



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

선박운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리
장치 설치 용량에 관한 연구

A Study on the Capacity of After Treatment System of Exhaust
Gas with Analysis of Containerships Sailing Profile



지도교수 이 강 기

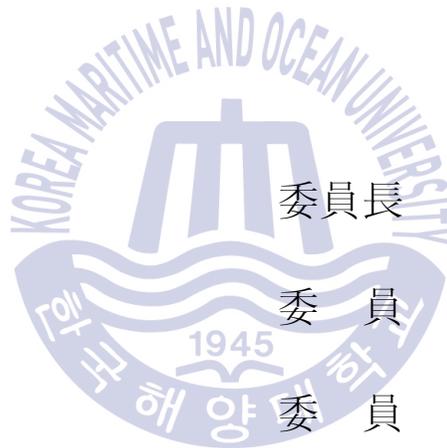
2017 年 2 月

한국해양대학교 대학원

해양플랜트운영학과

여 실 중

本 論文을 여실중의 工學碩士 學位論文으로 認准함.



委員長

조 권 회 (印)

委 員

이 강 기 (印)

委 員

예 병 덕 (印)

2016年 12月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

Nomenclature	iii
List of Tables	v
List of Figures	vii
Abstract	ix
제1장 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구 방법	4
1.2.1 선행 연구의 고찰	4
1.2.2 본 연구의 차별성	5
제2장 환경규제 및 대응 기술 현황	7
2.1 선박으로부터 배출되는 오염물질과 대기오염규제	7
2.1.1 선박으로부터 배출되는 오염물질	7
2.1.2 배출가스 규제현황	11
2.2 대기오염 규제 대응 기술 현황	14
2.2.1 배출가스 감소를 위한 대체 연료	14
2.2.2 배출가스 감소를 위한 대응 기술	17
제3장 배출규제해역 운항 자료 등의 분석	25
3.1 개요	25
3.2 대상선박의 제원	27
3.3 배출규제해역 운항에 따른 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석	29
3.3.1 선박 A호의 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석	30
3.3.2 선박 B호의 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석	33

제4장 배출규제해역 운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 용량 고찰 ...36	
4.1 개요36	
4.2 배출규제해역 운항패턴 분석37	
4.2.1 선박 A호의 운항패턴 분석37	
4.2.2 선박 B호의 운항패턴 분석42	
4.3 운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 용량 산출 및 비교46	
4.3.1 C 타입 기관의 배기가스 후처리 장치 용량 산출48	
4.3.2 D 타입 기관의 배기가스 후처리 장치 용량 산출52	
4.3.3 E 타입 기관의 배기가스 후처리 장치 용량 산출55	
4.4 요약58	
제5장 결론59	
참고문헌60	



Nomenclature

Acronyms and Abbreviations

CEAS	Computerized Engine Application System
CNG	Compressed Natural Gas
DWT	Dead Weight Tonnage
ECA	Emission Control Area
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EGB	Exhaust Gas Bypass
EGR	Exhaust Gas Recirculation
HC	Hydrocarbon
HFO	Heavy Fuel Oil
IMO	International Maritime Organization
ISO	International Standard Organization
LNG	Liquefied Natural Gas
LP	Low Pressure
LPG	Liquefied Petroleum Gas
LSDO	Low Sulphur Distillate Oil
LSFO	Low Sulphur Fuel Oil
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MCR	Maximum Continuous Rating
MDO	Marine Diesel Oil
MDT	MAN Diesel & Turbo
MEPC	Maritime Environment Protection Committee
MGO	Marine Gas Oil
NECA	NOx Emission Control Area
NOx	Nitrogen Oxides
PM	Particulate Matter
SAM	Scavenging Air Moistening

SECA	SOx Emission Control Area
SCR	Selective Catalytic Reduction
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFOC	Specified Fuel Oil Consumption
SMCR	Specified Maximum Continuous Rating
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction
SOx	Sulphur Oxides
TEU	Twenty-foot Equivalent Units



List of Tables

<Table 1> Shipping CO ₂ emissions compared with global CO ₂	1
<Table 2-1> NO _x control requirement of Annex VI	13
<Table 3-1> Ship's particular	27
<Table 3-2> Specification of standard vessel, Clarkson	30
<Table 3-3> Sailing table of A vessel	31
<Table 3-4> Average speed and fuel oil consumptions	33
<Table 3-5> Sailing table of B vessel	34
<Table 3-6> Average speed and fuel oil consumptions	35
<Table 4-1> Main engine specification	36
<Table 4-2> NECA Sailing table of A vessel	37
<Table 4-3> Sailing profile of A vessel	41
<Table 4-4> NECA Sailing table of B vessel	42
<Table 4-5> Sailing profile of B vessel	45
<Table 4-6> Calculation of SCR data	47
<Table 4-7> Assumptions of SCR installation for C type engine	48
<Table 4-8> Fuel consumptions and additional SCR operating values	49
<Table 4-9> Accumulated SCR operating values	49
<Table 4-10> Tank capacity of reducing agent	49
<Table 4-11> SCR installation for C type engine in consideration of actual sailing profile	50
<Table 4-12> Fuel consumptions and additional SCR operating values	51
<Table 4-13> Accumulated SCR operating values	51
<Table 4-14> Tank capacity of reducing agent	51
<Table 4-15> Assumptions of SCR installation for D type engine	52
<Table 4-16> Fuel consumptions and additional SCR operating values	53
<Table 4-17> Accumulated SCR operating values	53

<Table 4-18> Tank capacity of reducing agent	53
<Table 4-19> Fuel consumptions and additional SCR operating values	54
<Table 4-20> Accumulated SCR operating values	54
<Table 4-21> Tank capacity of reducing agent	54
<Table 4-22> Assumptions of SCR installation for E type engine	55
<Table 4-23> Fuel consumptions and additional SCR operating values	56
<Table 4-24> Accumulated SCR operating values	56
<Table 4-25> Tank capacity of reducing agent	56
<Table 4-26> Fuel consumptions and additional SCR operating values	57
<Table 4-27> Accumulated SCR operating values	57
<Table 4-28> Tank capacity of reducing agent	57
<Table 4-29> Tank capacity of reducing agent of each engine	58



List of Figures

⟨Fig. 2-1⟩ Annual cardiopulmonary mortality due to ship PM2.5 emission in Asia	10
⟨Fig. 2-2⟩ SO _x emission control plan	11
⟨Fig. 2-3⟩ NO _x emission control plan	12
⟨Fig. 2-4⟩ EGR illustration, MAN	18
⟨Fig. 2-5⟩ SCR system diagram, MAN	19
⟨Fig. 2-6⟩ Open loop, Wärtsilä	21
⟨Fig. 2-7⟩ Closed loop, Wärtsilä	21
⟨Fig. 2-8⟩ Dry scrubber illustration, MAN	22
⟨Fig. 2-9⟩ Humid air NO _x reduction by piston illustration, MAN	23
⟨Fig. 2-10⟩ Turbocharger cutout illustration, MAN	24
⟨Fig. 3-1⟩ CO ₂ emissions by ship type (international shipping only) calculated using the bottom-up method for all years (2007–2012)	25
⟨Fig. 3-2⟩ Summary graph of annual fuel consumption broken down by ship type and machinery component (main, auxiliary and boiler) 2012	26
⟨Fig. 3-3⟩ General view of the North American Emission Control Area ..	28
⟨Fig. 3-4⟩ Annual fuel saving per year	29
⟨Fig. 3-5⟩ Fuel oil consumptions of east bound for A vessel	32
⟨Fig. 3-6⟩ Fuel oil consumptions of west bound for A vessel	32
⟨Fig. 3-7⟩ Fuel oil consumptions of east bound for B vessel	35
⟨Fig. 3-8⟩ Fuel oil consumptions of west bound for A vessel	35
⟨Fig. 4-1⟩ M/E Power according to sailing time(VOY 50)	38
⟨Fig. 4-2⟩ M/E Power according to sailing time(VOY 51)	39
⟨Fig. 4-3⟩ M/E Power according to sailing time(VOY 52)	39

<Fig. 4-4> M/E Power according to sailing time(VOY 48)43
<Fig. 4-5> M/E Power according to sailing time(VOY 49)43
<Fig. 4-6> M/E Power according to sailing time(VOY 50)44



A Study on the Capacity of After Treatment System of Exhaust Gas with Analysis of Containerships Sailing Profile

Yeo, Sil Jung

Department of Offshore Plant Management
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

In accordance with Annex VI, IMO limited the sulphur content of the global fuel oil, and designated the Emission control area(Baltic Sea, North Sea, North American, US Caribbean Sea ECA) which restricted emissions of sulphur oxides and nitrogen oxides, restricted emissions from the halon emissions of the HCFCs.

This reinforced the use of fuel oil, which content not more than 3.5% sulphur content from 2012 to all ships, requiring the use of heavy fuel oil with 0.1% sulphur content that operates in the emission control area beginning in 2015.

Also, NO_x Tier III standard which is more stringent emission limit for engines enforced from 1 January 2016 in NECA as per the MEPC 66th session.

NO_x Tier III standards are 80% less than NO_x Tier I standard. Current NECA areas are the North American area and the US Caribbean Sea area.

But recently, during MEPC 70th session, the Committee agreed to designate the North Sea and the Baltic Sea as NECA with an effective date of 1 January 2021.

In response, shipping industry is trying to comply with various environmental regulations and is considering various ways to satisfy the requirement of NOx TIER III operation.

LNG as a fuel is gaining acceptance in maritime applications as an emission control measure for NOx. Also, there are ways to comply with regulation, such as using exhaust gas treatment system, SCR, EGR.

This study examines the pollutants emitted by the vessels, the air pollution regulations, and analyzes current techniques such as exhaust gas treatment system and replacement of alternative fuels.

It also analyzes operating hours, fuel consumption, and sailing profile by targeting large container ship which operating NECA, North America area, which mainly operates that area.

Moreover, it can be used to analyze the characteristics of the engine load for ships operating NECA and to use the sailing profile, which is important design requirements of SCR.

Finally, it calculates the design capacity of the exhaust gas treatment system based on the analysis data of sailing profile for existing ships.

So, it will show that the capacity of the exhaust gas treatment system can be reduced according to the sailing profile.

KEY WORDS : MCR 최대연속출력 ; NECA 질소산화물 배출통제해역 ; Sailing profile 운항 형태 ; SCR 선택적 촉매 환원기

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

세계 무역의 주요 운송수단인 선박은 과거 10년 전과 비교하였을 때 2005년 921,400,000 DWT에서 2015년 기준 1,746,400,000 DWT로 선박량은 약 1.9배가량 증가하였고, 물동량은 2005년 7,641,000,000톤에서 2015년 기준 10,718,000,000톤으로 약 1.4배 증가하였다^[1].

특히 컨테이너선의 경우 급증하는 화물 운송 수요에 따라 2만TEU급 초대형 선박을 건조할 만큼 대형화 추세가 급속히 진행 중에 있다.

그러나 산업 발달의 후면에는 온실가스 배출로 인한 지구의 기온변화, 생태계 변화 등 기후변화가 발생하였고, 이에 대한 국제사회의 대응도 점차 강화되고 있다. 더불어 선박에서 배출되는 유해배출가스의 규제도 강화되고 있다.

2012년 기준 전 세계적으로 CO₂ 배출량이 Table 1에서 보여준 바와 같이 35,640,000,000톤이었고, 그 중 2.6%인 938,000,000톤이 선박에서 발생되었다^[2].

Table 1 Shipping CO₂ emissions compared with global CO₂^[2]

Year	Global CO ₂	Total shipping CO ₂	Percent of global	International shipping CO ₂	Percent of global
2007	31,409	1,100	3.5%	885	2.8%
2008	32,204	1,135	3.5%	921	2.9%
2009	32,047	978	3.1%	855	2.7%
2010	33,612	915	2.7%	771	2.3%
2011	34,723	1,022	2.9%	850	2.4%
2012	35,640	938	2.6%	796	2.2%
Average	33,273	1,015	3.1%	846	2.6%

이에 따라 국제해사기구(IMO)의 환경보호위원회(MEPC)에서는 MARPOL의 새로운 부속서 VI를 채택하여 황산화물, 질소산화물 등 선박으로부터 배출되는 대기오염물질을 규제하게 되었다. 부속서 VI에 따라 전 세계 선박 연료유의 황 함유량을 제한하였고, 발틱해 등을 황산화물 배출규제해역(ECA)으로 지정하였으며, 디젤엔진에서 발생하는 질소산화물의 배출을 제한하는 한편, 선박으로부터 HCFCs(Hydrochloro-fluorocarbons) 및 할론가스 등 오존층 파괴 물질의 배출을 전면 금지시켰다. 특히 질소산화물의 경우 기존의 Tier I 규제에서 2011년 1월 1일을 기점으로 이후 건조되는 선박은 Tier II의 조건을 맞추도록 강화되었으며, 2016년부터는 배출규제해역을 통항하는 신조선박은 Tier I 대비 질소산화물의 배출량을 80% 저감한 Tier III를 만족하도록 요구 하였다. 2016년 10월 개최된 MEPC 70차 회의에서는 발틱해 및 북해지역을 질소산화물 배출규제해역으로 지정하고 2021년 1월 1일부터 요건의 발효일로 설정함에 동의하였다.

