

MGO를 적용한 선박용 중유 보일러의 배기 배출물 특성 연구

이 태 호[†]

[†]국립부경대학교(교수)

A Study on Exhaust Emission Characteristics of Marine Heavy Fuel Oil Boilers for Ships Applying MGO

Tae-Ho LEE[†]

[†]Pukyong National University(professor)

Abstract

This study conducted a comparative combustion test by applying MGO to a marine heavy fuel oil boilers for ships using HFO to respond to the increasingly strengthened exhaust emission regulations by the International Maritime Organization (IMO). As a result of applying the standard test method under the same surrounding environment and external conditions, the actually measured nitrogen oxide decreased by approximately 51.06% from 122.08 ppm for HFO to 59.75 ppm for MGO, and sulfur oxide decreased by approximately 88.08% from 110.53 ppm for HFO to 13.17 ppm for MGO. Referring to the actual measured oxygen content suggested in the previous study, nitrogen oxide calculated with 4% based on the standard oxygen concentration decreased by approximately 49.7% from 140.83 ppm for HFO to 70.78 ppm for MGO, and sulfur oxide decreased by approximately 89.3% from 127.28 ppm for HFO to 13.65 ppm for MGO. This means that although even simple switching between marine fuel oils that satisfy ISO-8217 is effective in reducing exhaust emissions, there are limits to responding to the increasingly strengthened emission regulations by IMO, and therefore it is necessary to actively utilize the introduction of various eco-friendly alternative fuel technologies in the future to address them.

Key words : Exhaust emissions, Marine boiler, ISO-8217, Heavy fuel oil, MGO, MEPC, NOx

I. 서 론

국제항해선박은 Bunker-C와 같은 저품질 연료의 예열(heating)이나 화물 관리에 필수적인 열원의 공급에 증기(steam)를 주로 사용하며, 이를 위해서는 선박 용도에 적합한 보일러가 필수적으로 가동되어야 한다(Lee, 2020). 특히 선박의 관리를 위해 가동되는 보일러에 공급되는 연료 또한 대부분 저품질 연료에 의존하고 있어 장기적으로는 보일러에서 발생하는 배출물의 저감을 위한 연구

가 필요할 것으로 판단되지만 이와 관련된 연구는 미흡한 실정이다. 또한 Bunker-C 계열의 선박용 저질 중유는 낮은 품질에 기인하는 배출가스가 선박기인 대기오염의 주요 원인으로 인식되고 있다. 이에 국제해사기구(IMO)에서는 선박에서 발생하는 대기오염물질의 심각성을 인지하고 배기 배출물을 규제하기 위해 황함유량이 낮은 연료를 사용하거나 질소산화물(NOx) 허용치를 만족할 수 있는 엔진의 장착을 의무화하고 있다(Choi et al, 2013). 해운 산업이 발전함에 따라 선박에

[†] Corresponding author : leeth@pknu.ac.kr, 051-629-5974

서 기인하는 배기 배출물의 규제 정책과 관련된 파생 효과는 지속적으로 논의되고 있다(Kim et al, 2024). 또한 2020년을 기점으로 세계의 석유 생산량은 급격히 감소할 것으로 보고되고 있어(Lee and Kang, 2023). 향후 자원 고갈에 대한 에너지 부족과 화석 연료에 기인하는 심각한 대기 오염 문제 해결이 더욱 중요하게 인식되고 있는 시점이다(Lee, 2020). 이에 IMO에서는 미래 연료로 5가지 대체 연료(LNG, 수소, 암모니아, 메탄올, 바이오연료)를 제안하고 있지만(IMO, 2024), 선박은 공간적인 제한과 기존 구축되어 있는 세계 시스템의 구조적 변경이나 개조 등을 시도하기 어려운 한계가 존재하게 된다(Concawe, 2019).

보일러의 배기 배출물 규제에 대응하기 위해 보고된 선행 연구 동향을 살펴보면, Bunker-C 연료를 사용하는 선박용 보일러에 25%의 물과 유화제를 혼합한 유화연료유를 적용하여 배기 배출물 저감을 시도한 사례가 있으며(Lee et al, 2021), 1.5톤급 선박용 보일러의 SCR 시스템을 적용하여 수치해석을 시도한 사례가 있다(Lee et al, 2022).

