



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](#)

공학석사 학위논문

선박용 디젤엔진의 초저유황 연료유 사용에  
따른 실린더 윤활 문제에 관한 연구

A Study on the Cylinder Lubricating Problem by Using  
Ultra Low Sulfur Fuel Oil to Marine Diesel Engine



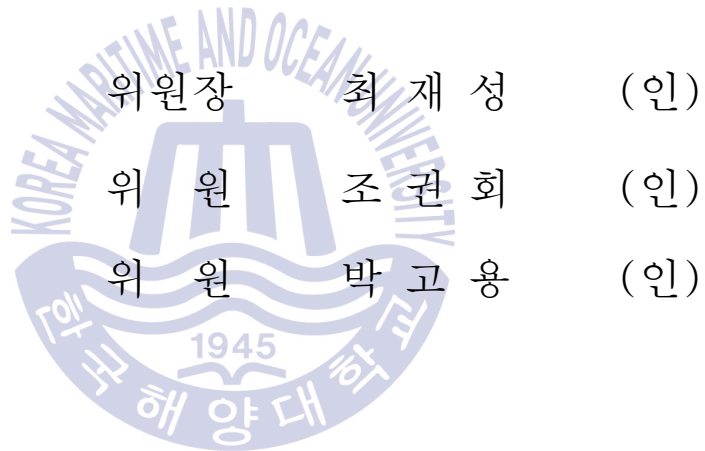
2018年 2月

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과

김 무 겸

본 논문을 김무겸의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 12월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iv
List of Figures .....	v
국문요지 .....	vii
Abstract .....	ix
1. 서론 .....	1
2. 선박용 추진기관에서 초저유황 연료유 사용 배경 .....	3
2.1 국제기구 차원의 선박 대기오염물질 배출 규제 .....	3
2.2 선박 대기오염물질 종류와 영향 .....	4
2.2.1 일산화탄소(CO) .....	4
2.2.2 이산화탄소(CO <sub>2</sub> ) .....	5
2.2.3 탄화수소(HC, Hydrocarbon) .....	6
2.2.4 황산화물(SO <sub>x</sub> ) .....	7
2.2.5 질소산화물(NO <sub>x</sub> ) .....	10
2.2.6 미립자(PM, Particulate Matter) .....	13
2.2.7 연료유 질(Regulation 18) .....	14
2.3 오염물질 배출규제에 따른 선박용 추진기관 연료의 변화 .....	15
2.4 황산화물 배출 통제 지역 운항 현황 .....	15
3. 초저유황 연료유와 유행 특성 분석 .....	20
3.1 초저유황유 .....	20
3.1.1 초저유황 연료유의 정의 .....	20
3.1.2 초저유황 연료유의 종류 .....	20
3.1.3 초저유황 연료유의 특성 .....	22
3.1.4 초저유황 연료유의 착화성 .....	24

3.2 황 함유량에 따른 연료유의 운할 특성 분석 .....	26
3.2.1 일반 연료유의 운할 특성 분석 .....	26
3.2.2 초저유황 연료유의 운할 특성 분석 .....	31
<b>4. 선박용 추진기관에 초저유황 연료유 사용에 따른 운할 관리 방안 및     실태 .....</b>	<b>36</b>
4.1 실린더유의 알칼리가 선정, 급유율 조정 및 자동 시스템 .....	36
4.1.1 알칼리가 선정, 급유율 조정 .....	37
4.1.2 ACOS, BOB와 ACOM .....	38
4.2 PC-링과 CERMET 코팅 피스톤링 사용 .....	42
4.2.1 PC-링(ring) 사용 .....	42
4.2.2 CERMET 코팅(coating) 피스톤링 사용 .....	43
4.3 지속적인 선박 모니터링 .....	45
4.3.1 드레인 오일 분석 .....	45
4.3.2 소기공 검사 .....	47
4.3.3 마모 상태 측정 .....	49
4.3.4 실린더 라이너 표면검사 .....	50
4.4 국적 A선사의 황산화물 배출 통제 지역 운항 실태 분석 .....	50
<b>5. 결론 .....</b>	<b>57</b>
<b>참고 문헌 .....</b>	<b>59</b>
<b>감사의 글 .....</b>	<b>62</b>

# List of Tables

<b>Table 2.1</b>	IMO SOx emission control standard .....	8
<b>Table 2.2</b>	EU SOx emission control standard .....	8
<b>Table 2.3</b>	CARB SOx emission control standard .....	8
<b>Table 2.4</b>	China SOx emission control standard .....	9
<b>Table 2.5</b>	NOx reduction treatment for marine diesel engine .....	12
<b>Table 2.6</b>	Particular for operating vessel .....	17
<b>Table 2.7</b>	Main engine specification .....	18
<b>Table 2.8</b>	Average speed and fuel oil consumptions .....	19
<b>Table 2.9</b>	North America SOx emission control area sailing table .....	19
<b>Table 3.1</b>	Fuel type abbreviations .....	20
<b>Table 3.2</b>	ULSFO supply by each region .....	21
<b>Table 3.3</b>	Major properties of ULSFO .....	25
<b>Table 4.1</b>	Example of low-BN cylinder oils on the international market ...	37
<b>Table 4.2</b>	Fuel Sulfur application for low-BN oils .....	38
<b>Table 4.3</b>	Correlation among wear type, mechanism and different iron measuring methods .....	47
<b>Table 4.4</b>	Main engine specification .....	51
<b>Table 4.5</b>	Distance and M/E ULSFO consumption .....	51
<b>Table 4.6</b>	ULSFO product data .....	52
<b>Table 4.7</b>	Cylinder oil product data .....	52
<b>Table 4.8</b>	M/E Cylinder oil feed rate value .....	53

## List of Figures

Fig. 2.1	Sectional air fuel ratio for atomized diesel fuel oil .....	6
Fig. 2.2	MARPOL Annex VI fuel sulfur limits .....	9
Fig. 2.3	Element composition of diesel PM .....	13
Fig. 2.4	EU SOx emission control area .....	16
Fig. 2.5	North America SOx emission control area .....	16
Fig. 3.1	Production from bottom oil of Hydrocracking .....	22
Fig. 3.2	Waxy precipitations in a fuel sample .....	23
Fig. 3.3	General Overview of cylinder lube oils and how to choose a suitable cylinder lube oil .....	27
Fig. 3.4	Relationship between sulfur in the fuel and BN in the cylinder lube oil .....	28
Fig. 3.5	Liner wear vs. cylinder lube oil dosage .....	29
Fig. 3.6	Microstructure of a normal, well-running liner .....	30
Fig. 3.7	Sketch of cross sections through a healthy cylinder liner running surface .....	30
Fig. 3.8	Photo of piston covered in deposits .....	32
Fig. 3.9	Schematic of deposit(red) build-up behind piston rings .....	33
Fig. 3.10	Sketch of cross section of a smeared cylinder liner running surface (bore-polish) .....	34
Fig. 3.11	Replica of microstructure of 6L60MC engine operating continuously on fuel < 0.1% S. Note the closed graphite lamellas .....	34
Fig. 3.12	Bore-polishing in cylinder liner of 6S60MC .....	35
Fig. 4.1	6S60MC engine operating continuously on distillate - experiencing heavy deposit build-up and scuffing .....	36
Fig. 4.2	ACOS and ACOM of cylinder lube oil auto supply system .....	38
Fig. 4.3	The layout and flow diagram of the blending on board system .....	39
Fig. 4.4	Example of mixing strategy for ACOM system. Here a 25 BN and a 100 BN or 140 BN is mixed .....	42
Fig. 4.5	Piston Cleaning ring(PC-ring). Positioned between cylinder cover and liner .....	43

Fig. 4.6	Cross-section of plasma-sprayed Cermet coating. SEM micrograph .....	44
Fig. 4.7	Alu-COATING vs. CERMET COATING .....	45
Fig. 4.8	Alarm limits for BN vs. Iron in cylinder drain oil .....	46
Fig. 4.8	CL groove measuring of piston ring .....	48
Fig. 4.9	Clean, smooth condition of piston ring .....	48
Fig. 4.10	Micro seizure of piston ring .....	49
Fig. 4.11	Measuring piston ring grooves .....	49
Fig. 4.12	Piston and Liner of NO.1 Cylinder After using ULSFO .....	54
Fig. 4.13	Piston and Liner of NO.2 Cylinder After using ULSFO .....	55





# 선박용 디젤엔진의 초저유황 연료유 사용에 따른 실린더 윤활 문제에 관한 연구

김 무 겹

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과

(지도교수 : 조 권 회)

## 요 지

선박의 경제적 운항만을 중시하여 유해 배기가스를 무분별하게 배출하는 시대가 저물어 가고 있다. 선박으로부터의 해양오염방지를 위한 국제협약인 MARPOL 73/78에서 대기오염을 다루는 부속서 6 (Annex VI)이 2005년에 발효됨에 따라, 선박에서는 IAPP(International Air Pollution Prevention) 증서를 갖춰야 한다. 언급한 IAPP에서 다루는 대기 오염 물질 항목 중 황산화물에 관한 규제에 주목할 필요성이 점점 커지고 있다.

국제해사기구는 MEPC(Maritime Environment Protection Committee) 70차 회의(2016.10.20)에서 2020년부터 선박에서 사용되는 연료유의 황함유량을 0.5% 이하로 전 해역을 기준으로 규제하기로 결정하였다. 선주는 이에 따라 강화된 황산화물 배출규제를 만족시키기 위한 효율적인 방안을 마련해야 한다. 그 방안으로 추가적인 설비가 요구되지 않고 가장 간단하게 황산화물 배출규제를 만족시킬 수 있는 방법은 초저유황 연료유를 사용하는 것이다.

본 연구에서는 선박용 디젤엔진에서 초저유황 연료유를 사용하여 운항 중인 선박을 대상으로 운항자료를 분석하고, 선박용 디젤엔진에서 초저유황 연료유 사용으로 발생하는 실린더 윤활의 문제점에 주목하였다. 그리고 결과적으로 초저유황 연료유 사용으로 기인한 실린더 윤활 문제의 개선 방안을 제시하고 이로 인해 실제 운항 시 개선된 양상을 확인하였다.

주제어 : 황산화물, 선박용 디젤엔진, 초저유황 연료유, 윤활문제, IAPP(International Air Pollution Prevention)



# A Study on the Cylinder Lubricating Problem by Using Ultra Low Sulfur Fuel Oil to Marine Diesel Engine

Kim, Moo Keyom

Department of offshore Plant Management  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University  
(Supervisor : Prof. Kwon-Hae Cho)

## Abstract

The time that all merchant ships discharge harmful exhaust gas in the air for economical sailing is passing. As Annex VI which is about air pollution in International Convention for the Prevention of Marine Pollution from ships(MARPOL 73/78) comes into effect, the ships must have IAPP certificate. There is several items concerning air pollutant in IAPP, and it is needed to pay attention to SOx regulation.

International Maritime Organization decided to regulate sulfur contents in fuel oil less than 0.5% in all sea area through the 70th conferences of MEPC(Maritime Environment Protection Committee). Therefore shipowners have to come up with an effective plan for coping with satisfaction to intensified SOx regulation. To use ULSFO(Ultra Low Sulfur Fuel Oil) is the simple way to respond to SOx regulation without additory facilities.

In this study, the sailing data of ships using ULSFO in diesel engine was analyzed, especially cylinder lubricating problems as using ULSFO in marine diesel engine was focused. So improvement plan to reduce cylinder lubricating problems was suggested, and finally improvement aspect was verified through real sailing data.

KEY WORDS: SO<sub>x</sub>(Sulfur Oxides), Marine diesel engine,  
ULSFO(Ultra Low Sulfur Fuel Oil),  
Lubricating problem,  
IAPP(International Air Pollution Prevention)



## 제 1 장 서 론

선박의 경제적 운항만을 중시하여 선박용 엔진의 주 연료로 검은 연기를 내뿜는 중유(HFO, Heavy Fuel Oil)를 사용하는 시대가 가고 있다. 선박으로부터의 해양오염방지를 위한 국제협약인 MARPOL 73/78에서 대기오염을 다루는 부속서 6(Annex VI)이 1997년에 채택되고, 2005년에 발효됨에 따라, 선박은 IAPP(International Air Pollution Prevention) 증서 없이는 운항이 불가능하게 되었다.

IMO에서는 오존파괴물질(Regulation 12), 질소산화물(Regulation 13), 황산화물(Regulation 14), 휘발성 유기화합물(Regulation 15), 선내소각(Regulation 16), 연료유 질(Regulation 18)의 6가지 항목에 관하여 만족해야만 IAPP 증서를 발행할 수 있도록 하였다. 특히 그중에서도 황산화물과 연료유 질에 관한 규제에 주목할 필요가 있다.

IAPP 협약 발효 이전에는 황 함유량이 최대 5%인 연료유 사용이 가능하였으나, 현재는 전 해역(Global Area) 항해선박 기준으로 황 함유량 3.5%를 초과하는 연료유는 사용이 금지되며, 나아가 2020년 이후 황 함유량 0.5%를 초과하는 연료유 사용이 금지된다. 또한 SECA(Sulfur Emission Control Area)에서는 이미 0.1% 이하의 황 함유 연료유 사용을 적용하고 있는 상황이다.

이러한 배경으로 연안을 항해하는 선박용 디젤엔진은 점차 초저유황 연료유를 사용하는 추세이며, 특히 미국 연안에서(CARB/EPA)<sup>1)</sup>는 저유황/저방향족화합물의 증류유 사용을 강제화하고 있다. 머지않아 대양을 항해하는 선박 역시 초저유황 연료유 사용은 피할 수 없는 현실이 도래할 것으로

---

1) CARB: California Air Resources Board  
EPA: Environmental Protection Agency

로 보인다.

그러나 연료 속의 황은 윤활효과의 기능이 있어 연료공급펌프, 연료분사펌프의 플런저와 배럴 등 연료 공급장치의 마모를 방지하여 장기수명을 보장하는 역할을 한다. 하지만 초저유황 연료유 사용 시 비정상적 연소특성이 나타나 실린더 라이너와 피스톤링 온도의 상승, 실린더 오일 산화, 유막파괴촉진, 피스톤링 운동 저하 등 윤활에 있어 심각한 문제들을 야기시킬 수 있다<sup>[1]</sup>. 기존 연구 자료에 의하면 상기 문제점은 추진기관을 250시간 이상 지속적으로 운전할 경우 주로 발생된다고 언급하고 있다<sup>[2]</sup>. 하지만 현재 SECA 지역은 거리상 250시간 이상의 추진기관 운전이 이뤄지지 않는다. 그로 인하여 발생하는 문제점이 크게 대두되고 있지 않지만 2020년 이후 전 해역에서 0.5% 황 함유 연료유를 사용할 경우 추진기관은 당연히 250시간 이상으로 운전될 것이다. 이렇게 되면 선박용 추진기관에 초저유황유 사용은 불가피하며, 지속적인 초저유황 연료유 사용으로 인하여 기인하는 윤활의 문제점이 크게 부각될 것이다. 그래서 사전 예방을 위하여 초저유황 연료유 사용에 따른 윤활에 관한 연구가 선행되어야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 선박용 추진기관에서 초저유황 연료유를 사용함에 따라 발생할 수 있는 여러 가지 문제점 중 실린더 윤활에 관한 문제점을 분석 평가하고자 한다. 따라서 앞으로 계속되는 범국가적 차원의 대기오염배출 규제에 대응하여 초저유황 연료유 사용에 따른 실린더 윤활 문제에 관한 유용한 참고 자료가 될 것으로 생각된다.

## 제 2 장 선박용 디젤기관에서 초저유황 연료유 사용 배경

### 2.1 국제기구 차원의 선박 대기오염물질 배출규제

선박 대기오염물질 배출 규제는 국제해사기구(IMO : International Maritime Organization)에서 규정하는 선박으로부터의 대기오염방지 협약(IMO MARPOL 73/78 Annex VI), 그리고 특정 국가에서 지역적으로 또는 자국의 선박만을 대상으로 하는 규제로 나눌 수 있다.

국제해사기구는 해양 환경 보호와 대기 오염 방지를 위해 해양환경보호위원회(MEPC : Marine Environmental Protection Committee)에서 이를 다루어왔으며, 1987년 11월 처음으로 선박으로부터의 대기오염방지를 검토제의 이후 10여년의 작업을 거친 후 1997년 9월에 선박으로부터 배출되는 대기오염방지규칙을 채택하였다. 이후 동 부속서는 2005년부터 발효되어 현재 운항중인 선박은 IAPP 증서 없이는 운항이 불가하다.

세계보건기구(WHO)에서는 유해성분을 발생하는 물질인 황산화물, 질소산화물을 심각한 대기오염 물질로 간주하고 있다.