이러한 배출가스에 대한 국제적 움직임과 더불어 자국의 환경보호를 위한 국지적인 규제에 의해 그린십(Green ship) 관련 친환경 녹색선박 시장이 발달하게 되었고, 질소산화물 등의 배출을 줄이기 위한 다양한 기술개발이 이루어지고 있다. 선박연료유를 기존의 중유(HFO)에서 액화천연가스(LNG)로 변경하거나, 기존 선박에 SCR 장치, EGR 장치 등 배기가스 후처리시설을 설치하여 배출가스 규제에 따른 대응방안을 마련하고 있다.

기 개발된 배기가스 후처리기술마다 장·단점이 있으나 유해배출가스 감소율에 있어 EGR은 질소산화물을 60%까지, SCR은 80%~95%까지 감소시킬 수 있다는 것으로 보고되고 있다.

이와 같이 해운분야는 그린십 운항(Green ship operation)을 통한 각종 환경 규제에 대응하는 노력을 병행하고 있고, 특히 TIER III 지역의 운항조건을 만족하기 위해 다양한 방법을 연구하고 있다.

이에 본 연구에서는 선박으로부터 배출되는 오염물질과 대기오염규제를 고찰하고, 이에 따라 배출가스 저감 기술, 대체연료의 사용 등 대응 기술을 파악하고 분석 하였다. 또한 TIER III 배출규제해역으로 지정된 북아메리카 서부해역을 주로 운항하는 대형 컨테이너선을 대상으로 실제 배출규제해역 운항기록을 분석하여 운항시간, 연료소모량 등을 산출하고 SCR 등 배기가스 후처리장치 탑재 시

설계 요건인 운항 형태(Sailing profile)를 패턴(Pattern)화하여 NOx TIER III 지역을 저속 운항하는 선박에 활용할 수 있도록 하였다. 또한 이를 바탕으로 배기가스 후처리 장치의 설계용량을 산출·비교하여 운항 패턴에 따라 용량이 감소될 수 있고 이는 결국 배기가스 후처리 장치의 기관실내 설치공간을 더욱 경제적이고 효율적으로 관리할 수 있음을 제시하였다.



1.2 연구 방법

1.2.1 선행 연구의 고찰

선박으로부터 발생하는 대기오염 물질과 관련하여 다양한 분야의 연구가 선행되었으며 크게 네 가지 분야로 분류할 수 있다. 첫째, 선박 기인 대기오염 규제를 위한 국제규범 등에 관한 연구, 둘째, 선박 기인 대기오염물질을 저감하기 위한 기술에 대한 고찰, 셋째, 기존 선박연료유 대비 LNG 등 대체연료의 경제성 분석, 넷째 선박으로부터 발생하는 온실가스 배출량 산정 등이다.

우선, 해양환경보호 의무가 지속적으로 강화되고 있는 추세에 따라 대기오염 규제를 위한 국제규범에 대한 고찰과 이에 따른 시사점 제시 등의 연구는 계속되어 왔다. 특히 환경 및 대기오염방지 기술 확보는 세계화 시대에 경쟁력을 유지하는데 필수적인 조건이기에 이미 선진 각국은 대기오염을 억제하기 위한 각종 규제를 제정하고 오염물질의 배출 저감을 위한 다양한 처리기술들을 개발하고 있다.

또한 이를 효과적으로 규제하기 위하여 정부와 해운기업 간에 변화가 진행되고 있어 우리나라도 해운기업의 적극적인 대책 마련이 시급하지만 현재 해운기업의 인식수준은 매우 낮은 것으로 나타나고 있다. 아울러 해운기업들의 선박 기인 대기오염 규제에 대한 인식도, 체감도 및 준비수준 등에 영향을 미치는 요인은 정부의 각종 법률제정, 정비 및 규제를 강화하는 정책적 지원이 수반될 때 높아진다고 한다^[3].

둘째, 선박 기인 대기오염물질을 저감하기 위한 기술에 대한 연구는 국내뿐만 아니라 국외에서도 활발히 진행되어 왔다. 로이드 선급에서는 선주 및 선박운항자를 위해 MARPOL 부속서 6장의 황산화물과, 질소산화물의 규제에 대응하기 위한 각종 기술들의 개발 현황을 설명하고 각각의 기술에 대한 장·단점을 기술하였다^[4]. 국제해사기구에서도 배출가스 제어 및 에너지 효율 측정에 관한 연구가 이루어 졌다. 항내에서의 대기오염은 선박관련 종사자, 선주, 관계당국 및 국제기구에서도 주요한 도전으로 인식되고 있고 대기오염을 줄이기 위한 압박은 점차 시간이 지날수록 증가할 것이라고 한다. 또한 배출가스를 제어하기 위해

연료분사시기 조정 등의 기관조정 기술(Primary Method), 배기가스 후처리 장치, 대체 연료, 효율적인 운항 등 다양한 기술이 개발·개선되고 있으나 선박의 운항 조건, 화물처리 방법, 부두 운영 등 다양한 요소들로 인해 배출가스 제어를 위한 완벽한 단일 해결책은 없다고 한다. 따라서 각 경우별로 이행에 앞서 충분한 분석이 요구된다. 대기환경 개선을 위한 규제는 주로 북미와 북유럽국가에서 시행되어 왔으나 아시아에서도 점차 주요 사안이 되고 있어 규제가 강화되는 추세이다^[5].

셋째, 세계적으로 선박의 배출가스 규제가 강화됨에 따라 이를 대응하기 위한 다양한 기술 중 액화천연가스를 연료로 사용하는 것이 유가 추세, 대체 기술의 유지·보수비용, 선박의 운항 특성 등을 고려하였을 때 경제성 측면에서 보다 효과적인 것으로 보고되었다. 액화천연가스 병커링(bunkering) 시설 기반 확보·확충과 더불어 액화천연가스 추진선의 도입 전망, 배출규제해역의 확대 여부, 국제해사기구에서의 전 해역에 대한 배출가스 도입 시기 등 높은 불확실성 등을 고려하여 개발시기의 탄력적인 조정이 가능하도록 정책적 배려가 필요할 것으로 판단된다^[6].

넷째, 부산항·울산항 등에서 선박으로부터 배출되는 배출가스량 산정에 관한 연구이다. 대기오염물질의 선박배출량 산정 기법은 넓은 범주로 3분류인 연료 사용량 산출법, 물동화물량 산출법, 개별선박 배출량 산출법으로 분류할 수 있고, 각 분류별로 항구별 배출가스량을 산정하는 연구가 있었다. 이 중 각각의 선박에서 배출량을 산출하는 개별선박 배출량 산출법에 따라 부산항에서의 배출가스량을 측정한 결과, 컨테이너 선박이 전체 NOx 배출량의 약 47%와 전체 주엔진 출력의 약 73%로 가장 높았다. 부산항의 경우 컨테이너 선박에 대한 규제나 정책만 있어도 많은 배출량 저감효과가 있을 것으로 사료된다^[7].

1.2.2 본 연구의 차별성

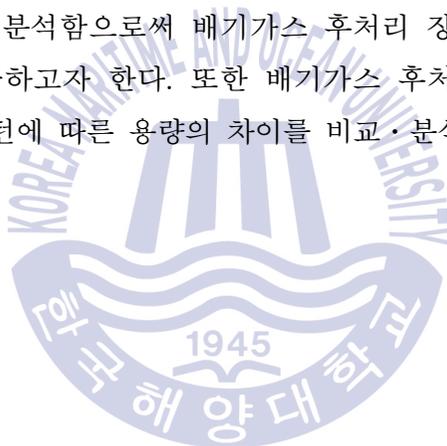
환경오염이 글로벌 기후변화에 미치는 영향이 점차 가시화됨에 따라 선박이 대규모 단위 오염원이라는 점이 부각되었고 이에 대한 방지책들에 대해서는 그간 많은 연구가 진행되어 왔다.

그러나 실제 배출규제해역을 운항하는 선박의 기관부하 자료를 바탕으로 운항 형태를 분석하고 패턴화하여 NO_x TIER III 지역을 저속 운항하는 선박에 적합한 배기가스 후처리 장치 용량 산출 등에 관한 연구는 매우 드물다.

SCR 제조사에서도 배기가스 후처리 장치(SCR) 탑재로 인해 기관실내 공간을 과도하게 차지하는 난제를 극복하기 위해 선박의 운항패턴에 따른 효율적인 배기가스 후처리 장치를 최적화하는 노력을 하고 있다.

현재까지 SCR, EGR을 탑재하여 운항하고 있는 선박의 대부분이 중·소형급 출력의 기관이 탑재된 선박이고^[8], SCR의 반응기(Reactor), EGR Unit 등은 SMCR의 100% 출력을 기준으로 설계가 되어 왔었다.

본 연구에서는 저속 운항하는 대형 컨테이너선을 표본 선박으로 하여 배출규제해역의 운항 패턴을 분석함으로써 배기가스 후처리 장치의 최적화 설계를 위한 기본 데이터로 제공하고자 한다. 또한 배기가스 후처리 장치 설계용량을 산출하여 선박의 운항 패턴에 따른 용량의 차이를 비교·분석하고자 한다.



제 2 장 환경규제 및 대응 기술 현황

2.1 선박으로부터 배출되는 오염물질과 대기오염규제

2.1에서는 선박으로부터 배출되는 오염물질에 대해 알아보고 이로 인한 환경 영향 등을 고찰한다. 추가로 배출가스에 의한 환경오염을 저감시키기 위한 규제 현황도 검토한다.

또한 대기오염 규제 대응을 위한 배기가스의 근본 원인인 연료 자체를 바꾸는 방법, 선박기관에서 배기가스가 발생한 후 후처리하는 방법 등에 대해서도 살펴보고 각각의 기술에 대한 배출가스의 저감도를 비교한다.

2.1.1 선박으로부터 배출되는 오염물질

디젤엔진의 연소는 공기 중의 산소(O₂)가 연료 속의 탄소(C), 수소(H) 및 유황(S)과 반응하여 이산화탄소(CO₂), 물(H₂O), 아황산가스(SO₂)를 생성한다. 공기 중의 질소는 흡입공기 중에 존재하고 있는 수증기나 과잉 산소의 역할처럼 냉각제로서 엔진을 통과하며, 배기가스 중에 부가적으로 생성되는 대기오염물질은 질소산화물(NO_x), 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 그을음(soot) 등이 있다. 대부분의 미립자는 연료 탄화수소계의 불완전연소에 기인하고 일부는 엔진 윤활유에서 발생한다^[9].

2.1.1.1 CO(일산화탄소)

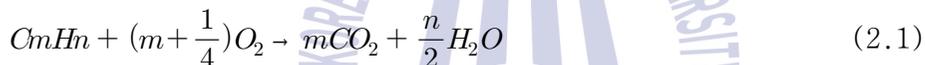
일산화탄소는 인체의 헤모글로빈(hemoglobin)과의 친화력이 산소(O₂)보다 200~300배 정도 강하여 인체 내의 산소 공급을 저해하는 유해물질로서 일산화탄소농도에 따라 생명에 위협을 줄 수 있는 규제 대상의 오염 물질이다.

일산화탄소 배출량을 저감시키는 방법에는 주기적인 정비나 희박 연소방법 등을 들 수 있지만 희박 연소방법은 질소산화물의 생성을 촉진시키게 되므로

좋은 해결책이 될 수 없다. 일산화탄소 발생량(농도)은 공기연료 혼합비에 가장 크게 좌우된다. 디젤엔진은 대부분 희박한 공연비영역에서 작동하기 때문에 일산화탄소는 크게 문제시되지 않는다. 그러나 가솔린엔진은 공연비가 농후한 영역에서도 작동하기 때문에 일산화탄소가 중요한 공해물질이다. 엔진 작동시의 일산화탄소 발생요인은 실린더간의 혼합기 불균일성, 저온 시동 시 농후한 연료 공급, 과도운전시의 농후한 연료공급 등이 있다^[10].

2.1.1.2 CO₂(이산화탄소)

이산화탄소는 연료 중의 탄소와 공기 중의 산소가 화합하여 연소함으로써 배기 중에 이산화탄소가 생성되는데, 그 반응은 식(2-1)과 같다. 인체에 독성은 적으나, 지표로부터 복사되는 적외선을 차단시켜 지구 온난화 현상을 유발시키는 잠재적 오염물질이다.



이산화탄소의 배출량은 연료의 연소효율에 따라 다르게 되어 연소된 연료가 많을수록 배출량은 더욱 많아진다. 그러므로 이 배출물은 연소한 연료의 정해진 양에 대하여 최대로 증가되어야 하는데, 이것은 연소가 가능한 범위 내에서 완전히 이루어진다는 것을 나타낸다.

이산화탄소를 저감시키는 가장 효율적인 방법은 연료 사용량을 줄이는데 있으며 이런 측면에서 보면 디젤엔진이 가솔린엔진에 비해 20%~30% 유리하며 특히 직접분사식 디젤엔진이 가장 효율적이다^[11].

