



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

대학원 석사 학위논문

소형선박용 고속디젤기관에서 연료 성분  
및 엔진부하 변화가 대기오염물질 배출에  
미치는 영향에 관한 분석



한국해양대학교 일반대학원

기관시스템공학과 동력기계·재료공학전공

이 경 열

본 논문을 이경열의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 원 주 (인)

위원 박 상 균 (인)

위원 최 재 혁 (인)



2018년 6월

한국해양대학교 일반대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vi
<b>1. 서론 .....</b>	<b>1</b>
<b>2. 선박 대기오염물질 배출규제 현황 및 제반 여건 .....</b>	<b>5</b>
2.1 선박 대기오염물질 배출규제 현황 .....	5
2.1.1 질소산화물(NO <sub>x</sub> ) 배출규제 .....	5
2.1.2 연료유 황 함유량(% m/m) 규제 .....	8
2.1.3 블랙카본(B.C) .....	9
2.2 대기오염물질 배출에 관한 제반여건 분석 .....	11
2.2.1 배출규제 수준의 결정 .....	11
2.2.2 국내 선박 대기오염물질 저감정책 현황 및 문제점 .....	13
2.3 입자상물질(PM) 2차 생성과정 .....	14
<b>3. 소형선박용 고속디젤기관의 연료유 분석 .....</b>	<b>19</b>
3.1 소형선박용 고속디젤기관의 연료유 사용 현황 .....	19
3.2 연료유 샘플 확보 및 분석 결과 .....	21
<b>4. 엔진시험 장치 및 시험방법 .....</b>	<b>27</b>
4.1 엔진시험장치 .....	27
4.1.1 엔진 .....	27
4.1.2 동력계 .....	30
4.1.3 냉각수 공급제어장치 .....	31

4.2 배기가스측정장치 .....	32
4.3 엔진시험 및 배기가스측정 장치 개략도 .....	33
4.4 엔진시험방법의 선정 .....	38
4.5 배출량 측정값 보정 .....	41
<b>5. 실험 결과 및 고찰 .....</b>	<b>43</b>
5.1 .360 PS 고속디젤기관의 대기오염물질 측정 결과 .....	43
5.1.1 ISO 8178-E2 cycle 운전 시 측정결과 .....	44
5.1.2 ISO 8178-E3 cycle 운전 시 측정결과 .....	48
5.2 430 PS 고속디젤기관의 대기오염물질 측정 결과 .....	51
5.2.1 ISO 8178-E2 cycle 운전 시 측정결과 .....	52
5.2.2 ISO 8178-E3 cycle 운전 시 측정결과 .....	57
<b>6. 결론 .....</b>	<b>62</b>
참고문헌 .....	64
감사의 글	



## List of Tables

<b>Table 2.1</b> 중국의 대기오염물질 배출규제해역(ECA) 규정 시행시기	12
<b>Table 2.2</b> 2차 생성 유기성 입자상물질(PM)의 반응식과 변화율	12
<b>Table 2.3</b> 암모니아 농도에 따른 2차 입자상물질(PM) 생성 반응의 특성	12
<b>Table 3.1</b> 경유의 품질기준	20
<b>Table 3.2</b> 엔진시험에 사용된 소형선박용 연료유 확보방법	22
<b>Table 3.3</b> 엔진시험에 사용된 소형선박용 연료 조성 및 물성치 분석결과	23
<b>Table 4.1</b> 엔진시험용 소형고속디젤엔진의 제원	28
<b>Table 4.2</b> 두산 L126TIH 엔진시험 및 배기가스측정 장비 목록	34
<b>Table 4.3</b> 대동 DD6CAM 엔진시험 및 배기가스측정 장비 목록	36
<b>Table 4.4</b> ISO 8178-4 모드별 적용 대상 엔진 분류 방법	38
<b>Table 4.5</b> ISO 8178 E2 cycle에서의 출력, 회전수 및 가중계수	39
<b>Table 4.6</b> ISO 8178 E3 cycle에서의 출력, 회전수 및 가중계수	39

## List of Figures

<b>Fig. 2.1</b> IMO 질소산화물(NO <sub>x</sub> ) 배출량 제한 요건 .....	5
<b>Fig. 2.1</b> Baltic Sea and North Sea ECAs (Ini Akpadiaha, 2016) .....	7
<b>Fig. 3.1</b> 연료유별 40℃ 동점도(kinetic viscosity) 분석 결과 .....	25
<b>Fig. 4.1</b> 엔진시험용 소형고속디젤엔진의 모습 .....	27
<b>Fig. 4.2</b> 두산 L126TIH 엔진의 성능 및 연료소모량 곡선(제조사 제공) .....	29
<b>Fig. 4.3</b> 엔진시험에 사용한 동력계 .....	30
<b>Fig. 4.4</b> 냉각수 공급제어장치 .....	31
<b>Fig. 4.5</b> 연료 공급제어장치 .....	31
<b>Fig. 4.6</b> 두산 L126TIH 엔진시험에 사용된 SPC(좌)와 FTIR(우) 장비의 모습 .....	32
<b>Fig. 4.7</b> 대동 DD6CAM 엔진시험에 사용된 AMA i60 배기분석기(좌)와 Nova prime(우) 장비의 모습 .....	33
<b>Fig. 4.8</b> 두산 L126TIH 엔진시험 및 배기가스측정 장치 개략도 .....	35
<b>Fig. 4.9</b> 두산 L126TIH 엔진시험 및 배기가스측정 장치의 전경 .....	35
<b>Fig. 4.10</b> 대동 DD6CAM 엔진시험 및 배기가스측정 장치 개략도 .....	37
<b>Fig. 4.11</b> 대동 DD6CAM 엔진시험 및 배기가스측정 장치의 전경 .....	37
<b>Fig. 4.12</b> 출력을 제한한 L126TIH 엔진에 대한 ISO8178 E2/E3 사이클 운전 조건 .....	43
<b>Fig. 4.13</b> E2 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NO <sub>x</sub> 배출량 측정 결과 .....	44
<b>Fig. 4.14</b> E2 사이클에서 연료 변화에 따른 THC, CO, PM 배출량 측정 결과 .....	45
<b>Fig. 4.15</b> E2 사이클에서 연료 변화에 따른 NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> 배출량 측정 결과 .....	46
<b>Fig. 4.16</b> E2 사이클에서 연료 변화에 따른 연료소모율 측정 결과 .....	48
<b>Fig. 4.17</b> E3 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NO <sub>x</sub> 배출량 측정 결과 .....	49
<b>Fig. 4.18</b> E3 사이클에서 연료 변화에 따른 THC, CO, SO <sub>x</sub> 배출량 측정 결과 .....	50
<b>Fig. 4.19</b> DD6CAM 엔진에 대한 ISO8178 E2/E3 사이클 운전 조건 .....	51
<b>Fig. 4.20</b> E2 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NO <sub>x</sub> 배출량 측정 결과 .....	52
<b>Fig. 4.21</b> E2 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 THC, PM 배출량 측정 결과 .....	53

**Fig. 4.22** E2 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출량  
측정 결과 ..... 54

**Fig. 4.23** E2 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 연료소모율 측정 결과 .. 55

**Fig. 4.24** E3 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NO<sub>x</sub> 배출량 측정 결과 .. 57

**Fig. 4.25** E3 사이클 각 모드별 엔진 효율 측정 결과 ..... 58

**Fig. 4.26** E3 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 THC, PM 배출량 측정 결과 .. 58

**Fig. 4.27** E3 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출량  
측정 결과 ..... 60

**Fig. 4.28** E3 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 연료소모율 측정 결과 ... 61

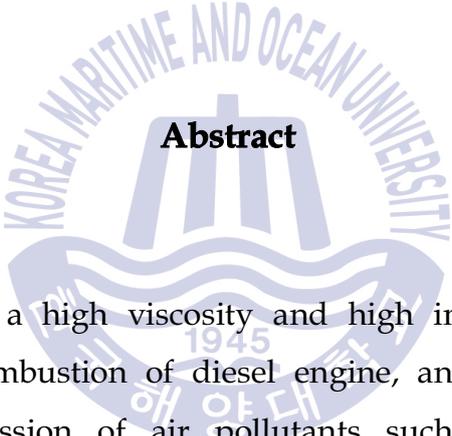


# **A Study on the Influence of Fuel Component and Load Changes on the Emission of Air Pollutants of High Speed Diesel engine for Small ships**

Lee, Kyeong Yeol

Department of Marine System Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University



## **Abstract**

Ship's fuel oil with a high viscosity and high impurities is likely to cause incomplete combustion of diesel engine, and is therefore highly likely to cause emission of air pollutants such as PM (Particulate matter), NO<sub>x</sub> (Nitrogen oxides), SO<sub>x</sub> (Sulfur oxide) from the ship.

Recently, restrictions on the emission of air pollutants are being more tightened on the ship. So it is required to develop more effective national policies on the reduction of air pollutants emission from the ship.

In order to do so, it is necessary to analyze the factors that affect the emission of air pollutants from diesel engines for the ship and use its results to establish policies for reducing emissions.

This study investigated that the increase in sulfur content of MGO (Marine Gas Oil) used as ship's fuel oil has some effect on kinetic viscosity rise, SFC (Specific Fuel oil Consumption) improvements and the increase in SO<sub>x</sub> (Sulfur Oxide) emissions on high speed marine diesel engine under MCR 500 kW. SFC (Specific Fuel oil Consumption) improvements is due to the kinetic viscosity increase of fuel oil which affects the reduction of friction loss in attached fuel oil supply pump, etc. And this study also found that increased sulfur content in fuel oil does not affect the emissions of NO<sub>x</sub>(Nitrogen Oxide), THC (Total Hydrocarbon Content) and CO (Carbon monoxide), but an increase above a certain level of sulfur content affects the increase in PM (Particulate matter) emissions.



KEY WORDS : NO<sub>x</sub>(Nitrogen Oxide) ;  
SO<sub>x</sub>(Sulfur Oxide) ;  
PM(Particulate Matter) ;  
MGO(Marine Gas Oil)  
Marine Diesel Engine.



## 제 1 장 서 론

경제성 확보를 주된 목적으로 선박에서 주로 사용되는 고점도의 선박용 연료유는 불순물의 함유량이 높고, 불완전 연소 가능성이 높아 입자상물질(Particulate Matters, PM), 황산화물(SO<sub>x</sub>)과 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 등과 같은 대기오염물질을 다량으로 배출하기 때문에 이의 사용을 제한하기 위한 규제가 지속적으로 강화되고 있는 추세이다. 유럽연합(EU)은 2005년 지침(Directive 2005/33/EC)에서 EU 회원국 항구에 정박하는 모든 선박은 2010년부터 황 함유량 0.1% 이하의 연료유만 사용하도록 규정하고 있다. 국제해사기구(IMO)의 경우 2008년 10월 해양환경보호위원회(MEPC) 회의에서 선박 연료유의 황 함유량에 관한 MARPOL 규정을 개정하여 황 함유량이 2012. 1. 1. 이후 3.5%, 2020. 1. 1. 이후 0.5%를 초과하는 연료유를 사용할 경우 있으며, 별도의 성능기준에 충족하는 배기가스정화장치를 의무적으로 설치하도록 하였다.

국내에서는 '15년부터 미세먼지에 대한 심각성이 부각되고 사회적 관심이 증대되면서 정부는 미세먼지 이슈를 최대 해결과제로 선정하고 모든 산업분야에서 미세먼지 저감활동이 활발히 이뤄지는데 필요한 정책을 개발·추진 중에 있다. 자동차분야의 경우 1990년대 이후 DPF(Diesel Particulate Filter, 디젤매연여과장치)에 대한 본격적인 연구가 진행되어 기술상용화가 이뤄졌고<sup>[1]</sup>, 2010년대 초반부터 정부의 지원사업이 활발히 진행되면서 디젤차량을 대상으로 널리 보급되었던 사례가 있으며, 발전분야, 폐기물 소각분야에서도 배출가스 저감장치의 의무사용을 단계적으로 강화하고 있다. 그러나 배출량이 상대적으로 많지 않은 분야에서는 미세먼지 등에 대한 배출 저감활동이 활성화 되지 않은 경향이 있다.

대표적으로 선박부문을 들 수 있다.

선박은 특유의 이동특성으로 인해 대기오염물질 배출규제를 적용함에 있어 국제항해에 종사하는 경우와 그러하지 않은 경우로 크게 구분되는데, 국제항해에 종사하는 경우에는 IMO MARPOL 협약과 관련 국내법(해양환경관리법 등)을 동시에 준수하여야 한다. IMO는 현재 직접적인 질소산화물(NOx) 배출규제와 함께 선박 연료유의 황 함유량 규제를 통한 간접적인 황산화물(SOx) 배출 규제를 시행하고 있다. 아울러, 블랙카본(B.C, Black Carbon)이 극지방 등 환경에 미치는 악영향이 부각되면서 배출규제 범주에 새롭게 포함시키고자하는 논의를 IMO PPR(해양오염방지전문위원회) 및 MEPC(해양환경보호위원회)에서 게시함에 따라 국제항해에 종사하는 선박에서 규제되는 대기오염물질의 범위가 점차적으로 확대될 것으로 전망된다.

선박의 추진용 디젤기관은 특히 저부하에서 연소상태가 좋지 않아 열효율이 낮고, PM(Particulate matter) 발생량이 증가하는 점을 개선하기 위하여 Y. Takasugi 등은 연료분사시기와 분사압력을 전자적으로 제어하는 최적화하는 기술을 적용하여 열효율 및 PM(Particulate matter) 발생량을 개선한 바 있다.[2]

디젤기관에서 발생하는 PM(Particulate matter), 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx)을 별도의 후처리과정을 통하여 제거하는 연구도 진행되고 있는데, W. Balachandran 등은 MW급 마이크로웨이브 플라즈마(Microwave plasma)를 활용한 후처리장치를 통하여 디젤기관에서 나오는 PM(Particulate matter)을 90%, 질소산화물(NOx)을 100% 제거하는 것이 가능하며,[3] 황산화물(SOx) 제거를 위하여 설치·운영에 있어 대형공간을 요구하는 스크러버(scrubber)를 소형화하고 PM(Particulate matter)과 질소산화물(NOx)도 동시에 제거할 수 있는 배기가스세정장치(Exhaust gas cleaning device)가 개발되고 있다.[4][5]

선박에서의 오염물질 배출을 규제하는 국내 법령인 「해양환경관리법」에 따라 우리나라에 등록된 모든 선박은 대기오염물질 배출활동이 제한된다. 현행 「해양환경관리법」은 MARPOL 부속서 6에 명시된 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx) 배출 관련 규제사항을 그대로 수용하여 동일하게 적용하고 있으며, 특히 질소산화물(NOx) 배출 규제의 경우에는 국내 연안에서만 운항하는 선박도 준수하도록 확대 적용하고 있다.

최근 국내 미세먼지 발생 이슈를 해결하기 위한 범정부차원의 미세먼지 종합관리대책이 수립(17. 9, 관계부처 합동)되어 PM<sub>10</sub> 뿐만 아니라 인체유해성이 높은 PM<sub>2.5</sub>에 대한 저감 조치가 요구되고 있으며, 종전에 저감 조치가 요구되지 않은 선박부문도 포함되는 등 배출량의 규모와 상관없이 모든 산업분야에서 해당 분야에 맞는 저감 활동이 필수적으로 전개되어야 하는 상황에 직면해 있다. 동 대책에서 선박부문 저감대책으로 미세먼지 저감장치 개발 및 상용화, LNG 선박의 충전 인프라(병커링) 기술개발 등 기술적인 조치와 연료유 황 함유량 요건을 0.5%<sub>m/m</sub> 이하로 강화하는 정책적인 조치가 포함됨과 동시에 배출량 산정 및 관리 강화의 필요성을 강조하는 내용도 함께 담겨져 있다.[6]

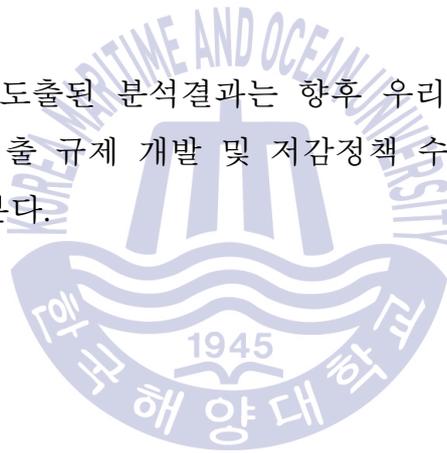
배출량을 체계적으로 관리하기 위해서는 기본적으로 산정방식의 표준화가 이뤄져야 한다. 선박 온실가스 배출량 산정의 경우 IPCC Guideline(발열량 기준) 및 IMO Res. MEPC.245(66)(탄소함량 기준)에 따라 국제적으로 표준화된 산정방식이 존재하지만, 선박 대기오염물질 배출량의 경우에는 아직 국제적으로 표준화되지 않은 상황이다. 배출량 관리를 위해서는 국내에 적용 가능한 배출량 산정표준의 정립이 우선되어야 하며, 배출량에 대한 기초자료의 수집 및 분석에 대한 연구가 필요한 시점이다.

실제 선박의 운항정보와 디젤기관의 대기오염물질 배출정보를 조사한 자료를 토대로 PM(Particulate matter), 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx) 등의 대기오염물질들에 대한 배출량을 산정하는 방법이 제시되고 있으며

[7][8], 다양한 활동지표를 활용한 배출량 전망방법론이 개발되고 있다.[9] 최근에는 선박자동식별장치(AIS)를 통하여 수집되는 정확도 높은 선박별 운항정보를 활용하여 배출량을 실시간으로 산정하는 방법이 제시되고 있다.[10]

우리나라에 등록된 선박의 척수 기준으로 전체의 약 50%가 디젤기관을 추진기관으로 사용하고 있으며, 이 중 약 90% 정도가 500kW 이하 고속디젤기관을 사용하고 있다. 이런 점을 고려하여 본 연구에서는 국내 연안선박에서 사용빈도가 높은 500kW 이하 고속디젤기관 2종을 선정하고 엔진시험 및 배기가스측정이 가능한 테스트베드를 활용하여 연료의 성분 변화 및 엔진 부하 변화가 대기오염물질 배출에 미치는 영향을 분석하였다.

본 연구를 통하여 도출된 분석결과는 향후 우리나라의 선박 대기오염물질 배출량 관리, 배출 규제 개발 및 저감정책 수립에 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 본다.