이와 관련, 2015년 국립환경과학원에서 발표한 “2013 국가 대기오염 배출량”<sup>[3]</sup>에 따르면 선박에서 발생하는 질소산화물은 우리나라 전체 발생량의 8.2%, 황산화물은 15.9%에 이르는 것으로 나타났으며 선박대기오염 물질의 배출량 감소를 위하여 배출 관리를 강화 할 필요성이 점차적으로 증가하고 있다.

## 2.2 선박 대기오염물질 종류와 영향

디젤엔진의 연소과정에서는 공기 중의 산소(O<sub>2</sub>)가 연료 속의 탄소(C), 수소(H<sub>2</sub>) 및 유황(S)과 반응하여 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 물(H<sub>2</sub>O), 아황산가스(SO<sub>2</sub>)를 발생 시킨다. 또한 공기 중의 질소(N<sub>2</sub>)는 흡입공기 중에 존재하고 있는 수증기나 과잉 산소처럼 냉각제로서 엔진을 통과한다. 이 연소과정 중 벤조피렌과 같은 발암물질이 포함된 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 그을음(soot), 그리고 미립자(PM, Particulate Matter)와 같은 오염물질을 배출하고 있으며 이로 인해 항만 인근 지역의 대기오염을 가중시키고 있다<sup>[4]</sup>.

이러한 디젤엔진의 연소과정에서 발생하는 상기의 대기오염물질의 종류와 해당 대기오염물질이 환경에 미치는 영향에 대하여 다음 절에서 알아보려고 한다.

### 2.2.1 일산화탄소(CO)

일산화탄소는 무색·무미·무취 가스로 피부나 점막에 대한 자극도 없어 감지가 어려우며 물에 잘 녹지 않고 공기에 비해 비중이 0.967배 이다. 헤모글로빈(Hb)과의 결합력이 산소에 비해 300배 이상 커서 체내 산소운반 작용을 저해하여 조직의 저산소증을 일으키게 된다. 또한 인지작용과 사고 능력 감퇴, 반사작용 저하, 졸음과 협심증 유발, 무의식 및 사망을 유발하기도 한다. 임신 여성에 있어 태아성장 및 조직발달에도 영향을 미친다.

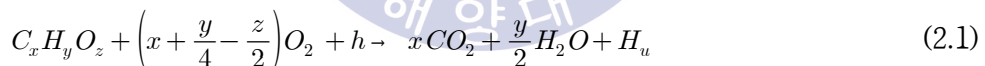
탄화수소계 연료의 불완전연소로 인해 연소의 중간 단계에서 생성되는 화합물로서 디젤 연소의 경우 일산화탄소의 생성량은 공기과잉률과 연소 온도 그리고 연소실 내부의 연료와 공기의 균질성과의 관계에 있다. 당량비가 1이상인 연료과농 연소인 경우 연소가스 온도가 2,000K 이상이 되어 평형상태가 되면 많은 일산화탄소가 생성된다. 연소가 완결될 때 이산화탄소로 되려는 일산화탄소의 산화가 일산화탄소와 다른 산화물 사이의



재결합 반응을 통하여 일어나는데, 만약 이 재결합 반응이 산소의 부족이나 낮은 가스 온도의 영향으로 완성되지 못하면, 일산화탄소는 산화되지 않고 남게 된다. 일반적으로 선박 디젤기관으로부터의 일산화탄소 배출은 높은 공기과잉률과 비교적 충분한 연소과정으로 인해 높지 않지만, 정비 불량이나 저부하운전시에는 불완전 연소가 되므로 일산화탄소의 배출량이 높게 된다. 따라서 선박으로부터의 일산화탄소 배출량을 저감시키는 방법에는 주기적인 기관의 정비나 희박 연소방법 등을 들 수가 있지만 희박 연소방법은 질소산화물( $\text{NO}_x$ ) 생성을 촉진시키게 되므로 좋은 해결책이 될 수는 없다<sup>[5]</sup>.

### 2.2.2 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )

탄화수소계 연료중의 탄소와 공기 중의 산소가 반응하여 연소함으로써 배기가스 중에 이산화탄소가 생성되는데 그 반응은 식(2.1)과 같으며 이산화탄소 배출량은 연료의 연소 효율에 따라 다르게 나타난다. 즉, 연소된 연료가 많을수록 이산화탄소 배출물은 많아지므로 이 배출물은 연소한 연료의 정해진 양에 대하여 최대한 증가되어야 하는데, 이것은 연소가 가능한 범위 내에서 완전히 이루어진다는 것을 의미한다.



이산화탄소를 저감시키는 가장 효율적인 방법은 연료 사용량을 줄이는데 있으며 이런 측면에서 보면 디젤엔진이 가솔린엔진에 비해 20%~30% 유리하며 특히 직접분사식 디젤엔진이 가장 효율적이다<sup>[5]</sup>.

2015년 12월 파리에서 개최된 제21차 유엔기후변화협약 당사국 총회에 앞서, 국제해운회의소(ICS, International Chamber of Shipping)는 정부 협상가들에게 해운업계 종사자들이 탄소배출 감축을 위해 노력하고 있음을 강조하였으며 2050년까지 이산화탄소 50% 감축을 천명하였다. 글로벌 해운업계가 지속적으로 증가하고 있는 무역량에도 불구하고 2007년 당시 세

계 전체 이산화탄소 배출량 중 해운업이 차지하는 비율은 2.8%였으나, 2014년에는 2.2%까지 감소되었다. 하지만 온실가스 감축 목표 설정이 강제화 될 가능성이 높기 때문에 이산화탄소 배출량 감소를 위한 노력이 절실하다<sup>[6]</sup>.

### 2.2.3 탄화수소(HC, Hydrocarbon)

정상적인 연소에서의 HC 발생요인은 공연비가 과도하게 농후하거나, 희박한 두 경우를 고려할 수 있다. Fig. 2.1은 디젤의 연료분사노즐에서 분무된 연료의 국부적 공연비 분포를 공기과잉률( $\lambda$ )로 나타낸 것이다. 연료의 점화는 이론공연비( $\lambda=1$ )보다 약간 희박한 점에서 발생하며, 희박연소 한계선 바깥영역은 공연비가 더욱 희박하여 자동발화(autoignition)가 일어나지 못한다.

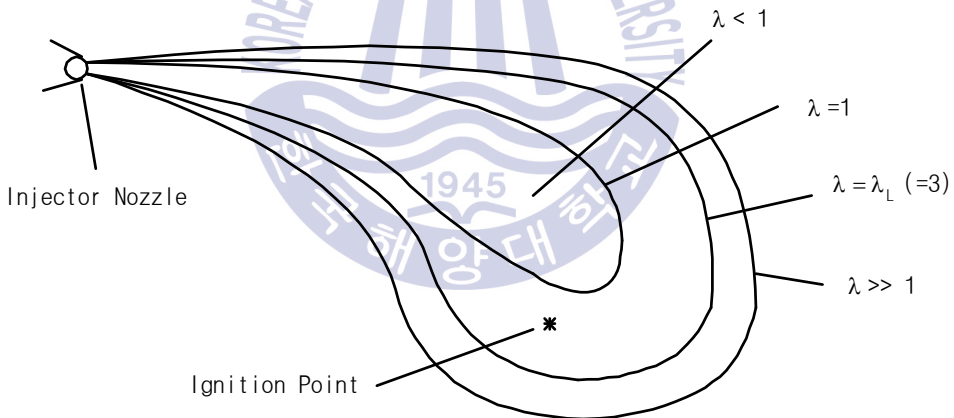


Fig. 2.1 Sectional air fuel ratio for atomized diesel fuel oil

이와 같은 초희박(overlean) 영역에서는 산화반응이 느리기 때문에 반응이 제대로 끝나지 못하여 미연소연료, 연료분해생성물, 부분산화물(알데히드, 옥시탄트) 등이 생성된다. 초희박 영역에서의 탄화수소 발생농도는 점화지연기간동안 분사되는 연료량과 분사된 연료가 공기와의 혼합되는 비율에 크게 지배된다. 즉, 점화지연기간에 분사되는 연료가 많거나 또는

점화지연기간이 길어지면 탄화수소 발생량이 증가한다. 반면 분사된 연료가 과농하게 되는 경우는 노즐의 sac volume에 남아 있던 연료가 연소과정 후기에 느린 속도로 분사되는 경우와, 연료가 처음부터 연소실에 과도하게 공급되는 경우의 두 가지로 볼 수 있다. 특히 sac volume의 체적과 HC 발생량은 거의 비례하는 경향을 가지고 있다.

HC는 화학적 성질에 따라 파라핀, 나프텐, 올레핀, 방향족으로 분류되며 이중 방향족 화합물인 PAHs(Polynuclear Aromatic Hydrocarbon)가 특히 인체에 유독하며 대부분 입자상 물질에 흡착되어 있다.

HC가 저농도에서는 호흡기 계통을 자극하는 정도이나, 산화되어 알데히드가 발생되면 눈, 점막, 피부 등을 심하게 자극한다. 알데히드가 다시 산화되면 과산화물이 형성되어 광화학스모그의 원인이 되어 눈을 더욱 자극한다. HC는 고분자량탄화수소(미연소), 저분자량탄화수소(열분해)로 대별되며 광화학스모그 생성성분을 함유하고 있다<sup>[7]</sup>.

#### 2.2.4 황산화물(SO<sub>x</sub>)

황산화물은 황(S)과 산소와의 화합물을 총칭하는 것으로 이산화황, 황산 그리고 황산구리와 같은 황산염 등이 속한다. 주요 대기오염물질로서 산성비의 원인으로 작용하며, 식물의 엽록소를 파괴하여 말라죽게 하는 등 그 피해가 인류에 매우 크게 작용한다.

그러므로 선박에서 사용되는 모든 연료유는 IMO에 의해 황 함유량 규제를 받으며, 일부지역에서는 규정된 기준과 절차에 따라 IMO가 지정한 값보다 엄격하게 통제된다. Table 2.1, 2.2, 2.3, 2.4에 각 지역별 황산화물 배출규제 기준을 표로 나타내었으며, Fig. 2.2에 도식화하였다. 현재 전 해역에서 3.5% 이하의 황이 함유된 연료유를 사용 가능하지만 2016년 10월 제70차 국제해사기구 해양환경보호위원회의 결정으로 인하여 2020년부터는 0.5% 이하의 초저유황 연료유 사용이 불가피하다.

**Table 2.1** IMO SO<sub>x</sub> emission control standard<sup>[8]</sup>

Application area	Application year & Emission limits		
	Whole sea area	prior to 2012.1.1.	since 2012.1.1.
4.5% m/m or less		3.5% m/m or less	0.5% m/m or less
Sulfur Emission Control Area (SECA)	prior to 2010.7.1.	since 2010.7.1.	since 2015.1.1.
	1.5% m/m or less	1.0% m/m or less	0.1% m/m or less

**Table 2.2** EU SO<sub>x</sub> emission control standard<sup>[8]</sup>

Application area	Regulations	Application year	Application
When berthing in EU port /Ship for inland waterway	2005/33/EC	2010.01.01.	0.1% m/m or less

**Table 2.3** CARB SO<sub>x</sub> emission control standard<sup>[8]</sup>

Application area	Application year	Emission limits
24 Nautical Mile Zone	2009.7.1.~2011.12.31.	MDO : 0.5% m/m or less MGO : 1.5% m/m or less
	2012.1.1.~	MDO : 0.1% m/m or less MGO : 0.1% m/m or less

Table 2.4 China SOx emission control standard

Application area	Application year	Emission limits
All ship in ECA Area	2016.1.1.~	3.5% m/m or less (When required from specified port in ECA Area, 0.5% m/m or less)
Ship berthing to Main port in ECA Area	2017.1.1.~	0.5% m/m or less (Application for Berthing)
Ship berthing to all port in ECA Area	2018.1.1.~	0.5% m/m or less (Application for Berthing)
All ship in ECA Area	2019.1.1.~	0.5% m/m or less

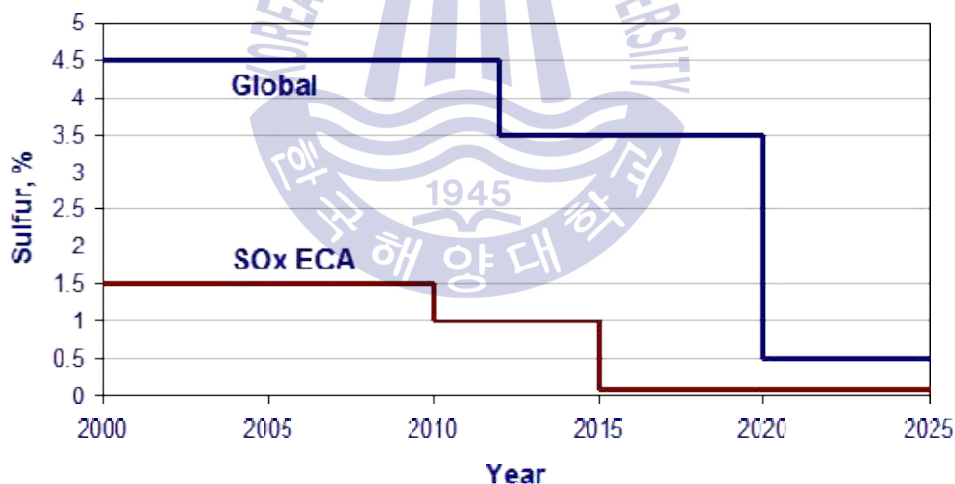


Fig. 2.2 MARPOL Annex VI fuel sulfur limits

앞으로 선박 운항에 있어 연료유 내 황함유량 기준이 충족된 저유황 연료유를 사용하거나 배기가스 세정장치(Scrubber) 기술 개발과 같은 근본적인 대응이 필요함을 시사하고 있다.

### 2.2.5 질소산화물( $\text{NO}_x$ )

선박용 디젤기관의 유해배기가스 중에서 그을음과 미립자는 현존기술로 충분히 여과가 가능하며, 탄화수소(HC)와 일산화탄소(CO)는 거의 완전연소에 가깝기 때문에 역시 큰 문제가 되지 않는다. 그리고 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )에 대해서는 열효율이 높기 때문에 다른 화석연료기관에 비교하여 유리하다. 따라서 현재 문제가 되는 것은 황산화물( $\text{SO}_x$ )과 질소산화물( $\text{NO}_x$ )인데 전자는 인간의 활동으로 4%가 대기 중에 방출되고, 후자는 7% 정도가 선박용 디젤기관에 의하여 발생된다고 한다.

질소산화물은 대기 중의 질소와 산소의 화학반응으로 생성되는 물질로서 대기오염에 중요한 영향을 미치는 것은 NO,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ 가 있다. 한편, 디젤 엔진에서 배출되는 질소 산화물은 주로 NO,  $\text{NO}_2$ 로, 우리가 질소산화물이라고 할 때에는 NO,  $\text{NO}_2$ 를 뜻하며  $\text{NO}_x$ 라고 표기한다. 질소산화물을 지배하는 주요 인자에는 온도, 산소의 국부농도 및 연소의 지속시간이 있다.

디젤 기관의 질소산화물은 고온 연소과정 동안에 공기 중의  $\text{N}_2$ 나 연료 중에 함유된 질소분(N)이  $\text{O}_2$ 나  $\text{O}$ 의 혼합물로부터 해리에 의하여 생긴 산소원자와 고온 반응하여 모든 연료의 분무영역에서 다양한 농도로 생성된다. 이와 같이 디젤기관에서 생성 배출되는 질소산화물은 높은 열효율을 위한 고온 사이클과 저속회전, 고압축비 등의 채용, 연료와 공기의 혼합과 연소과정이 지극히 복잡한 디젤연소의 특성 등으로 인해 다른 열기관에 비해 생성정도가 높은 편이다. 질소산화물은 NO,  $\text{NO}_2$ 등으로 이루어지며, 기관에서 배출되는 성분비  $\text{NO}_2/\text{NO}$ 는 SI(Spark Ignition) 엔진이 2%(당량비 0.85에서), CI(Compression Ignition) 엔진에서 10%~30% 정도이다.

다시 말해  $\text{NO}_2$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 양은 NO에 비교하여 상대적으로 매우 적어서  $\text{NO}_2$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 양은 보통 저부하에서 NO량의 30% 정도이지만 부하의 증가와 함께 5% 이하로 감소한다. 따라서  $\text{NO}_2$ 와  $\text{N}_2\text{O}$ 양은 NO양에 비해 미량이므로 무시하거나 연소실 화염 확산에 따라 NO로 전환되므로 중간 생성물로 생

각할 수 있다.  $N_2O$  중간생성물 및  $NO_2$ 를 통한  $NO$ 의 생성 반응식은 식 (2.2)~(2.6)과 같다.