2.1.1.3 HC(Hydrocarbon, 탄화수소)

탄화수소는 모든 유기 화합물의 기본이 되는 물질로서 벤젠(C₆H₆)과 벤조피렌(C₆H₆-C₁₆-H₁₀)은 발암 물질이고, 올레핀(olefin)계 탄화수소(C_nH_{2n})는 광화학 스모그를 발생시키는 물질이며 에틸렌(C₂H₄)은 탄화수소 화합물 중에서 식물의 성장에 가장 큰 영향을 주는 물질이다. 디젤엔진 배기가스 중의 탄화수소는 원래

연료분자나 분해된 연료분자, 또는 재결합된 중간 화합물로 구성되는데, 이들 탄화수소 중의 약간은 윤활유의 불완전 연소에 의해서도 소량 생성된다.

탄화수소는 연료분사계통의 결합으로부터 생길수도 있는데, 이들 중 일부는 쉽게 극복될 수 있으나, 다른 일부는 엔진이 넓은 속도범위에 걸쳐 운전되므로 피할 수 없는 것도 있다^[12].

2.1.1.4 SO_x(황산화물)

연료유중의 유황분은 연소한 다음 아황산가스(SO₂)로 되고 그 중 일부는 무수황산(SO₃)으로 되어 수분과 화합하며, 황산이 되어 실린더라이너, 피스톤 링 등의 부식마모를 일으킬 뿐만 아니라, 대기 중으로 방출되는 아황산가스도 매우 심각한 대기오염원이 되므로 유황분은 되도록 적을 것이 바람직하다.

황산화물은 연료유 중에 포함된 황성분이 연소 과정을 거치면서 황산화물을 형성하는데 주로 아황산가스(93%)와 무수황산(7%)로 생성된다. 디젤엔진의 황산화물 배출은 연료유의 유황 함유량을 낮추거나 배기가스 탈황기술을 사용함으로써 억제할 수 있다^[13].

2.1.1.5 Particulate matter(미립자)

미국 CARB(California Air Resource Board, 캘리포니아 대기 정화국)에서 정의한 미립자는 다음과 같다. 51.7℃ 이하의 공기로 희석되어 필터에 포집된 배출성분 중 응축수분을 제외한 모든 배출성분을 말하며 미분(fines), 분진(dust), 그을음(soot), 미스트(mist), 연무(fog), 스모그(smog) 등이 포함된다.

미립자 발생량은 연료량의 중량 중 약 0.2%~0.5%이며 대부분의 미립자는 연료 탄화수소계의 불완전연소에 기인하고 일부는 엔진 윤활유에서 발생한다^[14].

원양항해 선박에 의해 선박으로부터 기인하는 미립자의 증가는 폐암 등으로 인한 사망에 영향을 미치는 치명적인 유해물질이다. Fig. 2-1은 동아시아 및 서아시아의 선박과 항만의 활동이 가장 높은 수준인 연안에서 가장 많은 인명피

해가 발생하였음을 나타낸 것이다(Corbett, et al. "Mortality from ship emission: a global assessment", 2007)^[15].

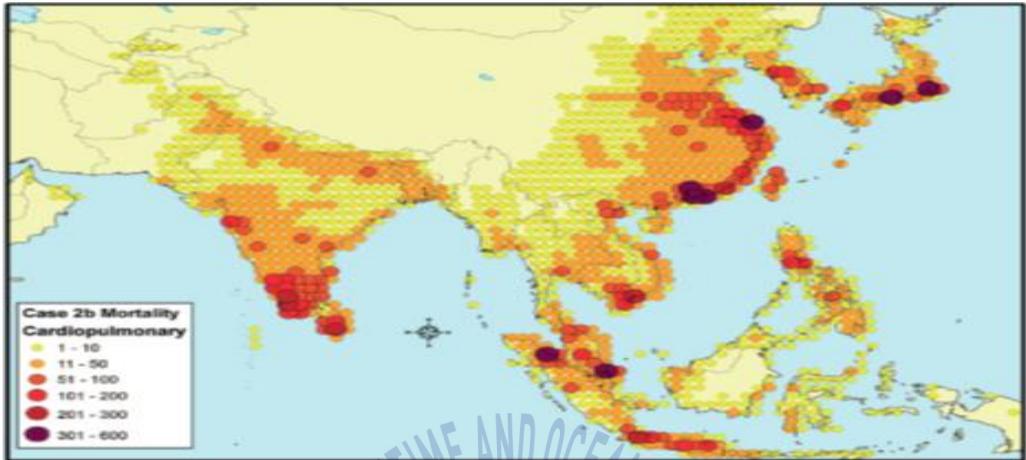


Fig. 2-1 Annual cardiopulmonary mortality due to ship PM2.5 emissions in Asia^[15]

2.1.1.6 NOx(질소산화물)

대기환경 오염 물질인 질소산화물은 질소와 산소로 이루어진 화합물로서 이들의 혼합물을 지칭할 때 일반적으로 사용되는 용어이다. 그 중에서도 대기오염의 주범이 되는 NO와 NO₂를 총칭하여 NO_x라고 한다. 이와 같은 NO는 연소시에 발생하는 질소산화물이 약 95% 정도를 차지하며 대부분 빠르게 NO₂로 산화되며, 인체 및 자연환경 파괴의 원인물질로서 작용한다. NO_x는 7가지 종류로 존재하는 것으로 알려져 있으며 그 중 NO, NO₂, N₂O는 발생량이 지배적으로 높고 인체 및 대기 환경 유해성으로 문제가 대두 되고 있다.

NO_x는 생성 매커니즘에 따라 열생성(thermal) NO_x, 연료기인(fuel) NO_x, 속발(prompt) NO_x로 구분되며, 이 중 열생성 NO_x가 연소 반응에서 70%~80% 수준의 높은 비율로 형성된다. 열생성 NO_x란 고온의 연소 분위기에서 연소 공기 중의 질소와 산소가 반응하여 생성되며 연료 중의 질소성분이 없는 청정 연료의 연소에서 NO_x 발생의 주원인이다. 열생성 NO_x의 생성은 주로 연소 온도가 높을 때, 연소 영역에서 산소의 농도가 높을 때, 고온 영역에서 연소가스의 체류 시간이 길 때 많이 발생한다고 알려져 있으며 온도 의존성이 매우 크다^[16].

2.1.2 배출가스 규제현황

2005년 3월 19일 MARPOL 부속서 VI가 발효됨에 따라, MEPC는 기술적 진보와 적용기술 실적을 바탕으로 배출 제한을 강화할 목적으로 부속서 VI를 개정하기로 합의하였으며(2005.7.), 2008년 10월, 3년 동안의 적용결과를 바탕으로 MEPC는 수정된 부속서 VI와 질소산화물 기술코드를 적용하기로 결정하였고 발효 시점은 2010년 1월 1일로 합의하였다. 수정된 부속서 VI의 가장 큰 변화는 황산화물, 질소산화물, 미립자의 점진적 감축과 설정된 해상구역에서 이러한 오염 물질을 더욱 감축하기 위한 배출규제해역의 도입이다^[17].

Fig. 2-2에서 보는 바와 같이 수정된 부속서 VI에서 2012년부터 전 해역에서 운항하는 선박 연료유의 황 함유량을 3.5% m/m으로 제한하고, 2015년부터 배출 규제해역을 운항하는 선박연료유의 황 함유량의 배출량을 0.1% m/m으로 강화하였다.

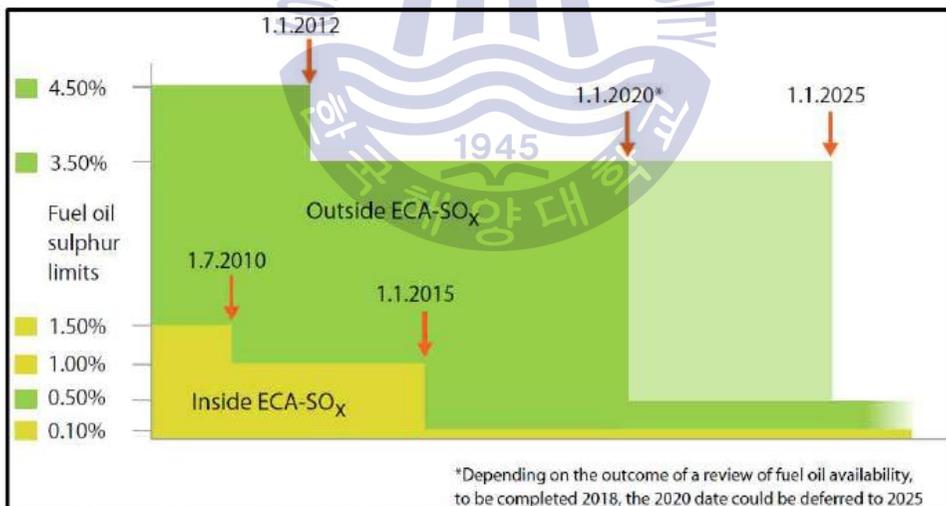


Fig. 2-2 SO_x emission control plan^[18]

MEPC 68차는 전세계 0.5% m/m 황함유량 요건에 대한 연료유의 이용 가능성을 평가하기 위한 운영위원회의 설립에 동의하였고, MEPC 69차는 운영위원회의 경과보고서를 주목하였으며, 상기 황 함유량 요건의 이행시기를 MEPC 70차에

결정할 것임에 동의하였다. 2016년 10월 MEPC 70차에서는 0.5% m/m 황 함유량을 지닌 연료유의 이행시기를 2020년 1월 1일로 결정하게 되었다. 이와 관련하여 위원회는 0.5% m/m 황 함유량 요건의 만족을 위한 중유의 혼합(blending)이 연료유의 안전성, 점도 및 적합성 등에 관한 기술적인 문제를 지닐 수 있음을 주목하고, 0.5% m/m 황 함유량 요건의 원활한 이행을 위한 이행계획을 개발할 것을 지시하였다^[19].

Fig. 2-3과 같이 질소산화물의 경우 기존의 Tier I 규제에서 2011년 1월 1일을 기점으로 이후 건조되는 선박은 Tier II의 조건을 맞추도록 강화되었으며, 2016년 1월 1일 이후 배출규제해역을 통항하는 선박은 Tier III를 만족하도록 강화시켰다.

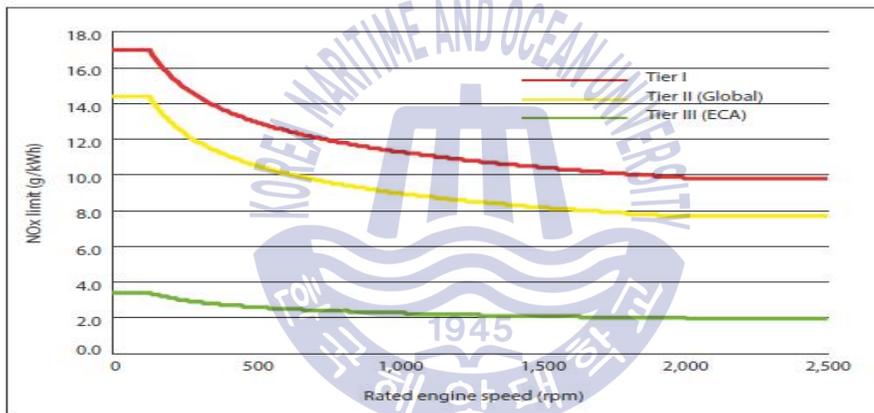


Fig. 2-3 NOx emission control plan^[20]

이번 MEPC 70차 회의에서는 배출규제해역의 지정과 절차적 요건에 대한 우려가 있었으나, 위원회는 영국 해협(English channel)을 포함한 발틱해 및 북해 해역을 배출규제해역으로 지정하고 2021년 1월 1일부터 요건의 발효일로 설정함에 동의하였다. 또한, NOx Tier III 배출통제해역 내에 위치한 조선소에서 건조되거나, 개조되거나, 수리되는 선박들이 Tier II만 만족하거나, 액화천연가스 등 Tier III를 만족할 수 있는 가스연료 사용이 가능한 이중연료기관이 설치된 선박에 대한 면제사항에 대하여도 동의하였다^[19].

Table 2-1은 신조선박에 대한 질소산화물 배출규제 내용이다. 비상용 선박 디젤기관 또는 선박에 설치되어 비상시에만 사용할 목적의 어떤 장치나 기구에 동력을 공급하는 기관, 또는 비상용으로만 사용할 목적의 구명정에 설치된 선박용 디젤기관은 제외한다.