## 제 2 장 선박 대기오염물질 배출 규제 현황 및 제반 여건

### 2.1 선박 대기오염물질 배출규제 현황

#### 2.1.1 질소산화물(NOx) 배출규제

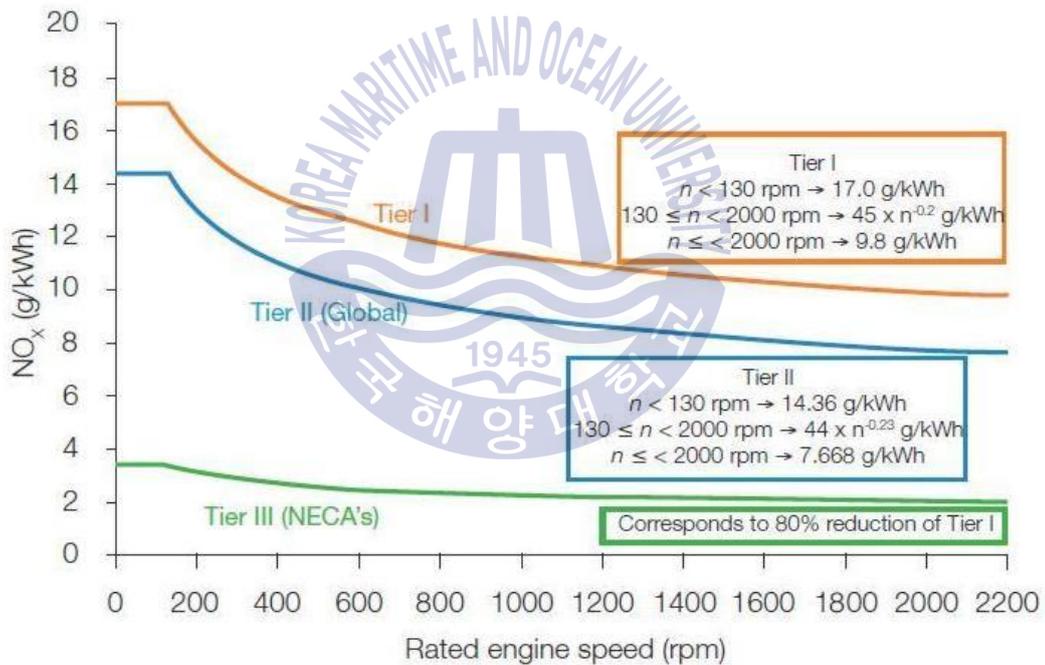


Fig. 2.1 IMO 질소산화물(NOx) 배출량 제한 요건

선박에 설치되는 디젤기관은 MARPOL 부속서 6의 제13규칙에 명시된 질소산화물(NOx) 배출 제한치(g/kWh)에 충족해야 한다. 2000.1.1. 이후 2011. 1. 1 전에 건조된 선박에 설치되는 디젤기관의 경우 Tier I 요건

에 충족되어야 하며, 2011. 1. 1 이후에 건조된 선박에 설치되는 디젤기관은 Tier I 요건보다 약 15~20% 강화된 Tier II 요건을 충족해야 한다. 아울러 MAPROL 부속서 6의 제13규칙에 Tier III 요건을 명시하고 있는데, 동 규칙 제6항에 따라 지정된 질소산화물 배출통제해역(NECA, NOx Tier III Emission Control Area)을 운항하는 선박은 2016년부터 Tier I 보다 약 80% 강화된 Tier III 요건을 충족하여야 한다.

현재 북아메리카해역, 미국 캐리비안해역이 질소산화물 배출통제해역(NECA)으로 지정되어 있으며, IMO 제71차 해양환경보호위원회(MEPC 71)에서 발틱해와 북해를 추가로 지정하는 MARPOL 협약 개정안이 채택되었고, 2021. 1. 1부터 발틱해와 북해도 질소산화물 배출통제해역으로 적용될 예정이다.[11]

배출통제해역으로 지정되기 위해서는 MAPROL 부속서 6의 부록 3(Appendix III)에 명시된 “배출통제해역 지정을 위한 기준 및 절차”를 이행하는 것이 선행되어야 한다. 먼저 2개국 이상의 인접 국가들의 동의를 기반으로 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 입자상물질(PM) 등 대기 오염물질의 배출로 인해 인접지역 환경 및 거주하는 주민에 미치는 악영향, 해운경제 파급효과 등을 조사·평가하는 연구를 실시하고, 관련된 내용을 정리한 제안서를 IMO 해양환경보호위원회(MEPC)에 제출되어야 한다. 제출된 제안서는 IMO의 검토와 여러 IMO 회원국이 참석하는 해양환경보호위원회 회의를 거쳐 지정여부가 최종 결정된다.

발틱해 인접 9개국(덴마크, 독일, 핀란드, 스웨덴, 러시아 등)이 공동으로 제70차 해양환경보호위원회(MEPC 70)에 제출한 “발틱해 질소산화물 배출통제해역 지정 제안서”에 따르면, 발틱해 인접국가 총 인구의 43%가 발틱해 연안에서 10km 이내에 거주하고 있고, 31%가 50km 이내에 거주하고 있을 정도로 발틱해 연안이 인구 고밀도 지역이며, 선박으로부터 발생한 NOx 로 인해 부영양화, 환경의 산성화, 인체 건강에 부정적 영향 등이 발틱해 전체에 걸쳐 나타나 1900년대부터 이미 부영양화로 인

한 피해가 있어왔다고 한다. 아울러 비용측면에서 육상에서 질소산화물(NOx) 배출량을 감소시키는 것보다 배출통제해역 지정으로 선박으로부터의 질소산화물(NOx) 배출량 저감이 더 효과적인 것으로 분석하였다. [12]



**Fig. 2.1** Baltic Sea and North Sea ECAs (Ini Akpadiaha, 2016)

북해 인접 8개국(영국, 노르웨이, 덴마크, 벨기에, 독일 등)이 공동으로 제70차 해양환경보호위원회(MEPC 70)에 제출한 “북해 질소산화물 배출 통제해역 지정 제안서”에 따르면, 북해 해역은 발달된 도시가 많아 지

역적 경제적 가치가 높고 2030년에는 총 인구 약 2억 7천만 명 정도가 될 것으로 예상되는 인구 고밀도 지역일 뿐 아니라 생산력이 높은 수산 자원의 보고라고 한다. 북해가 배출통제해역으로 지정되어야 하는 가장 큰 이유로 동 제안서에 명시된 내용을 보면, 북해 해역에서 선박으로부터의 질소산화물(NOx) 배출량은 2009년 472,000 톤이며, 해운업, 어업 및 석유채굴업의 발달로 배출량이 지속적으로 증가한다는 것을 꼽을 수 있다. 아울러 “발틱해 질소산화물 배출통제해역 지정 제안서”와 마찬가지로 비용측면에서도 육상에서의 NOx 배출량을 감소시키는 것보다 북해를 질소산화물 배출통제해역(NECA)으로 지정하여 선박에서의 NOx 배출량을 저감하는 것이 효과적임을 강조하고 있다.[13]

### 2.1.2 연료유 황 함유량(% m/m) 규제

2011. 7. 15 제62차 해양환경보호위원회(MEPC 62)에서는 선박에서 배출되는 황산화물(SOx)을 규제하기 위한 간접적인 수단으로 선박연료유 내 황 함유량(% m/m)을 제한하는 내용의 MARPOL 부속서 6 개정안을 채택하였다. 중전 4.5% m/m로 규정된 제한치를 2012. 1. 1 이후부터 3.5% m/m로 낮추고, 2018년에 타당성 재검토를 거쳐 2020. 1. 1 이후부터는 0.5% m/m로 강화시키는 내용인데, 2016. 10. 28 제70차 해양환경 보호위원회(MEPC 70)에서 선박에서 사용하는 연료유 내 황 함유량 0.5% m/m 제한요건을 당초 계획대로 2020년부터 적용하는 것으로 결정하였다. 아울러 동 회의에서는 연료유 내 황 함유량 제한요건을 적용하는데 현실적인 문제 및 지역적 공급 불균형 문제 등에 대하여 해양오염 방지전문위원회(PPR)에서 상세검토하고 MEPC 회의에서 해결방안을 지속적으로 논의하기로 하였다. 황 함유량 제한요건에 충족하지 않는 고유황유를 중전과 같이 계속 사용하고자하는 선박은 IMO의 배기가스세정 장치가이드라인(Res. MEPC.529(68))에서 요구하는 성능요건을 충족하는 배기가스세정장치를 설치·운영하여야 한다.

또한, 2011. 6. 15 제62차 해양환경보호위원회에서 발틱해, 북해 및 미국 캐리비안해를 황산화물(SOx) 배출통제해역(SECA)으로 지정하는 MARPOL 부속서 6 개정안을 채택하고, 동 해역에서 운항하는 선박에는 일반해역에서 보다 강화된 요건을 적용하기로 하였다. 종전 1.0% m/m로 정해진 황산화물(SOx) 배출통제해역(SECA) 내 연료유 황 함유량 제한요건이 2015년 이후부터는 0.1% m/m로 강화되어 현재까지 적용되고 있다. 아울러 마찬가지로 요건에 충족되지 않은 고유황유를 사용할 경우 Res. MEPC.529(68))에서 요구하는 성능요건을 충족하는 배기가스세정장치를 설치·운용하여야 한다.

### 2.1.3 블랙카본(B.C)

블랙카본(B.C)은 화석연료, 바이오매스, 바이오연료의 연소과정에서 불완전연소로 인해 발생하는 입자상 물질(PM)이며, 그 질량의 80% 이상이 탄소로 이루어져 있다. 블랙카본은 대기 중에 있는 황산염(Sulfate), 중금속 등과 같은 다른 오염물질을 모으는 특성이 있어 흡입 시 인체에 매우 위험하며, 호흡기질환, 심혈관질환, 암 등을 유발할 수 있다. 또한, 빛을 흡수하는 성질이 강하여 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O 등 온실가스과 더불어 지구온난화를 가속화하는 물질로 알려져 있다. 특히 북극지방에서 발생하여 빙하 위에 쌓인 블랙카본은 해빙(解氷)을 유발하여 북극 생태계에 치명적인 영향을 끼친다.[14]

IMO는 배출통제해역(ECA) 지정 및 2020년 선박연료유 황 함유량 0.5% m/m 규제 시행에 합의했지만, 현재 선박의 블랙카본 감축을 위한 뚜렷한 규제나 요구사항이 부재한 실정이다. 블랙카본의 인체 유해성, 지구온난화 촉진, 북극 해빙 등 악영향을 고려하여 IMO는 2015년부터 블랙카본 배출량 측정을 통한 기초자료를 수집하여 체계적인 대응을 추진하고 있다.

선박에서 배출되는 블랙카본을 측정하는 적합한 방법으로 LII<sup>1)</sup>, FSN<sup>2)</sup>,

PAS<sup>3)</sup>, MAAP<sup>4)</sup> 등 다양한 방법이 IMO회의에서 거론되었으며, 블랙카본의 제어기술에 대한 조사 및 분석도 병행되고 있다.

2018년 2월에 개최된 IMO 제5차 해양오염방지전문위원회(PPR 5)에서 블랙카본 측정을 위해 검토된 5가지 방법(FSN, PAS, LII, MAAP, TOA) 중에 FSN, PAS, LII만을 블랙카본을 측정하기 위한 가장 적합한 방법으로 선정하였고, 향후 단일 대표방법을 선정하는 부분에 대해서는 자발적인 연구 및 추가적인 협의를 통해서 결정하기로 하였으며, 블랙카본 측정을 통해 배출계수(emission factor)를 개발 및 블랙카본 규제 조치를 위한 기술적인 검토를 수행하기로 하였다.[15]



- 
- 1) LII(Laser Induced Incandescence) : 레이저 백열 유도법
  - 2) FSN(Filter Smoke Meter) : FSN 측정법
  - 3) PAS(Photo-Acoustic Spectrometry) : 광 음향 분석법
  - 4) MAAP(Multi Angle Absorption Photometry) : 다중 각 흡수 측정법

## 2.2 대기오염물질 배출에 관한 제반여건 분석

### 2.2.1 배출규제 수준의 결정

선박에 대한 대기오염물질 배출규제 도입을 검토하기에 앞서 국제해사기구(IMO)는 배출량에 대한 충분한 조사·분석 결과를 토대로 규제대응 기술의 존재여부 및 적용가능성, 해운업계 및 각 국가에 미치는 영향 등을 종합적으로 검토한다.

1997년 MARPOL 부속서 6이 제정되어 선박으로부터의 대기오염방지 규정이 수립될 당시 IMO는 디젤기관의 출력 및 회전수 등에 따른 배출량 자료를 수집·분석하여 선박의 질소산화물(NOx) 배출제한기준이 수립하였다.[16] 연료유 황 함유량 제한기준 또한 현재 선박에 공급되고 있는 연료유의 황 함유량을 조사하고, 탈황기술 개발 및 전 세계 각 지역별 적용가능성을 검토한 후 적정수준에 대한 각 IMO 회원국 및 관련 업계 등의 논의를 거쳐 최종 결정하였다.

상기의 배출제한 기준은 국제항해에 종사하는 전 세계 모든 선박이 운항해역에 대한 구분 없이 공통으로 적용되는 기준이다. 그러나 산업발달, 경제활성화 보다 환경보호 및 인류 건강을 더욱 중요시하는 일부 국가들이 자국과 인접한 해역에 보다 강도 높은 배출제한 기준을 설정해 줄 것을 상기 2.1에서 언급한 내용과 같이 IMO에 요구하게 되는데, 이를 기반으로 MARPOL 부속서 6의 제13규칙 및 제14규칙에 따른 배출통제해역(ECA)이 설정된다.

중국은 IMO MARPOL 협약과는 별개로 자국의 법령에 따라 자국 연안에 강도 높은 배출제한기준을 적용하기로 하였다. 중국 교통운송부는 장강 삼각주, 주강 삼각주 및 발해만 수역을 자국 규정에 따라 배출규제해역으로 지정하여 배출규제를 시행하는 방안을 2015년 12월에 발표하였다.

**Table 2.1** 중국의 대기오염물질 배출규제해역(ECA) 규정 시행시기

시행일	적용	연료유 황 함유량 제한치	기타
2016.1.1.~	ECA 내 모든 선박	3.5% m/m 이하 또는 0.5% m/m 이하	ECA 내 특정항구에서 요구할 경우
2017.1.1.~	ECA 내 핵심항구에 정박하는 모든 선박	0.5% m/m 이하	입항 후 1시간부터 출항 전 1시간까지 적용
2018.1.1.~	ECA 내 항구에서 정박하는 모든 선박	0.5% m/m 이하	
2019.1.1.~	ECA 내 모든 선박	0.5% m/m 이하	

동 규정에 따라, 중국의 배출규제해역 내 핵심항구에 정박하는 모든 선박들은 Table. 2.1과 같이 2017년 1월 1일부터 0.5%의 황 함유량을 만족하는 연료유를 사용하여야 하고, 2019년까지 매년 단계별로 기준이 강화될 예정이다.[17]

과거 선박의 대기오염물질 배출규제는 저감기술과 경제적 영향력을 갖춘 일부 선진국들의 주도하에 최소치가 설정되는 경향이 있었다. 그러나 각 국가마다 환경보호 및 인류건강에 대한 관심이 증가되고, 국가 이미지 제고 등을 고려하여 환경정책을 강화하는 추세임에 따라, MARPOL 협약에서 요구하는 수준을 선제적으로 이행하거나, 보다 강화된 수준을 적용하려는 움직임이 일본, 호주, 멕시코 등 여러 국가에서 발생하고 있다.

## 2.2.2 국내 선박 대기오염물질 저감정책 현황 및 문제점

최근 국내 대기질 악화에 따른 미세먼지 등 대기오염물질에 대한 저감 필요성에 대한 사회적 관심이 증폭되어 배출규제 강화 및 저감활동 활성화가 요구되고 있다. 이에 정부는 2016년에 관계부처 합동으로 “미세먼지 관리 특별대책”을 수립하여 다량의 미세먼지를 배출하는 발전소, 자동차 등에 대한 저감정책을 추진하였고,[18] 2017년에는 중전 대책의 미비점을 보완하고 통합적인 저감 대책을 추진하고자 “미세먼지 관리 종합대책”을 발표하였다.[19]

현재 국내 선박의 대기오염물질 배출규제는 주로 「해양환경관리법」을 통하여 시행되고 있는데, 대부분 국제해사기구(IMO)의 MARPOL 협약에서 규정하고 있는 사항을 대부분 그대로 수용하여 시행하고 있다.

하지만, MARPOL 협약은 국제항해에 종사하는 선박에 대한 배출규제를 다루고 있기에, 국내 연안 선박에 대한 배출규제가 국제항해 선박과 동일한 수준으로 설정되기는 어려웠다.

국내 대기 질 개선을 위하여 정부는 통합적이고 보다 강화된 저감 정책을 추진하는 상황에서 저감정책이 활발히 추진되는 발전소, 자동차, 산업 등 타 부문과 비교하여 선박부문은 뚜렷한 배출규제나 저감방안이 없는 실정이다.

