure
MEP	: mean effective pressure
SMCR	: specified maximum continuous rating

#### 1. 서론

최근 세계 곳곳에서 이상 기후 현상이 빈번하게 발생 하는 것은 현재 우리가 살아가는 지구에 문제가 있다는 것을 시사한다. 이러한 문제에 해답을 찾고 해결하기 위해 1988년 세계 저명한 기후학자들과 각 정부 대표가 함께 IPCC(기후 변화에 관한 정부 간 협의체, Intergovernmental Panel on Climate Change)를 출범하였다. IPCC는 수 년간 인간에 의해 발생하는 온실가스에 의한 기후변화 시물레이션에 대해 연구함으로써 21세기에 살아가는 인간들에 의해 발생하는 기후변화의 속도는 매우 빠르며, 이는 인간 사회와 자연 생태계 및 농업 환경에 막대한 영향을

\*Corresponding author, E-mail: [jmoh@mmu.ac.kr](mailto:jmoh@mmu.ac.kr)

<sup>†</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

Table 1 Status of national greenhouse gas emissions<sup>3)</sup>

(Unit : Million ton)

Year	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Emission	688	697	691	692	693	709	727

미칠 수 있다고 발표하였다. 우리가 이러한 위기를 극복할 수 있는 유일한 해결책은 CO<sub>2</sub> 배출량을 지금보다 대폭 감소시켜 기온 상승폭을 산업화 이전의 수준 대비 1.5 °C 미만으로 낮추는 것이다.<sup>1)</sup>

오늘날 국가간 무역은 90 % 이상이 해상을 통해 이루어지고, 2012년 국제수송 선박에 의한 온실가스 배출량은 약 796백만 톤으로 해당 년도의 지구 전체 온실가스 배출량의 2.2 %에 해당한다.<sup>2)</sup> 또한, Table 1과 같이 매년 환경부에서 발표하는 최근 7개년 동안의 우리나라 총 온실가스 배출량 평균보다 많은 수준이다.

1992년 브라질 리우회의에서 온실 가스 배출 증가로 인한 지구 온난화 현상을 막기 위해 기후 변화 협약이 채택되었고, 그로부터 5년 후 일본 교토에서 교토 의정서를 발행하여 IMO(국제해사기구, International Maritime Organization)와 협력하여 기존의 몬트리올 의정서에 의해 규제 받지 않은 선박용 연료유에서 배출되는 온실가스 배출을 제한하고 감소하기 위한 정책을 마련하도록 위임하였다.<sup>4)</sup>

국제해운 온실가스 배출을 저감하겠다는 비전을 가지고 21세기 내에 가능한 빠른 온실가스 배출을 단계적으로 폐지하기 위한 목표로 IMO에서는 2018년 72차 MEPC(해양환경보호위원회, Marine Environment Protection Committee) 회의를 통해 IMO GHG Initial Strategy를 발표하였다. 2050년까지 전체 선박의 연간 온실가스 배출량을 2008년 대비 50 % 이상 감축을 목표로 설정함으로써 해운 분야에서의 온실가스 저감을 위한 전기를 마련하였다.<sup>5)</sup>

2021년 07월 14일, European Commission(유럽연합 집행위원회)은 EU(유럽연합, European Union)의 총 온실가스 배출량을 2030년까지 1990년 대비 55 % 감소하기 위해 55개의 제안서에 대한 “Fit for 55”를 발표하였다. 이 규정에 따라 EU 회원국들은 2025년까지 기존의 Bunker-A, MGO 등과 같은 연료가 아닌 LNG 연료의 가용성을 높이고, 2030년까지 AMP(육상전원공급장치, Alternative Maritime Power Supply) 공급을 EU 회원국의 핵심 항구에 확대해야 한다. 또한, ReFuelEU Aviation & Maritime 규정을 제안하여 다가오는 2050까지 선박에서 사용되는 연료 중 지속가능한연료의 의무혼합비중이 75 % 이상 구성되도록 제한하였다.<sup>6,8)</sup>

Table 2 Set for the use of sustainable fuels

Year	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Aviation	5 %	5 %	20 %	32 %	38 %	63 %
Maritime	2 %	6 %	13 %	26 %	59 %	75 %

매년 온실가스 배출 감소량 파악을 위해서는 해운 부문의 정확한 배출량을 산정하고 목록화 하는 것이 선행되어야 한다.