Table 2-1 NOx control requirement of Annex VI^[21]

구 분	Tier I (2000.1.1.)	Tier II (2011.1.1.)	Tier III (2016.1.1., ECA)
n < 130 rpm	17.0	14.4	3.4
n = 130~1999 rpm	$45 \cdot n^{(-0.2)}$	$44 \cdot n^{(-0.23)}$	$9 \cdot n^{(-0.2)}$
n ≥ 2000 rpm	9.8	7.7	2.0

한편 국제해사기구(IMO)는 선박에서 배출되는 온실가스(CO₂)를 감축하기 위해 에너지 효율 설계 지표(EEDI)를 신조 선박에 의무화하고 모든 선박에 에너지 효율 관리 계획(SEEMP)을 적용하도록 의무화하였다. 에너지 효율 설계 지표는 1톤의 화물을 해상에서 1마일 수송할 때 발생하는 이산화탄소의 배출량을 의미하며 400톤급 이상의 모든 선박에 적용된다. 2013년 1월 1일부터 발효되었으며, 2015년까지 10%, 2020년 20%, 2025년 30%의 감축을 의무화하고 있다. 이 규정을 충족하지 못할 경우 선박의 운항이 전면 금지된다^[22].

2.2 대기오염 규제 대응 기술 현황

2.2에서는 선박으로부터 배출되는 오염물질을 감소시키기 위한 기술개발의 현황과 각각의 기술에 대한 작동방법, 배출가스 저감률 등을 비교·분석하고자 한다. 선박에서 배출되는 배출가스를 저감하기 위해 배기가스의 근본원인인 연료 자체를 저유황유, LNG, 메탄올 등으로 바꾸는 방법 등을 소개한다. 또한 선박 기관에서 발생한 배기가스를 후처리하는 방법인 EGR, SCR, Scrubber, SAM (Scavenging Air Moistening) 및 HAM(Humid Air Motor), Turbocharger cut-off 등을 살펴보고 각 기술에 대한 장·단점을 알아본다.

2.2.1 배출가스 감소를 위한 대체 연료

배기가스의 근본원인인 연료 자체를 바꾸는 방법이 있다. 저유황유, LNG, 메탄올 등 연료 자체가 황산화물 또는 질소산화물 등을 줄이는 방법은 다음과 같다.

2.2.1.1 저유황유(Low sulphur distillate oil)^[23]

원유의 특성과 정제 공정에 따라 0.1% 황 함유량을 만족하는 잔사유의 광범위한 사용은 기대하기 어렵다. 따라서 잔사유가 아닌 증류유(distillate oil)인 저유황유가 일반적으로 사용되어 진다고 예상된다. 이는 황산화물 규정을 준수하기에 가장 간단한 방안이다. 선박용 디젤유(MDO)와 선박용 경유(MGO)에 대한 용어의 명확한 정의가 구분되어 있지 않지만, 그들은 잔사유와 같이 가열을 요구하지 않는다.

그러나 저유황유는 RFO 380 cSt(centistokes) 보다 비싸고, 가격 차이는 장기적으로도 유지될 것으로 예상된다. 저유황유의 단점으로 높은 황 함유량의 연료에 오염되게 되면 0.1% 황 함유량을 쉽게 만족하지 못하여 불충분한 연료로 변하게 되기에 저유황유와 다른 연료유와는 엄격하게 구분할 필요가 있다.

또한, 증류유의 경우 ISO 8217에서는 MGO로 분류되는 DMA는 2~6 cSt/40°C, DMZ는 3~6 cSt/40°C, MDO로 분류되는 DMB는 2~11 cSt/40°C로 정의하고 있으며, 이러한 낮은 점도는 분사 전에 예열 등이 필요가 없고 또한 필수적인 윤활 작용을 하는 것에는 불충분함을 의미한다.

연료유 이송 및 공급 펌프, 연료 밸브와 다른 연료유 계통 부문에 대하여 저점도에서 운영할 때 필히 정상작동 여부 및 누설여부를 확인하여야 한다. 또한 추운 지역에서 사용할 때 급격하게 필터를 막을 수 있기에(Cold flow) 따뜻한 지역에서 차가운 지역으로 이동할 때 필히 인지하여야 하며, 문제가 발생하지 않도록 22°C 이상의 온도를 유지 할 필요가 있다.

연료유 전환 작업을 할 때 필히 매뉴얼에 따라 실시하여 기관 마모·고착 등이 발생하지 않도록 주의하여야 하며 선원들이 이 작업에 친숙하여야 한다.

2.2.1.2 하이브리드 연료(Hybrid fuels)^[23]

선박용 경유 보다 더욱 가격적으로 합리적인 하이브리드 연료는 증류유와 잔사유와 특성을 혼합한 것이다. 통상적인 열분해 연료유(RFO)보다 점도와 비중은 더 낮으나 점화와 연소 특성은 좋다.

2.2.1.3 바이오 연료(Bio-fuels)^[24]

해상용 연료유로 이용 가능한 액체 바이오 연료유는 차세대 연료유로 알려진 바이오 디젤[bio-diesel (FAME)], 조류 연료(algae fuels), 메탄올(methanol), 수소 재생 디젤유(HDRD, Hydrogenation-Derived Renewable Diesel) 등이 있다.

바이오 디젤, 조류연료, 메탄올 및 수소재생 디젤유의 황 함유량은 사실상 거의 존재하지 않는다. 조류 연료 및 수소재생 디젤유는 선박용 디젤기관 및 연료시스템에 적합하나 바이오 디젤유는 특정 금속 및 비금속 물질로의 사용에 적합하지 아니하며, 선박의 디젤기관 및 연료시스템의 개조가 요구되는 것으로 보고되고 있다. 메탄올은 2050년까지 가장 효율적인 연료유가 될 수 있을 것으로 고려되고 있다. 선박을 메탄올 연료 사용이 가능하도록 개조하는 것은 메탄올

연료저장의 단순함으로 인하여 LNG 연료 사용이 가능하도록 개조하는 것과 비교하여 훨씬 저렴한 것으로 평가되고 있다. 비록 메탄올 연료 자체는 LNG와 비교하여 약간 비싸지만, 메탄올 연료의 비용 및 LNG 연료시스템의 복잡성을 비교할 때 이는 서로 상쇄하는 관계를 지니고 있다. 메탄올은 부식위험을 증가시키기도 하므로 연료유 탱크로 충분한 부식방지 조치가 강구되어야 하며, 상대적으로 낮은 메탄올의 톤당 열량은 이의 저장 공간의 확대를 위하여 선박의 화물구역을 차지하는 것을 의미하기도 한다. 메탄올은 디젤기관에 사용될 때 메탄과 거의 유사한 특성을 지니고 있으므로 이중연료 기관으로도 사용될 수 있다.

2.2.1.4 가스 연료(Gaseous fuel)

천연가스 또는 프로판 가스(LPG)는 해상연료유로 사용가능한 가스연료로 고려될 수 있다. 이러한 연료들은 극히 작은 황 함유량을 포함하고 있을 뿐만 아니라, 질소산화물, 미립자 및 이산화탄소도 저감할 수 있다. 천연가스는 CNG라 불리는 압축된 상태 또는 LNG라 불리는 액화상태로 운송될 수 있다. 특히, LNG 연료는 LPG 또는 CNG와 비교하여 운송용량이 감소될 수 있다. 액화공정은 대략적으로 -162°C 의 온도로 냉각하여 대기압에 근접한 압력 하에서 천연가스를 액화상태로 응축시키는 것을 의미한다. 에너지 밀도는 CNG와 비교하여 2.4배 높으며, 일반 디젤연료와 비교하여 60% 정도의 수준을 지니고 있다^[25].

LNG는 기존 선박 연료유 대비 오토사이클(Otto cycle)에서는 질소산화물을 88%까지, 미립자를 98%, 황산화물은 완전히 제거할 수 있다. 그러나 디젤사이클(Diesel cycle, 천연가스 점화를 위해 5%미만 연료유 첨가)의 경우 미립자를 95%, 황산화물을 97%까지 감소시킬 수 있으나, 단독으로는 Tier III를 만족시킬 수 없다. LNG 사용의 장점으로는 연료유를 정화할 추가적인 청정기가 필요하지 않으며, 연료비가 저렴하다. 또한, 스웨덴과 노르웨이의 경험에 따르면 기존 연료선박과 비교해 유지비를 줄일 수 있다^[22].

가스전용 엔진은 코일, 정화장치, 처리 설비, 서비스 및 침전탱크가 있는 기존의 연료 가열 시스템이 필요하지 않지만, 개조하기 어렵고 기존 연료선박에

비해 큰 연료탱크, 엔진, 가스 시스템이 필요하기 때문에 비용이 증가하게 된다.

연료탱크가 증가함으로써 화물적재 공간이 줄어들 수 있으며, 극저온·인화성 물질로 인해 취급자에게 특별한 훈련이 필요하다. 또한 현재 기반 시설이 제한되는 단점이 존재한다^[26]. 순수한 가스의 오토사이클과 밀러사이클 엔진은 메탄 슬립(methane slip)과 관련되어 있다. 엔진에 연소되지 않은 가스의 누설(methane slip)은 이산화탄소의 25배이고 메탄 슬립이 제어되지 않는다면 천연가스 사용에 따른 환경개선의 이익은 감소할 것이다^[27]. 메탄은 이산화탄소보다 지구온난화의 잠재력이 더욱 크다. 온실가스 증가와 더불어 메탄은 선박의 대기 오염 관련 논쟁의 더욱 두드러지는 부문이 될 것이다^[26].

2.2.2 배출가스 감소를 위한 대응 기술

선박기관에서 발생한 배기가스를 후처리하는 방법으로는 EGR, SCR, 스크러버, 소기 급습(Scavenging air moistening) 및 Humid Air Motor, 과급기 차단(Turbocharger cut-off) 등이 있다.

2.2.2.1 배기가스 재순환 기술(EGR system)

배기가스 재순환 기술(EGR)은 질소산화물 저감을 위한 가장 효과적인 방법 중 하나로서 가솔린엔진에서는 이미 실용화되어 사용되고 있다. 이 기술은 연소실에서 연소 후 배출되는 배기가스의 일부가 배기관에서 EGR 밸브를 통하여 다시 흡기관 내로 재순환되는 구조이며, 이는 배기가스의 CO₂나 H₂O 등과 같은 가스가 흡기의 일부와 치환되어 혼합됨으로써 혼합기의 열용량이 증대되어 실린더내 연소가스 온도상승을 억제한다. 또한 공기 과잉률을 낮추어 열생성 질소산화물(Thermal NOx) 생성을 억제함으로써 전체 질소산화물 발생량을 감소시키는 원리이다. 디젤엔진에서는 공기 과잉률이 적으면 매연과 미립자 발생이 급증하기 때문에 EGR의 적용은 공기 과잉률이 높은 부분 부하에 한정된다.

또한 최적 EGR률의 결정은 일산화탄소, 탄화수소, 매연과 연비가 과도하게 증가하지 않는 범위에서 결정해야 한다^[28].

Fig. 2-7은 MDT사의 EGR 시스템을 보여준다.

EGR은 배기가스를 냉각시켜 재순환시키면 효과가 더욱 크지만, 혼합기의 착화성을 불량하게 하고 기관의 출력을 감소시키게 된다. 또한 EGR률이 증가함에 따라 배기가스 중의 일산화탄소, 탄화수소 그리고 연료소비율은 증가된다. 이외에도 EGR률이 너무 높을 경우에는 기관의 운전 정속도가 저하된다. 따라서 질소산화물의 배출량이 많은 운전영역에서만 선택적으로 적정량의 배기가스를 재순환시키고 있다^[29].

질소산화물은 60%까지, 잠재적으로 80%까지 감소 가능한 것으로 알려져 있다^[31].

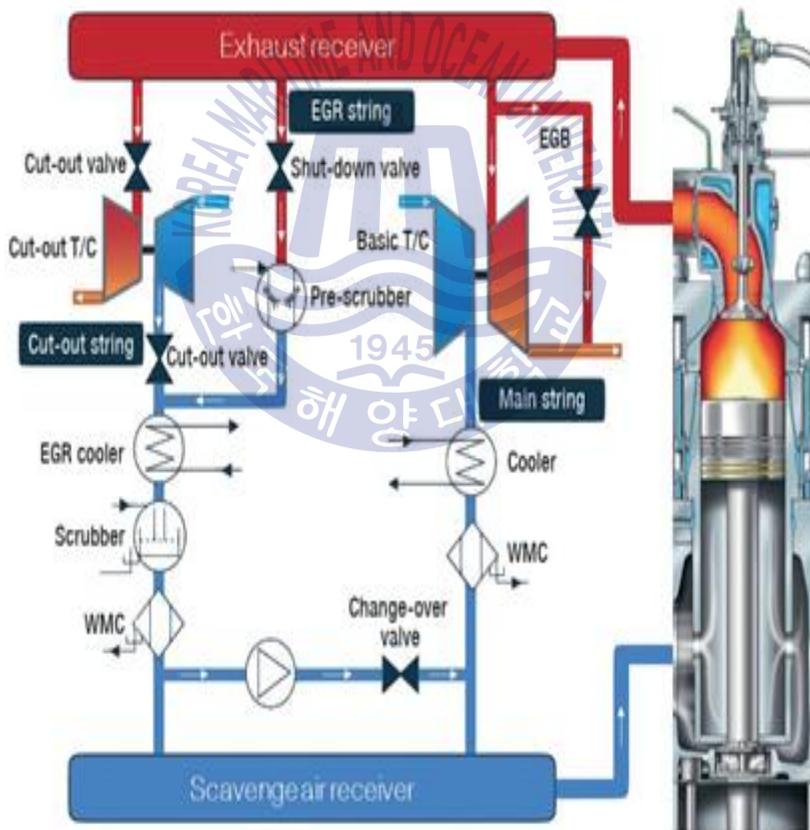


Fig. 2-4 EGR illustration, MAN^[30]

2.2.2.2 선택적 촉매환원 기술(SCR system)

질소산화물 처리방법에는 선택적 촉매환원(SCR) 공정과 촉매를 사용하지 않는 선택적 무촉매 환원(SNCR) 기술이 있으며 공통적으로 암모니아나 요소(Urea)와 같은 환원제를 사용하여 배기가스 중의 질소산화물을 질소와 수증기로 환원시키는 원리를 이용한다. 이 중 SCR은 암모니아나 요소와 같은 환원제와 배기가스 중 질소산화물이 촉매 반응기에서 반응하여 질소와 수증기로 환원시키는 방식이다. 환원제를 이용한다는 점에서 SNCR과 유사하나 촉매를 이용한다는 점과 이로 인해 반응온도가 낮다는 점이 큰 차이점이다^[33].