### 2.3 입자상물질(PM)의 2차 생성과정

대기 중 입자상물질(PM)은 Fig.에서 나타난 바 배출원에서 직접 대기 중으로 배출되는 1차(Primary) PM과 대기 중에서 화학반응에 따라 생성된 2차 PM으로 구분된다. 1차 PM은 자연상태에서 발생하는 흙먼지, 식물의 꽃가루 등의 OC(Organic carbon)와 인위적으로 석탄·석유 등 화석연료를 태울 때 생기는 배기가스, 공장 내 분말형태의 원자재 및 소각장 연기 등이 있다. 2차 PM은 여러 배출원에서 나오는 가스 상태의 물질이 공기 중의 다른 물질과 화학반응을 일으켜 발생하는 것으로, 화석연료 연소 과정에서 배출되는 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 휘발성 유기화합물(VOCs), 암모니아 등이 수증기, 오존 등과 반응하여 생성되며, 대부분 직경 2.5 $\mu$ m 이하의 미세한 먼지형태를 이룬다.[20]

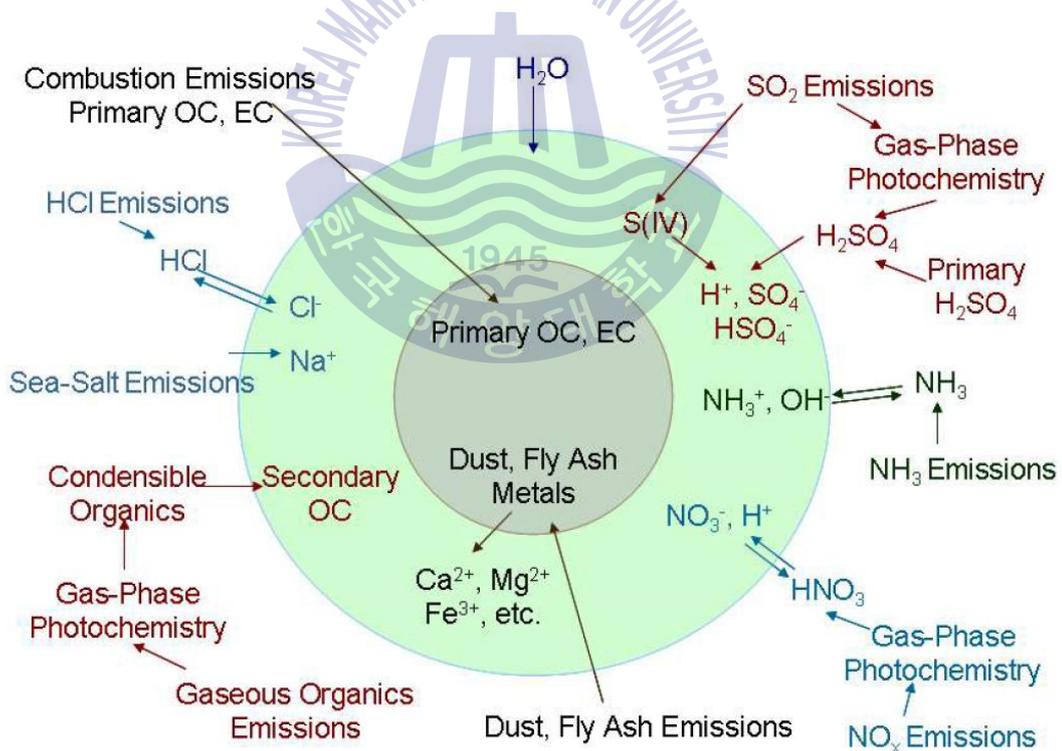
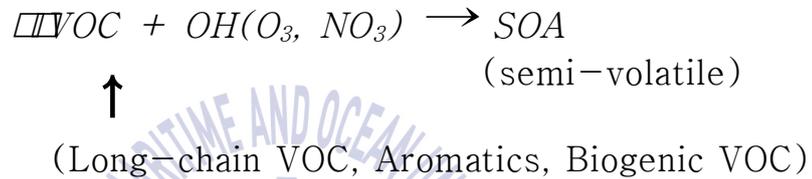


Fig. 1차 및 2차 입자상물질(PM) 생성 과정

입자상물질(PM)의 생성은 유기적인 생성(Organic formation)과 무기적인 생성(Inorganic formation)으로 구분할 수 있다.

유기적인 생성(Organic formation)은 대기 중에 존재하는 탄소가 8개 이상의 alkane 및 alkene 계열, Terpene 및 Isoprene 등의 자연배출 유기성화합물, 그리고 Toluene 등의 방향족 등의 유기화합물이 OH, O<sub>3</sub> 및 NO<sub>3</sub>에 의한 산화반응에 의해서 고분자성 유기물로 변환되는 것을 말하며, 아래의 식과 같이 Table 2.2는 2차 생성 유기성 입자상물질(PM)의 반응식과 기본적인 변화율을 나타낸 것이다.[21]



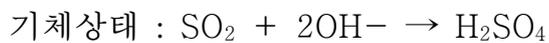
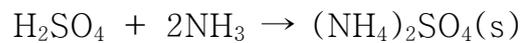
**Table 2.2** 2차 생성 유기성 입자상물질(PM)의 반응식과 변화율

Gas-Phase Organic Species	Aerosol Yield [ $\mu\text{gm}^{-3}$ / ppm(reacted)]
C8 and higher alkanes	380
Anthropogenic internal alkenes	247
monoterpense	740
toluene	424
xylene	342
cresol	221

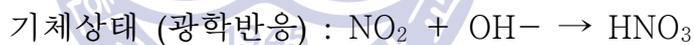
무기적인 생성(Inorganic formation)은 대기 중의 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>)이 서로 반응하여 황산염(Sulfate), 질산염(Nitrate), 암모늄(Ammonium)을 발생시키는 것을 말한다. 황산염

(Sulfate)은 대기 중 황산화물이 반응하여 생성되는 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 화합되어 생성되고, 질산염(Nitrate)은 대기 중 질소산화물(NO<sub>x</sub>)이 수증기와 반응하여 생성된 질산과 암모니아가 화합되어 생성된다. 황산염(Sulfate) 생성은 비가역반응, 질산염(Nitrate) 생성은 가역반응이 이뤄진다.

#### 황산염(Sulfate) 생성



#### 질산염(Nitrate) 생성



한편, 질산염(Nitrate) 생성은 가역적 평형반응이므로 대기 중에 존재하는 질소산화물, 암모니아 및 질산염(Nitrate)의 농도와 온도에 의해서 반응 방향 및 2차 생성 질산염의 농도가 결정된다. 또한 질산염(Nitrate) 생성에 주요 반응물인 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 황산염(Sulfate) 반응에도 참여하므로 대기 중에 2차 생성되는 무기성 입자상물질은 암모니아(NH<sub>3</sub>)의 농도에 따라서 결정된다. 따라서 2차로 생성되는 입자상물질(PM)은 Table 2.3에서 나타낸 바와 같이 암모니아(NH<sub>3</sub>)의 농도가 과대(rich) 및 과소(deficient) 영역으로 각각 구분되고 그에 따른 2차 입자상물질(PM)의 생

성 반응의 특성도 다르게 진행된다.[20]

**Table 2.3** 암모니아(NH<sub>3</sub>) 농도에 따른 2차 입자상물질(PM) 생성 반응의 특성

구분	NH <sub>4</sub> /SO <sub>4</sub> 몰비	2차 입자상물질(PM) 생성 반응 특성
NH <sub>3</sub> 과소(deficient)	< 2.0	- 저농도의 질산염, 산성 에어로졸의 생성 - 질산염 생성이 RH에 민감함
NH <sub>3</sub> 과대(rich)	>2.0	- 질산염 풍부 - NH <sub>3</sub> 과잉





## 제 3 장 소형선박용 고속디젤기관의 연료유 분석

### 3.1 소형선박용 고속디젤기관의 연료유 사용 현황

디젤 기관에서 착화성이 나쁜 연료를 사용하면 착화지연시간이 길어지고, 이 구간 중에 분사되어 축적된 연료가 매우 급격하게 연소하여 디젤 노크(diesel knock)를 일으키게 된다. 따라서 착화지연시간이 길수록 노크의 세기는 증가한다. 착화지연을 최소화하기 위해서는 연료의 착화성이 좋은 연료를 사용하는 것이 중요하다. 일반적으로 세탄값이 높은 연료일수록 디젤노크가 잘 일어나지 않는데, 고속디젤기관의 적정 세탄가는 52~58 정도이다.

국내 연안의 소형선박은 주기관 및 보조기관으로 고속디젤기관을 사용함에 따라 선박용 경유를 연료로 사용한다. 국내에서 공급되는 선박용 경유는 ISO 분류체계에 의하면 Marine Gas Oil(MGO)에 해당된다.[20]

선박에서 사용하는 MGO는 육상의 경유와 대체적으로 성분이 비슷하여 혼용이 가능하나, 황 함유량에 있어 미묘한 차이를 보인다. 이는 육상차량용 경유와 선박용 경유의 품질기준이 다르게 정하고 있는 현실을 반영한 것이다. “석유제품의 품질기준과 검사방법 및 검사수수료에 관한 고시” (산업통상자원부고시 제2018-67호, 2018.4.9.)에서 정하고 있는 경유의 황 함유량 제한기준에 따르면, 자동차용은 10 ppm 이하이나, 선박용은 이 보다 50배나 높은 500 ppm 이하로 규정하고 있다. 세탄가도 자동차용은 52 이상이나, 선박용은 40 이상으로 차이를 보이고 있다. 아울러 「해양환경관리법」에서도 국내 영해 내에서 운항하는 선박이 연료

유로 사용하는 경유의 황 함유량을 500 ppm 이하로 규정하고 있다. 이러한 점 때문에 선박용 경유는 통상 “고유황유”로, 자동차용 경유는 “저유황유”로 일컬어지고 있다.

Table 3.1 경유의 품질기준

항목	등급	자동차용	선박용
유동점 (°C)		0 이하 (겨울용 : -18 이하)	0 이하 (겨울용 : -13 이하)
인화점 (°C)		40 이상	
동점도 (40°C, mm <sup>2</sup> /s)		1. 9이상~5.5 이하	1.5 이상~6.0 이하
증류성상 (90%유출온도, °C)		360이하	-
10% 잔유중 잔류탄소분 (무게%)		0.15 이하	0.20 이하
물과 침전물 (부피%)		0.02이하	
황분 (mg/kg)		10 이하	0.05 이하(무게%)
회분 (무게%)		0.02 이하	0.01 이하
세탄값 (세탄지수)		52 이상	40 이상
동판부식 (100°C, 3h)		1 이하	
필터막힘 점 (°C)		-18 이하	-
윤활성@60°C (HFRR 마모흔경, μm)		400 이하	-
밀도@15°C (kg/m <sup>3</sup> )		815 이상~835 이하	-
다고리방향족 함량 (무게%)		5 이하	-
방향족화합물 함량 (무게%)		30 이하	-
바이오디젤 함량 (부피%)		2 이상 5 이하	-
색(육안식별)		-	빨간색

자료 : “석유제품의품질기준과검사방법및검사수수료에관한고시”(산업통상자원 부고시 제2018-67호, 2018.4.9.)

국내 연근해어선에 공급되는 연료유는 면세혜택이 적용되기 때문에 이 과정에서 다량의 선박용 경유가 저렴한 가격에 보급된다. 이러한 이유로 선박용 경유가 자동차용 등으로 일부 사용되어 해양경찰 등 단속기관에 의해 적발되는 사례가 발생하고 있는데, 이는 탈세문제 뿐만 아니라 고유황유를 비선박용으로 무단 사용하였다는 사유로 관련 법령에 따라 엄격히 통제받고 있는 실정이다.

### 3.2 연료유 샘플 확보 및 분석 결과

본 연구에서는 소형선박용 고속디젤기관의 배기가스 내 대기오염물질을 측정하는 시험을 실시하기에 앞서 시험에 사용될 연료유 샘플을 확보하고 시험분석을 실시하였다.

연료유 샘플 확보에 앞서 자동차용 경유와 선박용 경유의 가장 큰 차이점이 황 함유량이고, 이는 2차 미세먼지 유발물질로 알려진 황산화물(SO<sub>x</sub>)의 발생과 밀접한 연관성이 있을 것이라고 판단하여 다양한 종류의 고유황유를 엔진시험에 활용하고자 하였다.

결과적으로 고유황 경유(High Sulphur Diesel; HSD) 4가지와 육상 교통에 사용되는 저유황 경유(Ultra low Sulphur Diesel; ULSD) 1가지를 확보하였는데, 고유황 경유의 경우 현재 연근해에서 구할 수 있는 황 함유량 0.05% 미만의 선박용 경유 1종(본 연구에서 “MGO A”로 지칭)과 다량의 황이 포함된 연료첨가물을 저유황 경유(Ultra low Sulphur Diesel; ULSD)에 투입하여 제조한 경유 1종(본 연구에서 “MGO D”로 지칭), 그리고 두 경유를 임의의 비율로 혼합하여 제조한 연료 2종(각각 “MGO B”, “MGO C”로 지칭)을 확보하였다. 저유황 경유(Ultra low Sulphur Diesel; ULSD)로는 일반 주유소에 판매되는 자동차용 경유를 확보하였다.

Table 3.2 엔진시험에 사용된 소형선박용 연료유 확보방법

No.	연료유 명칭	확보방법
1	ULSD	국내 일반 주유소에서 판매하는 경유를 구입
2	MGO A	선박연료유 공급업체가 취급하는 선박용경유를 구입
3	MGO B	ULSD와 MGO D를 10 : 1의 비율로 혼합
4	MGO C	ULSD와 MGO D를 2 : 1의 비율로 혼합
5	MGO D	ULSD에 액상의 황첨가제를 투입하여 제조

본격적인 엔진시험을 시작하기 전에 연료의 조성과 물리/화학적 성질에 대하여 분석하고자 한국석유관리원 석유기술연구소에 확보한 연료유 샘플(총 5종)에 대한 시험분석을 의뢰하였으며, 그 결과는 Table 3.3과 같다.

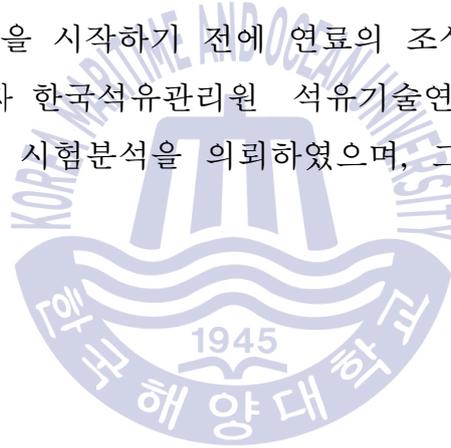


Table 3.3 엔진시험에 사용된 소형선박용 연료 조성 및 물성치 분석결과

Property	Unit	ULSD	MGO "A"	MGO "B"*	MGO "C"*	MGO "D"	
LHV	MJ/kg	42.799	42.684	42.69	42.55	42.326	
HHV	MJ/kg	45.726	45.519	45.654	45.4	45.134	
Density	kg/m <sup>3</sup>	824.5	850.4	828.2	844.4	864.2	
Ash	%	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	
Fe	mg/kg	<1	<1	1	1	1	
C	%	85.66	86.35	85.62	85.48	85.33	
H	%	13.79	13.36	13.71	13.5	13.24	
N	%	<0.75	<0.75	<0.75	<0.75	<0.75	
O	%	0.48	0.27	-	-	-	
S	mg/kg	<b>6</b>	<b>211</b>	<b>1,014</b>	<b>5,021</b>	<b>10,726</b>	
Cetane number	-	54.6	52.5	52.8	51.0	49.1	
Aromatic total	%	19.7	26.4	20.5	23.0	26.4	
Aromatic composition	MAH	%	18.3	23.7	18.0	17.3	16.4
	PAH	%	1.4	2.7	2.1	4.4	7.9
	DAH	%	0.2	2.6	0.6	1.1	2.1
	TAH	%	1.2	0.1	2	5.6	10.0
Non-aromatic total	%	80.3	73.6	79.5	77	73.6	
Kinematic viscosity	mm <sup>2</sup> /s at 40°C	2.468	3.791	2.525	3.185	4.555	
Pour Point	°C	-9	-6	-8	-7	-6	

\* 분석기관 : 한국석유관리원 석유기술연구소

황 함유량의 경우 ULSD와 MGO A, MGO D는 각각 6, 211, 10,726 mg/kg으로 각각 35배, 180배 정도 차이를 보이고 있다. 따라서 황산화물(SOx) 배출량의 경우 큰 차이가 예상되나, 저위발열량(Lower heating value; LHV)이 동일하기 때문에 거의 동일한 출력 특성을 나타낼 것으로 판단된다.

선박용 엔진과 같은 압축착화엔진에서는 연료의 착화 특성을 나타내는 세탄가(Cetane index)의 값이 커질수록 압착착화가 용이하게 일어나 연소 특성이 좋아지며 소음 및 연비, 배출가스 특성에도 영향을 주는데, 이번 연구에서는 대상 연료 모두 세탄가 50 이상이기엔 엔진 상에서 착화 및 연소에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

황 함유량이 높을수록 세탄지수(Cetane index)가 낮아지는 것으로 분석되었으나, MGO C와 MGO D를 서로 비교할 때 황 함유량은 5,000ppm이 차이나지만, 세탄지수(Cetane index)의 큰 변화가 없는 점을 비추어 볼 때 황 함유량과 세탄지수 사이의 연관성은 없는 것으로 판단된다.

다만, 황함유량이 높을수록 40℃ 동점도(kinetic viscosity)가 높게 나타나는 결과를 볼 수 있다. 각 연료유의 40℃ 동점도(kinetic viscosity)를 살펴보면, 황 함유량이 6 ppm인 ULSD는 2.468 cSt, 황 함유량이 211 ppm인 MGO A는 3.791 cSt, 황 함유량이 10,726 ppm인 MGO D는 4.555 cSt이다. MGO A와 MGO D의 동점도 변화를 보면, 황 함유량이 급격히 증가한 반면에 40℃ 동점도(kinetic viscosity)는 약간 증가한 점을 볼 때 40℃ 동점도(kinetic viscosity) 증가가 황 함유량 증가 사이의 일정한 비례관계는 성립되지 않는 것으로 판단된다. 그러나, 전반적으로 황 함유량이 증가 시 40℃ 동점도(kinetic viscosity)가 일부 증가하는 경향이 나타나고 있다.

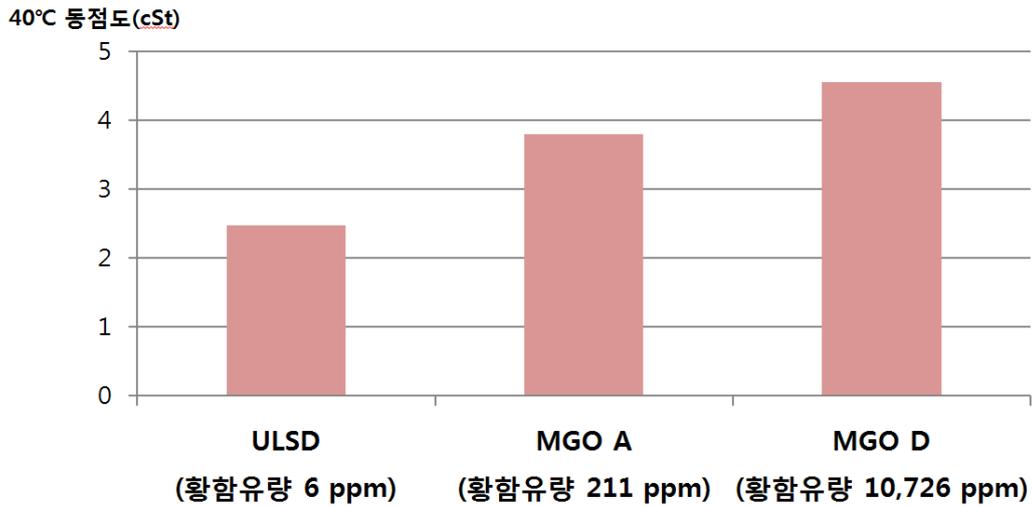


Fig. 3.1 연료유별 40°C 동점도(kinetic viscosity) 분석 결과

이익성 등(2017)이 실시한 저유황경유(황 함유량 100 ppm미만)와 고유황경유(황 함유량 360 ppm)의 40°C 동점도(kinetic viscosity) 분석결과를 보면, 저유황경유는 2.894 cSt, 고유황경유는 3.596 cSt로 나타나 고유황경유가 저유황경유에 비해 0.709 cSt 높은 것으로 분석되었다.[21]



## 제 4 장 엔진시험장치 및 시험방법

### 4.1 엔진시험장치

본 연구에서 총 2종의 500kW이하 소형고속디젤엔진을 사용하여 엔진시험장치를 구성하였고 이에 대한 세부내용은 다음과 같다.