이와 같이 화염대(Flame zone)에서 형성된  $NO$ 는 다음과 같은 반응에 의해  $NO_2$ 로 빠르게 전환된다.  $NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$  뒤이어 다음의 반응에 의해  $NO_2 \rightarrow NO$ 로의 변환이 일어난다.  $NO_2 + O_2 \rightarrow NO + O_2$  이 과정에서 냉각공기의 혼합으로 인해 화염내에 형성된  $NO_2$ 가 동결되면 이 반응이 성립되지 못해  $NO_2$  양이 증가한다.  $NO$ 는 연소 과정 중  $N_2$ 의 산화에 의해 생성되는 초기산화물의 90% 이상을 차지하며, 다시 팽창과 배기 과정을 지나면서  $NO_2$ 와  $N_2O$ 를 생성하는데 각각  $NO$ 양의 5%와 1% 정도이다. 또한,  $NO_2$ 는  $NO$  농도가 100 ppm이상이고  $O_2$ 가 충분하며 온도가 1,100°C 이상인 상태의 연소실에서 직접 생성이 가능하고, 또 대기로 방출된  $NO$ 가 공기 또는 산소와 접촉하여 적갈색의  $NO_2$ 로 산화되기도 하며, 자외선에 의하여  $NO$ 가  $NO_2$ 로 광산화되기도 하여, 대기 중에는  $NO$ 와  $NO_2$ 가 혼재한다<sup>[9]</sup>.

IMO에서  $NO_x$ 의 규제가 강화됨에 따라 선박용 탈질기술에 대한 수요는 최근 매우 높아진 상태라고 할 수 있으며  $NO_x$  저감을 위한 방법으로는 Table 2.5와 같이 다양한 기술이 제시되고 있다.

Table 2.5 NO<sub>x</sub> reduction treatment for marine diesel engine<sup>10)</sup>

Treatment	Method	Remark
Pre-Treatment	Substitute fuel	·Methanol ·LNG ·Emulsified fuel
Internal Treatment	Combustion	·Fuel Injection timing retard ·Lean combustion ·Rich combustion ·Pre-chamber type combustion ·Fuel valve nozzle spec. modification ·High pressure of fuel injection
	Scavenging	Scavenging air cooling
	Water injection into cylinder	·Water mixture(mixed valve) ·Water mixture(independence valve)
	Water addition	·Water mixture into suction air
	Cycle modification	·De oxidised furnace ·Exchange gas recirculation
Post-Treatment	Emission de-NO <sub>x</sub>	·Selective catalytic reduction ·Catalytic decomposition

IMO MEPC 65차에 보고된 세계 NO<sub>x</sub> 저감기술 현황을 보면, EGR, SCR, 그리고 이중 연료(dual fuel), 가스연료가 고려되었으며, 여기서 현실적으로 가장 적용 가능한 기술은 SCR 시스템이라고 보고되었다.

엔진에서 질소산화물 (NO<sub>x</sub>)의 발생량은 연소가 저온에서 이루어지느냐 고온에서 이루어지느냐에 따라 달라진다. 즉, 엔진의 압축비와 연소 압력에 따라 그 질소산화물의 양이 결정이 된다. 고온연소(Hot Combustion)에서는 다량의 질소 산화물과 소량의 미립자가 발생하며 저온연소(Cold Combustion)에서는 소량의 질소 산화물과 다량의 미립자가 발생한다. 따



라서 엔진이 저온에서의 연소가 이뤄진다면 다량의 미립자를 걸러주기 위한 장치가 필요하며, 고온 연소가 이뤄진다면 다량의 질소산화물이 발생하기 때문에 그 다량의 질소산화물을 줄이기 위한 장치가 필요한 것이다<sup>[8]</sup>.

### 2.2.6 미립자(PM, Particulate Matter)

미국 CARB(California Air Resource Board)에서 정의한 PM은 다음과 같다. 51.7°C 이하의 공기로 회석되어 필터에 포집된 배출성분 중 응축수분(condensed water)을 제외한 모든 배출성분을 말하며 미분(fines), 분진(dust), 검댕(soot), 미스트(mist), 연무(fog), 스모그(smog) 등이 포함된다.

PM 발생량은 연료량의 중량 중 약 0.2%~0.5%이며 대부분의 PM은 연료 탄화수소계의 불완전연소에 기인하고 일부는 엔진 윤활유에서 발생한다. Fig. 2.3은 PM의 구성을 나타내며, 크게 SOL(solid fraction), SOF(soluble organic fraction), SO<sub>4</sub>(sulfate particles)로 구성되어 있다.

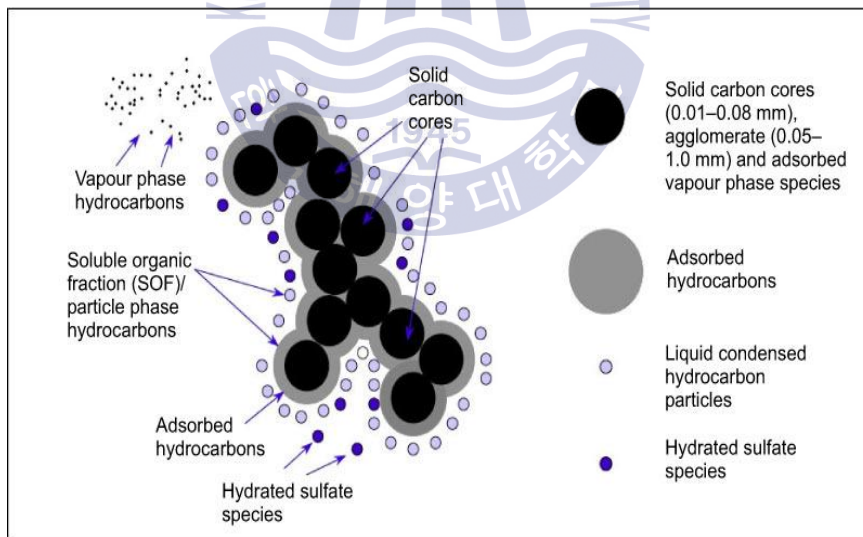


Fig. 2.3 Element composition of diesel PM

SOL은 탄소입자가 대부분이며 재(ash)도 포함된다. 배기가스온도 500°C 이상에서는 직경 15 nm~30 nm의 탄소(carbon)입자나 입자의 덩어리(cluster)로서

H/C=0.2~0.3의 건조 검댕(dry soot) 상태이다. 엔진기술이 향상됨에 따라 탄소(carbon) PM은 대폭 저감되었으며 이에 따라 재의 비중이 커지고 있다. 재의 발생원인은 엔진 윤활유 첨가제에서 Ca, Zn, Mg 산화물이 발생하며, 엔진마모에 따른 Fe, Cu, Cr 산화물, 엔진 배기관의 부식영향, 매연 여과장치의 연료첨가제에 의한 발생 등이 있다.

디젤엔진에서 배출되는 PM 분포상태는 중량기준(accumulate mode)으로 할 경우 입자직경 30 nm~500 nm에 분포되어 있으며 100 nm~200 nm에 집중되어 있다. 그러나 수량기준으로 보면 3 nm~30 nm에 분포되어 있으며 10 nm~20 nm에 집중되어 있다. 질량은 전체의 10% 이내이나 수량은 90% 이상이다<sup>[11]</sup>.

### 2.2.7 연료유 질(Regulation 18)

MARPOL 73/78 Annex VI의 내용 중 선박에 연소를 목적으로 공급되어 사용하는 연료유는 석유 정제로부터 추출된 탄화수소의 혼합물이어야 하며 무기산이 포함되어서는 안 된다고 규정하고 있다. 또한 선박의 안전을 저해하거나, 기계의 성능에 나쁜 영향을 미치는 것, 인체에 유해한 것, 전체적으로 대기오염을 가중시키는 물질이 포함되지 않을 것을 명시하고 있다. 또한 석유정제외의 방법에 의하여 연소를 목적으로 하는 연료유는 제 14규칙 황산화물(Regulation 14)에 규정된 황 함유량을 초과하여서는 안 된다는 것을 거듭 명시하고 있다.

연료유에 대한 상세한 자료는 연료유 공급서류에 기록되어야 하며, 연료유 공급서는 적합한 때에 검사를 위해 쉽게 이용가능한 장소의 본선에 공급된 시점부터 3년간 보관되어야 한다.

연료유 공급서는 기구에 의해 개발된 지침에 따라, 인도되는 연료유의 대표 샘플이 함께 제공되어야 한다. 이 샘플은 연료 공급자의 대리인과 연료유 공급 작업을 완료시 책임사관이나 선장에 의해 밀봉되고 서명이 되어야 하며, 이는 그 해당 연료유가 다 소모가 될 때까지 본선에 보관되어야 한다. 그러나 어느 경우든 공급 후 12개월 이상 보관되어야 한다<sup>[12]</sup>.

### 2.3 오염물질 배출규제에 따른 선박용 추진기관 연료의 변화

선박은 연료소비량이 많아 고가인 양질유가 아닌 초저질혼합중유를 사용해왔다. 초저질혼합중유는 비스브리킹 잔사유(Vis-breaking bottom)나 FCC잔사유(FCC bottom)에 직류경유나 분해경유를 혼합하여 점도를 조절 한 것으로, 희석용경유의 양을 감소시켜 불순물 함량 및 밀도와 점도가 상당히 높고 연소성이 나쁘다. 여기서 중유혼합재는 비스브리킹 잔사유와 FCC잔사유로 하고, 희석용 경유는 직류경유(세탄값:55~65)를 최소한도로 사용하며, 주로 FCC로부터의 분해경유(세탄값:18~20)를 사용한다. 혼합조합유는 연소성을 고려하나 그 점도는 600 cSt/50°C 혹은 그 이상으로 된다.

대형 선박의 등장과 공업화의 급격한 진행에 따라 양질유의 가격이 급등하기 시작하여 선박에서의 연료비용 절감을 위하여 1950년대 초부터 180 cSt/50°C 급의 저질중유가 등장하였다. 그 후로 유가의 상승으로 1960년대 초 부터는 280 cSt/50°C 급을 사용하기에 이르렀고, 이어 1차 석유파동(Oil shock) 이후 380 cSt/50°C 급이, 2차 석유파동 이후 500 cSt/50°C 급의 초저질 중유가 등장하였다. 또 1985년 이후부터 신조선 주기관에는 600 cSt/50°C 급의 중유사양을 일반화하였으며, 선박용 디젤기관 연료유의 CIMAC규격(Recommendation)이나 ISO표준규격에는 700 cSt/50°C 급의 저질 중유가 포함되어 있다<sup>[13]</sup>.

### 2.4 황산화물 배출 통제 지역 운항 현황

현재 각 선사에서는 유럽과 북아메리카 해역의 황산화물 배출 통제 지역을 향해 시에 저유황 연료유를 사용하고 있다. 유럽의 황산화물 배출 통제 지역에서는 황 함유량 0.1%를 초과하지 않는 초저유황 연료유(ULSFO : Ultra Low Sulfur Fuel Oil)를 사용 중에 있으며, 북아메리카 해역의 황산화물 배출 통제 지역에서는 황 함유량 0.1%를 초과하지 않는 MGO를 주로 사용하고 있다. Fig. 2.4와 Fig. 2.5는 각각 EU SOx emission control area와 North America SOx emission control area를 나타낸 것이다.

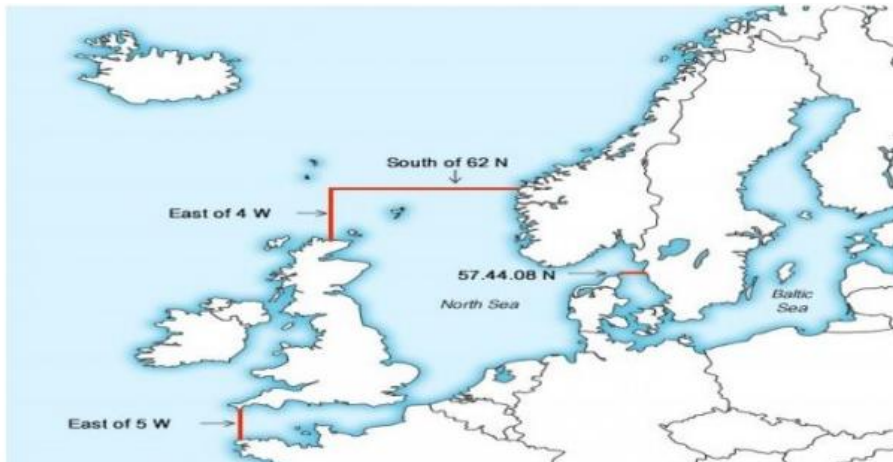


Fig. 2.4 EU SOx emission control area



Fig. 2.5 North America SOx emission control area

상기 기술한 사항 중 North America SOx emission control area를 향해 하는 선박을 대상으로 운항 현황을 파악하기 위해 표본 선박을 선정하였으며 Table 2.6은 표본 선박 명세를 나타낸 것이다.

Table 2.6 Particular for operating vessel

	Vessel A
D/L	2008.02.04
LOA(m)	339.62
Breath Moulded(m)	45.6
Depth Moulded(m)	24.6
DWT(MT)	99,052
G/T(ton)	94,511
N/T(ton)	51,638
M/E MODEL	HYUNDAI SULZER 14RT-FLEX 96C
M/E MCR / RPM	108,920 bhp / 102 rpm
M/E NCR / RPM	98,030 bhp / 98.5 rpm
Service Speed(knots)	27.0

표본 선박은 부산 신항을 기점으로 북아메리카 서부해역의 항로를 항해하며 북미지역에서는 미국의 타코마항, 시애틀항, 캐나다 밴쿠버항을 기항한다. 황산화물 배출 통제 지역에 진입하기 전에 모든 선박들은 0.1% m/m를 초과하는 연료유를 완전히 교체할 수 있는 충분한 시간을 갖고 연료유 교환 작업을 시행해야 한다. 또한 연료유 교환 작업 수행을 증명할 수 있는 문서가 갖추어져야 한다. 그래서 연료유 교환 작업이 시행된 선박의 위치, 날짜, 시간, 각 연료유 탱크의 용량 및 잔량을 기관실 로그북에 기재하여야 한다.

Table 2.7은 표본 선박의 주기관 사양을 나타내었으며, Table 2.8에서는 표본선박의 3항차 기준 평균 속력과 황산화물 배출 통제 지역 및 그 외 지역 운항시간에 따른 평균 연료유 소모량을 나타내고 있다.

**Table 2.7** Main engine specification

	Vessel A
MODEL	HYUNDAI SULZER 14RT-FLEX 96C
TYPE	TWO STROKE SINGLE ACTING, CROSSHEAD
NO. OF CYLINDER	14
CYL. BORE/STROKE(mm)	960 / 2,500
OUTPUT(kW)	MCR 81,254 / NCR 73,130
MEAN EFF. PRESS.(bar)	MCR 18.6 / NCR 17.3
MEAN PISTON SPEED(m/s)	MCR 8.5
ROTATION	CLOCKWISE VIEWED FROM FLYWHEEL SIDE
F.O. CONSUMPTION	174(g/kW · h) + 5% AT MCR
L.O. CONSUMPTION	SYSTEM 12 kg/cyl · 24h Cyl. oil 0.65 ~ 1.0 g/kW · h

Table 2.8 Average speed and fuel oil consumptions

Voyage	Average speed (knots)	Average fuel oil consumptions (M/T per day)	
		HFO	MGO (SECA)
50E	17.3	96.96	61.57
50W	18.4	102.92	42.50
51E	18.8	93.47	53.91
51W	16.9	86.73	35.66
52E	18.0	89.00	40.94
52W	16.5	80.92	36.92

또한 Table 2.9는 황산화물 통제 지역에서의 운항 시간을 나타낸 것으로 미국의 타코마항, 시애틀항 및 캐나다 밴쿠버 항에서의 정박시간을 제외하면 실제 항해시간 74~76 시간임을 보여주고 있다.

Table 2.9 North America SOx emission control area sailing table

	Voyage 50	Voyage 51	Voyage 52
Operating time(Hour)	189	215	204
In port time(Hour)	114	139	130
Sailing time(Hour)	75	76	74

2장에서는 선박 대기오염물질의 종류 및 규제 현황을 다루었으며, North America SOx emission control area를 항해하는 선박을 대상으로 운항 현황을 분석하여 항차별 연료소모량 및 항해 시간을 알아보았다.

## 제 3 장 초저유황 연료유와 운할 특성 분석

### 3.1 초저유황 연료유

#### 3.1.1 초저유황 연료유의 정의

세계적으로 표준화된 용어가 존재하지 않지만, 해상용 초저유황 연료유<sup>2)</sup>는 ULSFO를 말하며 Ultra Low Sulphur Fuel Oil로 황 함유량이 0.1% m/m 미만인 것을 말한다.