Fig. 2-8은 일반적인 저압(LP) 방식 SCR 장치를 보여준다. 저압 방식 SCR 장치는 엔진의 과급기 후단에 위치하며, 주요 구성품으로는 SCR 반응기(Reactor), 혼합기(mixer), 분해 장치(DCU, decomposition unit)이며, DCU는 반응기 출구와 혼합기 입구 측에 설치되고, 송풍기(blower), 히터(heater) 그리고 증발기(vaporizer)로 구성되어 있다^[34].

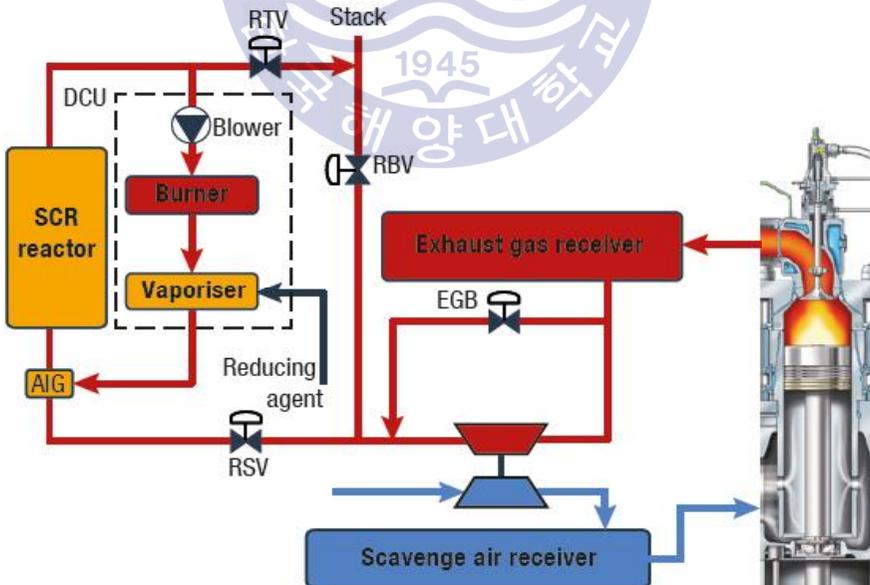


Fig. 2-5 SCR system diagram, MAN^[32]

SCR에 사용되는 환원제는 무수 암모니아(Anhydrous Ammonia), 암모니아수, 요소 등이 많이 사용되며, 최근 탄화수소류도 적용되고 있다. 무수 암모니아는 높은 증발 압력과 유독성을 갖고 있지만, 암모니아수는 이에 비해 비교적 취급이 용이하기 때문에 현재 SCR의 환원제로 가장 많이 적용되고 있다.

SCR은 디젤엔진으로부터 배출되는 질소산화물의 저감 대책 중 가장 효과가 크고, 연료 소비율에도 영향을 최소화할 수 있는 방법으로 화력발전소와 같은 육상설비에서는 많이 적용되고 있다. SCR을 조악한 연료를 사용하는 특수성을 가진 선박의 엔진에 적용하기 위해서는 SCR 시스템이 차지하는 공간의 최적화와 환원제인 암모니아의 취급문제, 운전 경비 등 많은 문제점들이 있다. 하지만 현재 디젤엔진에서 배출하는 질소산화물의 제거율이 80%~95%까지 가능하기에 육상 시설에서는 오래전부터 이용되어 왔다^[33]. 그러나 엔진에서 저부하 운전 시 필요한 예열(Pre-heating)으로 인해 이산화탄소가 미세하게 증가한다^[35].

2.2.2.3 습식 스크러버 기술(Wet Scrubber system)

배기가스 세정장치는 스크러버 기술이 대표적으로 적용되고 있으며, 해수를 직간접적으로 이용하는 습식 스크러버와 건식 스크러버로 나뉜다.

습식 스크러버 기술 중에 개방형(open loop system)은 자연적으로 알칼리성을 갖는 해수를 직접적으로 스크러버 상단에 공급시켜서, 바닥으로 떨어지는 해수와 배기가스가 접촉하여 다양한 상호작용을 일으켜 황산화물 및 입자성 물질을 저감시키는 기술이다. 스크러버를 빠져나온 해수는 원심분리 및 pH 레벨의 조절 과정을 거쳐서 다시 바다로 배출시킨다. Fig. 2-9는 개방형 스크러버 시스템을 보여준다. 폐쇄형 습식 스크러버 기술(closed loop system)은 담수에 수산화나트륨(NaOH)용액 등을 첨가하여 스크러버로 공급시켜서 황산화물의 중성화 과정을 유도한다. 이 때 스크러버 출구에서 담수의 pH 레벨을 일정하게 유지하도록 수산화나트륨의 분사율을 제어한다. 또한 개방형과 폐쇄형의 장점들을 선택적으로 사용할 수 있는 하이브리드 방식의 습식 스크러버 기술이 있다^[36].

Fig. 2-10은 폐쇄형 스크러버 시스템을 보여준다. 폐쇄형 스크러버 시스템은 외부로부터 해수를 유입하지 않고, 스크러빙 공정 후 바다로 물을 배출하지 않는다.

깨끗한 물을 큰 탱크에 저장하여, 수산화나트륨을 첨가하여 황산화물을 중화시킨다. 이러한 기술은 0.2%~1.4%의 연료소비가 요구된다^[37].

습식 스크리버(Wet Scrubber)의 경우 질소산화물은 5%까지, 미립자는 80%까지, 황산화물은 98%까지 감소가 가능하고, 이산화탄소 배출량은 약간 증가한다^[38].

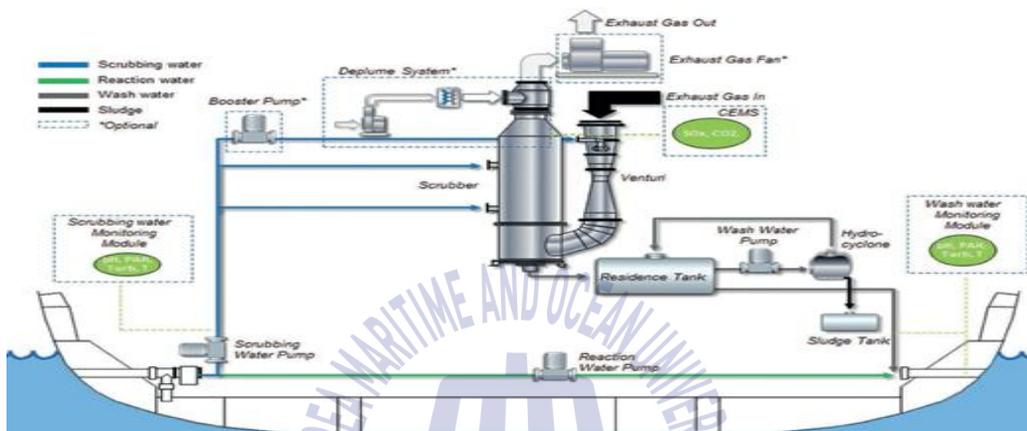


Fig. 2-6 Open loop, Wartsila^[38]

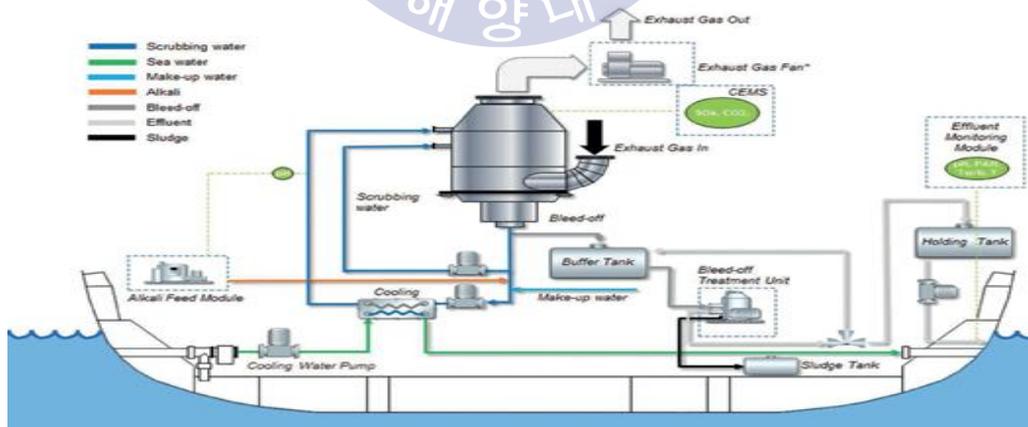


Fig. 2-7 Closed loop, Wartsila^[38]

2.2.2.4 건식 스크러버 기술(Dry Scrubber system)^[38]

Fig. 2-11은 건식 스크러버 기술의 모식도이다. 건식 스크러버는 낱알로 만들어진 석회 알갱이[Ca(OH)₂]를 활용하여 흡수재와 함께 작동한다. 뜨거운 배기가스가 석고(CaSO₄)를 생성하기 위해 알갱이와 반응한다. 석회 알갱이는 엔진 부하에 따라 시스템을 통하여 이동하고 석고는 시스템으로부터 제거되어 선박으로부터 제거를 위해 저장된다.

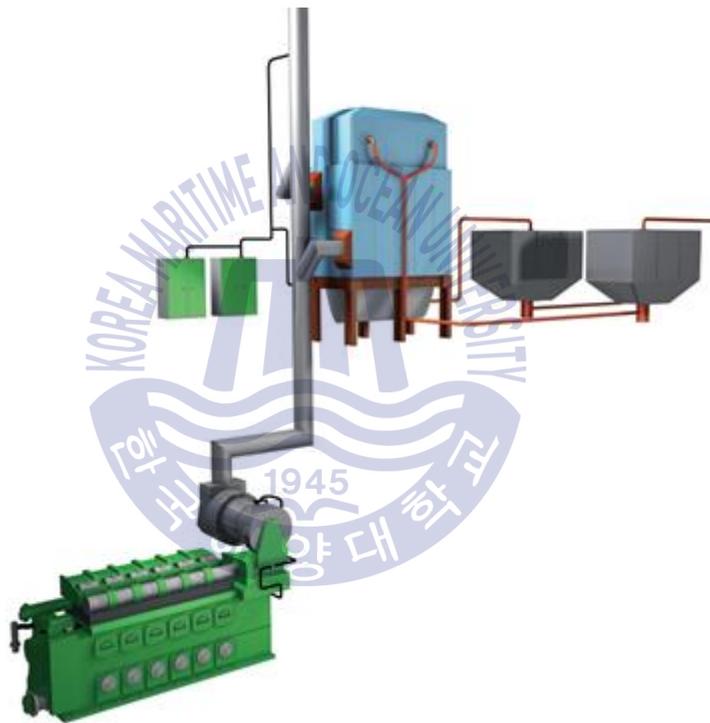


Fig. 2-8 Dry scrubber illustration, MAN^[38]

석고 알갱이는 일반적으로 육상의 발전시설에 보내어져서 습식 스크러버를 위해 재사용된다. 건식 스크러버의 경우 질소산화물은 5%까지, 미립자는 80%까지, 황산화물은 98%까지 감소가 가능하고, 이산화탄소 배출량은 약간 증가한다.

2.2.2.5 SAM(Scavenging air moistening) 및 HAM(Humid Air Motor) 기술^[39]

Fig. 2-12는 Humid Air Motor(HAM) 기술을 설명한 것이다.

SAM(Scavenging air moistening)은 대형 2행정 기관을 위해, Humid Air Motor(HAM)은 4행정 기관을 위해 사용되어 지고 둘 다 충전된 뜨거운 공기의 습도를 과급기의 압축기로부터의 뜨거운 충전된 공기를 적시게 되어 공기 중의 산소 농도를 감소시킨다.