환경부의 온실가스종합정보센터에서 발표한 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」에 따르면 현재 우리나라의 해운분야에서 발생하는 온실가스 중 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정하기 위해 연료소모량과 배출계수를 기준으로 한 간접 산출방식을 사용하여 배출량을 산정하고 있다.<sup>9)</sup> 본 연구에서는 이러한 간접 산출 방식에서 사용되는 배출계수의 신뢰성을 검증하기 위해 실 운항 선박에서 배출되는 CO<sub>2</sub>를 PEMS(이동식배출가스측정장비, Portable Emission Measurement System)를 사용하여 직접 측정하고, 그 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 관련연구

박준홍 등<sup>10)</sup>은 자동차 부문에서 PEMS를 이용하여 실제로 주행에서 발생하는 대기오염물질을 직접 측정하기 위해 차대동력계에서 CVS(Constant Volume Sampling)와 PEMS를 사용하여 배출가스를 측정하고 신뢰성을 평가하였다. 다양한 운전 조건에서 발생하는 배출가스를 측정하고 비교 결과 양호한 상관성이 도출됨을 확인하였다.

최상진 등<sup>11)</sup>은 IPCC에서 제공하는 가이드라인의 유류통계에 따라 연료소비량과 배출계수를 사용하여 배출량을 산정하는 Tier 1 방법으로 선박에 의한 온실가스 배출량을 산정하였다. 한국석유공사에서 제공하는 해운부문 및 어업부문에 공급되는 유류량을 이용하고, IPCC의 1996 및 2006에서 제공하는 배출계수를 적용하여 산정된 각 배출량을 비교하였다. 1996 IPCC 배출계수를 적용한 온실가스 배출량은 2006 IPCC 배출계수를 적용한 온실가스 배출량 대비 약 1.64 % 정도 낮게 산정되었다. 이는 두 배출계수의 탄소 산화계수가 달라 non-CO<sub>2</sub> 배출계수 차이에 의한 것으로 판단하였다. 연료소비량과 배출계수를 통한 산정법은 국가 및 각 부문별 온실가스 배출총량을 산정하는데 유용하나, 실제 선박의 엔진 제원, 운항 형태 등을 고려한 활동 등이 반영된 Tire 3 수준의 상향식 접근방법의 인벤토리 작성을 제안하였다. 또한 선박 부문의 온실가스 배출량 산정을 위한 시스템 개발에 관한 지속적인 연구의 필요성을 제시하였다.

Khan 등<sup>12)</sup>은 대형 선박의 엔진으로부터 발생하는 대기오염물질을 측정하기 위해 기존에 사용되는 SMM (Simplified Measurement Method)은 높은 비용이 요구되므로, 주로 상용 디젤 엔진에서 발생하는 대기오염물질 측정을 위해 사용되는 PEMS를 이용하여 대형 선박으로의 적용 가능성을 검토하였다. SMM 장비로 HORIBA PG-250을 사용하고 PEMS 장비로 SEMTECH-DS를 사용하여 그 결과를 비교하였다. 세 차례의 실측을 통해 두 장비의 CO<sub>2</sub> 배출량의 오차율은 0.6 %, Two-tailed, Paired t-test 결과 95 %이상의 신뢰성을 보임으로써, PEMS 장비를 통해 대형 선박의 엔진으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub>를 신뢰도 있게 측정가능함을 제시하였다.

Jiang 등<sup>13)</sup>은 엔진의 제원 및 부하, 배출계수를 사용한 배출 계산식 AIS-Based Emission Model과 Sensors사의 SEMTECH-DS 장비를 통해 각각 CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> 및 THC 배출량을 산출하고 결과를 비교하였다. 모든 배출물에서 실측 된 배출량보다 AIS-Based Emission Model을 통해 계산된 배출량이 낮게 산출되었다. 측정 장비를 사용하지 않고 계산식을 사용하여 보다 정확한 배출량을 산정하기 위해서는 기존의 계산식에 조류 등 외적인 요인을 포함할 수 있는 보정 계수를 적용해야 함을 제시하였다. 또한, 선박의 운항 조건을 접안, 입출항 및 정속항해로 나누어 각각 산정식을 차별화해야함을 제안하였다.

### 3. 실험 방법

PEMS를 사용하여 목포해양대학교에서 보유 및 운영하고 있는 실습선을 대상 선박으로 CO<sub>2</sub>, CO, THC 배출량을 실측하고, 온실가스종합정보센터에서 제공하는 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」에 명시되어 있는 산정식으로 계산한 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교하였다.

#### 3.1 대상 선박

목포해양대학교에서 2018년도에 건조하여 운영중인 9,196톤의 실습을 목적으로 하는 선박을 대상으로 하였다. 전장 133 m, 폭 19.4 m의 선박으로 총 239명의 인원을 수용할 수 있다. 대상 선박의 상세 제원은 Table 3과 같다.