그러나 상기 사례는 연료의 전처리 과정을 거쳐 생산된 친환경 대체 연료를 적용하였거나 배기 시스템 자체의 개조를 통해 배출 규제를 대응하고자 수행된 사례이므로 저장 안정성 및 보일러 시스템의 구조가 복잡해지는 한계가 있어 본 연구와는 차이가 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 주위 환경과 운전 조건이 동일한 상태에서 Bunker-C 계열 중유를 사용하는 선박용 보일러에 저유황유인 MGO(Marine Gas Oil)로 전량 전환하여 연소시험을 실시하고 배기 배출물 저감 특성을 분석하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. HFO 및 MGO의 물성치 분석

선박 연료유 품질기준인 ISO-8127을 만족하는 두 연료(HFO, MGO)의 물성치를 분석하여 <Table

1>에 비교 제시하였다(K-Petro, 2019, K-Petro, 2024). 해당 HFO는 Bunker-C 계열의 연료로 분류되는 180cSt 등급의 황함유량 0.3% 이하의 저유황유이다. 밀도는 917.1kg/m³ 이며 동점도(50℃)는 60.61cSt, 인화점은 172℃ 수준이다. 실제 황함유량은 0.28% 로 출하기준을 충분히 만족하는 연료임을 알 수 있다. 유색은 매우 짙은 갈색을 띄며 상온에서는 높은 점도로 인해 바로 사용이 어렵고 별도의 예열기를 이용해 적절한 수준의 온도로 가열하여 보일러로 공급되어야 한다.

선박용 저유황 경유인 MGO는 황함유량 0.03% 이하 등급이나 실제 황함유량은 0.0008% 수준으로 매우 우수한 품질이며, 밀도는 840.8kg/m³, 동점도는 3.011cSt 수준이다. 인화점은 67.5℃ 으로 ISO-8217의 선박유 품질기준인 60℃ 이상은 충분히 만족하는 등급으로 HFO와는 큰 차이를 보인다. 전반적으로 육상용 차량 경유와 거의 유사한 물리적 특성을 가지고 있으나 과세 부과 및 연료 종류의 구분을 위해 MGO의 유색은 적색으로 출하되고 있다(Lee and Kang, 2023). [Fig. 1]은 실험에 적용된 두 연료를 육안으로 비교한 것이다.

<Table 1> Comparison of fuel oil properties

List	Specification		Unit
	HFO	MGO	
Density	917.1	840.8	kg/m ³
Flash point	172.0	67.5	℃
Kinematic viscosity	60.61	3.011	cSt
Sulfur	0.2800	0.0008	%
Color	Dark brown	Red	-



[Fig. 1] Comparison of samples of marine fuel.

2. 선박용 증유 보일러 및 실험 장치

실험에 사용된 선박용 증유 보일러 장치는 국외 M사에서 제작된 Z-boiler VWH600 모델로 선정하였으며(Lee, 2020), 국내 K대학 G/T 1057톤급 어로 실습선에서 장시간 정상 가동된 장치이다. 해당 보일러는 자국의 선급기관인 한국선급(KR)의 선박 보일러 형식으로 정식 승인받은 장치이며(Korea Register, 1992), 저질 증유의 연소가 가능하도록 동체 하부에 증유에열기(F.O heater)와 고점도용 이송펌프(F.O gear pump)가 장착되어 있다. 또한 사용 연료의 종류에 따른 제어 모드의 운전 변경이 가능하다. 다만 동체 상단에 부착된 공급 공기의 댐퍼(damper)는 최적 연소 구간 조절에 필요한 비례제어가 불가능한 고정 댐퍼 타입이며 운전 시스템의 제어가 일체화된 보조 보일러 방식이다(Lee 2020). <Table 2>은 보일러의 세부 사양을 나타낸 것이다.