#### 4.1.1 엔진

본 연구에서 사용된 소형 고속디젤엔진은 현재 연근해 선박에서 사용하는 정격출력 360 PS의 두산 L126TIH 엔진과 정격출력 430 PS의 대동 DD6CAM 엔진이다. 모두 선박에 설치되어 운전해 오던 엔진을 소모품 교체 및 분해 정비하여 엔진시험에 활용하였다.

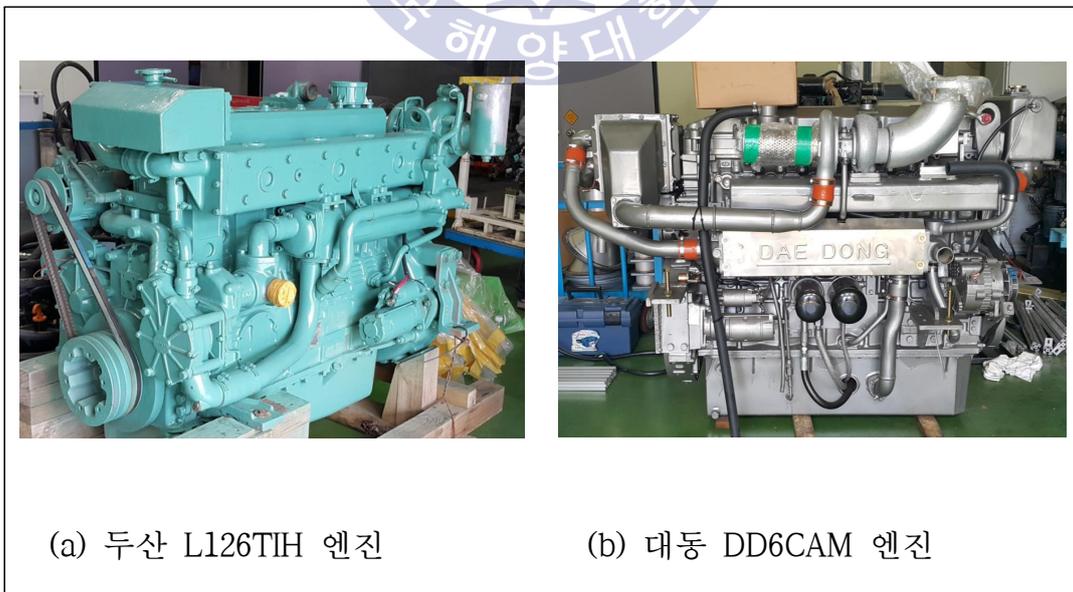


Fig. 4.1 엔진시험용 소형고속디젤엔진의 모습

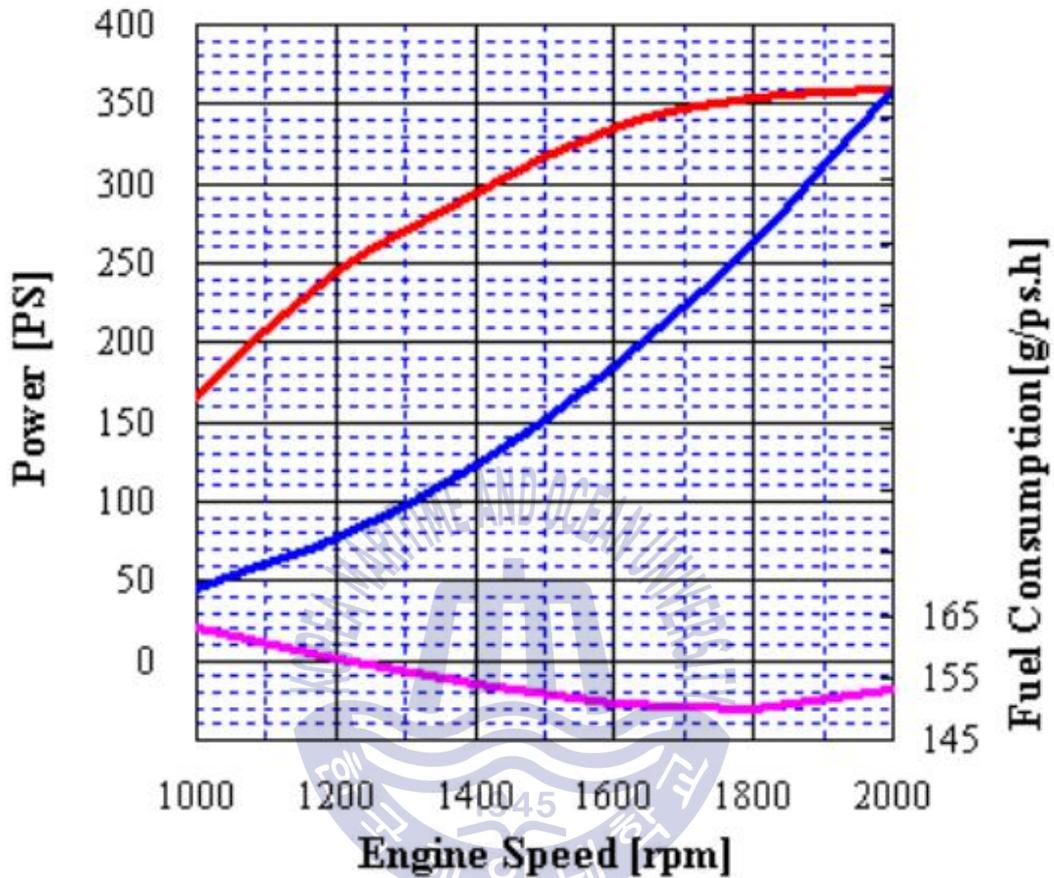
두산 L125TIH 엔진과 대동기계공업 DD6CAM 엔진의 제원은 Table 4.1과 같다.

**Table 4.1** 엔진시험용 소형고속디젤엔진의 제원

Engine Maker/ Model	두산인프라코어/ L126TIH	대동기계공업/ DD6CAM
Engine type	4 stoke, In-line, water cooled	4 stoke, In-line, water cooled
Cylinder number	6	6
Displacement (cc)	11,051	12,920
Bore x Stroke (mm)	123 x 155	133 x 155
Max. Power	360 PS (at 2,000 rpm)	430 PS (at 2,000 rpm)
Compression ratio	17:1	17.2:1
Model Year	2003	1998

두산 L126TIH 엔진은 무부하 최대 엔진회전수 2,200rpm에 아이들운전 시 연료 분사타이밍 BTDC 14±1 CAD를 적용하고, 해수를 냉각수 열교환기로 공급하여 엔진을 냉각하는 간접 냉각 방식의 선박 주기용 6기통 고속엔진이다. 제조사에서 제공한 엔진 회전수 대비 출력 성능과 연료 소모량에 대한 곡선은 **Fig. 4.2**와 같은데, 이는 최근 판매되고 있는 신형 엔진에 대한 것으로서 엔진 제작년도인 2003년의 성능 곡선을 구할

수 없었다. 따라서 출력 성능과 연료 소모량에 대한 곡선은 참고사항으로 사용해야 할 것으로 판단된다.



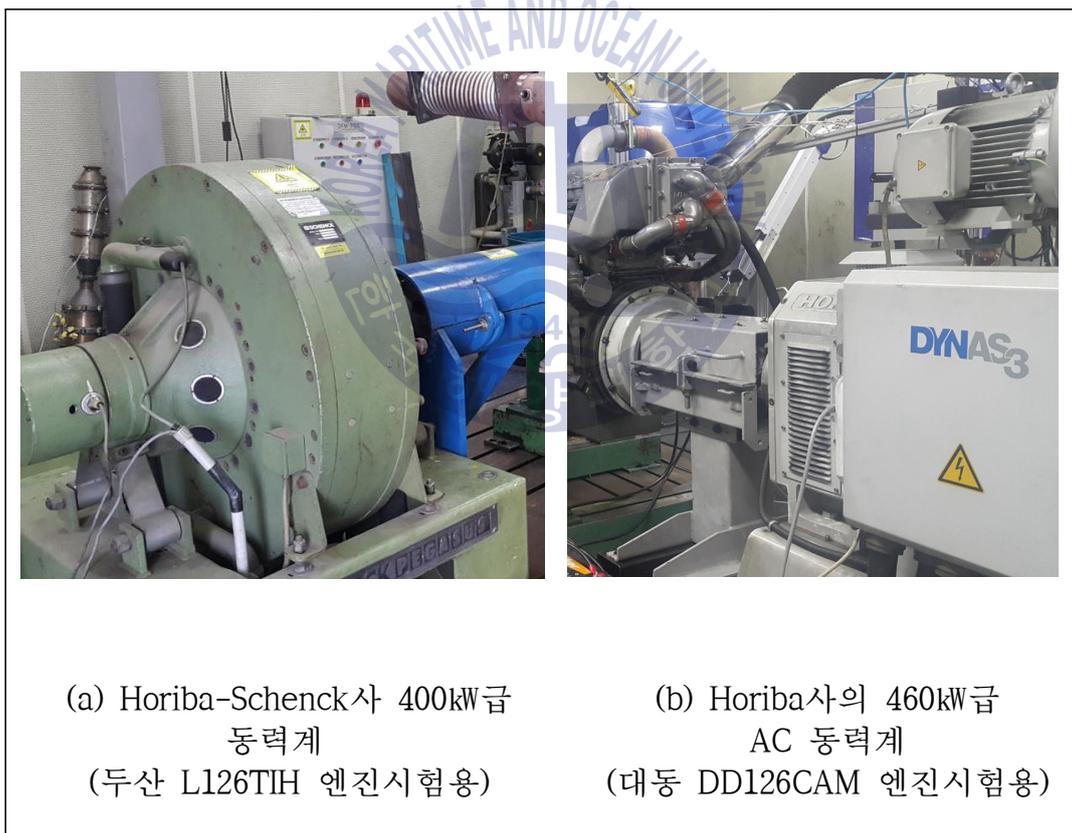
**Fig. 4.2** 두산 L126TIH 엔진의 성능 및 연료소모량 곡선(제조사 제공)

대동공업 DD6CAM 엔진은 해수를 냉각수 열교환기로 공급하여 엔진을 냉각하는 간접 냉각 방식의 430마력급 선박 주기용 6기통 고속디젤엔진이다. 현대 파워텍 D6GD 엔진을 기반으로 대동공업에서 선박용으로 개조되어 판매된 제품으로 지금으로부터 20년 전인 1998년에 제작되었기 때문에 해당년도에 대동공업에서 제공했을 것으로 보이는 엔진 회전수 대비 출력 성능곡선, 연료 소모량 곡선 등을 구할 수 없었다. 앞선 두산 엔진과는 다르게 동 엔진은 연료분사를 전자적으로 제어하는 ECU가 적

용되어 있어 엔진시험과정에서 연료공급량에 대한 정밀한 제어가 용이하였다.

#### 4.1.2 동력계

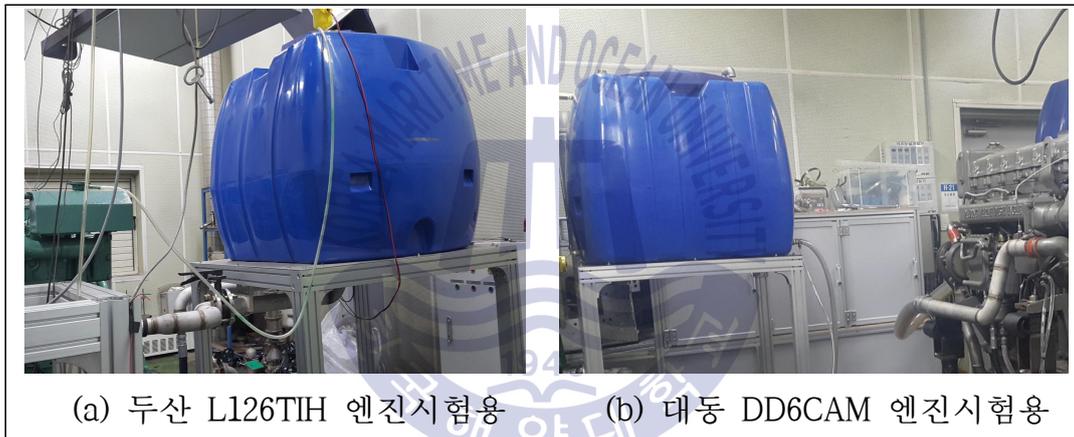
실제 선박에서의 운전 상황을 엔진 실험실에서 구현하기 위해 대상 엔진을 엔진 동력계와 연결하였다. 엔진 동력계는 동력계 제어기와 연계하여 엔진의 토크와 회전수를 제어하는 장비로서 두산 L126TIH 엔진의 경우 Horiba-Schenck사의 400kW급 동력계인 W400을 사용하였고, 대동 DD126CAM 엔진의 경우 Horiba사의 460kW급 AC 동력계인 DYNAS3을 사용하였다.



**Fig. 4.3** 엔진시험에 사용한 동력계

### 4.1.3 냉각수/연료 공급제어장치

선박용 고속디젤엔진에서 엔진 냉각을 위해서는 해수의 급수가 필요하다. 대량의 냉각수를 공급할 수 있는 별도의 냉각수 공급제어장치를 1,000리터 물탱크와 Level sensor, Shut-off valve, 그리고 PID 제어기를 이용하여 구성하였다. 엔진으로의 냉각수 공급으로 인해 물탱크의 수위가 일정 높이 이하로 낮아지면 냉각수 Feed밸브가 자동으로 열려 채워지는 방식의 냉각수 공급제어장치를 활용하였으며, 모든 엔진시험에 동일하게 적용하였다.



**Fig. 4.4** 냉각수 공급제어장치



**Fig. 4.5** 연료 공급제어장치

연료 공급제어장치의 경우 조성이 다른 각각의 연료를 공급하기 위해 3-way valve를 이용하여 변경 공급할 수 있도록 연료공급라인을 구성하였다. 연료분사량을 제어하기 위해 두산 L126TIH 엔진에는 동력계 제어기와 연동되는 Throttle 제어기를 장착하고 엔진 Throttle과 연결하였고, DD6CAM 엔진에는 두산 L126TIH 엔진과는 달리 전자식 Throttle이 장착되어 있기 때문에 연료량을 제어할 수 있도록 동력계 제어기에 설치된 TEMS사의 Throttle 제어기와 연결하였다.

#### 4.2 배기가스측정장치

엔진으로부터 배출되는 대기오염물질의 양과 PM의 양을 측정하기 위해 각 엔진시험장치에 배기가스측정장치를 설치하였다.



**Fig. 4.6** 두산 L126TIH 엔진시험에 사용된 SPC(좌)와 FTIR(우) 장비의 모습

두산엔진의 경우 오스트리아 AVL사의 FTIR과 SPC 장비를 배기라인 후단에 장착해서 사용하였다. FTIR은 레이저를 이용한 가스성분 분석을 통해 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, CO<sub>2</sub> 등을 측정할 수 있으며 별도의 FID 모듈을 장착하여 THC 역시 측정이 가능한 장비이다. SPC는 샘플링한 배기가스를 희석한 후 여지를 통과시켜 걸러진 PM의 무게를 측정하는 PM mass 측정 장비로 유럽과 미국의 배출가스 법규/기준에 만족하는 인증된 장비이다. 배출가스에 포함된 유해물질의 농도 측정값을 무게로 환산하기 위해서는 배기가스 유량을 알아야 한다. 그런데 엔진에서 배출되는 배기가스 유량은 흡입공기량과 연료공급량의 합과 동일하기 때문에 엔진의 흡기부에 흡입공기유량 센서를 설치하고 연료공급라인에 Flowmeter를 장착하여 공기량과 연료량을 각각 측정하였다.



**Fig. 4.7** 대동 DD6CAM 엔진시험에 사용된 AMA i60 배기분석기(좌)와 Nova prime(우) 장비의 모습

대동 DD6CAM 엔진의 경우 오스트리아 AVL사의 배출가스분석기인 AMA i60과 SPC, 그리고 MRU사의 NOVA prime 장비를 배기라인 후단에 장착하였다. AMA i60은 배출가스 내 THC, NOx, CO, CO2 등을 측정하는 공인인증 시험에 사용할 수 있는 인증시험 장치이고, NOVA prime은 배기가스에 포함된 가스성분을 최대 9가지까지 동시에 측정할 수 있는 배기가스 측정 장비로 SOx 배출량을 측정하기 위해 사용하였으며 그 외 측정되는 NOx, CO 등은 AMA i60의 측정값과 상호 검증하는데 사용하였다. 두산 L126TIH 엔진과 마찬가지로 흡입공기량과 연료공급량을 측정하기 위해 엔진 흡기부에 흡입공기유량 센서와 연료공급라인에 Flowmeter를 각각 설치하였으며, 엔진의 운전 상태를 모니터링하기 위해 냉각수 입출구, 터보차저 출구, 흡기매니폴드 등에 온도센서와 압력센서를 설치하였다. 또한 엔진시험실 내의 온도, 압력, 습도를 조절하기 위해 항온항습기를 사용하였다.