주 추진 엔진으로 MAN B&W사의 HYUNDAI-MAN

Table 3 Detailed ship specification

L.O.A	133.00 m	G.T	9,196 ton
L.B.P	120.00 m	N.T	2,758 ton
Mlb	19.40 m	Speed	17.66 kn
Mld	11.05 m	Complement	239 persons

Table 4 Machinery specification

Machinery	Specification
Type	Hyundai-Man B&W 6S40ME-E9.6-LP SCR
Output	6,618 kW / 146 rpm(at SMCR)
P <sub>max</sub>	185 bar
MEP	20.4 bar(at SMCR)

Table 5 Fuel oil specification

Detail	Specification	
	Bunker A	Diesel Oil
Type		
Gravity API@60°F, SG@15/4 °C	0.8673	0.8329
Viscosity Kin cSt@ 40 °C	4	2.7
Flash Point (°C)	82	52
Sulfur (%)	0.24	0.001
Water & Sediment (%)	0.05	Trace
Carbon Ratio (%)	86.56	86.56

B&W 6S40ME가 탑재되어 있고, 최대 출력은 146 rpm에서 6,618 kW를 낼 수 있다. 또한, 추진을 위한 Propeller로 일반적인 상선과는 달리 CPP(가변 피치 프로펠러, Controllable Pitch Propeller)가 장착되어 있어, 피치를 조절하여 선박의 추진 없이 일정한 RPM에서 공회전이 가능하다.

측정 기간 동안 주 추진 엔진에 사용된 연료는 경유유분 70 %와 Bunker C 유분 30 % 혼합유인 경질중유(Bunker A)를 사용하였다. 대상 선박의 주 추진 엔진에 대한 상세 사양은 Table 4와 같고, Table 5에 사용된 연료 유 성상과 자동차에 사용되는 일반적인 경유의 성상을 비교하여 나타내었다.

#### 3.2 이동식배출가스측정장비 사양

대상 선박으로부터 배출되는 배기가스 중 CO<sub>2</sub>를 측정하기 위해 주로 차량 등의 배출가스 인증평가에 사용되는 Sensors 사의 SEMTECH DS+ 장비를 사용하였다. NDIR(Non-Dispersive Infrared Detector) 방식을 통해 배기가스 중의 CO<sub>2</sub> 및 CO 배출 농도를 측정할 수 있고, 또한 FID(Flame Ionization Detector) 방식으로 THC 농도를 측정할 수 있다. 이외의 측정 장비의 상세 사양은 Table 6과 같다.

장비의 오차를 최소화하기 위해 측정 전·후로 KTL (한국산업기술시험원, Korea Testing Laboratory)에서 『환경분야 시험·검사 등에 관한 법률』에 따라 인증 받은 교정가스(CO<sub>2</sub>: 12.33 %, CO: 4.74 %, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>: 987 ppmC)를 사용하여 측정장비를 교정하였다.

Table 6 Measurement device specification

Component	CO <sub>2</sub>	CO	THC
Maximum range	18 % vol	8 % vol	30,000 ppmC
Zero drift (over 4 hrs)	≤ ±0.1 % vol	≤ ±50 ppm	±1 % of full scale of selected range over 1 hour
Span drift (over 4 hrs)	2 % of span value or ≤ ±0.1 % vol, whichever is greater	2 % of span value or ≤ ±50 ppm, whichever is greater	±2 % of full scale of selected range over 8 hour
Accuracy	< ±2 % of Point or ≤ ± 1 % of Span, Whichever is larger		-
Precision	≤ 1 % of full scale of span		-

### 3.3 연료유량계 사양

실시간 연료 유량 데이터 측정을 위해 선박에 탑재되어 있는 VZFA ii 40 FL 130/25 모델의 연료 유량계를 사용하였다. VZFA ii 40 FL 130/25의 측정 범위는 225-9,000ℓ/h로, 225ℓ 이하 연료 유량 측정을 위해 UF-7000 Series 모델의 초음파 유량계를 별도로 설치하여 데이터를 수집하였다.

VZFA ii 40 FL 130/25 모델의 연료 유량 데이터는 선박에 탑재되어 있는 ACONIS(선박 감시 제어 시스템, Advanced Control and Integrated System)으로부터 취득할 수 있으며, UF-7000 Series 모델의 유량 데이터는 DAQ (Data Acquisition System)를 구축하여 수집하였다.