Table 3.1 Fuel type abbreviations

Fuel type	Denomination	Sulphur content % m/m
HFO	Heavy Fuel Oil	> 1.50
LSHFO	Low Sulphur Heavy Fuel Oil	< 1.50
ULSFO	Ultra Low Sulphur Fuel Oil	< 0.10
ULSD	Ultra Low Sulphur Diesel	< 0.01

#### 3.1.2 초저유황 연료유의 종류<sup>[14]</sup>

##### 3.1.2.1 보급지역별 초저유황 연료유 구분

정유사 생산시설 기반에 따라 지역별로 초저유황 연료유의 성향이 Table 3.2와 같이 다양하게 나타난다.

ARA(Antwerp-Rotterdam-Amsterdam)와 USEC(US East Coast)는 점도가

2) 황 함유량에 따른 육상용 경유 분류<sup>[15]</sup>

500 ppm 이상: 고유황경유, 30 ppm~500 ppm: 저유황경유, 30 ppm 미만 : 초저유황경유



높아 추가로 가열(Heating)이 필요한 반면, USWC(US West Coast)는 주로 DMB-s 0.1% 계열로 점도가 낮은 경향을 보인다. ASIA 및 MED도 SK를 제외하고는 점도가 낮은 경향을 보인다.

**Table 3.2** ULSFO supply by each region

Region	보급가능지역	Supplier	점도(cSt)	Pour Point (°C)
ARA	RTM, ANT	Exxonmobile, Shell, BP, SK(예)	21~65 6~13(BP)	9 ~ 27
USWC	LGB, SEA, TIW	Chemoil, Philips 66, BP	8.6~12.8	-3 ~ -9
USEC	NYC, SAV, HOU	Shell, Chemoil	16.8~26.3	-6 ~ 24
ASIA	BUS, NJK, SIN(예)	SK, S-oil, LUK	26.7/6.9	-3~-9/9
MED	ALG	CEPSA	8.8	-12

### 3.1.2.2 초저유황 연료유의 생산 공정

#### (1) 하이드로크래커 잔사유(Hydrocracker Bottom Oil) 가공 생산 방식

가장 보편적인 생산방법은 Fig. 3.1과 같이 하이드로크래커 잔사유(Hydrocracker Bottom Oil)를 가공하여 생산하는 방식을 사용한다. 수첨분해(hydrocracking)공정은 이전 정유공정의 잔사유(Bottom oil)로부터 나프타(naphtha), 등유(kerosene), 경유(diesel) 등을 추가로 추출하기 위한 공정이다. 이 공정을 진행하는 중 타르(tar)와 코크스(coke), PAHs 등의 생성을 최소화하기 위하여 수소(hydrogen)를 투입하는 이 과정에서  $S \rightarrow H_2S$ 로,  $N_2 \rightarrow NH_3$ 로 바뀌어 탈황이 진행된다. 대부분의 초저유황 연료유는 이 방법으로 생산하는 것으로 알려져 있다.

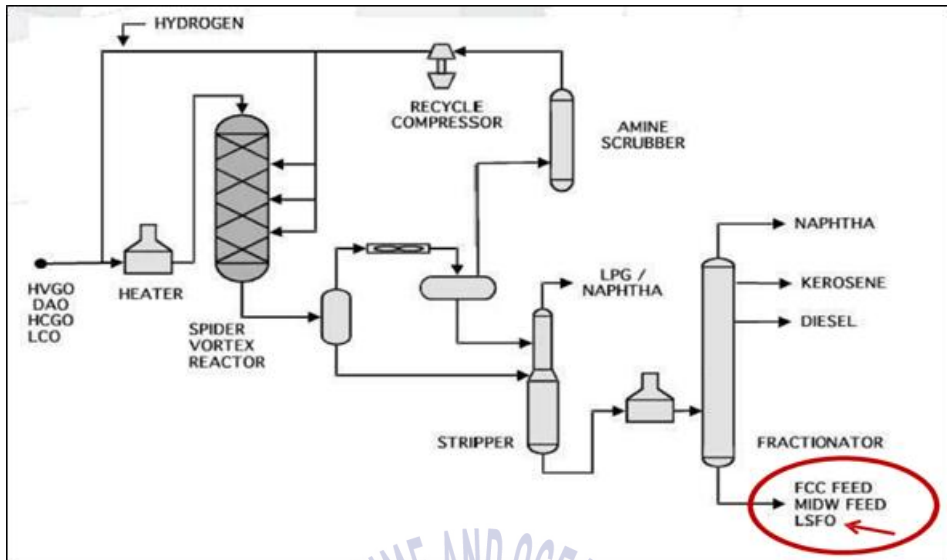


Fig. 3.1 Production from bottom oil of Hydrocracking

## (2) Doba 원유(cude oil) 등 저유황 원유 블렌딩 방식

Chad, Cameroon 등지에서 생산되는 황함유량이 0.11%~0.3%인 초저유황 Doba 원유를 기본으로 블렌딩하는 방법이다.

### 3.1.3 초저유황유(Hydrocracker Bottom Oil)의 특성<sup>[16]</sup>

#### (1) 황함유량 저하로 인한 특성

초저유황 연료유는 황함유량 저하로 인하여 산화 및 열화 안정성이 감소하고, 전기전도성이 0.035% m/m 이하로 감소된다. 이는 정전기에 의한 폭발가능성을 내재한다. 또한 박테리아 발생 및 증식의 우려가 있으며 무엇보다도 황함유량 0.05% m/m 미만인 경우 운활성의 급격한 저하를 가져올 수 있다. 정유공정상 운활성 개선제 처리를 하지만 부분별로 처리 정도가 다를 수 있으며 이는 곧 부식의 원인으로 작용하기도 한다.

## (2) 화학적 안정성의 저하로 인한 특성

고도화 공정이 반복됨에 따라 분해 잔사유(cracked residue)의 함량이 높아지므로 화학적 안정성이 크게 저하되어 작은 충격에도 급격히 반응하는 불안정한 상태가 된다.

## (3) 고 함유량의 왁스(waxy) 성분으로 인한 특성

지방족(Aliphatic) 성상의 왁스 성분 함량이 높음으로 인하여 점도와 유동점이 높고, 착화성 및 연소성이 우수하다. 또한 저온유동성을 나타내는 지표로 CFPP(Cold Filter Plugging Point)가 일반적으로 증류유(distillate)의 경우 유동점이 3°C~6°C 수준이며, 잔사유의 경우 유동점 10°C 정도를 유지한다. 이 밖에 연료유 계통 내 존재하던 기존의 침전물이 분해되어 연료유 이송 시 같이 유입되는 현상이 발생할 수 있으며 청정기 또는 필터가 막히는 문제가 발생할 수 있는 특성을 가지고 있다.



Fig. 3.2 Waxy precipitations in a fuel sample.

### 3.1.4 초저유황 연료유의 착화성

중유의 경우 CFR엔진으로 세탄가를 결정함에 있어 어려움이 있어 대안으로 CCAI(Calculated Carbon Aromaticity Index)와 CII(Calculated Ignition Index)를 사용한다. CCAI 값이 클수록 착화성은 떨어지며, 두 지수 모두 연료의 밀도와 동점도로부터 계산된다<sup>[17]</sup>.

$$CCAI = D - 140.7 \log_{10} \log_{10}(V + 0.85) - 80.6 \quad (3.1)$$

- ┌  $D$ : 15°C 에서의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- └  $V$ : 50°C 에서의 동점도(mm<sup>2</sup>/s)

$$CII = (270.795 + 0.1038T) - 0.254565D + 23.708 \log_{10} \log_{10}(V + 0.7) \quad (3.2)$$

- ┌  $D$ : 15°C 에서의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- └  $V$ : 50°C 에서의 동점도(mm<sup>2</sup>/s)
- └  $T$ : Viscosity temperature(°C)

초저유황 연료유는 정유사별, 지역별 원유와 생산방식의 차이로 그 성상이 제 각각이며, ISO 8217의 특정 등급(grade)로 정의되지 않아 품질관리가 어렵다. 정유사별 초저유황유의 주요 특성은 Table 3.3과 같으며, CCAI값이 780~811인 것으로 보아 착화성 및 연소특성이 LSFO, LSMGO 대비 우수한 것을 알 수 있다.<sup>[14]</sup>

**Table 3.3** Major properties of ULSFO<sup>[14]</sup>

	SK	Chemoil (NYC)	Chemoil (LGB)	S-OIL	CEPSA	BP	LSFO LSMGO
Density (@15°Ckg/m <sup>3</sup> )	922.4	912.1	898.4	859.6	869.4	845.0	991.0 890.0
Viscosity (cSt@50°C)	26.71	23.25	10.3	6.78	8.911	12.38	380 2~6
Viscosity (cSt@100°C)	10.9	5.9	2.8	2.6	2.6	3.1	
<b>CCAI</b>	<b>806</b>	<b>811</b>		<b>786</b>			<b>&lt;870</b>
ECN (Estimated Cetane Number)			>40		50.6	74.05	40
Sulfur (%m/m)	0.09	0.06	0.05	0.08	0.001	0.001	3.5 0.1
Pour Point (°C)	-3	-6	-9	-9	-6	-3	30 -6~0
MCR (%m/m)	4.32	3.07	0.07	1.2	0.01	0.05	18 0.3
Lubricity (µm)	-	169	277	304	315	-	- 520
Al+Si (mg/kg)	15	1	1	3	2	-	60 -
Non Organic (mg/kg)	Fe: Ni:9 Mg: K:1	Fe:7, Ni:5 Mg:2, Ca:178	Ni:3	Fe:2, Ni:3	Ni:2	Fe:1	
Stability (Separability No.)	1.1		0.2	0.6	0.3	-	
Net S. Energy (MJ/kg)	42.06	42.22	42.43	42.87	42.8	43.09	39~41

## 3.2 황 함유량에 따른 연료유의 윤활 특성 분석

### 3.2.1 일반 연료유의 윤활 특성 분석

선박용 추진기관의 경제적인 운항과 엔진 보호를 위하여 윤활 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 특히 운전 시마다 연료유의 연소과정으로 인해 고온, 고압의 상태에 지속적으로 노출되는 실린더는 그 어느 곳 보다도 섬세한 윤활이 필요하다. 실린더 윤활을 통하여 피스톤 링과 실린더 라이너 사이에 적절한 유막을 형성하고, 연소 퇴적물(deposit)을 최소화하여 피스톤 링의 자유로운 운동을 지속시켜야 한다. 그리고 무엇보다도 실린더 윤활에서 중요한 것은 중화(neutralization)이다.

일반적으로 최근까지도 사용되고 있는 황 함유량이 높은 HFO의 연소과정을 살펴보면 연료유 중에 포함된 S가 SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>로 바뀌고, SO<sub>3</sub>은 H<sub>2</sub>O와 결합하여 강산성을 띠는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>를 만들어낸다.



이렇게 발생한 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>을 중화시키기 위한 실린더 윤활유의 주성분이 CaCO<sub>3</sub> 이다. 실린더 윤활유에 CaCO<sub>3</sub> 함량이 높을수록 BN(Base Number)이 커진다.



알칼리 성질을 띠는 실린더 윤활유는 산성을 중화시키고 피스톤 링과 실린더 라이너의 표면의 부식을 방지한다. 만약 실린더 윤활유의 급유율(feed rate)이 낮아지거나 BN이 낮으면, 중화 반응이 충분히 일어나지 못하여 부식이 발생된다. 효과적인 중화를 위하여 연료유 중 황 함유량에 적합한 BN이 필요한데, MAN Diesel & Turbo(이 후 MDT)사의 2행정 사이클 엔진의 일반적인 BN선택 방법은 Fig. 3.3과 같다.

저유황 연료유의 경우, 알카리가가 낮은(15-40 BN) 실린더 윤활유를 사용하지만, 상대적으로 고유황 연료유의 경우 알카리가가 높은(70-100 BN) 실린더 윤활유를 사용한다.

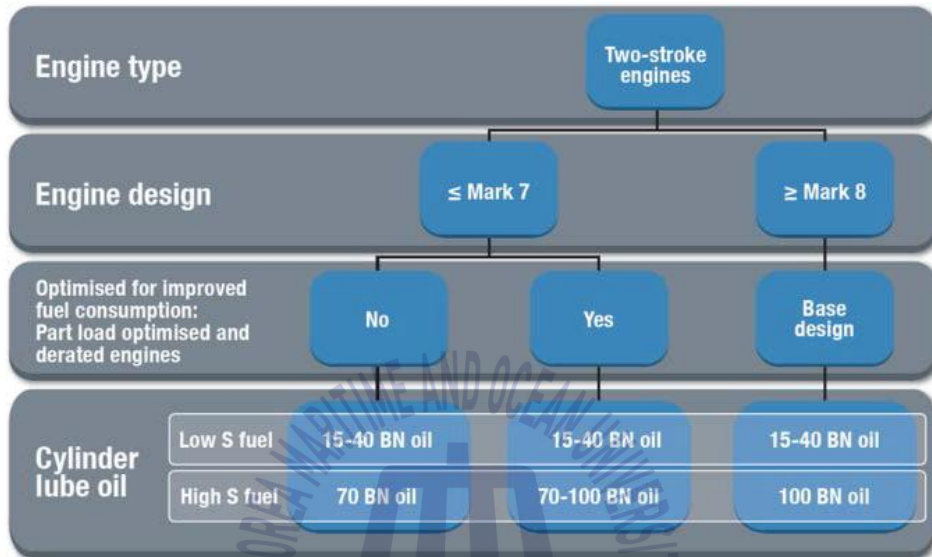


Fig. 3.3 General Overview of cylinder lube oils and how to choose a suitable cylinder lube oil<sup>[18]</sup>

저유황 연료유로 운전 시 발생하는  $H_2SO_4$ 의 양이 적지만, 상대적으로 고유황 연료유로 운전 시 발생하는  $H_2SO_4$ 의 양은 많아지므로 연료유 내 황 함유량에 따라 적합한 BN의 실린더 윤활유를 사용해야 한다. Fig. 3.4는 연료유 내 황 함유량과 실린더 윤활유의 BN 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

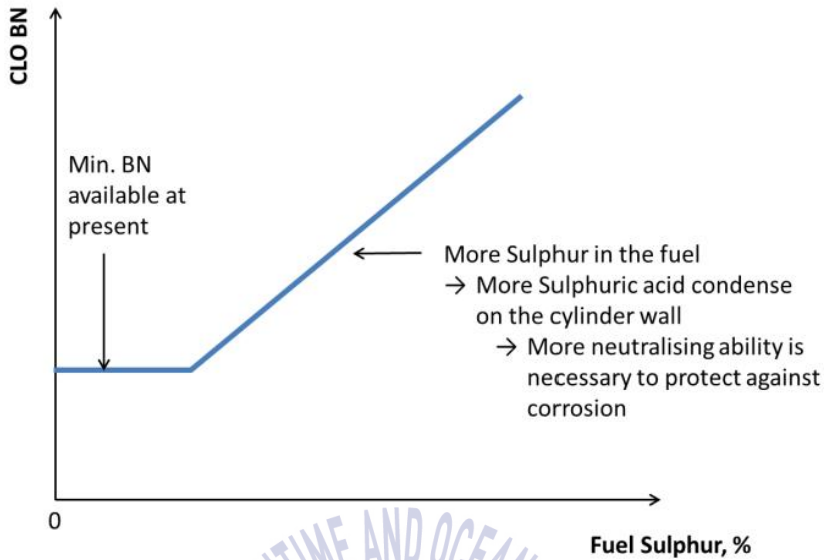


Fig. 3.4 Relationship between sulfur in the fuel and BN in the cylinder lube oil

실린더 내부의 중화에는 실린더 윤활유의 BN 뿐만 아니라 실린더 윤활유 급유율도 큰 영향을 준다. 연료유 중의 황 함유량, 실린더 윤활유 급유율과 실린더 라이너의 마모 정도 간의 관계를 Fig. 3.5에서 나타내고 있다. X축은 실린더 윤활유의 급유율을 나타내고 Y축은 실린더 라이너의 마모상태를 나타내는데 연료유 속 황 함유량에 따라 마모 허용치에 속한 급유율이 다른 것을 알 수 있다. 또한 급유율이 너무 작아도, 또는 너무 커도 라이너의 마모 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 급유율이 너무 클 경우 연소퇴적물 증가에 따른 스커픽(scuffing) 현상이 발생함을 알 수 있다. 물론 엔진의 상세 구성, 운전 상태, 소기 습도와 같은 대기상태 또한 영향을 줄 수 있다.<sup>[19]</sup>