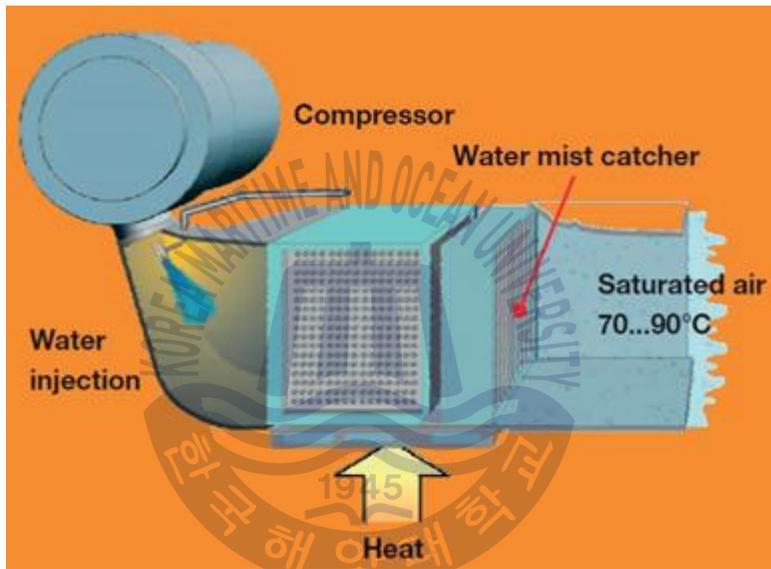


Fig. 2-9 Humid air NOx reduction by piston illustration, MAN^[39]

가습기 안에 열교환기를 통한 해수를 가열함으로 발생하는 습도가 있는 공기가 압축기로부터 충전된 공기와 반응을 하게 된다. 물의 증발과 함께 충전공기의 습도가 증가하게 되어 질소산화물 발생을 65%까지 감소하게 된다. 추가적으로 유지·보수비용이 적고 저부하에서 기관성능이 좋다. 단, 탄화수소와 미립자는 연소실 온도의 냉각으로 증가하게 되고 이는 연료소모량이 대략 3% 증가하게 된다.

2.2.2.6 과급기 차단(Turbocharger cut-off) 기술^[39]

Fig. 2-13은 과급기 차단시스템을 나타낸 것이다.

과급기 차단시스템은 연료소모량을 저감시키고 저부하 운전에서 엔진 성능을 개선시킨다. 과급기 차단시스템은 두 가지 방법에 의해 이루어 질수 있다. 과급기 공기(turbocharger air) 출구와 배기가스 입구에 스윙게이트밸브(swing gate valve)를 설치하거나 과급기 공기 출구에 블라인딩 플레이트(blinding plates)를 설치하는 것이 있다. 과급기 차단시스템으로 인해 사용자의 입장에서 한 개의 과급기를 저부하에서 사용할 수 있는 연료소모량은 $7 \text{ g/kW} \cdot \text{h}$ 까지 저감할 수 있다. 과급기 차단시스템의 사용은 기관의 사양에 따라 질소산화물 발생을 40% 까지 감소시킬 수 있다.

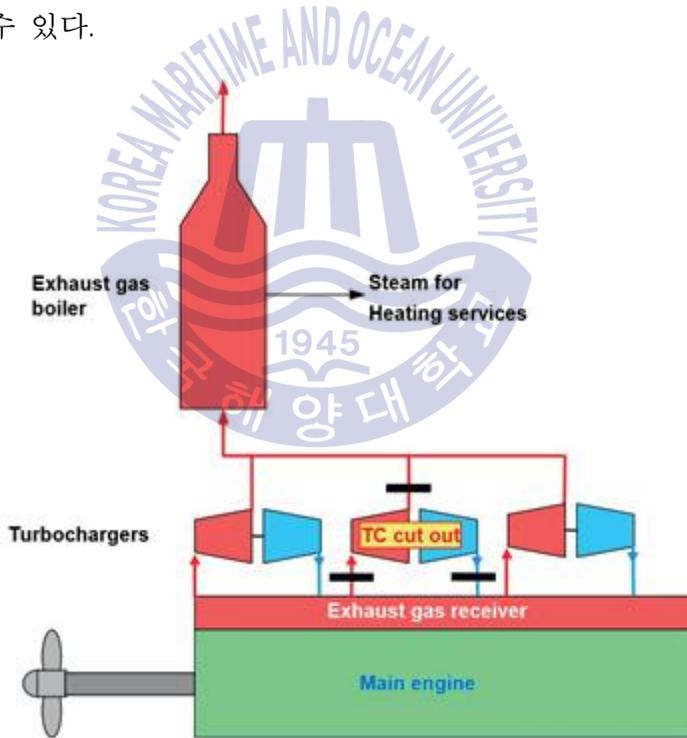


Fig. 2-10 Turbocharger cutout illustration, MAN^[39]

제 3 장 배출규제해역 운항 자료 등의 분석

3.1 개요

이 장에서는 현재 질소산화물 배출규제해역으로 지정되어 있는 북아메리카 서부 해역을 정기적으로 운항하는 8,600 TEU 컨테이너선을 대상으로 배출가스 규제해역 운항에 따른 연료소모량, 운항 자료 등을 분석하였다.

컨테이너선을 표본 선박으로 선정한 이유는 배출규제해역 운항에 따른 연료소모량이 가장 많고 이에 따라 배출가스 후처리 장치의 용량이 상대적으로 대용량인 점을 고려하였다. 본 연구의 결과에 따라 배출가스 후처리 장치 탑재 시 기관실 공간배치효율, 경제적 비용 감소 등의 효과가 크고, 보편화 될 수 있는 가능성이 높은 선박이기 때문이다.

Fig. 3-1은 2007년~2012년 동안 선종별 CO₂ 배출량(국제항해 선박)을 나타낸 것이다. 매년 컨테이너선이 가장 많은 CO₂를 배출하였고, 2012년의 경우 컨테이너선에서 약 205,000,000톤의 CO₂가 배출되었음을 알 수 있다. 이는 2012년 국제항해 중사하는 선박에서는 배출된 CO₂량인 796,000,000톤의 약 25.6%에 해당되는 양이다.

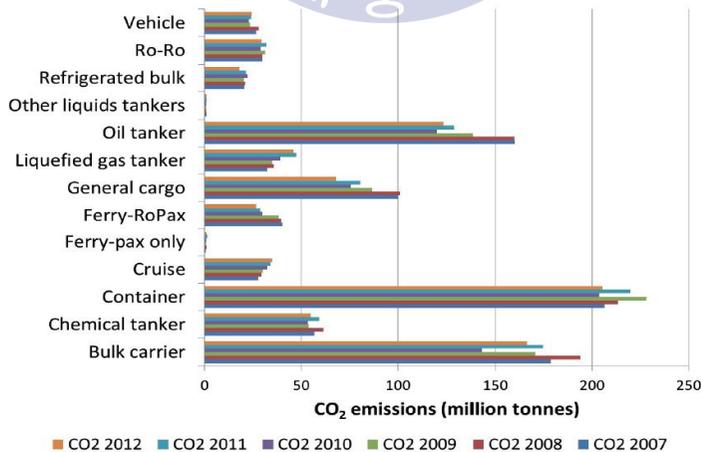


Fig. 3-1 CO₂ emissions by ship type (international shipping only) calculated using the bottom-up method for all years (2007 - 2012)^[40]

Fig. 3-2는 2012년 선종별 주기관, 발전기 등 보조기관 및 보일러에 사용되는 연료유량을 나타낸 것으로서(국제 및 국내항해 포함) 컨테이너선이 가장 많은 연료를 소모한 것을 알 수 있다.

컨테이너선은 연료소모량이 가장 많고, 기관출력이 큰 초대형엔진의 탑재·사용 및 배출규제해역 운항시간 등을 고려하였을 때 SCR 등 배출가스 후처리 장치의 용량이 가장 큰 모델을 사용 할 것으로 추론할 수 있다.

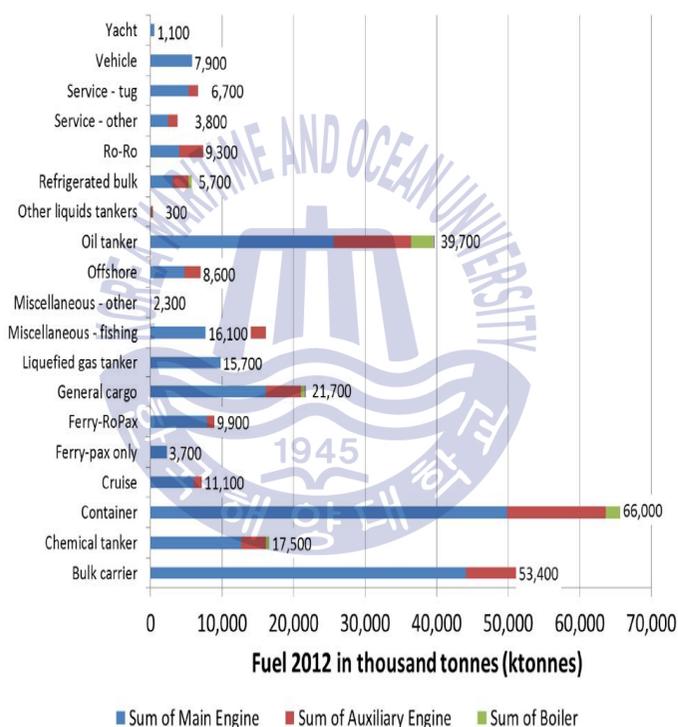


Fig. 3-2 Summary graph of annual fuel consumption broken down by ship type and machinery component (main, auxiliary and boiler) 2012^[40]

3.2 대상선박의 제원

질소산화물 배출규제해역으로 지정되어 있는 북아메리카 서부해역을 운항하는 선박의 연료소모량, 운항 자료 등을 분석하기 위한 표본 선박의 명세는 Table 3-1과 같다.

Table 3-1 Ship's particular

		A vessel	B vessel
D/L		08.2.4	08.3.20
LOA		339.62	339.62
Breath Moulded		45.6	45.6
Depth Moulded		24.6	24.6
DWT(MT)		99,052	99,043
G/T(ton)		94,511	94,511
N/T		51,638	51,638
M/E	Type	HYUNDAI SULZER 14RT-FLEX 96C	HYUNDAI SULZER 14RT-FLEX 96C
	MCR*RPM	108,920 BHP * 102	108,920 BHP * 102
	NCR*RPM	98,030 * 98.5	98,030 * 98.5
G/E	Type	HD MAN B&W 7L 32/40H	HD MAN B&W 7L 32/40H
Service Speed(Knots)		27.00	27.00

표본 선박은 부산 신항을 출항하여 북아메리카 서부해역을 통과하기 위해 배출규제해역에 진입하기 전에 중유(H.F.O.)에서 황함유량이 0.1% m/m를 초과하지 않는 저유황유로 연료를 전환(Bunker change) 한다. 북미지역에서는 미국의 타코마항, 시애틀항, 캐나다 밴쿠버항 등을 기항하고 캐나다 밴쿠버항을 출항한 뒤 배출규제해역을 벗어나게 되면 저유황유에서 다시 황 함유량이 3.5% m/m 이하인 중유로 연료를 전환한다.

Fig. 3-3과 같이 북아메리카 해역의 경우 미국과 캐나다 동서부 영해기선으로부터 200 nm 떨어진 거리이기에 EAST BOUND 시 미국 타코마항을 입항하기 위해 북아메리카 해역 통과 전부터 미국 타코마항 입항까지 가장 많은 저유황유를 소모한다.



Fig. 3-3 General view of the North American Emission Control Area^[41]

이와 같이 배출규제해역을 운항하는 선박의 경우 협약사항에 따라 연료유 수급 시 유종, 수급량, 연료유 수급 항구, 황 함유량 및 비중 등의 정보가 포함된 연료유 공급서(Bunker delivery note)를 3년 동안 본선에 보관하여야 하며 연료유 공급서는 인도되는 연료유의 대표 샘플과 함께 제공되어야 한다.

제공된 샘플은 연료유 공급자의 대리인과 연료유 공급 작업 완료 시 책임사관이나 선장에 의해 밀봉이 되고 서명이 된 후 그 해당 연료유가 다 소모될 때까지 본선에 보관되어야 하지만, 어떤 경우든 공급 후 12개월 이상 보관되어야 한다. 또한 황산화물 배출규제해역에 들어가거나 떠나는 선박들은 배출규제해역에 들어가기 전 0.1% m/m를 초과하는 연료유를 완전히 씻어낼 수 있도록 충분한 시간을 허용하는 연료 교환이 수행되었다는 것을 증명하는 문서화된 절차가 수립되어야 한다.

아울러 황산화물 배출규제해역에 들어가기 전 완료된 연료유 전환작업, 또는 그러한 해역으로부터 나온 후 개시된 연료유 전환작업이 실행된 선박의 위치, 날짜, 시간뿐만 아니라 각 탱크의 저유황 용량을 기재하여야 한다.