Table 7 Flowmeter specifications

VZFA ii 40FL 130/25	
Type	Rotary piston flowmeter
Measuring range	225-9,000ℓ/h
Max. permissible error	±0.5 % of actual value
Repeatability	±0.1 %
UF-7210 Series	
Type	Ultrasonic flowmeter
Measuring range	0-5,000 kg/h
Accuracy	±1.0 % after calibration
Repeatability	±0.2-0.5 %
Linearity	0.5 %

### 3.4 이동식배출가스측정장비 설치

대부분 선박의 주 추진 엔진의 배기가스 통로에는 「NO<sub>x</sub>

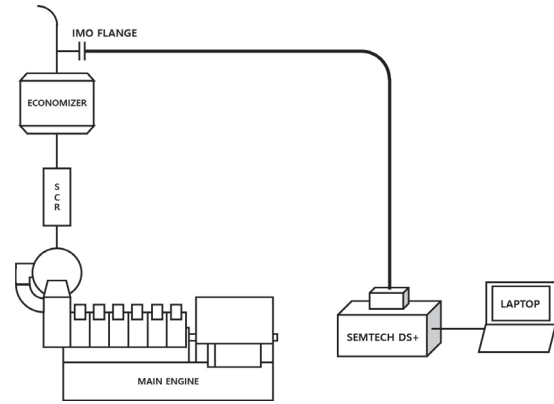


Fig. 1 PEMS connection layout

Technical Code 2008」에 명시된 규정을 충족하고, 주 추진 엔진으로부터 배출되는 NO<sub>x</sub>를 측정하기 위한 IMO Flange가 설치되어 있다. 대상 선박의 배기가스 통로에도 IMO Flange가 설치되어 있어, Fig. 1과 같이 PEMS 장비의 Sampling Line을 배기가스 통로에 연결하여 대상 선박의 주 추진 엔진으로부터 배출되는 CO<sub>2</sub>를 실시간으로 측정하였다.

해당 선박의 엔진은 IMO Tier 2를 만족하여NECA (NO<sub>x</sub> Emission Control Area)를 항해하는 경우를 제외하고 통상적으로 SCR을 사용하지 않으며, 실측 기간에도 사용하지 않았다.

### 3.5 실험 조건

선박의 엔진과 구동 장치의 연결 방식은 일반적인 자동차와 차이가 있다. 자동차의 경우 가속 페달을 사용하여 엔진 RPM을 증가시키고 감속 기어를 통해 구동축을 회전시키나, 선박의 경우 엔진과 Propeller가 감속 기어 없이 직접 연결되어 있다. Telegraph라 불리우는 가·감속 Lever를 통해 주 추진 엔진의 RPM과 전·후진을 제어한다. Telegraph를 사용하여 Table 8과 같이 전·후진

Table 8 Example of telegraph setting

Detail	RPM (rpm)		Pitch (%)		Speed (kn)	
	Ahead	Astern	Ahead	Astern	Ahead	Astern
Dead slow	73	110	50	-40	5.5	3.6
Slow	88	121	65	-50	8.0	5.3
Half	97	127	75	-55	10.5	7.3
Full	116	135	83	-62	13.5	8.7
Navigation full	141	141	97	-65	17.7	9.8



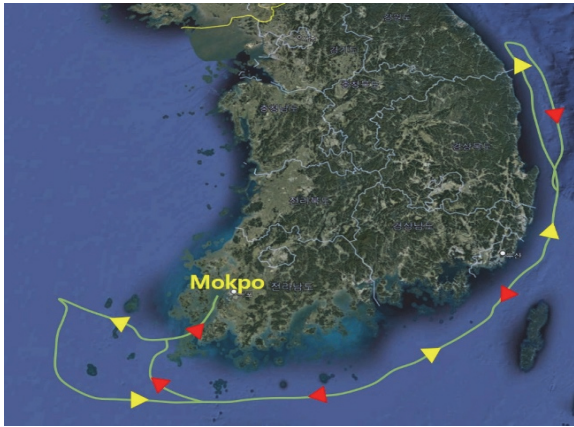


Fig. 2 Navigation area during experiment

Table 9 Measuring time for each telegraph mode

Mode	Dead slow	Slow	Half	Full	Navigation full
Time(s)	1,570	272	3,466	3,313	3,279

시 각각 Dead Slow, Slow, Half, Full, Navigation Full 단계로 RPM을 조절할 수 있다. 일반적인 중대형 선박의 경우 FPP(고정 피치 프로펠러, Fixed Pitch Propeller)를 사용하므로 프로펠러 날개 각도를 변경시킬 수 없으나, 대상 선박의 경우 가변 피치 프로펠러가 탑재되어 있어 프로펠러의 날개 각도를 변경함으로써 일정 속도 범위에서 RPM 변동 없이 속도 제어가 가능하다.