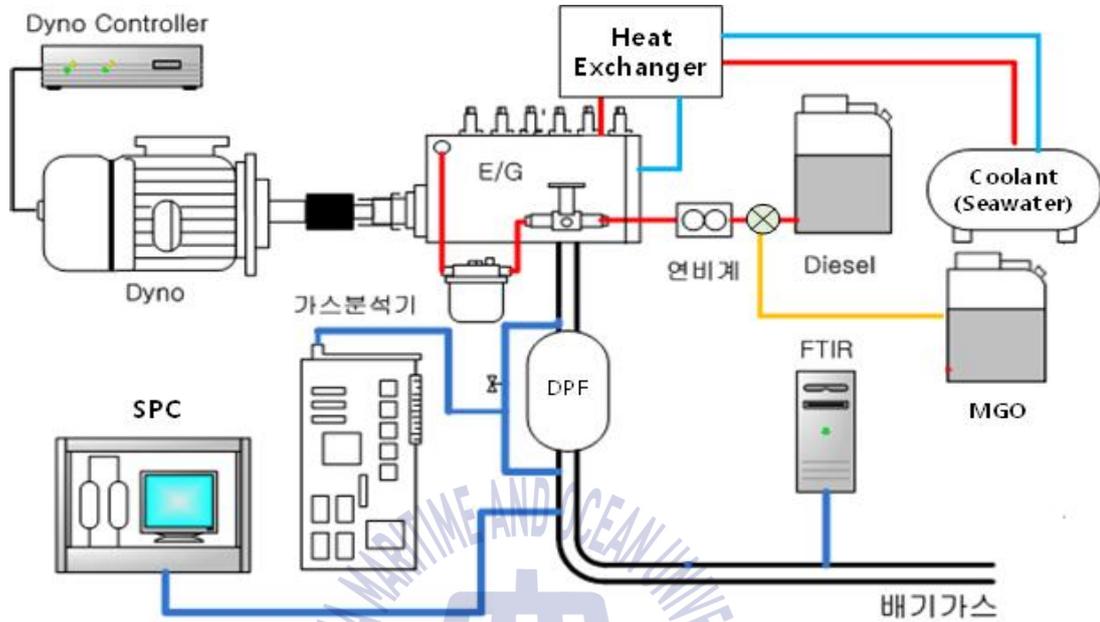
#### 4.3 엔진시험 및 배기가스측정 장치 개략도

**Table 4.2** 두산 L126TIH 엔진시험 및 배기가스측정 장비 목록

No.	품명	규격/모델	제조회사	기능
1	동력계	W400	Schenck Horiba	부하/rpm 제어
2	동력계 제어기	DCON 3100	다산 알앤디	부하/rpm 제어
3	SPC	SPC 478	AVL	PM 측정
4	FTIR	SESAM i60 FT	AVL	배기가스 성분 측정
5	Throttle controller	DTA-000	AVL	연료 분사량 제어
6	Flowmeter	FM-1500	Ono Sokki	연료량 측정
7	Intake Air Flow meter		Eldridge production Inc.	흡입공기량 측정

두산엔진을 활용한 엔진시험 및 배기가스측정 장치를 구성하는 세부장

비를 정리한 목록은 **Table 4.2**와 같으며, 전체 장치 개략도는 **Fig. 4.8**과 같다.



**Fig. 4.8** 두산 L126TIH 엔진시험 및 배기가스측정 장치 개략도

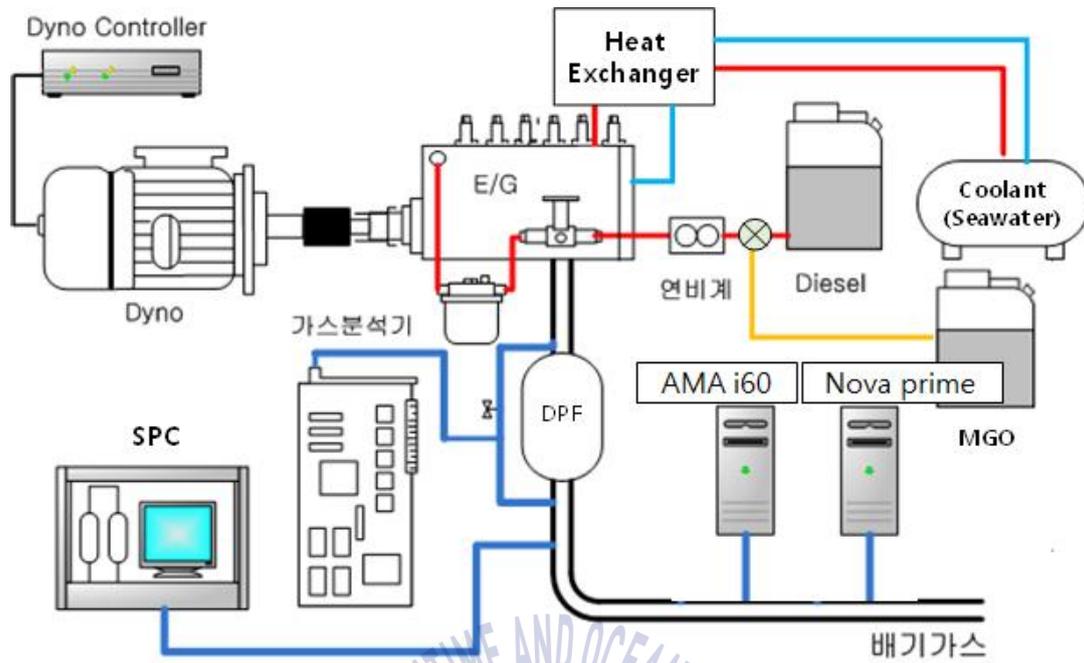


**Fig. 4.9** 두산 L126TIH 엔진시험 및 배기가스측정 장치의 전경

대동엔진을 활용한 엔진시험 및 배기가스측정 장치를 구성하는 세부장비를 정리한 목록은 **Table 4.3**와 같으며, 전체 장치 개략도는 **Fig. 4.10**과 같다.

**Table 4.3** 대동 DD6CAM 엔진시험 및 배기가스측정 장비 목록

No.	품명	규격/모델	제조회사	비 고
1	동력계	DYNAS3	Horiba	부하/rpm 제어
2	동력계 제어기	SPARC	Horiba	부하/rpm 제어
3	SPC	SPC 478	AVL	PM 측정
4	Exhaust gas analyzer	NOVA prime	MRU	배기성분 측정 (SOx)
5	Exhaust gas analyzer	AMA i60	AVL	배기성분 측정
6	Flowmeter	FM-257	Ono Sokki	연료량 측정
7	Intake Air Flow meter		Eldridge production Inc.	흡입공기량 측정



**Fig. 4.10** 대동 DD6CAM 엔진시험 및 배기가스측정 장치 개략도



**Fig. 4.11** 대동 DD6CAM 엔진시험 및 배기가스측정 장치의 전경

#### 4.4 엔진시험방법의 선정

ISO 8178는 다양한 비도로용 엔진에서 배출되는 대기오염물질의 배출량 및 배출 특성을 평가하기 위해 국제적으로 사용하는 시험 모드로 엔진 동력계를 이용한 정상상태 운전을 통해 가스상 물질과 입자상 물질을 모두 측정하는 시험 방법이다.

그 중 ISO 8178-4 (E 모드)는 선박용 엔진에 대상으로 한 것으로 E2 사이클은 선체 크기에 관계없이 일정한 엔진회전수를 기준으로 시험하는 방법이며 E3 사이클은 선박 엔진의 성능곡선을 고려하여 시험하는 방법이다. 따라서 이번 연구에서는 소형 선박 엔진에서 엔진 동력계 상 시험 평가 모드에 하나인 ISO 8178-E2 모드와 ISO 8178-E3 모드를 엔진시험모드로 선정하였다.

**Table 4.4** ISO 8178-4 모드별 적용 대상 엔진 분류 방법

Test cycle	Classification
E1	Diesel engines for craft less than 24 m, except engines for tug/push boats
E2	Heavy-duty, constant-speed engines for marine propulsion, without restriction of vessel length
E3	Heavy-duty engines running on the propeller curve for marine main propulsion, without restriction of vessel length
E4	Spark-ignition engines for craft less than 24 m, except engines for tug/push boats
E5	Diesel engines for craft less than 24 m, except for tug/push boats

참고로 ISO 8178 E 모드는 E1에서 E5까지 5 가지로 분류할 수 있으며 각 모드 별 적용 가능한 엔진 기준은 Table 4.4와 같다.

**Table 4.5** ISO 8178 E2 cycle에서의 출력, 회전수 및 가중계수

ISO8178 E2 cycle		1	2	3	4
원동기 조건	Power (%)	100	75	50	25
	Speed, %	Rated speed			
가중계수		0.2	0.5	0.15	0.15

**Table 4.6** ISO 8178 E3 cycle에서의 출력, 회전수 및 가중계수

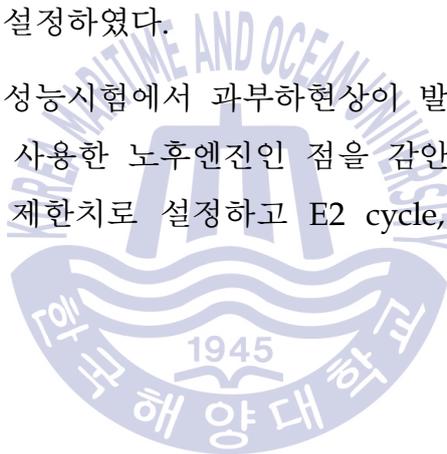
ISO8178 E3 모드		1	2	3	4
원동기 조건	Power (%)	100	75	50	25
	Speed, %	100	91	80	63
가중계수		0.2	0.5	0.15	0.15

E2, E3 모드에 따라 엔진시험 시 적용되는 출력 및 회전수 조건, 가중계수를 **Table 4.5, 4.6**과 같이 정리하였다.

모드 시험을 하기 위해서는 먼저 대상 엔진의 전부하 성능을 알아야하기 때문에 구축한 엔진시험장치를 이용하여 엔진회전수 별로 최대 토크와 최대 출력을 측정하는 시험을 실시하였다. 무엇보다도 이번 연구에서 사용한 중고 엔진의 경우 약 15년 정도 사용한 노후 엔진이기 때문에 원래 성능을 유지하고 있는지 확인하는 것이 필요하였다. 그런데, 두산엔진의 경우 정격출력영역에서 엔진의 과부하현상이 발생하여 정상운전 조건을 유지하기가 어려웠다. 따라서 엔진파손 방지를 위하여 **Fig. 4.2**의 성능곡선에서 나온 값의 75% 수준으로 제한한 상태로 운전하기로 결정하였다.

이러한 결정에 따라 두산엔진의 경우 출력제한치를 정격출력(360 PS)의 75%인 270 PS로 설정하고, 엔진회전수 제한치도 최대회전수 2,000 rpm의 85%인 1,700rpm으로 설정하였다.

대동엔진은 전부하 성능시험에서 과부하현상이 발생하지 않았지만, 마찬가지로 약 20년 정도 사용한 노후엔진인 점을 감안하여 정격출력의 90%, 정격회전수의 95%를 제한치로 설정하고 E2 cycle, E3 cycle 엔진시험을 실시하였다.



#### 4.5 배출량 측정값 보정

엔진시험 중 나오는 배기가스의 대기오염물질에 대하여 측정장치에서 측정된 결과값은 시험 당일의 온도, 압력, 습도 등의 주위 환경에 민감한 영향을 받기 때문에, 이를 보정작업이 필요하다.

동 연구에서 시행하는 엔진시험의 방법과 절차가 자동차 배출가스 허용기준 충족여부 판단을 위한 검사방법과 일부 유사한 점이 있기에 “제작자동차배출허용기준·소음허용기준검사방법및절차에관한규정”(환경부고시 제2008-151호)에서 규정하고 있는 배기가스 측정량 습도 보정방법을 준용하였다.

습도 보정을 위한 배출량 측정은 건식 상태에서 실시하여 다음의 보정식에 의해  $K_w$  계수를 계산하여 보정된다.

$$\text{CONC}(\text{wet}) = K_w \times \text{CONC}(\text{dry})$$

여기서,

CONC(wet) : 습식상태로 환산된 배출농도

CONC(dry) : 건식상태로 측정된 배출농도

$K_w$  : 습식전환계수

$$K_w = \left( 1 - \frac{\alpha}{\left( 1 + \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRW}} \right)} \times \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} \right) - K_{w,2}$$

$$K_{w,2} = \frac{1.608 \times H_a}{1000 + (1.608 \times H_a)}, \quad H_a = \frac{6.220 \times R_a \times p_a}{p_B - p_a \times R_a \times 10^{-2}}$$

여기서,

$G_{FUEL}$  : 연료유량 (kg/h)

$G_{AIRW}$  : 습한 흡입공기량 (kg/h)

$G_{AIRD}$  : 건조 흡입공기량 (kg/h)

$H_a$  : 흡입공기에 포함된 수분량 ( gH<sub>2</sub>O/Kg dry air )

$R_a$  : 흡입공기중의 상대습도 (%)

$p_a$  : 흡입공기의 포화수증기압 (kPa)

$p_d$  : 희석공기의 포화수증기압 (kPa)

$p_B$  : 대기압 (kPa)

$\alpha$  : 연료의 조성을 분석하여 H와 C의 조성이 C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>라 할 때 H와 C의 원자수의 비, y/x (통상 1.969로 한다.)

아울러, 질소산화물(NO<sub>x</sub>)에 대한 습도보정계수 계산식은 다음과 같다.

$$K_{H,D} = \frac{1}{1 + A \times (H_a - 10.71) + B \times (T_a - 298)}$$

여기서,

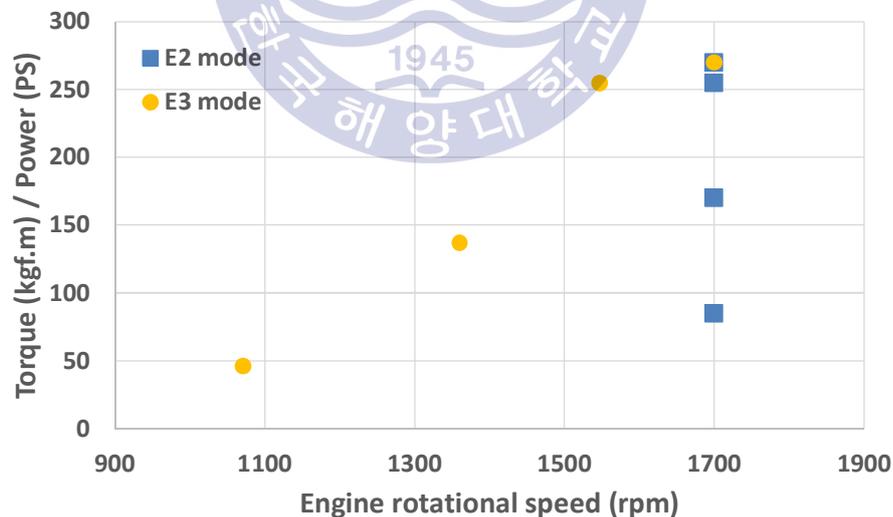
$$A = 0.309 \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} - 0.0266, \quad B = -0.209 \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} + 0.00954$$

$T_a$  : 흡입공기온도 (K)

## 제 5 장 실험 결과 및 고찰

### 5.1 360 PS 고속디젤기관의 대기오염물질 측정 결과

연료 조성에 따른 대기오염물질 배출량 및 배출패턴을 비교, 분석하기 위해 E2, E3 사이클의 각 모드별 운전 조건(엔진회전수 및 출력)을 ULSD와 황 211 ppm이 포함된 MGO A, 황 10,726 ppm이 포함된 MGO D 모두에 대해 동일하게 적용하였다. 이번 연구에서 사용한 두산 L126TIH 엔진이 노후된 중고엔진인 점을 고려하여 정격 출력과 정격 출력에서의 엔진회전수를 각각 75%, 85% 수준으로 낮추었고, E2, E3 사이클의 각 모드별 엔진회전수 및 출력에 대한 조건을 Fig. 4.12과 같이 정리하였다.

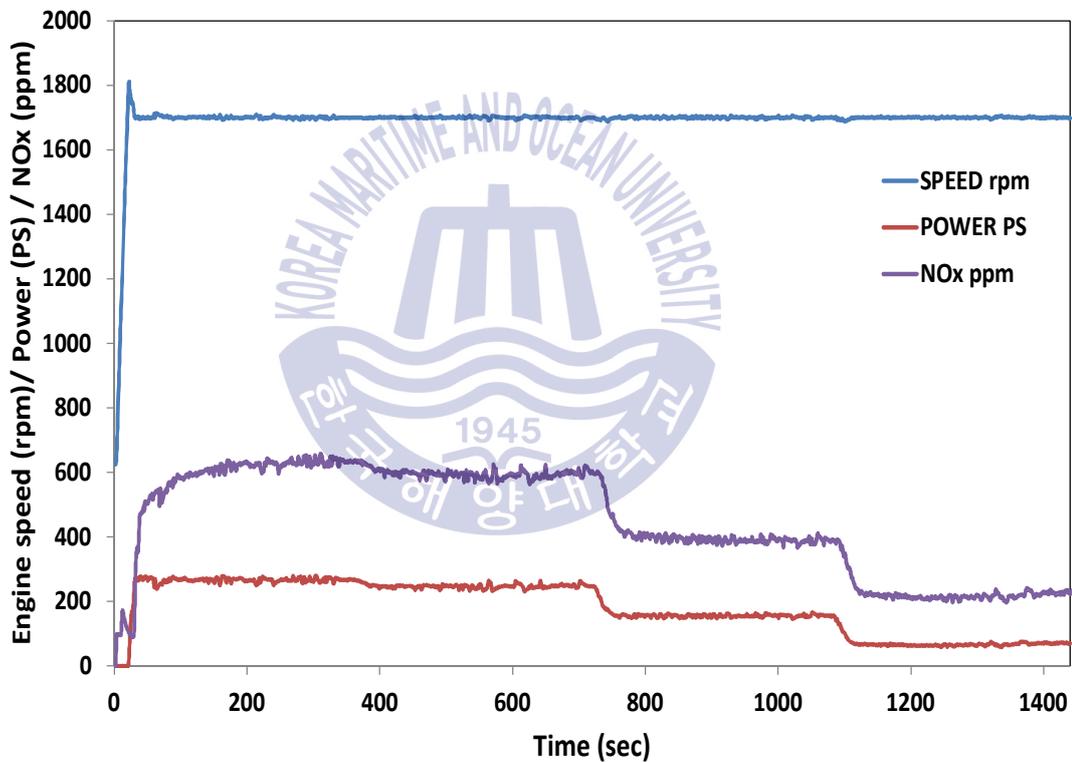


**Fig. 4.12** 출력을 제한한 L126TIH 엔진에 대한 ISO8178 E2/E3 사이클 운전 조건

E2, E3 사이클 운전에 따른 대기오염물질 측정결과는 다음과 같다.