3.3 배출규제해역 운항에 따른 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석

선박의 연료소모량은 선종에 따라 또한 크기와 운항 속도 등에 따라 다르게 나타나고 있다. 클락슨(Clarkson)의 자료에 따른 선박을 기준으로 10%의 연료소비율 향상은 대형선박의 경우 적당 수백만 달러의 연료비 절감을 가져오는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 3-4에 따르면 연료소모량이 큰 대형 컨테이너선(7,500 TEU)의 경우 10% 연료절감액은 연료유 가격이 톤당 300달러인 경우 1,770,000달러로 산출되었음을 알 수 있다. 연료유 가격이 700달러인 경우 연 4,130,000달러를 절감함을 알 수 있고, 동 가격에서 중소형 선박(MR, Medium Range) 탱커와 수프라막스(Supramax) 벌크선의 연간 절감액은 약 600,000달러 내외에 그침을 알 수 있다.

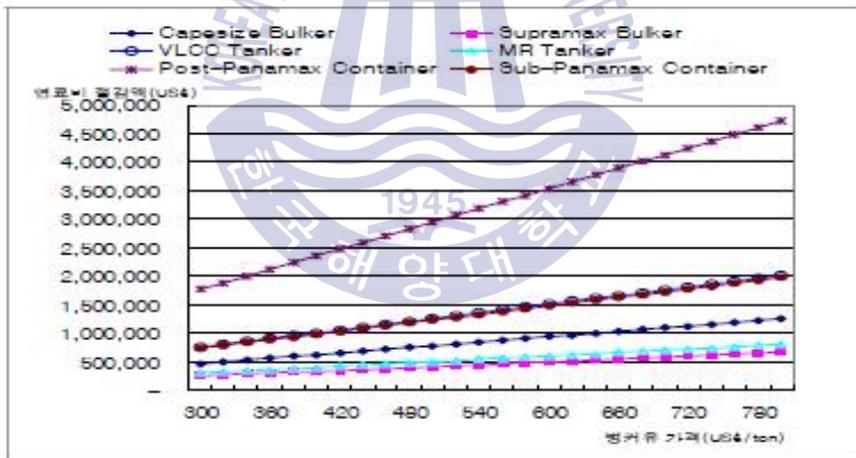


Fig. 3-4 Annual fuel saving per year^[42]

이와 같이 최적화된 운항 등으로 선박의 연료소비율 향상시키는 것은 조선 해운 시황에 매우 중요한 사안이고 이는 표본 선박의 운항 패턴분석을 통해서도 알 수 있다.

Table 3-2에 따른 데이터를 기초로 살펴보면 일일 연료소모량은 컨테이너선 > 탱커 > 벌크선 순으로 나타남을 알 수 있다. 그러나 이 데이터는 저속운항 이전 데이터를 사용하고 있어 실제보다 연료 소모량이 과도하게 표시되고 있다.

Table 3-2 Specification of standard vessel, Clarkson^[42]

Kind of vessel	Type	DWT or TEU	Average speed(kts)	Average fuel oil consumptions (ton/day)
Bulk	Capesize	172,000	14.75	56
	Supramax	52,454	14.25	30
Tanker	VLCC	300,00	14.5	90
	MR	47,000	14.5	36
Container	post-panamax	7,500	24.2	210.6
	Sub-panamax	2,500	22.1	88.2

본 장에서는 선박에서 매 월 작성하는 항해요약일지(Abstract log)의 자료를 바탕으로 실제 저속운항에 따른 표본 선박의 평균 속력과 북아메리카 서부해역, 중국 및 홍콩 등 배출규제해역(항만)을 운항함에 따른 연료소모량 등을 분석하였다.

3.3.1 선박 A호의 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석

Table 3-3은 표본 모델 선박 A호의 3항차(EAST & WEST BOUND) 운항기록을 바탕으로 작성하였다.

실제 A호의 경우 항차별 평균속력(SEA VOYAGE)은 16.5 노트~18.8 노트로 운항하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 중유의 경우 항차 당 1316.1 M/T~1675.4 M/T을 소모하고, 저유황유는 129.6 M/T~265.6 M/T을 소모하고 있음을 알 수 있다. 또한 2016년 4월 1일 이후 중국의 상하이 등 장강 삼각주(Yangtze River Delta) 핵심항구들에 접안하는 모든 선박들은 접안기간동안 0.5% 이하의 황함유량을 만족하는 연료유를 사용하도록 함에 따라 부두 접안 중 사용된 저유황유의 소모량은 52E 항차의 경우 지난 항차 대비 2배 이상 증가하였음을 알 수 있다.

Table 3-3 Sailing table of A vessel

		50E(HKKG-USTIW)	51E(HKKG-USTIW)	52E(HKKG-USTIW)
PERIOD		'16.1.30.~'16.2.19.	'16.3.11.~'16.3.30.	'16.4.22.~'16.5.12.
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 08H 54M	1D 13H 00M	1D 07H 30M
	SEA	14D 06H 18M	12D 22H 12M	13D 13H 48M
	TOTAL	15D 15H 12M	14D 11H 12M	14D 21H 18M
DISTANCE	HARBOUR	345	365	351
	SEA	5923	5833	5872
	TOTAL	6268	6198	6223
AVG. SPEED(SEA VOYAGE)		17.3	18.8	18.0
HFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	1575.9	1386.8	1249.1
	HARBOUR VOY	59.8	67.3	51.4
	IN PORT	39.7	40.6	15.6
	TOTAL	1675.4	1494.7	1316.1
LSFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	106.9	97.1	95.4
	HARBOUR VOY	20.6	24.3	22.7
	IN PORT	5.0	8.2	17.2
	TOTAL	132.5	129.6	135.3
		50W(USTIW-HKKG)	51W(USTIW-HKKG)	52W(USTIW-HKKG)
PERIOD		'16.2.18.~'16.3.12.	'16.3.29.~'16.4.23.	'16.5.10.~'16.6.4.
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 09H 30M	1D 16H 54M	1D 15H 18M
	SEA	14D 02H 24M	15D 06H 42M	15D 17H 24M
	TOTAL	15D 11H 54M	16D 23H 36M	17D 08H 42M
DISTANCE	HARBOUR	392	437	408
	SEA	6218	6200	6214
	TOTAL	6610	6637	6622
AVG. SPEED(SEA VOYAGE)		18.4	16.9	16.5
HFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	1548.5	1401.8	1373.5
	HARBOUR VOY	36.0	40.2	33.3
	IN PORT	16.8	14.0	14.0
	TOTAL	1574.3	1441.0	1393.8
LSFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	116.3	102.6	84.5
	HARBOUR VOY	65.2	73.0	79.1
	IN PORT	57.1	69.4	63.2
	TOTAL	265.6	260.0	253.8

Fig. 3-5 및 Fig. 3-6은 동향차 및 서향차(EAST and WEST BOUND)별 중유와 저유황유의 소모량을 비교하였다. 동향차에서는 대부분의 저유황유를 미국 타코마항에 입항하기 위해 북아메리카 서부해역을 통과하면서 사용하였고, 서향차 또한 미국 시애틀, 캐나다 밴쿠버 및 배출규제해역을 벗어나면서 저유황유를 사용하였고, 서향차 시 사용한 저유황유는 동향차 시 소모량보다 약 2배 이상 많음을 알 수 있다.

연간 총 3,500 M/T~3,600 M/T 정도의 저유황유를 소모하고 있다.

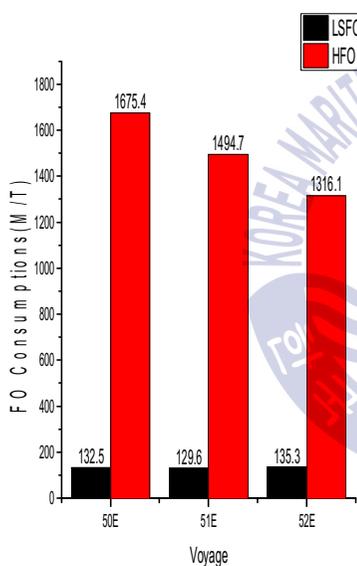


Fig. 3-5 Fuel oil consumptions of east bound for A vessel

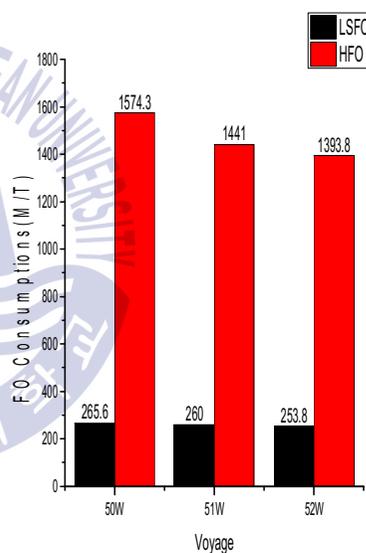


Fig. 3-6 Fuel oil consumptions of west bound for A vessel

Table 3-4는 표본 선박 A호의 평균속력과 배출규제해역 및 그 외 지역 운항시간에 따른 평균 연료소모량을 계산하여 비교하였다. 중유의 경우 하루에 약 80.92 M/T~102.92 M/T이 소모됨을 알 수 있다.

Table 3-4 Average speed and fuel oil consumptions

Voyage	Average speed(knots, Sea voyage)	Average fuel oil consumptions (ton/day)	
		H.F.O.	L.S.F.O.
50E	17.3	96.96	61.87
51E	18.8	93.47	53.91
52E	18.0	89.00	40.94
50W	18.4	102.92	42.50
51W	16.9	86.73	35.66
52W	16.5	80.92	36.92

3.3.2 선박 B호의 연료소모량 및 운항 자료 등의 분석

Table 3-5는 표본 선박 B호의 3항차(EAST & WEST BOUND) 운항기록을 바탕으로 작성하였다. 실제 B호의 경우 항차별 평균속력은 16.4 노트~18.1 노트로 운항하는 것을 알 수 있다.

또한 중유의 경우 1285.0 M/T~1507.2 M/T을 소모하고, 저유황유는 122.9 M/T~289.2 M/T을 소모하고 있음을 알 수 있다.

Table 3-5 Sailing table of B vessel

		48E(HKKG-USTIW)	49E(HKKG-USTIW)	50E(HKKG-USTIW)
PERIOD		'16.2.19.~'16.3.10.	'16.4.1.~'16.4.21.	'16.5.13.~'16.6.2.
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 05H 36M	0D 19H 18M	1D 06H 48M
	SEA	14D 10H 18M	13D 21H 18M	13D 22H 18M
	TOTAL	15D 15H 54M	14D 16H 36M	15D 05H 06M
DISTANCE	HARBOUR	282	213	278
	SEA	5958	5968	6042
	TOTAL	6240	6181	6320
AVG. SPEED(SEA VOYAGE)		17.2	17.9	18.1
HFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	1418.4	1401.0	1407.8
	HARBOUR VOY	45.3	27.1	48.0
	IN PORT	26.3	34.9	16.7
	TOTAL	1490.0	1463.0	1472.5
LSFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	132.6	86.2	106.5
	HARBOUR VOY	21.9	21.8	21.3
	IN PORT	8.2	14.9	14.0
	TOTAL	162.7	122.9	141.8
		48W(USTIW-HKKG)	49W(USTIW-HKKG)	50W(USTIW-HKKG)
PERIOD		'16.3.8.~'16.4.2.	16.4.19.~'16.5.14.	'16.5.31.~'16.6.25.
VOYAGE TOTAL HOURS	HARBOUR	1D 08H 18M	1D 10H 48M	1D 10H 06M
	SEA	15D 13H 30M	15D 20H 00M	15D 17H 54M
	TOTAL	16D 21H 48M	17D 06H 48M	17D 04H 00M
DISTANCE	HARBOUR	381	383	418
	SEA	6256	6257	6216
	TOTAL	6637	6640	6634
AVG. SPEED(SEA VOYAGE)		16.7	16.5	16.4
HFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	1450.0	1359.1	1240.1
	HARBOUR VOY	35.4	31.2	32.2
	IN PORT	21.8	15.1	12.7
	TOTAL	1507.2	1405.4	1285.0
LSFO CONSUMPTIONS (M/T)	SEA VOY	177.4	169.9	101.7
	HARBOUR VOY	63.8	59.3	68.7
	IN PORT	48.0	58.7	51.8
	TOTAL	289.2	287.9	222.2

Fig. 3-7과 Fig. 3-8은 동항차 및 서항차별 중유와 저유황유의 소모량을 비교하였다. 동항차의 경우에는 중유의 소모량이 저유황유의 약 9배~11배 이상 많았고, 서항차에서는 중유의 소모량이 저유황유보다 약 5배~6배 많았다.

연간 총 3,200 M/T~4,000 M/T 정도의 저유황유를 소모하고 있음을 알 수 있다.

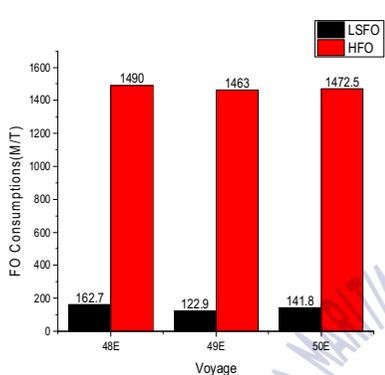


Fig. 3-7 Fuel oil consumptions of east bound for B vessel

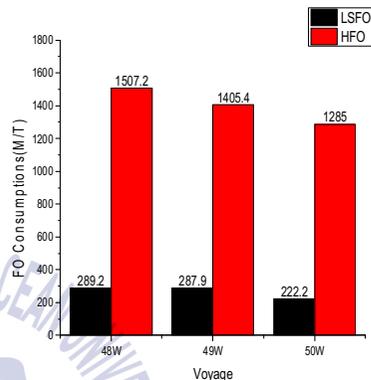


Fig. 3-8 Fuel oil consumptions of west bound for B vessel

Table 3-6은 표본 선박 B호의 평균속력과 배출규제해역 및 그 외 지역 운항 시간에 따른 평균 연료소모량을 계산하여 비교하였다.