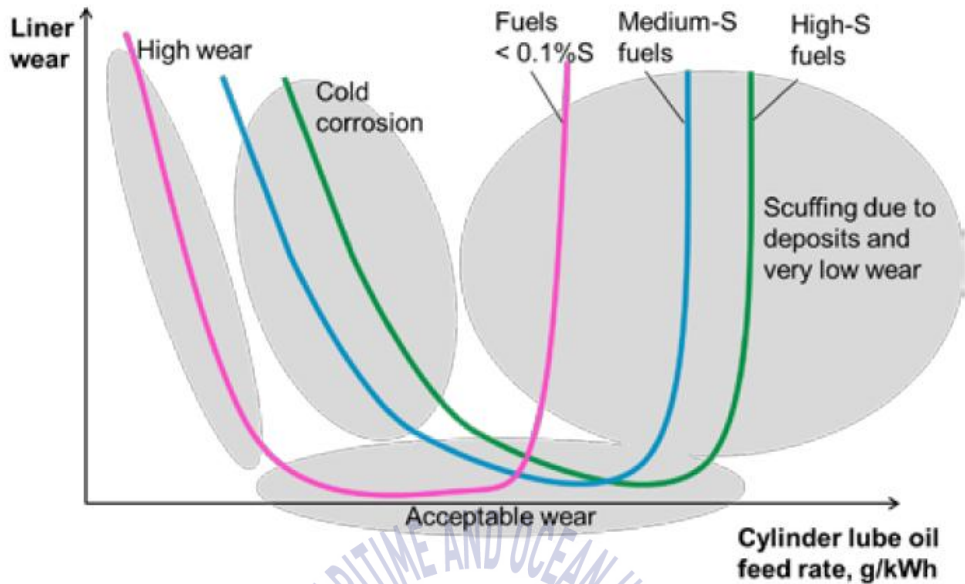


Fig. 3.5 Liner wear vs. cylinder lub. oil dosage

새로운 실린더 라이너는 wave-cut이라는 가공형태를 가지고 있는데, 이것은 실린더 윤활유의 충분한 양이 라이너의 표면에 유지될 수 있도록 도와준다. 엔진이 지속적으로 운전됨에 따라 실린더 라이너는 마모를 겪게 되고, 특히 라이너 상부의 wave-cut에도 계속해서 마모가 일어난다. 윤활유를 라이너에 적절히 스며들도록 유지시키는 속성은 노출된 흑연 박막층(open graphite lamella) 구조에 의해 가능한데, 좋은 상태의 라이너 표면은 Fig. 3.6과 같다. 노출된 흑연 박막층은 Fig. 3.7과 같이 윤활유의 유막을 쉽게 형성시키고 유지시켜주는 역할을 한다.

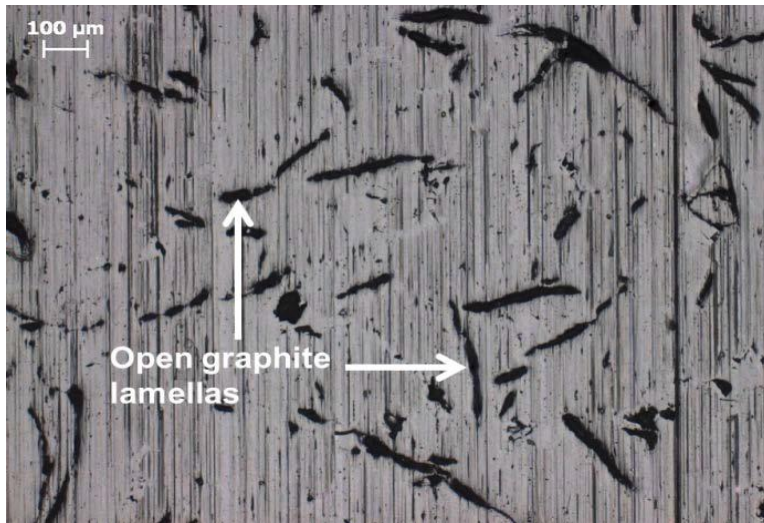


Fig. 3.6 microstructure of a normal, well-running liner

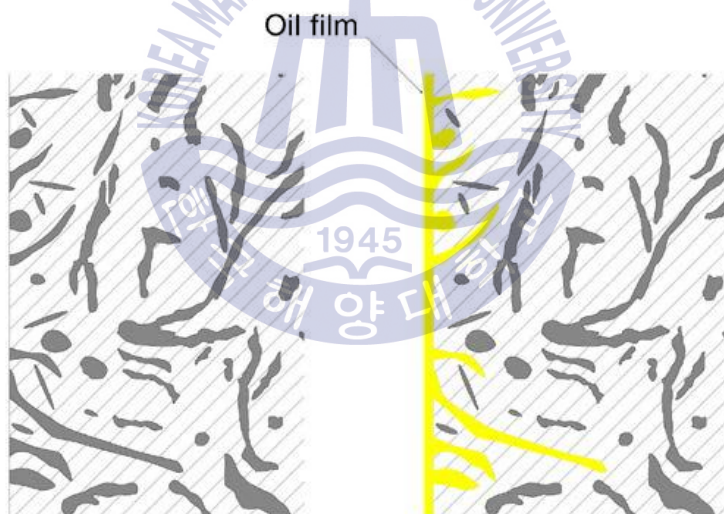


Fig. 3.7 Sketch of cross sections through a healthy cylinder liner running surface

실린더 윤활유의 급유율을 과하게 조절하거나, 너무 큰 BN 실린더 윤활유가 공급되면, 실린더 윤활유 내에 첨가제 중 일부가 피스톤 톱랜드(top land), 링랜드(ring lands), 그리고 피스톤 링의 뒤 공간까지 연소퇴적물(deposit)을 생성시키게 된다. 이는 흑연 박막층 구조를 없애 실린더광택

(bore-polishing)을 일으키고, 나아가 피스톤링과 실린더 라이너에 스커핑(scuffing)현상을 일으킨다.

일반적인 실린더 윤활유는 SAE 50 점도 등급과 우수한 세정력을 필요로 한다. SAE 50 점도 등급은 피스톤 링과 실린더 라이너 사이에 최적의 유막 두께를 유지시켜준다. 유막 두께가 너무 얇으면, 중화력이 떨어지고 부식을 촉진시킨다. 또한 피스톤과 실린더 라이너의 마찰을 증가시켜 마모가 일어난다. 우수한 세정력은 연소퇴적물 형성을 최소화시키는 능력을 말하며 실린더 윤활유의 세정력이 약하면 과도한 연소퇴적물 생성으로 인해 마모와 스커핑 현상이 증가하게 된다.<sup>[20]</sup>

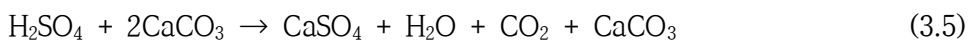
### 3.2.2 초저유황 연료유의 윤활 특성 분석

선박용 추진기관에서 황 함유량 0.1% 이하의 초저유황유 사용에 따른 실린더 윤활 특성의 핵심은 연소퇴적물 형성과 실린더 라이너 표면의 광택(bore-polishing)이다.

#### 3.2.2.1 실린더 윤활유로부터 발생하는 연소퇴적물<sup>[21]</sup>

실린더 윤활유는 끊임없이 연소과정이 일어나 고온 상태가 유지되는 연소실 내의 실린더 상부에서 사용될 수 있도록 열안전성이 우수해야 한다. 이러한 성질은 피스톤 톱랜드와 피스톤 링 안쪽에 연소 퇴적물 형성을 최소화하는 역할을 한다.

초저유황 연료유는 황함유량이 0.1% 이하로 연소과정에서 발생하는 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>가 기존 HFO에 비하여 적은 편이다. 따라서 초저유황 연료유 사용에 걸맞는 실린더 윤활유가 필요하다. 초저유황 연료유를 사용하면서 CaCO<sub>3</sub>성분의 첨가제가 다량 포함된 실린더 윤활유를 사용한다면, 중화반응 중에 발생한 불필요하게 많은 흰색의 CaCO<sub>3</sub>가 석출되어 Fig. 3.8과 같이 피스톤 톱랜드에, Fig. 3.9와 같이 피스톤 링 주변으로 들러붙게 된다.



들러붙은  $\text{CaCO}_3$ 는 연마작용의 특성이 있어 실린더 윤활유의 유막형성을 방해하고, 피스톤링의 움직임을 방해하며 스커핑의 위험을 증가시킨다. 나아가 실린더 라이너의 광택을 발생시켜 라이너 마모와 스커핑을 증가시킨다. 또한 Fig. 3.9와 같이 피스톤 링 주변에 들러붙은 연소퇴적물에 의하여 피스톤링은 바깥쪽으로 밀리게 되어 라이너와의 마찰이 급격히 증가하게 된다. 그로 인하여 피스톤링과 라이너의 마모도 증가로 인한 손상이 발생할 가능성이 크다.



Fig. 3.8 Photo of piston covered in deposits

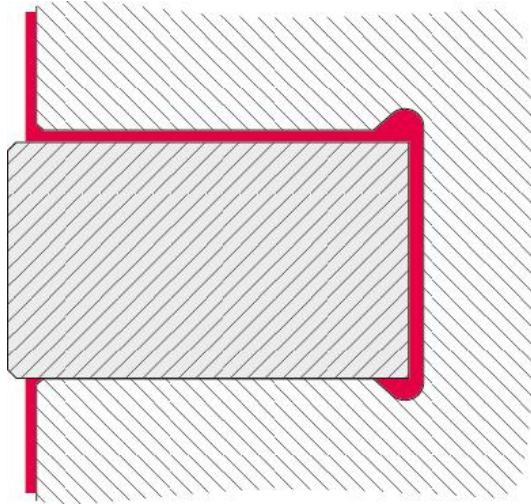


Fig. 3.9 Schematic of deposit (red) build-up behind piston rings

### 3.2.2.2 실린더 라이너 표면의 실린더광택(bore-polishing)<sup>[22]</sup>

초저유황 연료유 사용 시 대부분의 경우 부식의 수준은 아주 약하고, 실린더 라이너의 마모 역시 무시해도 될 정도로 약하게 나타난다. 아주 약한 마모는 Fig. 3.10과 같이 라이너 주철의 흑연 박막층이 철기 매트릭스재료(iron-based matrix material)의 박막층으로 재료 소성변형을 일으킬 수 있다. 이 과정을 스미어링(smearing)이라고 한다. Fig. 3.11은 초저유황 연료유로 운전하는 엔진의 실린더 라이너 미세구조 모형이다.

이 현상은 실린더 라이너의 표면을 아주 부드럽고 눈부시게 만들기 때문에 이를 실린더광택(bore-polishing)이라고 말한다. Fig. 3.12는 실린더광택이 발생한 실린더 라이너의 표면 사진이다. 실린더광택이 발생되면, 실린더 윤활유가 실린더 표면에 유지되는 능력이 감소해 유막형성이 불량해지게 된다. 불충분한 유막은 주철 피스톤 링과 주철 실린더 라이너의 접촉으로 이어지고, 둘 사이의 강한 마찰과 라이너 스커핑과 같은 심각한 응착(seizure)마모, 부식 현상을 발생시키게 된다.

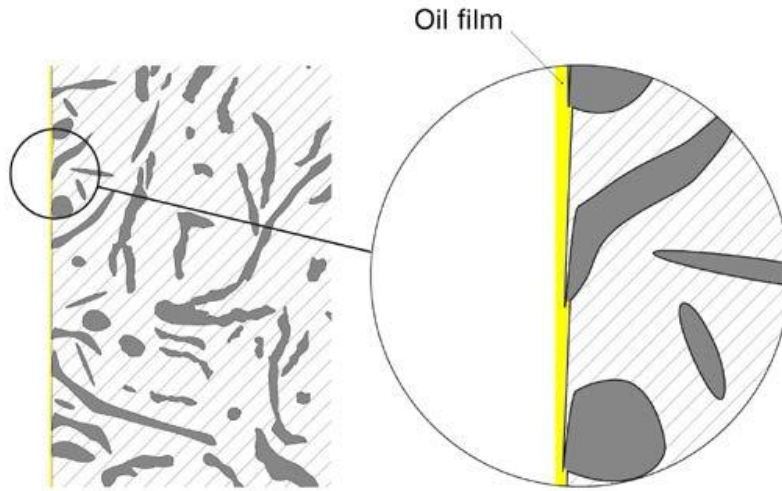


Fig. 3.10 Sketch of cross section of a smeared cylinder liner running surface (bore-polish)

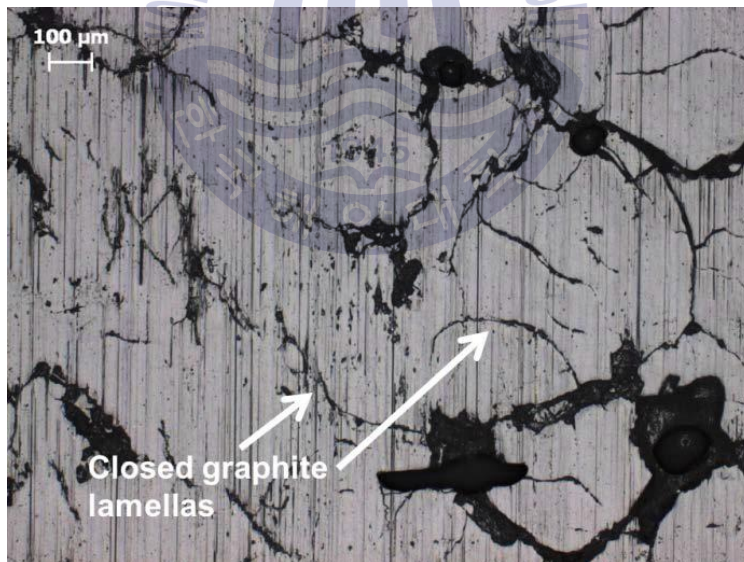


Fig. 3.11 Replica of microstructure of 6L60MC engine operating continuously on fuel  $< 0.1\% S$ . Note the closed graphite lamellas



Fig. 3.12 Bore-polishing in cylinder liner of 6S60MC

3장에서는 초저유황 연료유의 윤활 특성에 대하여 언급하였으며, 특히 초저유황 연료유 사용 시 윤활 과정에서 발생하는 주된 문제점으로 연소 퇴적물 축적에 의한 실린더 라이너의 실린더광택 현상에 주목하였다. 이러한 문제점에 의해 라이너, 피스톤, 피스톤링의 부식 및 마모는 더욱 악화된다. 그래서 이러한 문제점을 개선할 수 있는 방안에 대하여 다음 4장에서 다뤄 보고자 한다.

## 제 4 장 선박용 추진기관에 초저유황 연료유 사용에 따른 윤활 관리 방안 및 실태

실제로 MDT사의 6S60MC 엔진에서 지속적으로 초저유황 연료유를 사용하여 운전 테스트를 시행하였으며, 그 결과 Fig. 4.1과 같이 연소퇴적물의 형성, 실린더광택(bore-polishing), 그리고 스키핑(scuffing)이 발생하였다. 그렇다면 실제 황산화물 배출 통제 지역을 향해하여 초저유황 연료유를 사용 시 이러한 문제점을 개선하기 위해서 어떠한 조치를 취해야 하는지 그 방안에 대하여 다뤄 보도록 하겠다.

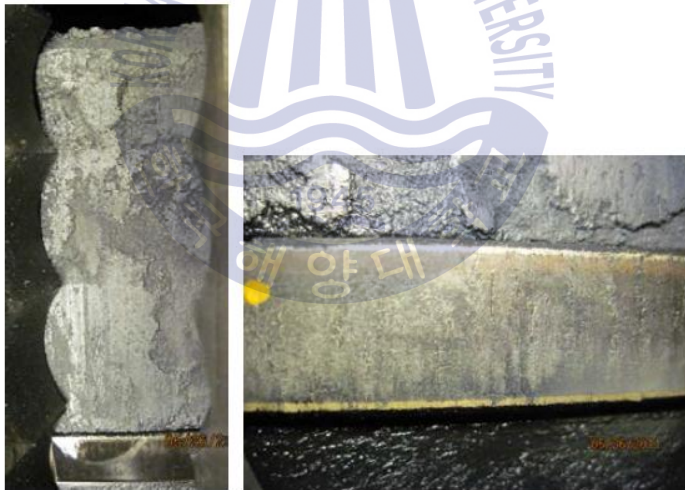


Fig. 4.1 6S60MC engine operating continuously on distillate - experiencing heavy deposit build-up and scuffing



## 4.1 실린더유의 BN 선정, 급유율 조정 및 자동 시스템

### 4.1.1 BN 선정, 급유율 조정

선박용 추진기관의 안전한 운전을 위하여 연료유를 0.1% 이하의 초저유황 연료유로 전환하면 동시에 알맞은 실린더 윤활유가 공급되어야 한다. 낮은 BN 윤활유는 17, 25, 40 BN 3종류가 있으며 회사별 제품 및 BN은 Table 4.1과 같다.