### 5.1.1 ISO 8178-E2 cycle 운전 시 측정결과

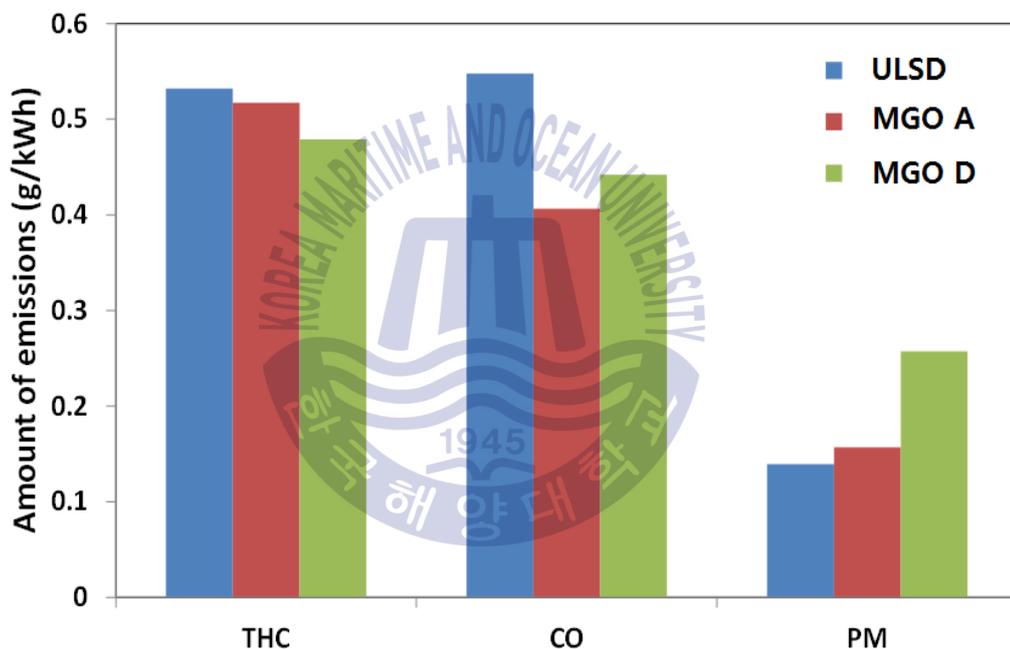
E2 사이클 운전 후 얻은 엔진 회전수, 출력, NOx 측정 결과를 시간에 따라 Fig. 4.13과 같이 나타내었다. Fig. 4.13에서 볼 수 있는 것처럼 엔진 회전수 1700 rpm과 각 모드별 출력값을 잘 유지하는 것을 확인할 수 있었다. NOx 역시 각 모드별로 배출량이 변화하는 모습을 관찰할 수 있었으며 부하가 증가할수록 더 많은 NOx가 배출됨을 확인할 수 있었다.



**Fig. 4.13** E2 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NOx 배출량 측정 결과

다음은 각 연료에 대해 E2 사이클 운전 시 측정된 대기오염 물질인

THC, CO, PM에 대해 각 모드별 가중치를 고려하여 얻은 배출량 및 배출 패턴 결과를 **Fig. 4.14**와 같이 확인할 수 있다. 참고로 **Fig. 4.14**에서 표기된 ULSD, MGO500, MGO1000은 **Table 3.2**에서 언급된 ULSD, MGO A, MGO D를 의미한다. 대기오염물질 배출량의 경우 시험 당일의 온도, 압력, 습도 등의 주위 환경에 민감한 영향을 받기 때문에 이를 보정하기 위해  $K_w$  계수를 계산하여 배출량 산정에 반영하였으며 추후 DD6CAM 엔진의 배출량과 정량적으로 비교하기 위해 단위 출력당 배출량인 g/kWh로 환산하였다.

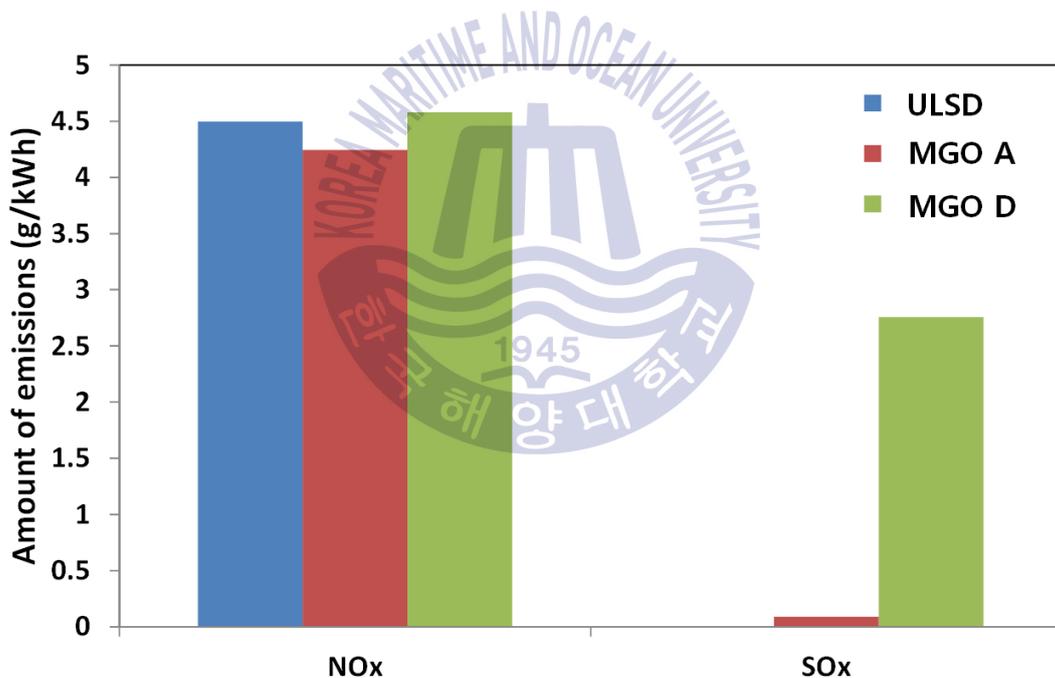


**Fig. 4.14** E2 사이클에서 연료 변화에 따른 THC, CO, PM 배출량 측정 결과

**Fig. 4.14**에서 볼 수 있는 것처럼 연료 내 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO가 감소하는데, 이는 황이 더 많이 포함된 고유황유일수록 점도가 증가하기 때문에 연료분사 후 착화되기까지 더 많은 시간이 걸리고

그로 인해 예혼합 정도가 증가하기 때문이다. 연료분사시기가 최적화되어 있는 전자식 엔진의 경우 이 같은 착화지연은 예혼합도를 증가시키는 효과보다 연소가 지연되어 효율이 감소하는 부정적인 효과가 발생할 수도 있으나, 대상엔진과 같은 기계식엔진의 경우 연료분사시기가 최적화되어 있지 않기 때문에 예혼합도 증가가 연소특성을 향상시켜 THC와 CO가 감소하는 방향으로 작용한 것으로 판단된다.

입자상물질(PM)의 경우 황 함유량이 증가할수록 크게 증가하여 ULSD에 비해 MGO A는 약 1.12배, MGO D는 약 1.84배 더 많이 배출하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 사용된 연료유가 점성이 증가하여 분사된 연료의 기화특성 악화로 연소상태가 나빠졌기 때문으로 판단된다.[22]



**Fig. 4.15** E2 사이클에서 연료 변화에 따른 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출량 측정 결과

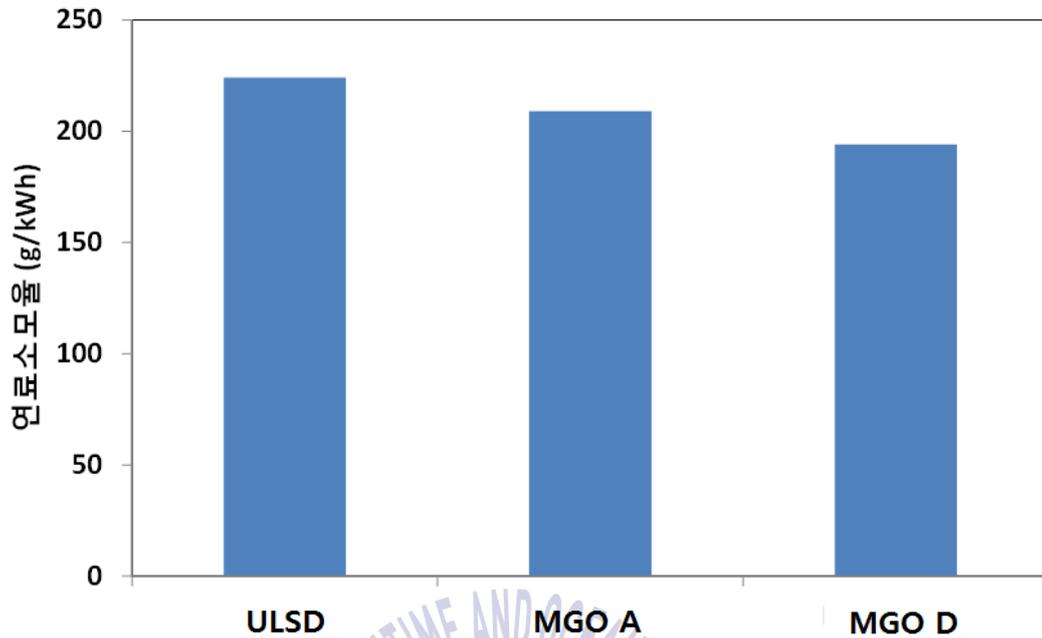
**Fig. 4.15**는 각 연료에 대해 E2 사이클 운전 시 측정된 NO<sub>x</sub>와 SO<sub>x</sub> 배출량과 배출 패턴을 각 싸이클별 가중치를 고려하여 측정된 결과이다. THC, CO 등과 마찬가지로 주위 환경변수를 K<sub>w</sub> 계수로 보정한 후 단위

출력당 배출량인 g/kWh로 환산하였다.

NO<sub>x</sub>의 경우 황 함유량과 큰 상관관계가 없는 것처럼 보이는데, 이는 고유황유의 낮은 세탄가는 착화지연을 통해 NO<sub>x</sub> 발생을 감소시키는 방향으로 작용하는 반면 단위 부피당 더 높은 발열량은 동일 부피의 연료 분사 시 연소온도를 높여 NO<sub>x</sub>를 증가시키는 쪽으로 작용하기 때문으로 보인다.

약 6ppm의 황이 함유된 ULSD의 경우 SO<sub>x</sub>가 거의 배출되지 않지만 약 211 ppm의 황이 함유된 MGO A의 경우 0.09 g.kWh, MGO D의 경우 2.756 g/kWh의 SO<sub>x</sub>가 배출되었다. 이때 MGO D는 MGO A에 비해 연료 내에 약 50배의 황을 포함하고 있음에도 배출되는 SO<sub>x</sub>의 양은 약 30배 정도임을 알 수 있는데 이는 나머지 황이 가스상 물질인 SO<sub>x</sub>가 아닌 입자상 물질인 Sulfate의 형태로 배출된 것으로 추정된다. 왜냐하면 **Fig. 4.14**에서 고유황유 사용 시 배출되는 입자상물질이 크게 증가하였기 때문이다.

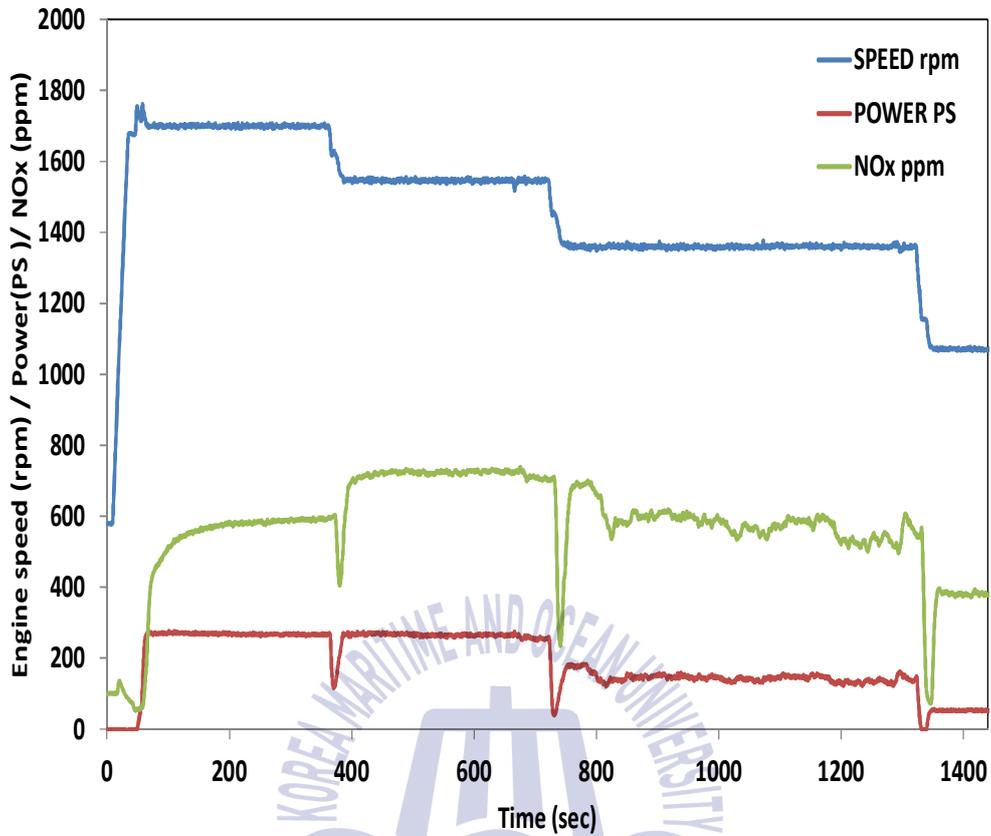
**Fig. 4.16**은 E2 시험 모드에서 연료에 따른 연료소모율 변화 결과를 나타낸 그림으로 황 함유량이 증가할수록 연료소모율이 작아짐을 볼 수 있었다. 이는 고유황유 사용 시 선박 엔진의 연비가 좋아짐을 의미하는데, 고유황유의 단위 부피당 발열량이 더 크므로 동일 부피에 대해 더 많은 출력을 낼 수 있기 때문으로 판단된다.



**Fig. 4.16** E2 사이클에서 연료 변화에 따른 연료소모율 측정 결과

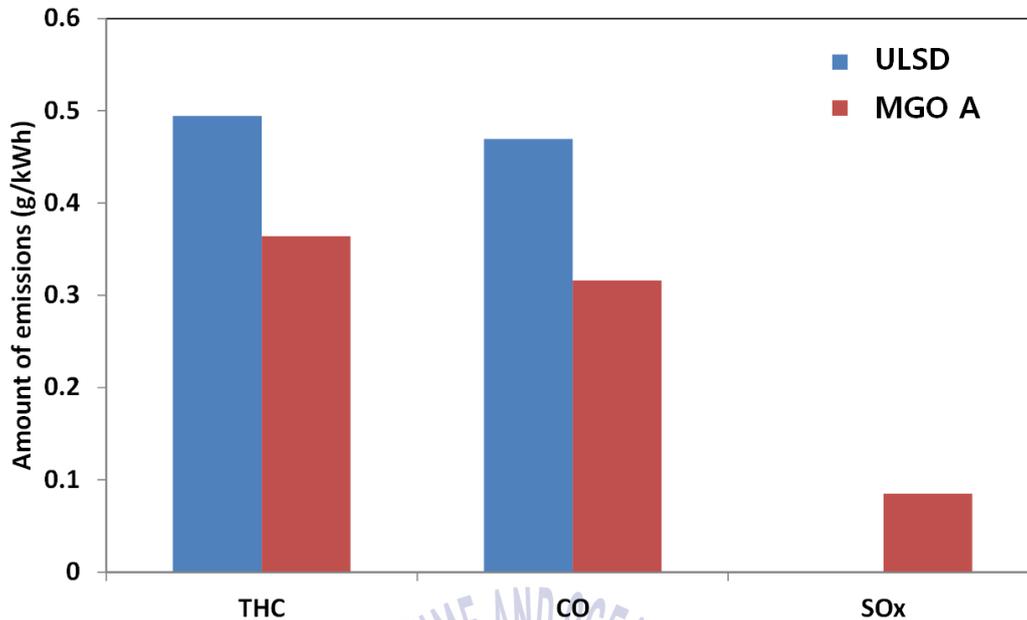
### 5.1.2 ISO 8178-E3 cycle 운전 시 측정결과

**Fig. 4.17**에서 볼 수 있는 것처럼 E3 사이클의 경우 각 모드별로 동시에 변화하는 엔진 회전수와 출력을 잘 따라감을 확인하였다. 다만 각 모드별 천이과정이 스로틀 개도가 감소한 후 엔진 회전수를 제어하는 순서로 이루어졌기 때문에 먼저 스로틀 감소로 출력이 낮아졌다가 엔진 회전수도 함께 감소하면서 출력을 회복하는 형태의 모드 운전 진행 모습을 보였다. 참고로 NO<sub>x</sub>의 경우 배기가스 온도가 더 높은 E2 싸이클에서 더 많이 배출되었다.



**Fig. 4.17** E3 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NOx 배출량 측정 결과

E3 사이클 운전 시 각 연료별 측정된 대기오염물질인 THC, CO, SOx에 대해 각 모드별 가중치 및 환경 보정계수를 고려하여 얻은 배출량 및 배출 패턴 결과를 **Fig. 4.18**과 같이 나타내었다. 이는 E2 사이클 시험 결과와 마찬가지로 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO 배출량은 감소하는 반면 SOx 배출량은 증가하는 것을 보여주고 있다.



**Fig. 4.18** E3 사이클에서 연료 변화에 따른 THC, CO, SOx 배출량 측정 결과

상기와 같이 정리한 E2, E3 사이클 시험 결과로부터 연료 내 황 함유량 변화에 따른 연료 물성 및 대기오염물질 배출 패턴을 분석해보면 다음과 같다.

E2, E3 사이클 모두에 대해 황이 더 많이 포함된 연료를 사용하면 THC와 CO의 단위 출력 당 배출량은 감소하는 반면 PM과 SOx 배출량은 크게 증가한다.

고유황 연료에 포함된 황 성분은 연료의 점성을 증가시키고 황산염(Sulfate)을 발생시킨다. 특히 고유황 연료 사용 시 증가된 황 성분이 가스상 물질인 황산화물(SOx) 뿐만 아니라 황산염(Sulfate) 성분이 함유된 입자상 물질로도 많이 배출된다. 따라서 실제 황산화물(SOx) 측정량은 연료 내 증가된 황의 양만큼 증가하지는 않는 모습을 보였다.

NO<sub>x</sub>의 경우 연료의 황 함유량 변화에도 배출량의 큰 변화를 보이지 않았다.

## 5.2 430 PS 고속디젤기관의 대기오염물질 측정 결과

430 PS 대동 DD6CAM엔진의 시험은 두산 L126TIH 엔진 시험과 동일하게 E2, E3 사이클의 운전 조건(엔진회전수 및 출력)에서 실시하였으며, 연료는 ULSD(황 6ppm 함유), MGO A (황 211 ppm 함유), MGO B (황 1,014ppm 함유), MGO C (황 5,021 ppm 함유), MGO D (황 10,726 ppm 함유) 등 5 가지를 사용하였다. 대동 DD6CAM엔진 또한 노후된 중고엔진인 점을 고려하여 최대출력과 최대출력에서의 엔진회전수를 낮추었는데, 각각 정격출력의 95%, 정격회전수의 90% 수준으로 설정하였으며, E2, E3 사이클의 각 모드별 엔진회전수 및 출력에 대한 조건을 Fig. 4.19와 같이 정리하였다.