<Table 2> Specification of marine boiler

List	Specification	Unit
Model	VWH-600	-
Type	Z-boiler (water tube)	-
Evaporation	600	kg/h
Calorific value	323,300	kcal/h
Used fuel oil	Bunker-A or C	-
Fuel consumption	39.0	kg/h
Burner	Pressure	20.0 kg/cm ²
	Type	Atomizing nozzle
Forced draft fan	10.9	m ³ /min
Electric capacity	6.8	kw
Control	On/Off	-
Weight	2,140(dry)	kg
Water capacity	290	kg

Source: Lee et al, 2021

3. 표준 측정 방법

HFO와 MGO의 비교 연소 시험을 수행하기 위한 표준 측정 방법은 국내 『대기환경보전법 시행규칙』 제 133조에 따른 ‘대기오염공정시험’을 준수하였다(NIER, 2018). 시험의 적용을 받는 기준 항목은 합산소량(O₂), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x) 및 황산화물(SO_x) 등이며, 황산화물의 경우는 SO₂만을 측정값으로 사용한다. 또한 이산화탄소(CO₂)의 경우 대기오염공정시험 항목에는 해당되지 않으나 실험의 일관성을 위해 상기 항목과 동일한 조건에서 동시 측정을 수행하였다.

측정 방법을 간략히 요약하면 주위 환경과 운전 조건이 안정된 상태에서 5분간 연속 측정을 실시한 평균을 산출하고 동일하게 3회 반복한 총 평균으로 결과값을 제시하여야 한다. <Table 3>은 대기오염공정시험기준 항목 및 표준 측정방법을 간략히 요약하여 제시한 것이다.

<Table 3> Standard measurement method

Parameter	Standard measurement method	Range	Unit
O ₂	ES 01314. 1b	0~25	%
CO	ES 01304. 2c	0~1000	ppm
CO ₂	Same O ₂	0~25	%
NO _x	ES 01308. 1b	0~1000	ppm
SO _x (only SO ₂)	ES 01307. 1b	0~1000	ppm
Temperature	Same O ₂	-40~1200	°C

Remark: The results is the average of the 3 consecutive measurements taken over 5 minutes.

배기 배출물 측정을 위한 가스 분석 장치는 국립환경과학원의 승인 제품인 Testo-340으로 선정하였으며(NIER, 2012), 세부 사양을 <Table 4>에 나타내었다. 측정 항목은 합산소량 및 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물 황산화물이며 배기가스 연도 측에 설치되는 프로브 끝단에는 K-타입 열전대가 포함되어 있어 배기가스 온도와 동시 측정이 가능하도록 설정하였다(Testo, 2010).

<Table 4> Specification of gas analyzer

Parameter	Range	Resolution	Unit
O ₂	0~25	0.01	%
CO	0~10000	1.00	ppm
CO ₂	0~CO ₂ max	0.10	%
NO _x	0~4000	1.00	ppm
SO _x (Only SO ₂)	0~5000	1.00	ppm
Temperature	-40~1200	0.10	°C

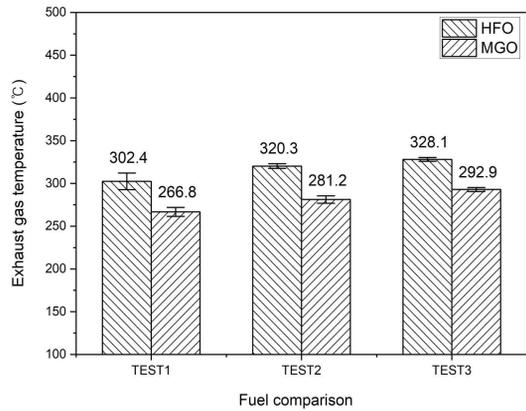
III. 연구 결과

1. 배기 배출물 특성

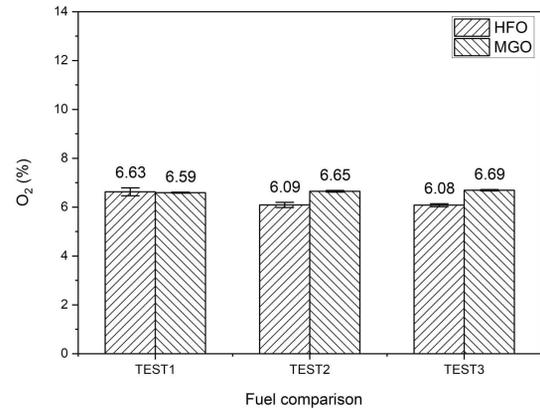
본 연구자의 선행 연구에서 일부 보고된 바와 같이 배기 배출물 항목의 참조 비교를 위해 HFO와 MGO의 함산소량 및 배기가스 온도를 [Fig. 2-3]에 제시하였다. 배기가스 온도의 경우 HFO는 약 316.9°C에서 MGO는 280.3°C로 약 11.54% 감소하는 경향이 나타났다. 이는 동일한 운전조건에서 MGO의 낮은 발열량을 고려하였을 때 대기로 배출되는 가스의 폐열 온도이므로 보일러 운전시 증기 생산량은 충분할 것으로 예상된다.