**Table 4.1** Example of low-BN cylinder oils on the international market

Oil company	Oil name	BN level
Aegean	Alfacylo 540 LS	40
Castrol	Cyltech 40SX	40
Chevron	Taro Special HT LF	25
	Taro Special HT LS 40	40
ExxonMobil	Mobilgard 525	25
Gulf Oil Marine	GulfSea Cylcare ECA 50	17
	GulfSea Cylcare DCA 5040H	40
Indian Oil Corp.	Servo Marine LB 1750	17
JX Nippon Oil & Energy	Marine C405	40
Lukoil	Navigo 40 MCL	40
Shell	Alexia S3	25
Sinopec	Marine Cylinder Oil 5040	40
Total	Talusia LS 25	25
	Talusia LS 40	40

MDT사의 연료유 내 황 함유량에 따른 실린더 윤활유의 BN 권고치는 Table 4.2와 같이 0%~0.5% 황 함유량 연료유 사용 시 15-24 BN, 최대 1% 이하 황 함유량 연료유 사용 시 25-34 BN, 최대 1.5% 이하 황 함유량 연료유 사용 시 35-40 BN을 권고하고 있다. 또한 황함유량에 따른 알카리

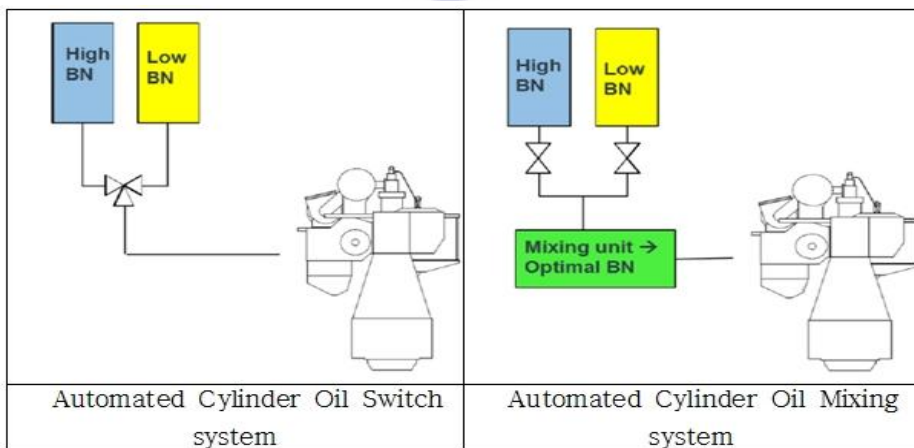
가 선정은 급유율 증감에 따라서 조정 적용될 수 있다.<sup>[23]</sup>

**Table 4.2** Fuel sulfur application for low-BN oils

Cylinder lube oil BN	Min. % S fuel	Max. % S fuel
15-24	0	0.5
25-34	0	1.0
35-40	0	1.5

#### 4.1.2 ACOS, BOB와 ACOM<sup>[24]</sup>

MDT사에서 초저유황 연료유 사용에 따른 알맞은 실린더 윤활유 공급을 위해 ACOS(Automated Cylinder Oil Switch system)와 ACOM(Automated Cylinder Oil Mixing system)을 개발하고 있다. ACOS와 ACOM은 공통적으로 초저유황 연료유에 대응할 실린더 윤활유를 높은 BN 윤활유와 낮은 BN 윤활유로 분리하여 탱크에 저장하고 있는 것이다. 여기서 ACOS는 Fig. 4.2와 같이 연료유의 황 함유량에 따라 적절한 실린더 윤활유를 3-way 밸브를 통하여 한 종류만 실린더 내에 공급하는 것이고, ACOM은 혼합장치(mixing unit)를 통해 최적의 BN 윤활유를 실린더 내에 공급하는 것이다.



**Fig. 4.2** ACOS and ACOM of cylinder lube oil auto supply system

Fig. 4.3은 WinGD사의 새로운 실린더유 공급방식인 BOB(Blending On Board) 방식을 보여준다. 실린더유 또는 시스템유를 BOB기유로 해서 기관실에서 BOB첨가제를 직접 혼합하여 엔진에 공급함으로써 어떠한 황 함유량에서도 적절한 알칼리가를 유지시켜 준다.

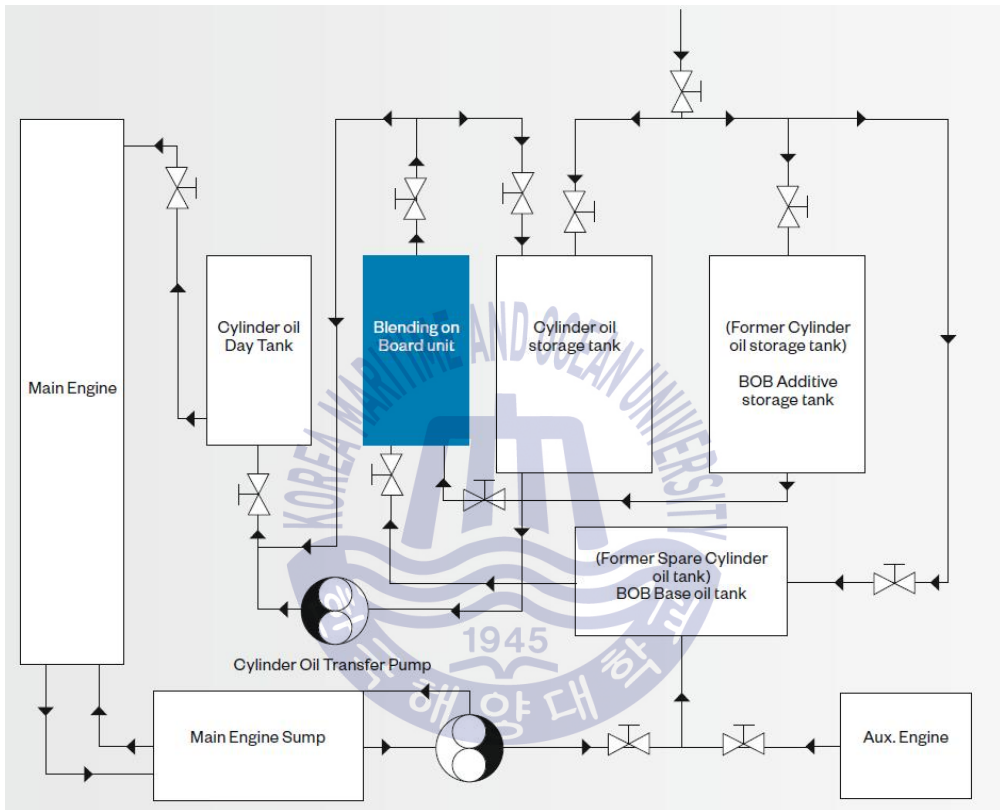


Fig. 4.3 The layout and flow diagram of the blending on board system<sup>[25]</sup>

#### 4.1.2.1 ACOS(Automated Cylinder Oil Switch system)

ACOS는 MDT사의 ME-GI엔진에 SDF(Specified Dual Fuel) 작동 모드 시 사용되고 있다. 실제 연소에 사용될 연료유의 황 함유량에 준거하여 높은 BN 윤활유와 낮은 BN 윤활유를 전환하여 공급한다. 여기서 연료유의 황

함유량을  $S_e$ (Sulphur equivalent)라 하고, 주기판 제어 시스템(Engine control system)에 의하여 계산된다. 계산근거는 첫째, 액체 연료유의 황 함유량, 둘째, 기체 연료유의 황 함유량, 셋째, 두 연료유의 사용률이다. 두 연료유의 사용률은 엔진의 작동 모드, 이용 가능한 가스 연료유의 양, 엔진 로드 에 따라 달라진다.

사용하는 연료유의 황 함유량은 높은 BN 윤활유와 낮은 BN 윤활유의 급유율 인자(feed rate factor)와 함께 반드시 MOP(Main Operating Panel)에 입력되어야 한다. 그래야만 자동적으로 알맞은 BN 윤활유가 선정되어 전환되고, 각각의  $S_e$ 에 따라 적합한 급유율이 자동적으로 조절되어 실린더 윤활유를 공급한다.

만약 ACOS가 고장 나면 3-way 밸브가 기계적으로 “failsafe” 포지션으로 전환되어 높은 BN 윤활유 쪽으로 라인업 된다.

#### 4.1.2.2 ACOM(Automated Cylinder Oil Mixing system)

ACOM은 0.1%~3.5% 황 함유량까지 다양한 범위 내에 있는 황 함유량 연료유를 사용하는 선박은 낮은 급유율로 효과적인 실린더 윤활을 위하여 여러 종류의 실린더 윤활유를 필요로 한다. 최근에 개발된 ACOM은 연료유의 황 함유량에 맞는 적합한 BN의 실린더 윤활유를 믹싱하여 제공한다. 오늘날 지역마다 다른 환경 규제 방안에 대응할 수 있는 시스템이라 할 수 있다.

ACOM은 황 함유량이 높은 연료 사용 시 높은 BN 윤활유를 낮은 급유율로 공급하고, 연료유의 황 함유량이 낮아지면 실린더 내부 부식을 막아 줄 수 있는 최적의 BN 윤활유를 공급할 수 있는 장점이 있다. 다시 말해서 낮은 BN 윤활유를 높은 급유율로 사용하는 것보다 높은 BN 윤활유로 낮은 급유율로 사용하는 것은 실린더 윤활유의 사용을 감소시키므로 경제적으로 효과가 있다고 할 수 있다.

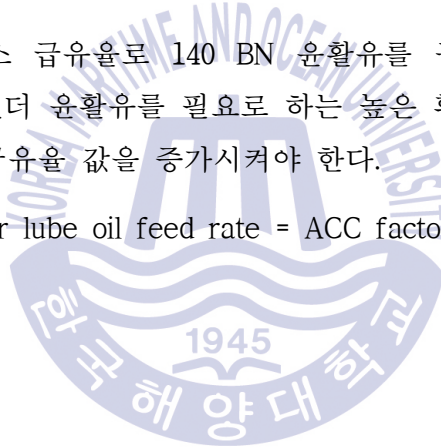
BN이 다른 윤활유를 섞는 것은 정해진 2개의 BN 윤활유를 사용하는 것

이 아니라 상황마다 다양한 범위의 BN 윤활유를 만들어낼 수 있다는 것을 말한다. 또한 적합한 BN 윤활유를 만들기 위해 두 윤활유를 섞는 과정에서 윤활유 고유의 세정력과 응력분산성이 유지되고, 점도 역시 SAE 50 수준이 유지된다.

다른 BN의 윤활유를 섞는 전략은 **Fig. 4.4**의 예시로서 이해할 수 있다. ACC-factor(Adaptive Cylinder oil Control-factor)를 알고 있는 연료유 내 황 함유량에 따라 적합한 실린더 윤활유가 필요한데, 이때 25 BN 윤활유와 100 BN 윤활유를 섞는다. 그래프의 경사는 ACC-factor에 따라 변화된다. 황 함유량에 적합한 실린더 윤활유를 섞는 동안 급유율은 최저값으로 유지된다.

그래프에서는 최소 급유율로 140 BN 윤활유를 공급하였지만, 실제로 100 BN 이상의 실린더 윤활유를 필요로 하는 높은 황 함유량의 연료유는 다음 식에 의하여 급유율 값을 증가시켜야 한다.

$$\text{Cylinder lube oil feed rate} = \text{ACC factor} \times \%S_{\text{fuel}} \quad (4.1)$$



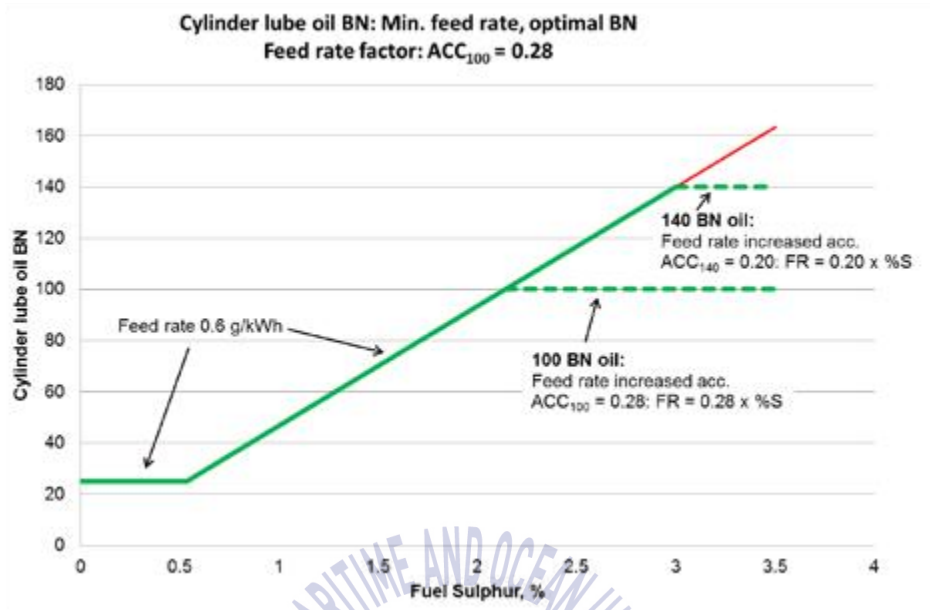


Fig. 4.4 Example of mixing strategy for ACOM system. Here a 25 BN and a 100 BN or 140 BN is mixed

## 4.2 PC-링과 CERMET 코팅 피스톤 링<sup>[26]</sup>

### 4.2.1 PC-링(ring)

PC-링은 피스톤 청소링(piston cleaning ring)으로서 Fig. 4.5와 같이 실린더 라이너와 실린더 커버 사이에 위치한다. 직경은 실린더 라이너 직경보다 조금 작아 연소과정 동안 피스톤 틈랜드에 지속적으로 생성되는 연소퇴적물을 긁어주어 퇴적물 축적을 막아준다. 따라서 피스톤 틈랜드에 축적되는 연소퇴적물이 야기하는 문제점들을 방지해주는 역할을 한다.

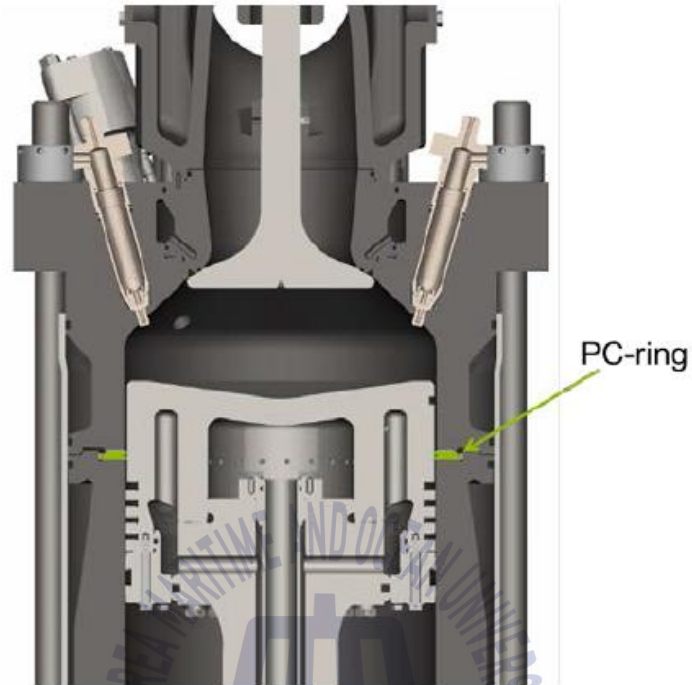


Fig. 4.5 Piston Cleaning ring(PC-ring). Positioned between cylinder cover and liner

#### 4.2.2 CERMET 코팅(coating) 피스톤 링

CERMET 코팅은 초내열성 재료로서 세라믹과 금속의 합성물이다. 내마모성과 내열성이 높은 세라믹과 인성(靱性)이 강한 금속의 분말을 배합 소결(燒結)하여 만든다. CERMET 코팅은 Fig. 4.6과 같이 Mo(몰리브데넘)과 Ni-Cr합금 조직망 내에서  $Cr_2C_3$ 의 플라즈마 분무층을 형성하는데, 제한된 윤활 환경에서  $Cr_2C_3$ 는 내열성과 내마모성을 발휘하여 실린더 라이너의 응착과 스키핑같은 부식, 마모 현상을 일으킬 수 있는 개연성을 낮춰준다.