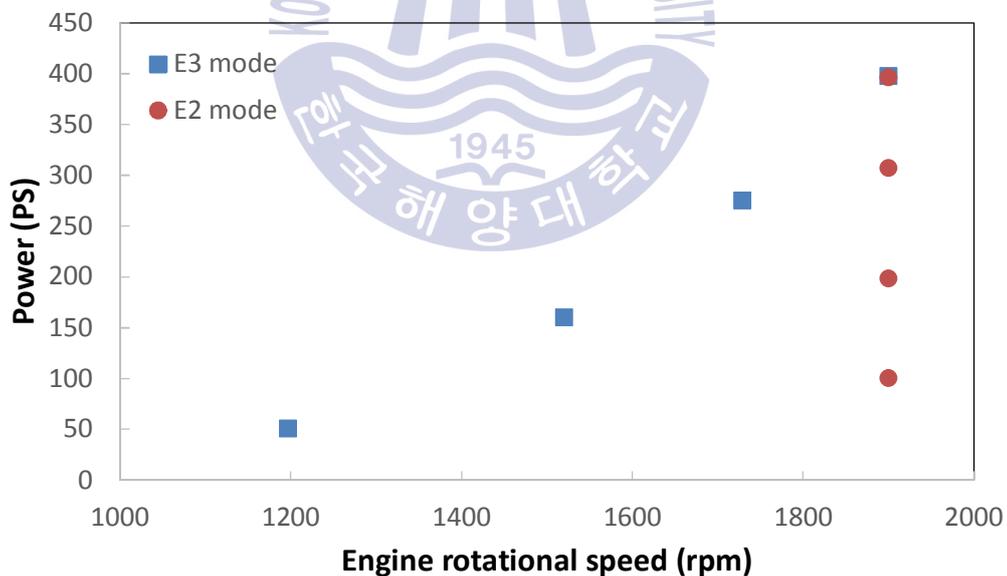
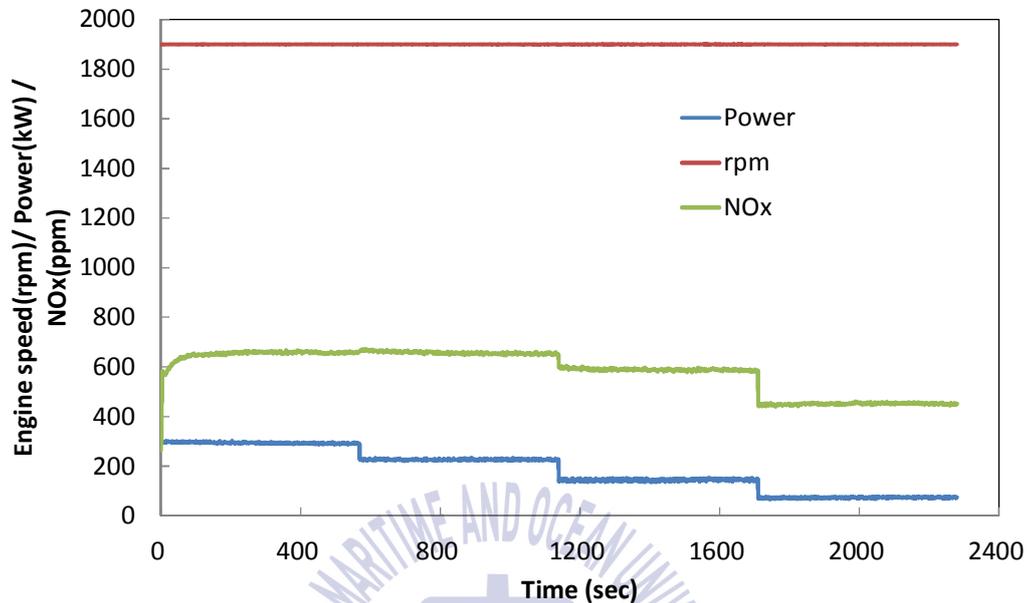


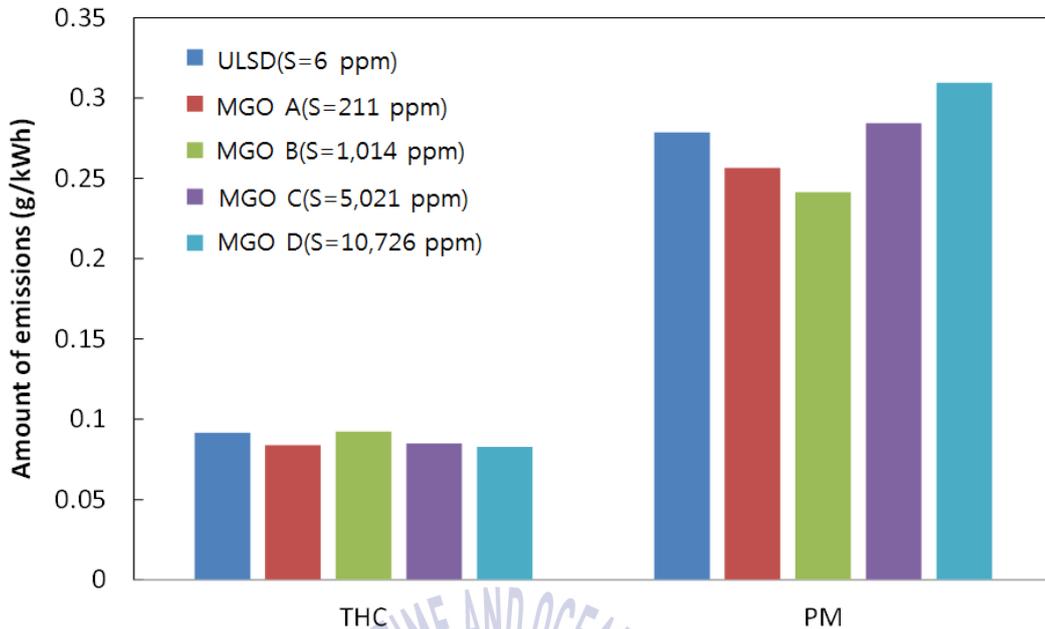
Fig. 4.19 DD6CAM 엔진에 대한 ISO8178 E2/E3 사이클 운전 조건

## 5.2.1 ISO 8178-E2 cycle 운전 시 측정결과



**Fig. 4.20** E2 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NOx 배출량 측정 결과(사용연료: ULSD)

**Fig. 4.20**는 ULSD를 연료로 사용하여 E2 사이클 운전 후 얻은 엔진 회전수, 출력, 질소산화물(NOx) 측정 결과를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. **Fig. 4.20**에서 볼 수 있는 것처럼 엔진 회전수 1,900 rpm과 각 모드별 출력값이 잘 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 질소산화물(NOx) 역시 각 모드별로 배출량이 변화하는 모습을 관찰할 수 있었으며, 부하가 증가할수록 더 많은 질소산화물(NOx)이 배출됨을 확인할 수 있었다.

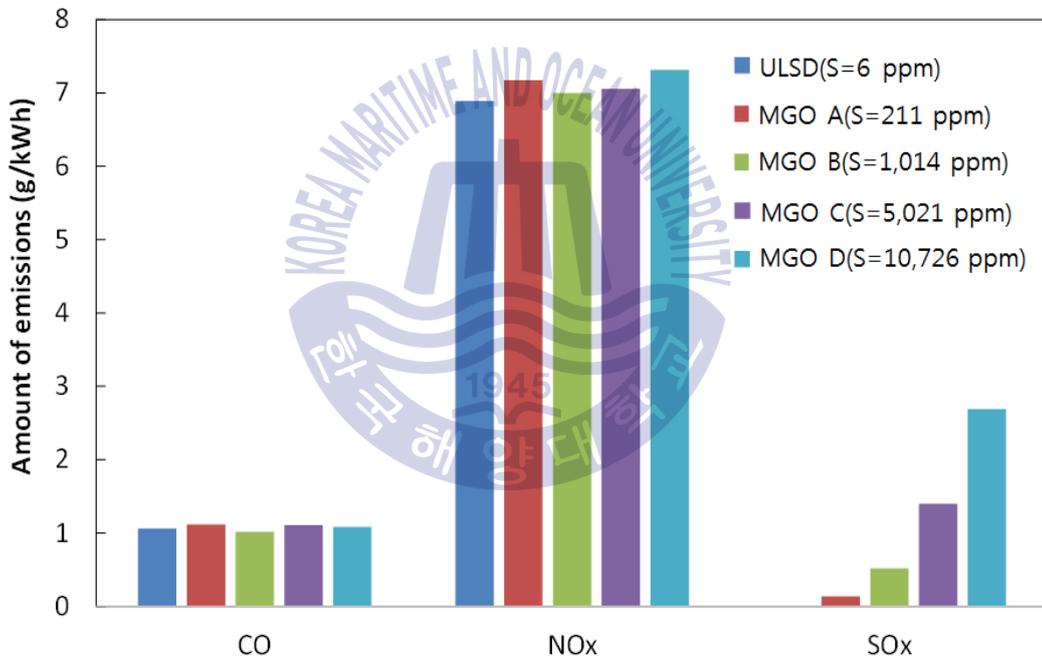


**Fig. 4.21** E2 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 THC, PM 배출량 측정 결과

**Fig. 4.21**은 각 연료에 대해 E2 사이클 운전 시 측정된 대기오염 물질인 THC, PM에 대해 각 모드별 가중치를 고려하여 얻은 배출량 및 배출 패턴 결과를 정리한 것이다. 대기오염물질 배출량의 경우 시험 당일의 온도, 압력, 습도 등의 주위 환경에 민감한 영향을 받기 때문에 이를 보정하기 위해  $K_w$  계수를 계산하여 배출량 산정에 반영하여 단위 출력당 배출량인 g/kWh로 환산하였다.

THC의 경우 두산 엔진 시험 결과와 비교하여 약 20% 수준으로 낮게 측정되었는데, 이는 기계식 엔진인 L126TIH 엔진과는 달리 DD6CAM 엔진은 연료 분사량과 분사시기 등을 전자식으로 제어하는 엔진이어서 연료 분사가 미연소된 탄화수소 배출 저감에 최적화되었기 때문으로 판단된다. 또한 연료 내 황 함유량이 증가하더라도 THC 배출량은 큰 변화가 없는 것을 볼 수 있는데, 고유황유 사용 시 THC 산화에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다.

입자상물질(PM)의 경우 황 함유량이 증가함에 따라 처음에는 감소하지만 황 함유량 1,000 ppm 근방에서부터 다시 증가하여 MGO D (황 함유량 10,726 ppm)의 경우 ULSD(ULSD)에 비해 약 1.1배 더 많은 PM을 배출하였다. 연료의 운활성과 점성을 동시에 증가시키는 황의 효과를 고려해볼 때 황 함유량이 적은 경우 점성 증가 효과는 미미하지만 운활성 향상 효과는 상대적으로 커서 분무 특성이 향상되는 반면, 황 함유량이 일정 수준 (1,000 ppm) 이상이 되는 경우 연료의 점성 증가로 분사된 연료의 기화특성이 악화되고 분무거리도 길어져 PM 발생이 증가하는 것으로 판단된다.

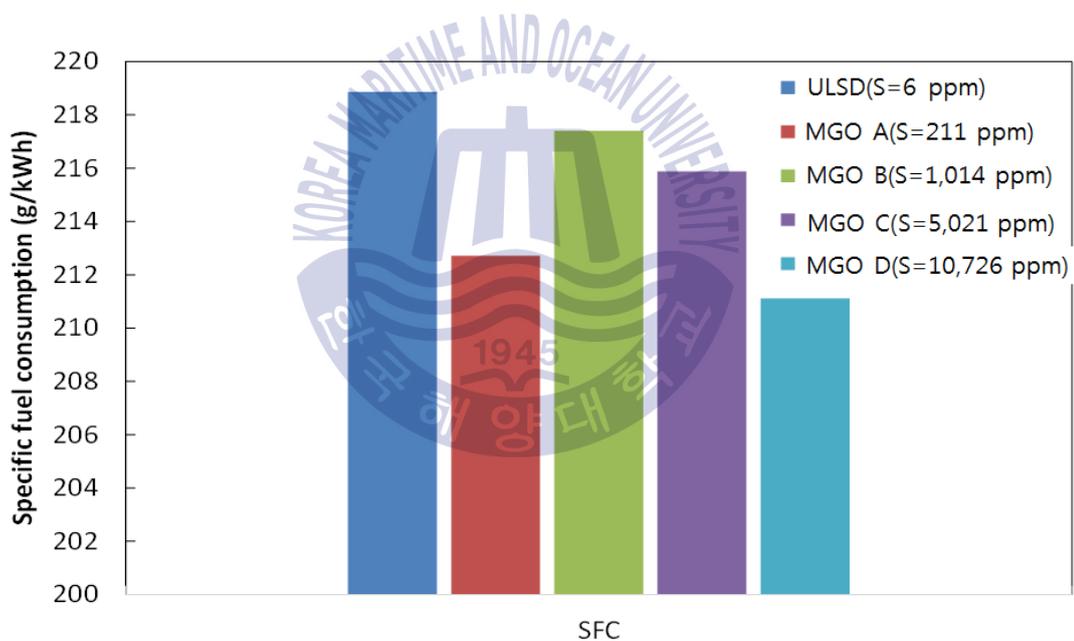


**Fig. 4.22** E2 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출량 측정 결과

**Fig. 4.22**는 각 연료에 대해 E2 사이클 운전 시 측정된 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO의 배출량과 배출 패턴을 각 모드별 가중치를 고려하고 주위 환경변수를 K<sub>w</sub> 계수로 보정한 후 단위 출력당 배출량인 g/kWh로 환산한 결과이다.

CO의 경우 THC와 마찬가지로 전자식 엔진에서는 황 함유량에 큰 영향을 받지 않음을 확인하였다. 다만 대동 DD6CAM 엔진의 CO 배출량은 두산 L126TIH 엔진의 약 2배 정도로 출력 대비 CO 배출량이 상대적으로 많음을 확인하였다.

NO<sub>x</sub>의 경우 황 함유량과 큰 상관관계가 없으며, SO<sub>x</sub>의 경우 연료 내 황 함유량이 증가할수록 배출량이 증가하는 모습을 볼 수 있다. 다만 황 함유량 약 211 ppm의 MGO A의 경우 0.13 g/kWh, 약 1,000 ppm의 MGO B의 경우 2.69 g/kWh의 SO<sub>x</sub>가 배출되었다. MGO B는 MGO A에 비해 연료 내에 황 함유량이 약 50배 많음에도 불구하고 배출되는 SO<sub>x</sub>의 양은 약 20배 정도였다.



**Fig. 4.23** E2 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 연료소모율 측정 결과

**Fig. 4.23**은 E2 사이클에서 전체 5종의 연료 사용에 따른 각 연료별 소모율 변화를 Flowmeter를 통하여 측정한 결과를 나타낸 그래프로서, 연료유의 밀도(Density)에 따라 연료소모율이 달라지는 경향을 볼 수 있

다. 황 함유량이 전반적으로 증가함에 따라 연료소모율이 낮아지는 결과를 보이긴 하나, MGO A와 MGO B의 경우에서 볼 수 있듯이 황 함유량 증가가 연료소모율로 감소로 이어지지 않는 않았다. 일반적으로 연료유는 밀도가 증가하면 동점도 또한 증가하는 양상을 보임에 따라,[22][23] 동점도 증가에 따른 윤활성의 향상으로 연료펌프 등 엔진 구동부의 마찰 손실이 다소 감소되었기 때문에 연료소모율이 낮아진 것으로 판단된다.



## 5.2.2 ISO 8178-E3 cycle 운전 시 측정결과

Fig. 4.24에서 볼 수 있는 것처럼 E3 사이클의 경우 각 모드별 운전조건을 맞추기 위하여 부하 등을 변경 시 엔진 회전수와 출력을 안정적으로 변경되는 것을 확인하였다. 기계식 스톱틀을 사용한 L126TIH 엔진과는 달리 전자식 스톱틀로 연료량을 제어했기 때문에 모드 변경 구간에서도 운전상태 변경이 비교적 부드럽게 이루어짐을 확인할 수 있었다.

ULSD(ULSD)을 사용한 E3 싸이클 운전시험에서 NOx의 경우 3 모드 (Power 50% 구간)에서 더 많이 배출되는 것으로 측정되었는데, 저부하 운전조건인 3모드에서 더 높은 엔진 효율을 보이는 것으로 보아 이는 연료 분사시기가 진각 되어 연소실 내 혼합기가 고온에 보다 많은 시간 노출되었기에 기인한 것으로 판단된다.