Fig. 2와 같이 목포항 도선구를 벗어나 국내 연안을 항해하고 목포해양대학교 실습선 부두로 돌아오는 항로에서 대상 선박의 주 추진 엔진으로부터 배출되는 배기가스 중의 CO<sub>2</sub> 배출량을 측정하였다.

Table 9와 같이 한 시점에서 측정이 아닌 Dead Slow ~ Navigation Full의 각 단계별로 일정 기간 동안 지속적으로 측정함으로써 데이터의 재현성을 확보하였으며, 측정을 위해 별도의 운항 조건을 추가하지 않고 평소 운항 조건에서 실측을 진행하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

대상 선박의 국내 연안 항해 구간에서 주 추진 엔진의 Dead Slow ~ Navigation Full에 해당하는 RPM에서 각각 배출되는 CO<sub>2</sub> 배출량을 PEMS를 사용하여 측정하였다. CO<sub>2</sub> 배출량 측정 구간에서의 연료 소모량 데이터를 기반으로 우리나라 환경부 온실가스종합정보센터에서 제공하는 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」에 명시된 CO<sub>2</sub> 배출량 계산법과 배출계수를 적용하여 계산된

배출량과 비교하였다.

#### 4.1 측정 결과

Telegraph 모드별 % 단위의 CO<sub>2</sub> 배출 추이는 Fig. 3과 같다. Navigation Full → Dead Slow로 RPM이 낮아질수록 CO<sub>2</sub> 배출 농도 또한 5% → 1.7%로 단계적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 순간적으로 RPM의 변동이 있는 구간에서 CO<sub>2</sub> 배출 농도도 순간적으로 급격하게 감소하거나 증가한 후 일정한 배출 농도를 나타내는 것을 확인하였다.

특히 Dead Slow 모드 구간 중 부두에 접안하기 위해 급격히 RPM을 증가시키는 시점에서 CO<sub>2</sub> 배출 농도가 급격히 증가한다.

실시간 연료소모량과 배출가스 중의 CO<sub>2</sub>, CO 및 THC 배출 농도를 사용하여 카본 밸런스(Carbon Balance)법으로 배기가스 유량을 계산하고,<sup>14)</sup> % 단위의 CO<sub>2</sub> 배출량을 kg/tonne<sub>fuel</sub> 단위의 배출량으로 환산하여 Table 10과 같은 결과를 도출하였다.

연료 소모량당 CO<sub>2</sub> 배출량은 Half, Full, Slow, Navigation full, Dead Slow 순으로 높으나, 그 차이는 최대 0.48% 정도로 매우 미미하다. 이는 CO<sub>2</sub>의 경우 연료 중 탄소 성분의 완전연소로 인해 생성되는 연소 생성물로, 선박용 중대형 디젤엔진의 경우 연소 효율이 매우 높아 대부분의 연료가 완전연소되어 연료 중 탄소 성분이 대부분 CO<sub>2</sub> 상태로 배출되기 때문이다.<sup>12,15-17)</sup>

따라서, 디젤 엔진에서 CO<sub>2</sub> 배출량은 연료 소모량에 선형으로 비례하여 배출되나, 엔진의 연식, 연소 상태 등에 의해 일부 차이가 발생할 수 있을 것으로 사료된다.<sup>18)</sup>

측정 기간 동안 총 배출된 CO<sub>2</sub>는 총 4,591.884 kg이고, 각 구간별 측정 시간을 가중치로 적용하여 전체 배출량을 산출한 결과는 3,153.79 kg/tonne<sub>fuel</sub>이다.

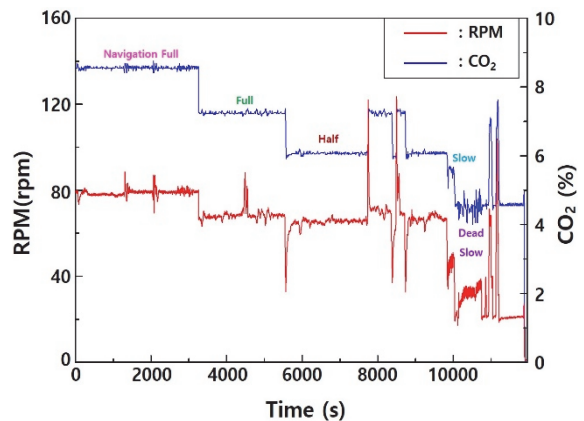


Fig. 3 Measuring result

Table 10 Result of measurement

Mode	Total emission (g)	Total fuel consumption (kg)	Fuel specific emission (kg/tonne <sub>fuel</sub> )
Dead slow	131,715.32	41.85	3,147.32
Slow	28,676.18	9.10	3,151.23
Half	685,711.58	216.82	3,162.58
Full	1,150,130.02	364.25	3,157.62
Navigation full	2,595,651.74	824.07	3,149.80
Total	4,591,884.84	1,456.09	3,153.79