함산소량(O₂)은 HFO가 6.27%일 때 MGO는 6.65% 수준으로 약 0.38% 소폭 상승함을 알 수 있다. 이는 바이오매스 계열이 함유되지 않은 두 광물성 연료의 특성상 MGO의 물리적 영향에 의한 상승으로 보기는 어려우며, 고정된 공기 덤퍼 조건에서 공급되는 공기량의 미연소 산소의 희석으로 인한 상승이 주원인으로 판단되었다.

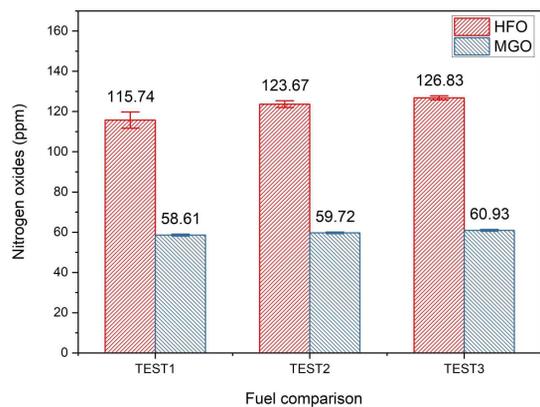
질소산화물(NO_x)의 경우 HFO는 122.08ppm에서 MGO는 59.75ppm으로 약 51.06% 감소함을 알 수 있다. 이는 ISO-8217을 만족하는 선박 연료유 간의 전환만을 통해 저질 중유를 사용하는 보일러의 질소산화물 저감 효과가 있음을 알 수 있다.



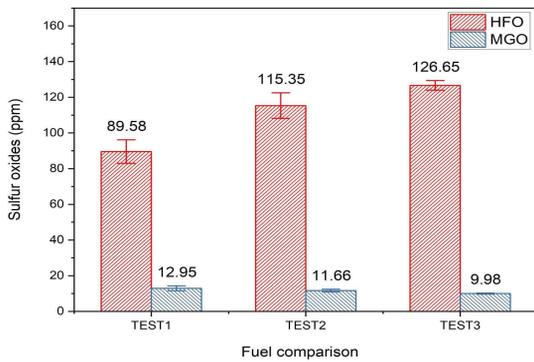
[Fig. 2] Result of exhaust gas temperature(°C).



[Fig. 3] Result of oxygen(%).



[Fig. 4] Result of nitrogen oxides(ppm).



[Fig. 5] Result of sulfur oxides(ppm).

황산화물(SOx)은 아황산가스(SO₂)로만 표기하며 동일한 운전 조건일 때 HFO는 110.53ppm 수준에서 MGO는 13.17ppm 으로 최대 약 88.08%가 감소함을 알 수 있다. 이는 물성치 분석에서 알 수 있듯이 저유황유인 MGO의 황함유량이 출하 기준인 0.03% 이하 조건보다 우수한 0.0008% 수준으로 우수한 품질의 영향으로 실제 황함유량 0.28% 수준의 HFO에 비해 MGO의 탁월한 황산화물 저감 효과가 있음을 알 수 있었다.

다만 상기 질소산화물과 황산화물의 경우 실제 측정된 데이터(Actual data)를 기반으로 비교한 결과이며 [Fig. 4-5]에 도표로 비교하여 나타내었다.

2. 표준산소농도기준 4% 적용

보일러에서 배출되는 질소산화물 및 황산화물은 모두 동일한 산소농도 조건을 가정하여 적용할 필요가 있다. 이는 서로 다른 연료의 화학적 특성에 따라 발생하는 연소가스의 농도 또한 공급되는 공기와의 희석에 의한 차이가 발생할 수 있기 때문이다(Lee and Lee, 2019).