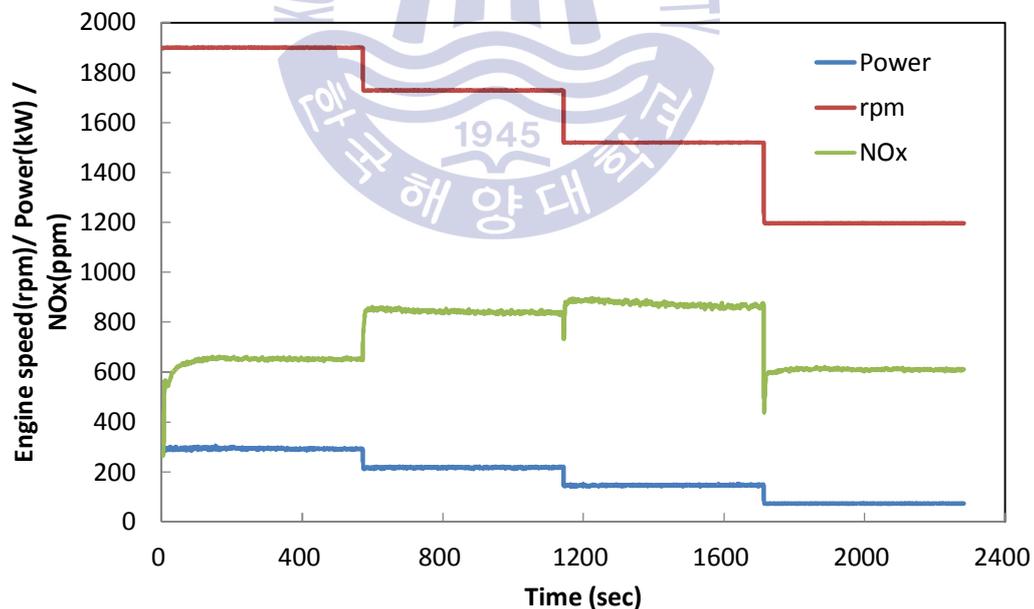
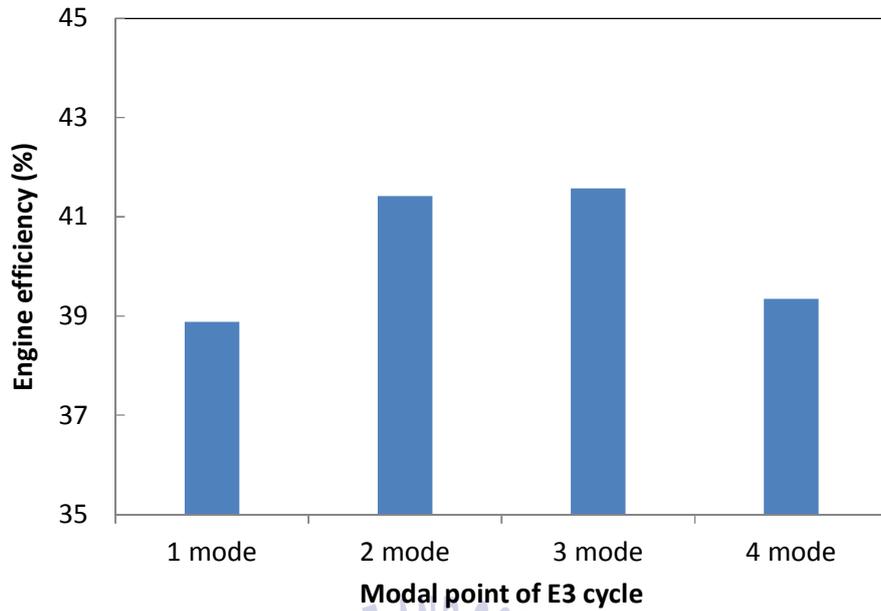
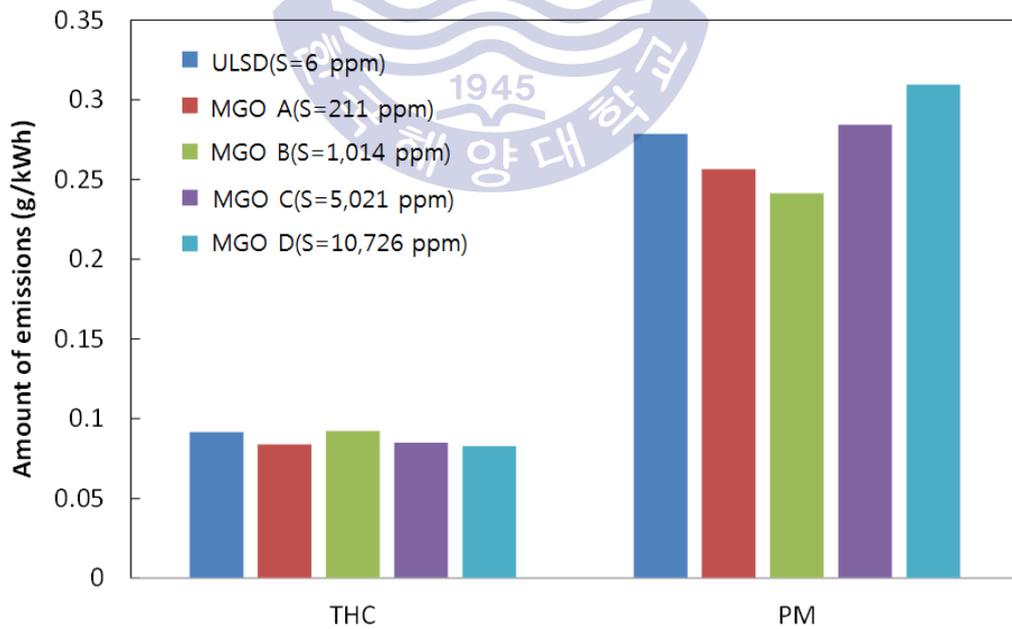


Fig. 4.24 E3 사이클 운전에 따른 출력, 엔진 회전수, NOx 배출량 측정 결과(ULSD 사용)



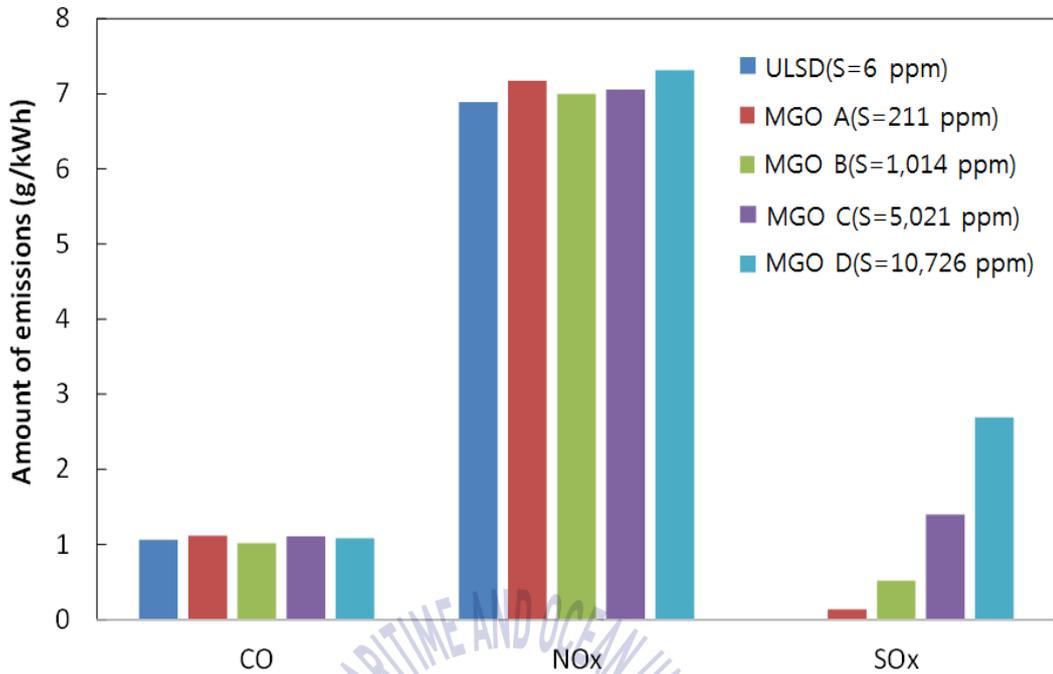
**Fig. 4.25** E3 사이클 각 모드별 엔진 효율 측정 결과(ULSD 사용)



**Fig. 4.26** E3 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 THC, PM 배출량 측정 결과

E3 싸이클 운전시험에서 황 함유량이 각기 다른 전체 5종의 연료에 대해 THC, PM의 배출량(g/kWh)을 측정한 결과 **Fig. 4.26**에서 나타난 바와 같다. THC의 경우 황 함유량의 변화에 따라 배출량에 미묘한 차이가 있었으나, E2 싸이클에서 측정한 결과와 동일한 양상으로서 그 차이가 황 함유량의 증감과 연관성이 없는 것으로 확인되었다.

입자상 물질(PM)의 경우도 E2 싸이클에서 측정한 결과와 유사한 양상으로 황 함유량이 증가할수록 그 배출량이 대체적으로 증가하는 것이 확인되었다. 다만, ULSD, MGO A(황 함유량 211ppm), MGO B(황 함유량 1000 ppm)에 대해 측정한 결과를 서로 비교해 보면, 황 함유량이 증가함에도 불구하고 입자상 물질(PM)의 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 연료의 황 함유량이 일정 수준 이하인 경우에는 황 함유량이 입자상 물질(PM)의 발생에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 판단된다. **Fig. 4.26**에서 볼 수 있는 바와 같이 황 함유량이 1,000 ppm 이상인 연료를 사용한 경우 황 함유량의 증가가 입자상 물질(PM)의 배출 증가로 이어지는 양상을 띠는데, 황 함유량이 일정 수준 이상이 되어야 입자상 물질(PM)의 발생에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

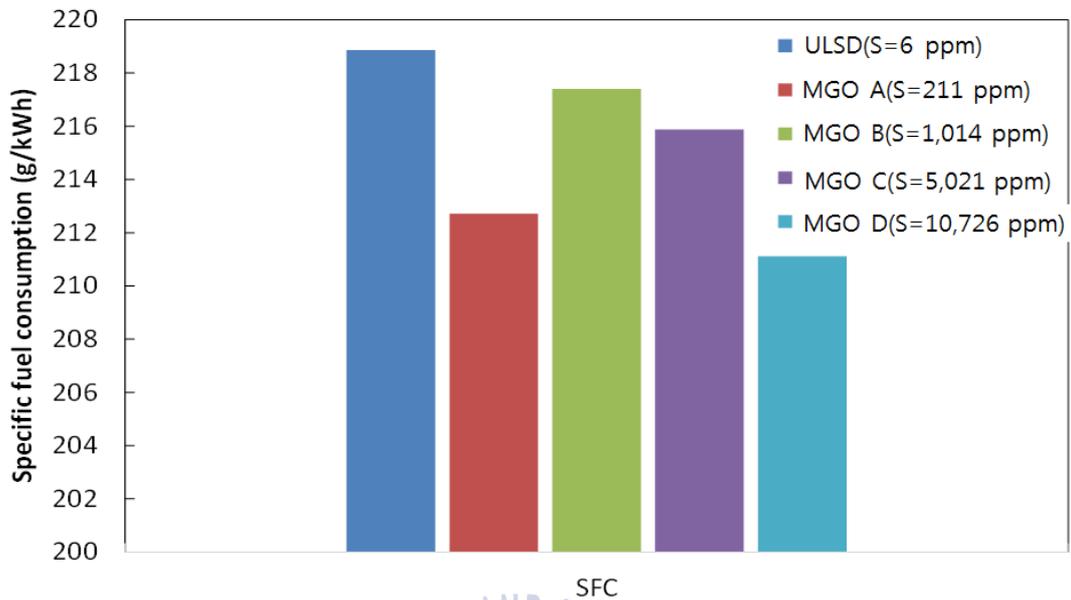


**Fig. 4.27** E3 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 배출량 측정 결과

CO의 경우 연료의 황 함유량 변화에 크게 영향을 받지 아니하고 큰 변화 없이 일정한 배출 형태를 보였으며, 이는 E2 사이클에서 측정된 결과와 유사하였다.

NO<sub>x</sub>의 경우도 황 함유량과 큰 상관관계가 없는 것으로 보이며, E2 사이클에서의 측정결과와 유사하였다.

SO<sub>x</sub>의 경우 E2 사이클에서 보인 결과와 비슷한 양상으로 황 함유량이 증가할수록 배출량이 증가하는 모습을 볼 수 있었으며, 황 함유량이 증가한 양 만큼 배출되는 SO<sub>x</sub>의 양이 그대로 증가하지는 않은 것으로 확인되었다.



**Fig. 4.28** E3 사이클에서 연료 조성 변화에 따른 연료소모율 측정 결과

연료소모율 또한 **Fig. 4.28**과 같이 황 함유량 증가에 따라 감소함을 확인하였는데, 연료의 황 함유량의 증가로 인한 점도 향상이 엔진의 마찰손실 저하에 미치는 영향이 상당함을 확인할 수 있다.

## 제 6 장 결 론

지금까지 살펴본 360 PS 두산 L126TIH 엔진과 430 PS DD6CAM 엔진을 이용한 E2, E3 사이클 시험 결과로부터 연료 내 황 함유량 변화에 따른 연료 물성 및 대기오염물질 배출 패턴을 분석해보면 다음과 같다.

1. 연료 내 포함된 황 성분이 연료의 발열량에 미치는 영향은 없으며, 세탄지수의 감소에 미치는 영향도 미미한 것으로 보인다. 다만, 현재 국내에서 선박에 공급되는 선박용경유(MGO)와 탈황공정을 거친 자동차용 경유(ULSD)의 동점도(Kinetic viscosity)가 상이한 점을 미뤄볼 때 황 함유량 증가가 동점도(Kinetic viscosity) 상승에 일부 영향을 주는 것으로 판단됨에 따라 황 함유량이 다른 다양한 연료샘플을 통하여 이 부분에 대한 상세 연구가 필요하다.

2. 기계식 엔진의 경우 E2, E3 사이클 모두에서 연료 내 황 함유량이 증가할수록 THC와 CO의 단위 출력 당 배출량은 감소하고 입자상물질(PM)은 증가하는 반면에, 전자식 엔진의 경우 황 함유량 증가가 THC, CO, NO<sub>x</sub> 배출량 변화에 유의미한 영향을 미치지 못하고 입자상물질(PM) 배출량도 반드시 증가하는 것은 아님을 확인하였다. 단 이 같은 결과는 기계식 엔진과 전자식 엔진을 각각 1대씩만을 사용하여 얻은 것이기 때문에 대표성을 갖기 위해서는 다양한 사양의 엔진을 사용한 추가 실험이 이루어져야 할 것으로 보인다.

3. 시험에 사용된 모든 엔진에서 황 함유량이 증가함에 따라 SO<sub>x</sub> 배출량이 증가하였는데, 이는 배기가스 내 SO<sub>x</sub>는 모두 연료에서 기인하기 때문인 것으로 판단된다. 아울러 황 함유량이 증가한 양 만큼 배출되는

SOx의 양이 그대로 증가하지는 않은 것으로 확인되었는데, 이는 연료 내 황 성분의 일부가 황산염(Sulfate) 형태로 변하여 입자상물질(PM)로 배출되었기 때문으로 판단된다.

4. 연료의 황 함유량이 증가할수록 동점도(Kinetic viscosity)가 증가되어 엔진의 연료소모율(SFC)이 좋아지는 것으로 확인되었다. 이는 연소상태가 좋아 출력상승에 따른 현상으로 보기는 어려우며, 동점도(Kinetic viscosity) 증가에 따른 연료의 유통성능 개선으로 연료공급펌프 및 실린더헤드부의 마찰손실이 저하되었기 때문으로 판단된다.

5. 또한, PM의 발생량은 연료의 황 함유량이 일정수준까지 증가할수록 감소하는 경향을 보이다가 일정 수준을 초과하면, 황 함유량 증가에 따라 같이 증가하는 경향을 보였다. 이에 따라 황 함유량이 일정 수준 이상이 되어야만 황 함유량 증가가 PM의 발생량 증가에 영향을 주는 것으로 판단된다.

6. NOx의 경우 이번 연구에서는 연료 변화에도 배출량의 큰 변화를 보이지 않았다.



## 참 고 문 헌

- [1] 김기일, 2013. 자동차 환경규제와 더불어 수요 증대 기대. Vol.4 Issue4 KIST MARKET REPORT, pp.15~18.
- [2] Y. Takasugi, et al., 2000. *Exhaust Emission Characteristics of a Marine Diesel Engine with an Electronically Controlled Fuel Injection System*, Journal of the Marine Engineering Society in Japan, Vol.35, Issue 12, pp.841-847.
- [3] W. Balachandran, et al., 2015. Reduction of NO<sub>x</sub> and PM in marine diesel engine exhaust gas using microwave plasma, Brunel University, UK
- [4] 손권, 2017. 중소형선박용 습식 스크리버의 최적설계에 관한 연구, 박사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원.
- [5] O. Nishida, 2014. Simultaneous removal of NO<sub>x</sub> and fine diesel particulate matter(DPM) by electrostatic water spraying scrubber, Journal of Marine Engineering & Technology, Vol 8, Issue 9, pp.45-53.
- [6] 국무조정실, 2017. 미세먼지 관리 종합대책, pp.20~21.
- [7] Defra. *UK Ship Emission Inventory*, 2010
- [8] EEA. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2016*, 2016.
- [9] C. Trozzi, 2010. *Emission estimate methodology for maritime navigation*, Italy: Techne-consulting srl.
- [10] S. Glomvik Rakke, 2016. *Ship emissions calculation from AIS*, Norway: Norwegian University of Science and Technology.

- [11] IMO, 2017. *REPORT OF THE MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE ON ITS SEVENTY-FIRST SESSION(MEPC 71/17)*. IMO secretariat.
- [12] IMO, 2016. *Proposal to designate the Baltic Sea as an emission control area for nitrogen oxide(MEPC 70/5/1)*. Denmark et al.
- [13] IMO, 2016. *Proposal to designate the North Sea as an emission control area for nitrogen oxide(MEPC 70/5)*. UK et al.
- [14] IMO, 2015. *Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce Black Carbon emissions from international shipping*, pp.1~3. IMO.
- [15] IMO, 2018. *Report To The Marine Environment Protection Committee(PPR 5/24)*, pp.14~20. IMO Secretariat.
- [16] 정연철, 2012. *MARPOL 협약 강의*, 다솜출판사.
- [17] 한국선급, 2015. *중국 ECA 실시 방안(0.5% 연료유 황 함유량 규제)*. 한국선급 정부대행검사본부.
- [18] 환경부, 2016. *정부합동 미세먼지 관리 특별대책 세부이행계획*, pp.3~6.
- [19] 국무조정실, 2017. *미세먼지 관리 종합대책*, pp.5~7.
- [20] 국립환경과학원, 2009. *PM2.5 배출특성 및 기여도 추정 연구 최종보고서*, pp. 157~167.
- [21] Francis S. Binkowski, 1999. *Aerosols in Models-3 CMAQ*, US:Environmental Protection Agency, CMAQ.
- [22] 조동연, 2018. *선박 온실가스 배출계수에 관한 연구*, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원.

- [23] 이익성, 2017. 4행정 선박용 디젤기관에서 연료의 황 함유량에 따른 가스상과 입자상 물질 배출에 관한 연구, 석사학위논문, 전북대학교.
- [24] 이진우, 2016. 디젤연료 온도에 따른 분무 발달 특성, 한국산화기술학회논문지 제17권 제3호, pp.270~275, 한국산화기술학회.
- [25] ISO 8217:2012, Specifications of marine fuels, International Organization for Standard.
- [26] 이기영, 2009. 상선/합정용 연료유의 성장변화에 관한 연구, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교대학원.



## 감사의 글

많은 분들의 도움으로 논문이 나오게 되었습니다.

논문이 나오기까지 도움을 주신 많은 분들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 먼저 완성도 있는 논문이 되도록 바쁘신 와중에 지도를 아끼지 않으셨던 최재혁 교수님께 진심으로 감사드리며, 언제나 친절하게 조언해 주시고 좋은 논문으로 거듭나게 해주신 박상균 교수님과, 개선점을 찾아 끝까지 도움을 주신 이원주 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

또한, 논문을 쓰는데 따뜻한 격려와 조언으로 많은 도움을 주신 김인섭 실장님과 직장 동료분들께 감사의 마음을 드립니다.

그리고 논문에 필요한 시험을 진행하는데 도움을 주신 이선엽 박사님께도 진심으로 감사드립니다.

아울러, 힘든 시간을 함께 해주고, 아낌없이 응원해준 사랑하는 아내 김영은씨와 건강하게 자라고 있는 애들에게도 감사의 마음을 전합니다.