#### 4.2 국내 CO<sub>2</sub> 배출량 산정 방식 적용 결과

현재 우리나라의 연안 여객선, 연안 화물선과 같은 해운부문에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량 산정을 위해 에너지산업 부문에 사용되는 배출계수와 산정식을 동일하게 적용하도록 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」에 명시되어있다. 에너지산업 부문의 CO<sub>2</sub> 배출량 산정식은 아래와 같다.<sup>9)</sup>

$$E = \sum_{ij} \left[ (TA_{ij} - NA_{ij} \times FCS_{ij}) \times 41.868 \times CF_i \times EF_i \times OF_i \times \frac{44}{12} \times 10^{-3} \right] \quad (1)$$

여기서,

E = CO<sub>2</sub> 배출량(x10<sup>3</sup> ton)

TA : 총 연료 사용량(x10<sup>3</sup> ton)

NA : 비연료 사용량(x10<sup>3</sup> ton)

FCS : 탄소물입률

41.868 : Joule-TOE 환산계수(TJ/10<sup>3</sup> ton)

CF : 전환계수(순발열량/총발열량)

EF : 배출계수(t C/TJ)

OF : 산화율

44/12 : 탄소기준 배출량을 이산화탄소 기준으로 전환 (kg CO<sub>2</sub>/kg CO)

i : 연료 유형

j : 부문

2007년 이후 탄소배출계수는 기존의 1996 IPCC GL에서 제시하는 기본 배출계수가 아닌 국가고유 배출계수를 사용한다. 유종별 CO<sub>2</sub> 배출계수는 Table 11과 같고, 대상 선박은 주 추진 엔진의 연료로 Bunker A를 사용하여 배출계수 20.657tC/TJ를 적용하였다.

이외에 연료소비량과 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」에 명시되어 있는 산정식에 필요한 인자들은 Table 12와 같고, 모드별 연료소비량은 Table 10에 나타

Table 11 CO<sub>2</sub> emission factor(tC/TJ)

Fuel	1996 IPCC	2017
Bunker A	20.53	20.657
Bunker C	21.1	21.929
Diesel oil	20.2	20.111

Table 12 Factor for calculation

Conversion factor	Oxidation quotient
0.933	99.0 %

Table 13 Result of calculation

	Total emission (g)	Total fuel consumption (kg)	Fuel specific emission (kg/tonne <sub>fuel</sub> )
Dead slow	122,583.83	41.85	2,929.12
Slow	26,655.03	9.1	2,929.12
Half	635,092.63	216.82	2,929.12
Full	1,066,933.36	364.25	2,929.12
Navigation full	2,413,803.08	824.07	2,929.12
Total	4,265,067.93	1,456.09	2,929.12

낸 Total Fuel Consumption을 사용하였다.

「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」의 해운부문의 CO<sub>2</sub> 배출량 산정식을 통한 대상 선박의 측정 기간 동안 발생한 계산된 모드별 CO<sub>2</sub> 배출량은 Table 13과 같다. 계산식 과정상 계산된 연료 소모량당 CO<sub>2</sub> 배출량은 모드에 상관없이 같은 값을 나타내고, 측정 기간 동안 소모된 연료 소모량을 사용하여 계산된 CO<sub>2</sub> 배출량은 4,265 kg 이고, 시간 가중치를 고려한 평균 배출량은 2,929.12 kg/tonne<sub>fuel</sub>이다.

#### 4.3 결과 비교

각 모드별로 측정된 g/s 단위의 CO<sub>2</sub> 배출량과 연료 소모량을 사용하여 계산된 값과의 차이는 Fig. 4와 같다. ① ~ ⑤ 구간은 각각 Navigation Full, Full, Half, Slow, Dead Slow를 나타낸다. 전 구간에 대해서 약 7% 정도의 배출량 차이를 보이며, 측정된 CO<sub>2</sub> 배출량이 더 높게 나타났다. 특히, 배출량이 가장 높은 ① 구간에서 배출량의 절대값 차이는 평균 55.71 g/s 정도다.

경향성 측면에서는 두 방법의 배출량은 아주 유사한 배출 경향을 보이고, ③과 ⑤ 구간에서 순간적으로 RPM을 급변하는 시점에서 Peak를 형성하는 양상이 비슷하게 나타났다.