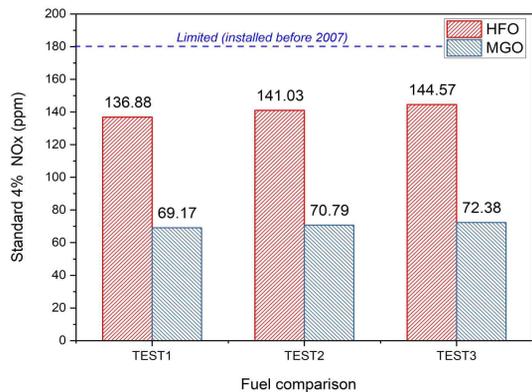
따라서 국내 『대기환경보전법』의 대기오염물질 배출허용기준 제15조 및 33조 관련을 참조하여 액체연료를 사용하는 보일러의 질소산화물의 경우, 대기 중 산소가 21% 일 때 표준산소농도를 4% 로 적용하여 결과값으로 제시하여야 한다 (Ministry of Environment, 2019).

산출 방법은 아래의 식 (1)~(2)를 참조하여 쉽게 유도할 수 있다.

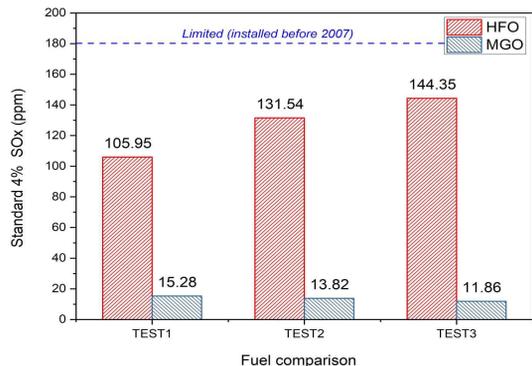
$$NOx [4\%, ppm] = NOx_{actual} \times \frac{O_{2ref} - O_{2standard}}{O_{2ref} - O_{2actual}} \dots\dots (1)$$

$$SOx [4\%, ppm] = SOx_{actual} \times \frac{O_{2ref} - O_{2standard}}{O_{2ref} - O_{2actual}} \dots\dots (2)$$

NOx_{actual}과 SOx_{actual}은 실측된 질소산화물 및 황산화물이며 O_{2actual}은 [Fig. 3]에 제시한 합산소 농도 실측값을 참조로 적용하였다. O_{2ref}는 대기 중 산소농도인 21% 를 적용하며, 표준산소농도기준은 관련 법령에 따라 4% 기준을 보정계수로 적용하였으며, 최종 유도된 질소산화물 및 황산화물 결과를 [Fig. 6-7]에 나타내었다.



[Fig. 6] Result of NOx for standard 4%(ppm).



[Fig. 7] Result of SOx for standard 4%(ppm).

표준산소농도계수 4%를 적용하였을 때 질소산화물의 경우 HFO는 140.83ppm 수준이며 MGO는 70.78ppm 으로 약 49.7% 감소가 가능함을 알 수 있다. 황산화물의 경우 HFO는 127.28ppm 수준에서 MGO는 13.65ppm 으로 89.27% 저감이 가능하였다. 이는 선박용 보일러의 경우 단순한 연료의 전환만으로도 규제 대상의 적용을 받는 두 배출 항목의 우수한 저감이 가능함을 알 수 있다.

또한 해당 보일러 장치는 『대기환경보전법』 대기오염물질의 배출허용기준에 따라 “액체 연료를 사용하는 증발량 10톤 미만 (열량 6,190,000kcal/h 미만)시설” 에 해당된다. 다만 보일러의 설치년도는 2007년 이전이므로 질소산화물 및 황산화물의 허용기준은 180ppm 이며 모든 실험조건에서 배출허용기준은 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

<Table 5>에 두 연료의 비교 시험 결과를 구체화하여 제시하였다. 결과적으로 ISO-8217 기준을 만족하는 MGO의 연료 전환만으로도 배기 배출물의 저감이 가능하지만 질소산화물의 경우, 2015년 이후 설치된 시설에는 70ppm 을 강화된 허용기준으로 적용하고 있다. 따라서 향후 IMO 의 강도 높은 배출 규제 대응에는 단순한 연료의

전환만으로는 분명한 한계가 있음을 시사한다.