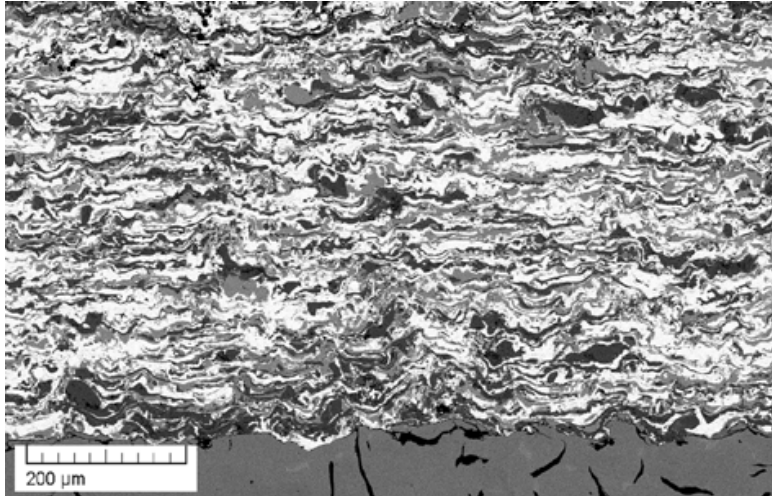


Fig. 4.6 Cross-section of plasma-sprayed Cermet coating. SEM micrograph

실제로 MDT사의 6S60MC 엔진에서 지속적으로 초저유황 연료유를 사용하여 운전하고 이를 개선하기 위하여 선주 및 정유회사와 함께 실험에 착수했다. 한 실린더는 CERMET 코팅된 피스톤 링 세트를 장착하였고, 다른 실린더는 표준 Alu-coating 피스톤 링 세트를 장착하였다. 두 실린더 라이너 모두 실린더광택(bore-polishing)이 나는 표면 상태였다. 실험 도중 사고로 연소실 내부에 수분이 침입되었고, 이는 실린더 운할 상태를 더욱 악화시켰다. 여기서 흥미로운 것은 Fig. 4.7과 같이 Alu-코팅 피스톤링은 이를 바로 교체하지 않으면 운전이 불가능 정도로 전체 스커핑 현상이 발생하였고, CERMET 코팅 피스톤 링은 그저 열 균열(Heat cracks) 현상만 발생하여 더 이상 악화되지 않은 상태로 6개월 동안 엔진에서 사용되었다.



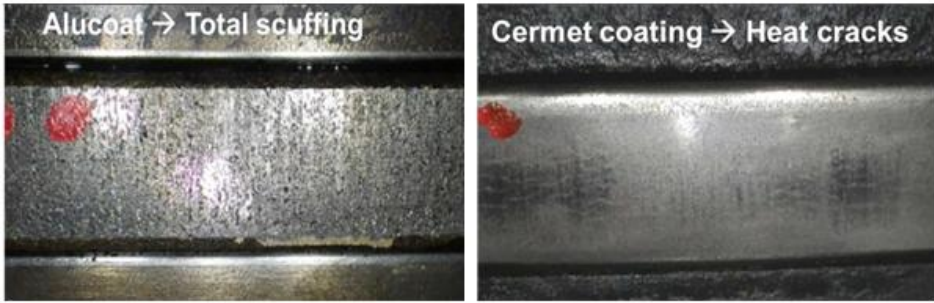


Fig. 4.7 Alu-coating vs. CERMET coating

### 4.3 지속적인 선박 모니터링

초저유황 연료유 사용에 따른 윤활의 안전성을 확보하기 위해선 지속적인 선박 모니터링이 필요하며 그 방법으로는 드레인 오일(drain oil) 분석, 소기공 검사, 마모 상태 측정, 실린더 라이너 표면 검사를 들 수 있다.

#### 4.3.1 드레인 오일 분석

엔진의 정상 운전 시 실린더 안으로 새로운 실린더 윤활유가 계속적으로 주입되며 남은 것은 실린더 라이너 아래쪽으로 드레인된다. 드레인된 실린더 윤활유를 채취하여 분석하는데 이것을 통하여 실린더 상태가 정상 범주 안에 있는지 아니면 적절한 조치가 필요한지를 확인할 수 있다. 적절한 조치라는 것은 실린더 윤활유 급유율 조절, 실린더 윤활유 BN의 조절, 연료유의 촉매입자(cat-fines) 제거를 말한다.

드레인 오일 분석은 주로 실린더 윤활유의 BN 값과 철 함량에 의한 실린더 상태를 나타낸다. Fig. 4.8은 MDT사의 실린더 윤활유 드레인 오일에서 BN과 철 함량에 의한 경보(alarm)값을 나타낸 것이다.

선박에서 드레인 오일 분석과 병행하여 육상의 실험실에서도 정기적으로 분석을 병행하여 보다 정확한 실린더 라이너 상태를 점검한다.

#### 4.3.1.1 부식 상태의 평가

드레인 오일의 BN은 산성의 중화 능력을 나타낸다. 낮은 BN은 연료가 연소될 때 중화역할을 충분히 하지 못하는 것을 나타내고, 높은 BN은 실린더 윤활유의 급유율이 너무 높거나 BN이 너무 높다는 것을 나타내 이는 곧 연소 퇴적물 발생 및 실린더광택이 증가될 것을 나타낸다.

초저유황 연료유로 운전 시 정상적인 드레인 오일의 BN수치는 초기 투입된 실린더 윤활유보다 5-10 BN 적게 나오는 것이 바람직하다.

#### 4.3.1.2 마모 상태의 평가

드레인 오일에서 검출되는 철 성분은 피스톤링과 실린더 라이너의 마모 상태를 반영한다. 다량의 철 성분 검출 시 지나친 마모가 일어나고 있음을 나타내고, 반대로 소량의 철 성분 검출 시 마모량이 작다는 것이다.

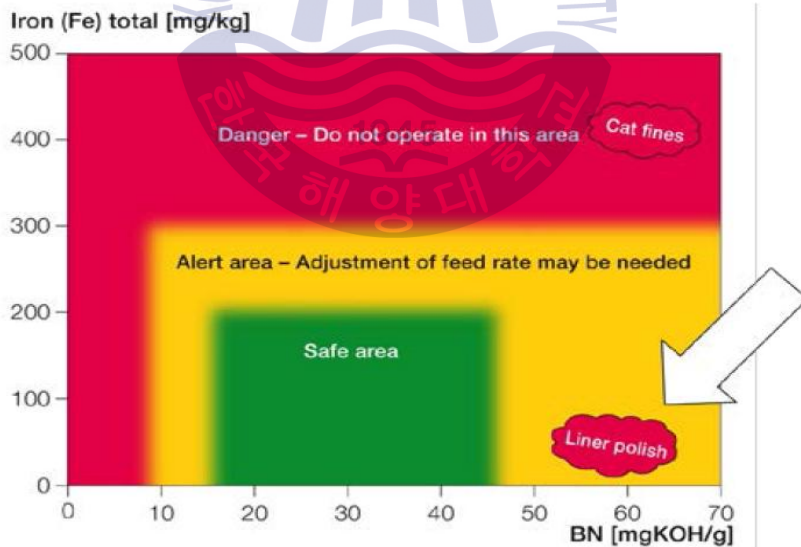


Fig. 4.8 Alarm limits for BN vs. Iron in cylinder drain oil.

다른 분석 방법은 Table 4.3과 같이 마모의 종류에 따라 달리 측정하는 방식이다. 철 요소를 측정할 때 전체를 측정하는 방법과 자성을 지닌 철

을 측정하는 방법, 그리고 저온부식에 의해 만들어진 산화철을 측정하는 방법으로 나뉜다. 초저유황 연료유 사용 시 드레인 오일에서 검출되는 전체 철 함량은 50-100 mg/kg이 정상 범주에 속한다.<sup>[27]</sup>

**Table 4.3** Correlation among wear type, wear mechanism and different iron measuring methods.<sup>[28]</sup>

Wear types	Wear mechanism	Measuring method		
		Total iron	Magnetic iron	Corrosive iron products
Normal wear Cat fines Micro-seizures Scuffing	Abrasive or adhesive wear	+	+	-
Cold corrosion	Corrosive wear		-	+

### 4.3.2 소기공 검사

엔진이 정지되고 소기공의 열기가 충분히 식혀지면 엔지니어가 직접 소기공에 진입하여 실린더 라이너와 피스톤, 피스톤링을 눈으로 확인한다. 정기적인 검사를 통하여 피스톤링의 코팅상태 측정, Fig. 4.8과 같이 CL홈 (Controlled Leakage grooves)을 측정하여 실린더 상태를 확인한다.

초저유황 연료유의 사용 시 특별한 주의를 기울여야 하는데 Fig. 4.9와 Fig. 4.10과 같이 불충분한 윤활과 보어광택의 첫 번째 암시인 피스톤 링 미세소착(micro-seizure)<sup>3)</sup>뿐 아니라 엔진의 클린 상태를 잘 확인하여야 한다.

3) 실린더 라이너의 유막부족으로 건조한 부분이 생기고, 이들 부분과 피스톤 링의 표면이 마찰작용으로 인해 긁히고 굳어져서, 거울같이 빛나던 링의 표면이 손상된다(소착). 수직방향으로 나타나는 소착 표면이 상대적으로 더 단단하고, 실린더의 마모를 증가시킨다. 소착상태를 오랫동안 방치하면 부분적인 마모현상이 넓게 확산된다. 또한 링이 홈안에서 움직이기 때문에 라이너 표면의 전체 주위에 국부적인 소착현상이 발생한다.



Fig. 4.8 CL groove measuring of piston ring



Fig. 4.9 Clean, smooth condition of piston ring

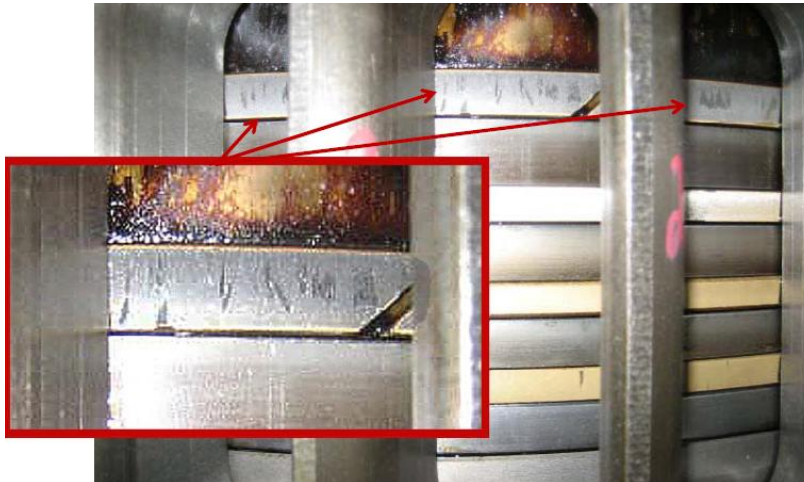


Fig. 4.10 Micro seizure of piston ring.

#### 4.3.3 마모 상태 측정

충분한 윤활이 되고 있는지를 확인하기 위하여 선박에서는 정기적으로 Fig. 4.11과 같이 실린더 라이너와 피스톤 링, 피스톤 링 그루브 마모 상태를 측정해야 한다.



Fig. 4.11 Measuring piston ring grooves

#### 4.3.4 실린더 라이너 표면 검사

선박용 추진기관 실린더 라이너 개방점검 시 마멸흔적(wear-marks)을 확인하여 마모상태를 확인한다. 특히 초저유황 연료유 사용 시 보어광택 발생 여부를 확인하는 것이 매우 중요하다. 만약 실린더광택이 발생하였다면, 호닝을 가볍게 하여(light honing) 흑연 박막층이 열릴(open) 수 있도록 조치를 취하여 실린더 윤활유가 실린더 라이너에 유막을 잘 형성시킬 수 있도록 한다.

#### 4.4 국적 A선사의 황산화물 배출 통제 지역 운항 실태 분석

CARB SO<sub>x</sub> 배출물 통제 지역(emission control area)인 24해리 이내에서 황 함유량 0.1% 미만의 선박용 경유인 MGO(Marine Gas Oil) 사용으로 연료유를 규제하고 있으며, HFO 유종은 사용이 불가하다. 하지만 연돌에서 배출되는 배기가스를 모니터링, 분석할 수 있는 시스템을 갖춘 선박에서는 사전에 Research Exemption을 신청하여 승인이 되면 HFO 유종으로 사용이 가능하다. 하지만 국적 A선사에서는 기본적으로 CARB SO<sub>x</sub> 배출물 통제 지역 항해 시 0.1% 미만의 선박용 경유인 MGO를 사용하고 있다.

EU SO<sub>x</sub> 배출 통제 지역 항해 시에는 황 함유량이 0.1% 미만의 초저유황 연료유인 ULSFO(Ultra Low Sulfur Fuel Oil)를 추진기관 연료유로 사용 중에 있으며, 이와 관련하여 윤활유의 적절한 TBN과 급유율 변경을 추진 기관에 적용하고 있는 상황이다. 우선 **Table 4.4**는 표본 선박의 추진기관 사양이며 **Table 4.5**는 표본 선박을 대상으로 EU SO<sub>x</sub> emission control area 항해 시 운항 자료를 나타낸 것이다. 그리고 SECA 지역 항해 시 사용된 초저유황 연료유(ULSFO) 및 실린더유(cylinder oil)의 데이터(data)는 **Table 4.6, 4.7**과 같다.

**Table 4.4** Main engine specification

	Vessel A
MODEL	HYUNDAI MAN B&W 10S90ME-C9.2
TYPE	2-STROKE, SINGLE ACTING, DIRECT REVERSIBLE, CROSSHEAD, ELECTRONICALLY CONTROLLED
CYL. BORE / STROKE	900 mm / 3,260 mm
OUTPUT(kW)	MCR : 48,510 / NCR : 43,660
REVOLUTION(rpm)	MCR : 84 / NCR : 81.1
ROTATION	CLOCKWISE LOOKING FROM AFT
SFOC AT MCR	163.5 g/kW · h + 5% AT MCR

**Table 4.5** Distance and M/E ULSFO consumption

Port	Distance (n.mile)	Sailing Time (Day)	RPM	Speed (knots)	ULSFO consumption (M/T)
SECA → LEH	208	0.63	53.6	13.9	46
LEH → RTM	234	0.58	64.5	16.7	60
RTM → HAM	209	0.6	55.7	14.4	47
HAM → SOU	426	1.42	48.4	12.5	75
SOU → SECA	175	0.54	52.1	13.5	37
TOTAL	1252	3.77			265

**Table 4.6** ULSFO product data

ULSFO	
Sulphur % mass	0.097
Flash Point °C	>70.0
Pour Point °C(max)	18
Density kg/m <sup>3</sup> 15°C	878.5
Viscosity cSt@ 50°C	7.395
Water % v/v(max)	0.02

**Table 4.7** Cyl. oil product data

Cyl. oil (Typical Values)	
BN Level	17
Flash Point °C	270
Pour Point °C	-18
Density @20°C, kg/L	899
Viscosity cSt@ 100°C	19.0
Viscosity Index	107

초저유황 연료유인 ULSFO를 사용함에 따라서 추진기관의 실린더 오일 유종 변경에 따른 급유율의 적절한 조정이 필요하며, 표준 선박의 실린더 오일 급유율 조정 현황을 **Table 4.8**로 나타내었다.



**Table 4.8** M/E Cylinder oil feed rate value

CYL. NO	Before Change (g/kW · h) (BN70)	Sulfur contents of Using HFO	After Change (g/kW · h) (BN17)	Sulfur contents of Using ULSFO	Remark
#1	0.68	2.42%	0.65	0.097%	*NO.2 CYL. is Running-In.  *ACC Factor = 0.28
#2	0.68		0.75		
#3	0.68		0.65		
#4	0.68		0.65		
#5	0.75		0.65		
#6	0.68		0.65		
#7	0.68		0.65		
#8	0.68		0.65		
#9	0.75		0.65		
#10	0.68		0.65		

Table 4.8에서 나타내는 데이터 값과 같이 실린더 오일 급유율은 황 함유량에 따라서 조정이 이뤄지고 있으며 초저유황 연료유인 ULSFO를 사용 시 적용되는 0.65 g/kW · h는 급유율 조정 시 적용되는 최소값이다.

또한 Table 4.5의 운항시간(sailing time)을 보면 추진기관에서 저유황 연료유인 ULSFO의 사용 시간은 대략 90시간으로 나타나고 있으며 서론에서 언급한 바와 같이 실린더 윤활의 심각한 문제점이 발생 될 수 있는 기준 시간인 250시간 이하로 운전된 항해 데이터 값을 볼 수 있다.