같은 기간 동안에 g 단위의 측정된 CO<sub>2</sub> 배출량과 계산된 CO<sub>2</sub> 배출량을 Fig. 5와 같이 비교 결과, 모든 구간에서 측정된 CO<sub>2</sub> 배출량이 계산된 CO<sub>2</sub> 배출량보다 더 많았다. 특히 Half 모드에서 약 7.97 % 정도로 가장 높은 오차율을 보이며, Dead Slow 모드에서 7.45 % 정도로 가장 낮은 오차율을 나타냈다.

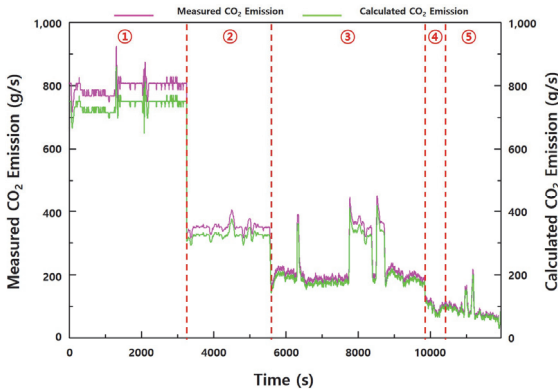


Fig. 4 Comparison of real time emission results

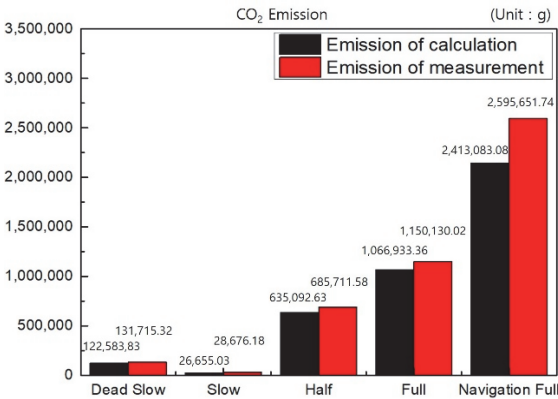


Fig. 5 Comparison of total emission results for each mode

Table 14 Comparison of each fuel specific emissions

	Calculated result (kg/tonne <sub>fuel</sub> )	Measured result (kg/tonne <sub>fuel</sub> )	Error percentage (%)
Dead slow	2,929.12	3,147.32	7.45
Slow		3,151.23	7.58
Half		3,162.58	7.97
Full		3,157.62	7.79
Navigation full		3,149.80	7.53
Total	2,929.12	3,153.79	7.67

두 결과에 따른 연료 소모량당 CO<sub>2</sub> 배출량의 오차율은 Table 14와 같다. 각 모드별로 7.45-7.97 % 정도의 오차율을 나타내고, 각 모드별로 측정 시간 가중치를 적용하여 도출한 총 배출량에서 약 7.67 %의 오차율을 나타냈다.

## 5. 결론

편리성과 경제성 등의 이유로 현재 해운 부문을 포함 한 많은 분야에서 온실가스 배출량 산정을 위해 직접 측정이 아닌 배출계수와 연료소모량을 이용한 계산 방식을 사용하고 있다. 본 연구는 현재 국내에 해운 부문의 온실가스 배출량 산정식을 사용하여 계산한 CO<sub>2</sub> 배출량과 PEMS를 사용하여 실제 측정된 배출량을 비교함으로써 산정식의 신뢰성을 검증하는데 목적을 두었다.

선박은 운항 기간 중 대부분을 엔진의 부하가 높은 Navigation Full 모드에서 운항을 한다. 측정된 CO<sub>2</sub> 배출량과 계산된 값과의 차이는 약 7 % 정도이나, 부하가 높은 구간에서는 절대값의 큰 차이를 나타내므로 향후 지속적인 실측을 통해 현재 사용하고 있는 산정식의 배출계수를 현실에 맞게 고도화할 필요가 있다.