3. 연소 효율

연소 효율은 연료의 발열량 대비 연소실에서 실제 연소한 열량의 비율을 의미한다(Kim et al 2024). 연소 효율의 유도는 다양한 방법이 존재하지만 본 연구에서는 가스 분석 장치의 브랜드에서 제공하는 파라미터를 참조값으로 활용하여 식 (3)~(4)와 같이 산출하였다(Kim et al, 2024).

$$qA = ((FT - AT) \times \frac{A_2}{O_{2ref} - O_2} + B_1) - K_k \dots\dots\dots (3)$$

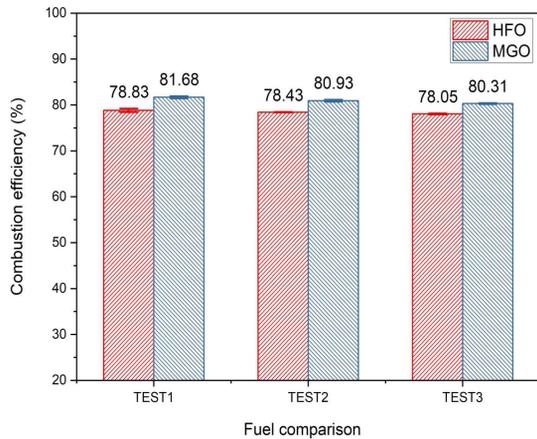
$$Eff_c[\%] = 100 - qA \dots\dots\dots (4)$$

qA는 연소 손실율을 의미하며 FT는 배출가스 온도, AT는 공급 공기 온도이다. A₂는 T사에서 제공되는 연료별 특정 파라미터로 MGO는 경질유(light oil)인 0.680, HFO는 중유(heavy oil)인 0.806을 적용하였다. MGO에 해당되는 무차원 보정 상수 B₁은 0.007을 적용하며, HFO는 해당되지 않는다. K_k는 배기가스 온도의 노점 온도 이하 보정 상수에 해당되나 적용되지 않는다.

<Table 5> Summary of experimental results

Parameter	Test 1		Test 2		Test 3		Average		SD		Variation (%)
	HFO	MGO	HFO	MGO	HFO	MGO	HFO	MGO	HFO	MGO	
O ₂	6.63	6.59	6.09	6.65	6.08	6.69	6.27	6.65	0.28	0.05	+0.38
CO	48.99	26.53	48.88	23.25	38.01	24.54	45.29	24.78	5.89	2.34	-45.28
CO ₂	10.81	10.63	11.21	10.58	11.22	10.56	11.08	10.59	0.21	0.04	-0.49
NO _x	115.74	58.60	123.67	59.73	126.84	60.93	122.08	59.75	5.34	1.07	-51.06
SO _x	89.58	12.95	115.36	11.66	126.65	9.98	110.53	11.53	16.58	1.52	-88.08
NO _x (4%)	136.88	69.17	141.03	70.29	144.57	72.38	140.83	70.78	3.14	1.31	-49.7
SO _x (4%)	105.95	15.28	131.54	13.82	144.35	11.86	127.28	13.65	15.97	1.40	-89.3
H ₂	2.61	2.80	3.00	3.85	2.30	4.33	2.64	3.66	0.53	0.80	+27.86
Temperature	302.4	266.8	320.3	281.2	328.1	292.9	316.9	280.3	12.24	11.46	-11.46
Air ratio	1.46	1.46	1.41	1.46	1.41	1.47	1.43	1.46	0.03	0.01	-0.02

qA에서 식(4)로 최종 유도하면 HFO는 약 78.44% 수준에서 MGO는 80.98% 로 약 2.54% 상승함을 알 수 있었다. 유도된 연소 효율의 비교는 [Fig. 8]에 나타내었다.



[Fig. 8] Result of combustion efficiency(%)

IV. 결론

본 연구는 대기오염공정시험기준을 만족한 조건에서 선박용 증유 보일러에 HFO와 MGO의 연소를 수행하고 배기 배출물 특성을 분석하였다.

실제 측정된 질소산화물의 경우 HFO는 122.08ppm 에서 MGO는 59.75ppm 으로 약 51.06% 감소하였으며, 황산화물은 HFO가 110.53ppm 에서 MGO는 13.17ppm 으로 약 88.08% 감소함을 알 수 있었다. 이는 저유황유인 MGO의 자체 품질이 우수하여 황산화물 저감에 높은 효과가 있고 동일한 조건에서 MGO연료의 전환만으로도 배기 배출물은 일부 저감이 가능함을 알 수 있다.