Fig. 4.12와 Fig. 4.13는 약 90시간의 초저유황 연료유를 사용한 후 추

진기관의 1번, 2번 실린더 연소실 내부를 점검한 사진이다.

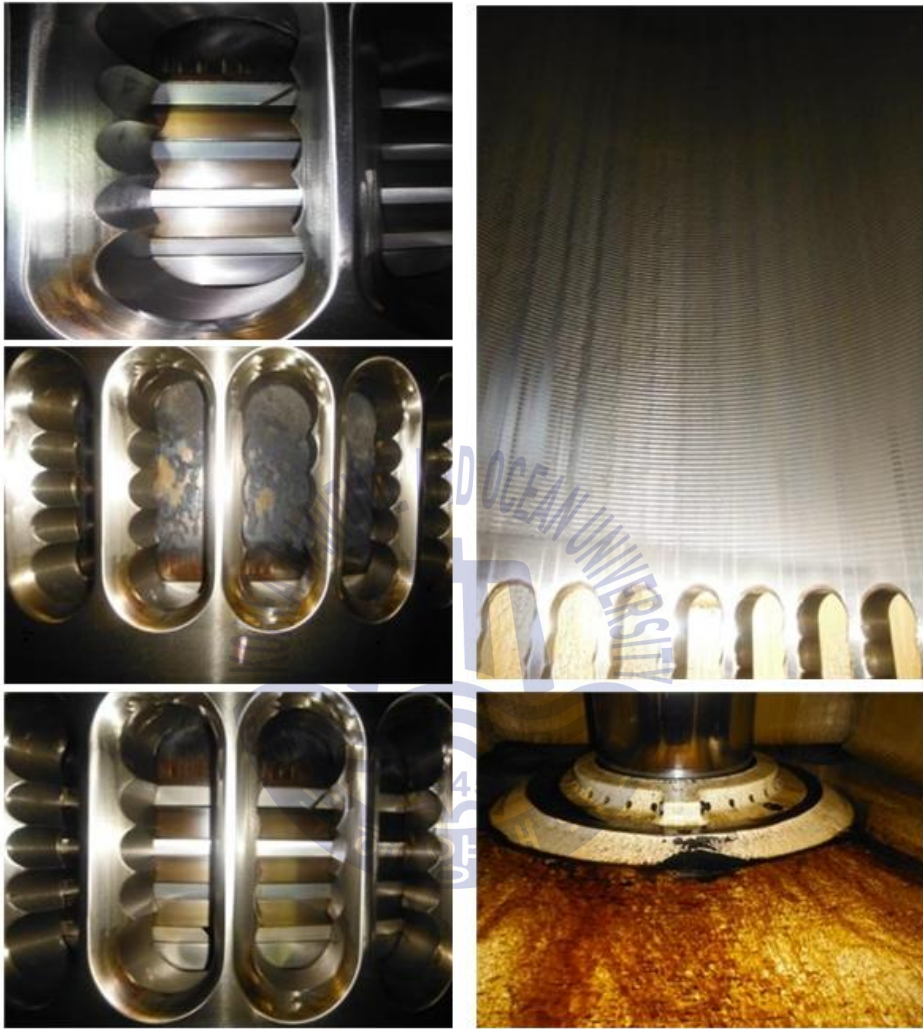


Fig. 4.12 Piston and liner of NO.1 cylinder after using ULSFO

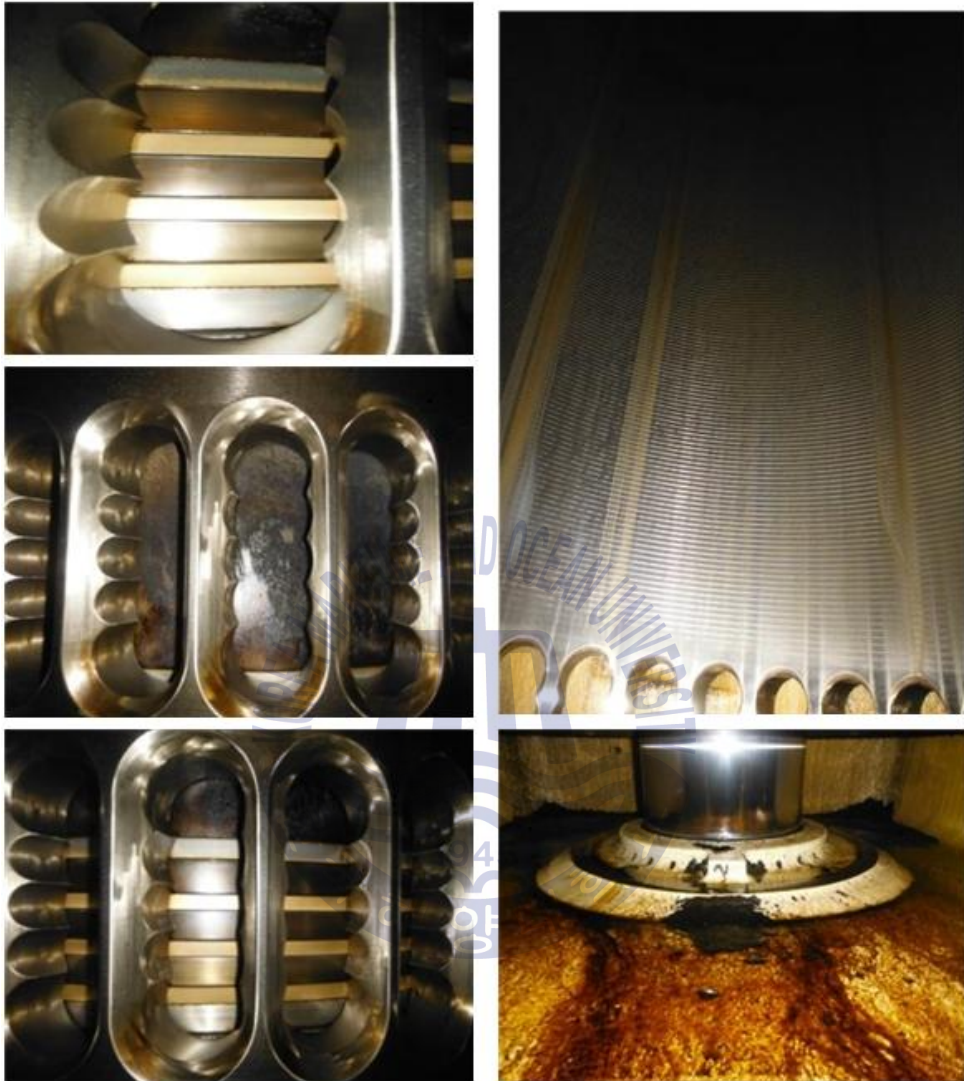


Fig. 4.13 Piston and liner of NO.2 cylinder after using ULSFO

상기 해당 표본선박은 초저유황 연료유 사용에 따른 윤활 관리 방안으로 제시된 사항 중 BN 선정(BN Level:17), 급유율 조정( $0.65 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ )을 적절하게 적용하였으며 PC 링과 CERMET 코팅 피스톤 링을 장착하여 사용하고 있다. 또한 지속적인 선박 모니터링과 소기공 검사를 시행하고 있었다.

비록 SOx 배출물 통제 지역에서의 항해 시간이 대략 90시간으로 실린더 윤활의 문제점이 발생되기 시작되는 기준 시점인 250시간을 초과하지는 않지만 위와 같은 조치 방안으로 인하여 Fig. 4.12, Fig. 4.13의 피스톤과 라이너(piston and liner) 점검 사진에서 보여지는 바와 같이 양호한 상태를 유지할 수 있었다고 판단된다.



## 제 5 장 결론

본 연구에서는 선박용 디젤엔진에서 초저유황 연료유 사용 시 대두되는 실린더 윤활 문제에 따른 방안을 제시하였다. 또한 표본 선박의 황산화물 배출 통제 지역 운항자료를 분석하였으며, 이를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 초저유황 연료유 사용 시 연소퇴적물에 의해 나타나는 실린더 윤활 문제에 관한 방안을 다음과 같이 제시하였다.

1. 실린더 윤활유 적정 알칼리가로 황함유량 0.1%미만의 초저유황 연료유를 사용 시 15~24 BN을 선정하여 적용한다.
2. 실린더 윤활유 급유율은 초저유황 연료유를 사용할 경우 계산식에 의해 최소값을 나타낸다. 그래서 최소값으로는 엔진사의 권고값을 반영하는데, 표본선박에서는 적정 급유율로 0.65 g/kW·h를 적용하였다.
3. 실린더 윤활유의 정확한 알칼리가와 공급량 반영을 위한 실린더 윤활유 자동 공급시스템 적용을 권고한다.
4. 피스톤 청소 링(Piston cleaning ring)을 장착하여 사용함으로써 연소퇴적물 축적을 방지하며, Cermet 코팅(coating) 피스톤 링 사용으로 내열, 내마모성을 높인다.
5. 실린더 윤활유 드레인 분석 적용한다. 드레인 윤활유에 포함된 철 성분은 50~100 mg/kg, 알칼리가는 5~10 BN이 적합하다.

둘째, 윤활 문제에 따른 방안으로 제시된 사항을 적용한 표본 선박의 황산화물 배출 통제 지역 운항 자료를 분석한 결과 연소퇴적물( $\text{CaCO}_3$  성분) 형성이 거의 없었으며, 디젤기관의 라이너와 피스톤 링의 적절한 윤

활 상태를 확인할 수 있었다.

셋째, 표본 선박의 황산화물 배출 통제 지역 운항 자료를 보면 운항시간이 대략 90시간으로 초저유황유 사용 시 실린더 운항의 문제점이 발생된다고 보고된 250시간에 미치지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 현재 0.1% 미만의 초저유황유를 사용하는 황산화물 배출 규제 지역이 한정되어 운항시간이 250시간에 도달할 수 있는 항해 거리가 확보되지 못하는 것으로 사료된다.

황산화물 배출 규제에 따라 선주들은 지속적으로 대응 방안을 마련 중에 있으며, 그중 하나로 초저유황유 사용을 제시하여 실린더 운항의 문제점에 대한 방안을 다루었다. 하지만 현재의 황산화물 배출 규제 지역 내에서는 충분한 운항 시간을 확보할 수 없었다. 또한 현 규제 지역 내에서 황함유량 0.1% 미만의 초저유황유 사용을 강제화하고 있어 2020년 이후 전 해역에서 사용될 황함유량 0.5% 미만 연료유 적용 분석은 반영할 수 없었다. 따라서 향후 정확한 분석을 위해서 황함유량 0.5% 연료유 사용과 충분한 항해시간이 확보된 표본선박을 적용하여 실질적인 결과에 대한 보완이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 조권희, 2015. 선박 유류 이론과 실무 II. 연료유, 윤활유편. 다솜출판사, pp.660~661.
- [2] Jacobsen, Dorthé M.S.등, 2016. Cylinder Lube Oil Experiences and New Development for the MAN B&W Two-stroke Engines. CIMAC, p.6.
- [3] 홍지형 등, 2013 국가 대기오염물질 배출량. 국립환경과학원, pp.22~24.
- [4] 조권희 등, 2012. 선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측. 다솜출판사, p.121, p.143.
- [5] 이성우, 2017. 저압형 SCR 시스템의 NO<sub>x</sub> 저감성능에 관한 실험 연구. 석사학위논문, 부산:한국해양대학교, p.4.
- [6] 박고용 등, 2017. 대형컨테이너선의 저속 운항 시 선수부 개조 전후 EEOI 변화에 대한 연구. 마린엔지니어링 학회지, pp.15~20.
- [7] 이원주, 2014. 선박용 디젤엔진에서 이단지연분사에 따른 배기배출물 저감에 관한 실험 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교, p.42.
- [8] 이원주, 2014. 선박용 디젤엔진에서 이단지연분사에 따른 배기배출물 저감에 관한 실험 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교, p.12.
- [9] 조권희 등, 2004. 선박용 발전기관의 배기배출물에 관한 실험적 연구. 해사산업연구소논문집 제15권, pp.24~25.
- [10] 이성우, 2017. 저압형 SCR 시스템의 NO<sub>x</sub> 저감성능에 관한 실험 연구. 석사학위논문, 부산:한국해양대학교, p.16.
- [11] 이원주, 2014. 선박용 디젤엔진에서 이단지연분사에 따른 배기배출물 저감에 관한 실험 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교, p.22.
- [12] 조권희, 2012. 선박 유류 이론과 실무 I. 연료유편. 다솜출판사, p.373.

- [13] 조권희, 2015. 선박 유류 이론과 실무 II. 연료유, 윤활유편. 다솜출판사, pp.246~251.
- [14] 한진해운 해사그룹 해사기술팀 연료관리파트, 2015. ULSFO 기술정보.
- [15] 조권희, 2015. 선박 유류 이론과 실무 II. 연료유, 윤활유편. 다솜출판사, p.80.
- [16] 한국선급, Technical information, 2017.01, 강화된 Global SOx 규제 대응을 위한 선주지침서.
- [17] 조권희, 2012. 선박 유류 이론과 실무 I. 연료유편. 다솜출판사, p.179.
- [18] MAN Diesel & Turbo, 2015. Lubricating oil for MAN B&W low speed two-stroke engine, p.2.
- [19] Jacobsen, Dorthe M.S.등, 2016. Cylinder Lube Oil Experiences and New Development for the MAN B&W Two-stroke Engines. CIMAC, p.5.
- [20] Jacobsen, Dorthe M.S.등, 2016. Cylinder Lube Oil Experiences and New Development for the MAN B&W Two-stroke Engines. CIMAC, p.6.
- [21] MAN Diesel & Turbo, 2017. 「Technical update course」, BN selection & feed rate adjustment for cylinder lube oil, pp.3~4.
- [22] Jacobsen, Dorthe M.S.등, 2016. Cylinder Lube Oil Experiences and New Development for the MAN B&W Two-stroke Engines. CIMAC, p.7.
- [23] MAN Diesel & Turbo, 2014. Guideline for operation on fuels with less than 0.1% sulphur, p.3.
- [24] Julia Svensson, MAN Diesel & Turbo, 2016. Automated cylinder oil mixing cylinder oil development, pp.10~11.
- [25] Wartsila technical journal, 2012.01, Blending on board-innovative engine lubrication management, p.52.



- [26] Jacobsen, Dorthe M.S.등, 2016. Cylinder Lube Oil Experiences and New Development for the MAN B&W Two-stroke Engines. CIMAC, pp.11~12.
- [27] MAN Diesel & Turbo, 2014. Adjusting the ACC factor in service replaces SL2013-517, p.3.
- [28] Jacobsen, Dorthe M.S.등, 2016. Cylinder Lube Oil Experiences and New Development for the MAN B&W Two-stroke Engines. CIMAC, p.13.



## 감사의 글

먼저 부족한 저를 넓고 따뜻한 마음으로 이끌어 주시고, 본 논문을 완성할 수 있도록 소중한 가르침과 격려를 아끼지 않으신 조권희 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그리고 바쁘신 와중에도 세심하게 논문을 심사해 주시고 아낌없는 조언을 해주신 최재성 교수님, 박고용 박사님께도 감사의 말씀을 드립니다.

아울러 논문을 시작하고 완성할 수 있도록 많은 조언과 격려를 해주신 한국해양수산연수원 실습선 변국남 선장님, 박용선 선장님, 허재정 기관장님, 김홍중 기관장님, 김종필 교수님, 김선태 교수님, 류원 교수님, 남홍식 교수님, 신동욱 교수님, 김태훈 교수님, 한국해양대학교 이원주 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 항상 든든한 지원을 아끼지 않는 동기 신재현님께도 감사드립니다. 또한 부족한 저를 묵묵히 도와주시고 든든한 버팀목이 되어주시는 이성우 교관님, 김홍범 교관님, 김준수 교관님, 권승철 교관님께도 감사의 말씀을 전합니다.

아들을 위해 항상 아낌없는 사랑을 베풀어주시는 어머니, 부족한 저를 믿어주시고 묵묵히 응원해주시는 장인.장모님께 깊은 감사를 드립니다. 그 은혜에 보답할 수 있도록 부디 오래오래 건강하시길 기원합니다. 또한 하늘에 계시는 아버지 감사드립니다. 무엇보다 제 곁에서 항상 믿어주고 응원해주는 사랑하는 아내 선영, 이쁜 장녀 나미, 귀여운 둘째 나은이와 함께 기쁨을 나누고 싶습니다.

마지막으로 일일이 언급을 하지 못했지만 그동안 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한 번 진심으로 감사드립니다. 모두 건강하시고 가정과 직장에 행복만이 가득하시길 기원합니다.

2017년 12월 김무겸 드림