- 1) PEMS를 사용하여 9,196톤급 실습선을 대상 선박으로 하여, 주 추진 엔진으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 직접 측정하였다.
- 2) 주 추진 엔진의 Telegraph 기준 Dead Slow ~ Navigation Full까지 전 구간에서 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 측정하고, 연료 소모량을 활용하여 최종적으로 kg/tonne<sub>fuel</sub> 단위의 배출량을 도출하였다.
- 3) 「2019 국가 온실가스 인벤토리 보고서」에 명시된 방법을 통해 측정 기간 동안의 연료 소모량을 활용하여 CO<sub>2</sub> 배출량을 계산하였고, 이를 실측한 CO<sub>2</sub> 배출량과 비교 분석하였다.
- 4) 두 방법에서 각 모드별 배출량은 7.45-7.97 % 정도의 오차율을 나타냈고, 측정 시간 가중치를 적용하여 도출한 총 배출량에서 약 7.67 %의 오차율을 나타냈다.
- 5) 후속 연구를 통해 다양한 조건에서 운용되는 선박의 주 추진 엔진으로부터 발생하는 CO<sub>2</sub>를 측정하고 결과를 비교분석함으로써 기존의 산정식을 보다 고도화할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다.(NIER-2021-03-02-002)

## References

- 1) Institute for Basic Science, IBS Research, 16th

- Issue, 2021.
- 2) J. H. Kim, J. H. Kim and J. Y. Lee, “Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships,” Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea, Vol.55, No.2, pp.24-27, 2018.
  - 3) Statistics Korea, National Greenhouse Gas Statistics, [http://www.index.go.kr/smart/mbl/chart\\_view.do?idx\\_cd=1464](http://www.index.go.kr/smart/mbl/chart_view.do?idx_cd=1464), 2022.
  - 4) Y. C. Lee and H. W. Doo, “A Study on the IMO Regulations regarding GHG Emission from Ships and its Implementation,” Journal of Navigation and Port Research, Vol.35, No.5, pp.371-380, 2011.
  - 5) IMO, Initial IMO Strategy of Reduction of GHG Emissions from Ships, Resolution MEPC 304(72), 2018.
  - 6) Korea Energy Economics Institute, “The Main Contents of the EU ‘Fit for 55’ Package,” World Energy Market Insight, Vol.21, No.15, 2021.
  - 7) European Commission, Questions and Answers – Sustainable transport, infrastructure and fuels, 2021.
  - 8) European Commission, Regulation of the European Parliament and of the Council on the Use of Renewable and Low-Carbon Fuels in Maritime Transport and Amending Directive 2009/16/EC, 2021.
  - 9) Greenhouse Gas Inventory and Research Center of Ministry of Environment, National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea, 2019.
  - 10) J. H. Park, J. T. Lee, S. M. Kim, J. S. Kim and K. W. Ahn, “A Study on the Emission Characteristics of Korean Light-duty Vehicles in Real-road Driving Conditions,” Transactions of KSAE, Vol.21, No.6, pp.123-134, 2013.
  - 11) S. G. Choe, S. G. Park, Y. G. Jang, H. G. Lee, U. H. Hwang and C. G. Bong, “A Study on the Greenhouse Gas Emission from Ships in Korea,” Journal of Korean Society of Transportation, Vol.28, No.6, pp.33-42, 2010.
  - 12) M. Y. Khan, S. Ranganathan, H. Agrawal, W. A. Welch, C. Laroo, J. W. Miller and D. R. CockerIII, “Measuring in-use Ship Emissions with International and U.S. Federal Methods,” Journal of the Air & Waste Management Association, Vol.63, No.3, pp.284-291, 2013.
  - 13) H. Jiang, D. Peng, Y. J. Wang, and M. L. Fu, “Comparison of Inland Ship Emission Results from a Real-World Test and an AIS-Based Model,” Atmosphere, Vol.12, No.12, p.1611, 2021.
  - 14) H. R. Kim, M. H. Im, G. C. Seo, S. B. Choe, H. B. Ju, J. S. Kim, I. C. Park, S. W. Kim, J. K. Park, T. H. Lim, S. H. Lim and J. M. Oh, A Study on the Improvement Avenue Preparation of Air Pollutant Emission Factors for Ships by Sector, National Institute of Environmental Research, 2021.
  - 15) M. S. Jang, E. C. Kim, I. S. Moon, J. W. Lee and O. S. Kwon, “CO<sub>2</sub> Emission from Carbon of Marine Fuel Oil in New Ships,” Journal of the Korean Society for Marine Environment Society, Vol.9, No.3, pp.148-153, 2006.
  - 16) J. B. Heywood, International Combustion Engine Fundamentals, McGraw-hills, New York, pp.138, 1988.
  - 17) H. K. Lee, J. G. Ryu and Y. T. Kim, “The Correlation Analysis of CO<sub>2</sub> Emission and Fuel Economy for LPG Vehicles,” KSAE Fall Conference Proceedings, pp.613-618, 2008.
  - 18) H. K. Kim, C. H. Jeon and Y. J. Chang, “A Study on the Emission Characteristics in 4 Stroke Large Propulsion Diesel Engine,” Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.38-45, 2001.