표준산소농도기준 4% 를 적용한 질소산화물은 HFO가 140.83ppm 에서 MGO는 70.78ppm 으로 약 49.7% 감소하였으며, 황산화물은 HFO가 127.28ppm 에서 MGO는 13.65ppm 으로 약 89.27% 감소함을 알 수 있었다. 이는 설치된 년

도가 과거의 시점에 해당하므로 대기오염물질 배출허용기준을 적용하더라도 모든 실험조건에서 충분히 만족하지만 국제해사기구(IMO)의 강도 높은 배출 규제 대응에는 단순한 연료 전환만으로는 분명한 한계가 있음을 시사한다.

따라서 향후 지속 가능한 선박의 해양 대기오염 규제에 적극적으로 대응하기 위해서는 연료 자체의 전환에만 의존하지 않고 미래 연료 및 다양한 친환경 연료 기술을 확대할 필요가 있다. 또한 본 연구의 보일러 장치는 공급 공기 조절이 불가능한 고정 댐퍼에서 수행되어 실험의 한계가 있으므로 향후 최적화 연소 구간 설정이 가능한 비례제어 방식 보일러의 비교 연소를 수행할 계획이다.

References

Choi JS, Han SG, Choi JH, Park SG, Park RS and Kim DH(2013). A Study on Characteristics of Exhaust Gas Emissions of Water-Bunker Oil Mixed by Homogenizer, *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, 19(5), 518~524.
<https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.5.518>

Concawe(2019). A look into e-fuels in transport system in Europe(2030-2050), *Concawe review*, 28, 4-22.

IMO(2024). Alternative Fuels-Scalability and Sustainability, *Future Fuels and Technology for Low and Zero Carbon Shipping Project in Website*.

Kim JW, Lee TH and Park JU(2024). Development of a Lap scale 1-ton Standard Combustion Chamber, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 26(2), 371~376.
<https://doi.org/10.17958/ksmt.26.2.202404.371>

Kim JW, Lee TH and Ryu YH(2024). Thermo-Gravimetric Analysis of MGO-Bioethanol Blended Fuel Oil, *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 26(6), 1187~1192.
<https://doi.org/10.17958/ksmt.26.6.202412.1187>

Korea Register(1992). *Korean Register of Shipping Certificate Report No. 294-738-92*, Korean Register of Shipping(KR), 1-3.

- K-Petro(2019). Korea Petroleum Quality and Distribution Authority of The Test Report, TSC2019-3201B, 1-3.
- K-Petro(2024). Korea Petroleum Quality and Distribution Authority of The Test Report, TSC2024-0118E, 1-5.
- Lee TH and Lee JK(2019). An Experimental Study on the SO₂ Reduction of Water 10% Mixed Emulsified Oil Applied to Boiler-Burner Using Bunker-C Oil, Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 31(6), 1801~1807.
<https://doi.org/10.1300/JFMSE.2019.12.31.6.1801>
- Lee TH(2020). Study on the Characteristics of Exhaust Emissions in a Marine Boiler Using Emulsified Bunker-C Oil, Jeonbuk National University Doctoral thesis, 1~189.
- Lee TH, Lee SH and Lee JK(2021). Exhaust Gas Emission Improvements of Water/Bunker C Oil-Emulsified Fuel Applied to Marine Boiler, Journal of Marine Science and Engineering, 9(477), 1~11.
<https://doi.org/10.3390/jmse9050477>
- Lee JW, Choi YJ, Hwang SC and Han SH(2022). A Study on the Numerical Analysis of the SCR system in a 1.5 Ton Marine Boiler, Journal of Power System Engineering, 26(2), 21~29.
<https://doi.org/10.9726/kspse.2021.26.2.021>
- Lee TH and Kang IS(2023). Small Combustion Chamber for Marine Fuel Oil and Analysis of Exhaust Gas Characteristics of Marine Gas Oil, Journal of Marine Science and Engineering, 11(609), 1~12.
<https://doi.org/10.3390/jmse11030609>
- Ministry of Environment(2019). Standard for Emission Acceptance of Air Pollutants Article 15, Air Quality Conservation, 5-8.
- NIER(2012). Type Approval Form of Environmental Measuring Instrument ASGAM-2012-2, National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea.
- NIER(2018). Air Pollution Process Test Standard No. 2017-51, National Institute of Environmental Research: Incheon, Korea.
- Testo(2010). Instruction Manual for Testo-340 Flue Gas Analyser, Testo Korea, 49~51.
-
- Received : 08 May, 2025
 - Revised : 29 May, 2025
 - Accepted : 03 June, 2025