중유의 경우 하루에 약 76.70 M/T~100.49 M/T이 소모됨을 알 수 있다.

Table 3-6 Average speed and fuel oil consumptions

Voyage	Average speed(knots, Sea voyage)	Average fuel oil consumptions (ton/day)	
		H.F.O.	L.S.F.O.
48E	17.2	91.09	67.79
49E	17.9	100.49	31.92
50E	18.1	97.09	44.37
48W	16.7	89.32	45.66
49W	16.5	84.24	41.62
50W	16.4	76.70	32.13

제 4 장 배출규제해역 운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 용량 고찰

4.1 개요

이 장에서는 앞서 분석대상인 표본 선박이 북아메리카 서부해역을 운항함에 따른 선박 기관부하를 분석하고 이를 패턴화 하였다. SCR의 설치 용량을 산출하기 위해 도출된 기관부하결과를 바탕으로 MDT사의 CEAS 프로그램^[43]을 활용하였고, 운항 패턴에 따른 배기가스 후처리 장치 설계기준의 차이를 비교 및 분석하였다. Table 4-1은 표본 선박의 주기관 사양이다.

Table 4-1 Main engine specification

Vessel A & B	
MODEL	HYUNDAI-SULZER 14RTFLEX 96C-B
TYPE	TWO STROKE SINGLE ACTING, CROSSHEAD
NO.OF CYLINDER	FOURTEEN(14)
CYL.BORE * STROKE	960 * 2,500 mm
OUTPUT(bhp)	MCR 108,920 / NCR 98,030
REVOLUTION(rpm)	MCR 102 / NCR 98.5
MEAN EFF.PRESS.(bar)	MCR 18.6 / NCR 17.3
MEAN PISTON SPEED(m/s)	MCR 8.5
ROTATION	CLOCKWISE VIEWED FROM FLYWHEEL SIDE
STARTING METHOD	COMPRESSED AIR(30 kg/cm ²)
EXH.GAS Q'TY * TEMP	627379 kg/h * 285 °C
TURBO-CHARGER	MET83SE II * 4 SETS
F.O. CONSUMPTION	128.0(gr/ps-h) + 5% AT MCR USING M.D.O. OF 10,200 kcal/kg IN L.C.V.
L.O. CONSUMPTION	SYSTEM 12 kg/CYL:24H CYL.OIL 0.9~1.3 g/kW·h
DIMENSION(L * W * H)	27,413 * 10,660 * 13,519 mm

4.2 배출규제해역 운항패턴 분석

표본 선박은 NOx TIER III 적용 해역을 운항함에 따라 신조선의 경우 질소산화물 저감을 위해 SCR 등 배출가스 저감 장치가 필요하다. 이를 위해서는 배출규제해역에서의 운항시간과 그 운항시간에 따른 선박 기관 부하값을 정형화할 필요가 있다. 이에 선박의 Ship Performance Daily Report를 활용하여 배출규제해역 운항에 따른 선박기관 부하변동 추이를 분석하고 항해요약일지(Abstract Log)의 운항일수 등을 고려하여 Harbour & Sea Voyage 운항시간을 산정하고자 한다. 이 과정을 통해 부하별 운전시간을 정형화한다.

본 논문에 사용된 운항자료를 제공한 선사에서는 표본 선박 및 동일 항로를 운항하는 동종 타 선박의 경우도 배출규제해역을 항해 할 때 인도된 후부터 지금까지 계속하여 저속 운항 하고 있고, 전속(Full speed)으로 운항한 이력이 없다.

4.2.1 선박 A호의 운항패턴 분석

Table 4-2에 따라 표본 선박 A호의 경우 NECA 지역 운항시간이 189시간~215시간으로 이 중 미국의 타코마항, 시애틀항 및 캐나다 밴쿠버 항에서의 정박시간을 각각 제외하면 실제 항해시간(Sailing time)은 74시간~76시간임을 알 수 있다. 이를 바탕으로 1년 동안 항해시간은 약 666시간~684시간이 될 것이다.

Table 4-2 NECA Sailing table of A vessel

	Voy 50	Voy 51	Voy 52
NECA operating time(Hour)	189	215	204
NECA in port time(Hour)	114	139	130
NECA Sailing time(Hour)	75	76	74
Annual NECA Sailing time(Hour)	675	684	666

Fig. 4-1, Fig. 4-2, Fig. 4-3은 위의 Table 4-2의 항차별 NECA 항해시간에 따른 선박 A호의 기관부하에 따른 운항패턴을 도식화 하였다.

북아메리카 해역을 진입하기 전에 중유에서 저유황유로 연료유를 전환 할 때 약 21,500 kW~26,500 kW로 운전하면서 연료유 전환을 진행하고 있고 이는 MCR 대비 약 26.8%~33.1%에 해당된다. 미국 타코마항에 입항하기 전 기관부하를 증가시킨 후, 입항 시점에 부하를 낮추어 타코마항에 입항함을 알 수 있다. 이는 부두 입항시간을 맞추기 위해 입항 전 기관부하를 잠깐 상승시켰으리라고 본다.

캐나다 밴쿠버항을 출항한 뒤 NECA 지역을 통과하고 연료유 전환을 완료 할 때까지도 NECA 지역을 진입할 때와 마찬가지로 약 26.8%~31.2%의 저부하로 운전하고 있음을 알 수 있다.

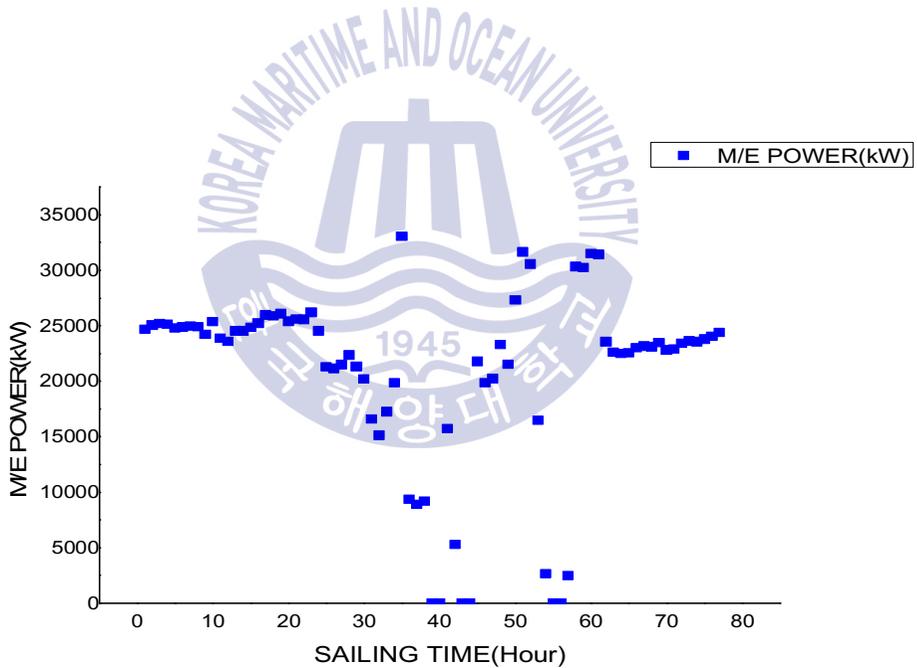


Fig. 4-1 M/E Power according to sailing time(VOY 50)

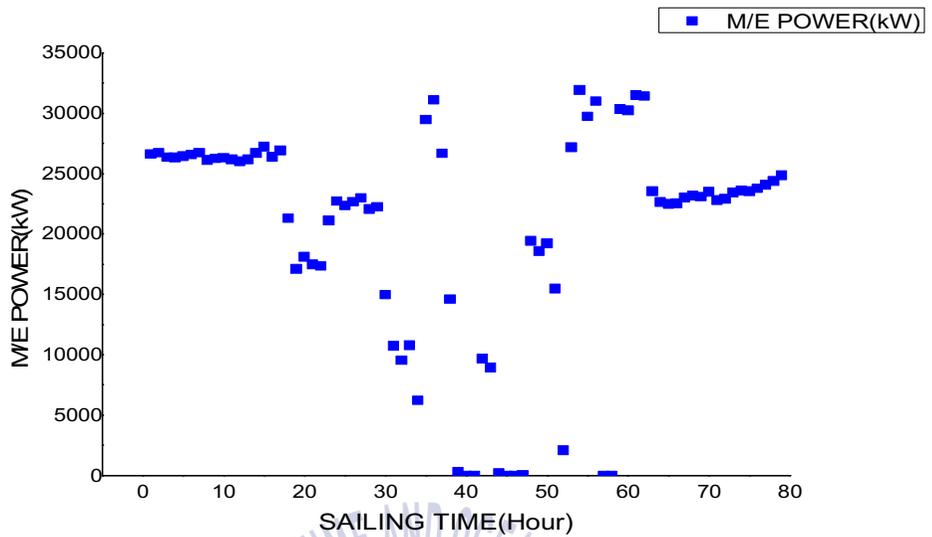


Fig. 4-2 M/E Power according to sailing time(VOY 51)

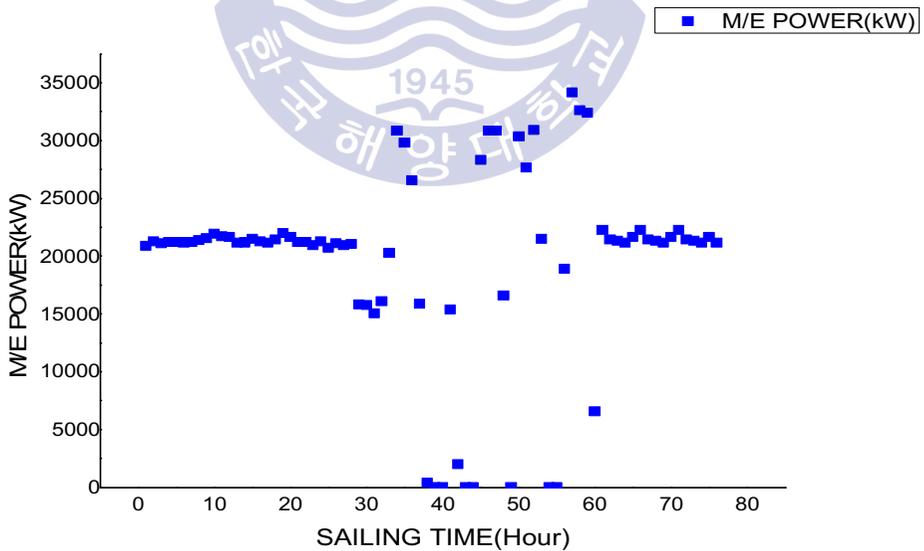


Fig. 4-3 M/E Power according to sailing time(VOY 52)

선박 A호의 NECA 운항 형태를 패턴화하기 위해 식(4.1)과 같이 구간별 운항 시간에 따른 주기관 평균 부하를 산정하였다. 현 미주항로의 경우 미국 타코마항, 미국 시애틀항, 캐나다 밴쿠버항에 입·출항 하기에 NECA 해역 진입에 따른 연료유 전환 시점을 기준으로 하여 미국 타코마항 접안까지 기관부하 분석, 미국 타코마항에서 미국 시애틀항까지 기관부하 분석, 미국 시애틀항에서 캐나다 밴쿠버항까지 기관부하 분석 및 캐나다 밴쿠버항을 출항하여 NECA 해역을 벗어나서 연료유 전환 완료시점까지 총 4가지 구간으로 분류하여 각각의 경우에 따른 기관부하의 변동추이를 분석하였다.

$$\frac{\int_a^b f(x)dx}{\text{sailing time}(h)} * \frac{100}{SMCR(kW)} \quad (4.1)$$

Table 4-3는 표본 선박 A호의 항차별 NECA 해역 운항에 따른 기관부하를 분석하여 이를 패턴화 하였다. 연간 NECA 항해시간은 한 항차(EAST & WEST BOUND)를 합한 운항일수를 고려하여 연간 9항차를 운항한다고 가정하였다.

50항차의 경우 대부분 24%~28% MCR로 운항하였고, 미국 타코마항에서 시애틀항까지 9% MCR로 운항하였음을 알 수 있다. 또한 NECA 해역 운항기간 동안 최대 기관 부하는 33,070 kW, 41% MCR로 운항하였다.

51항차의 경우도 대부분 22%~29% MCR로 운항하였고, 미국 타코마항에서 시애틀항까지 8% MCR로 운항하였음을 알 수 있다. 이는 51항차의 NECA 항해시간(76시간, 정박시간은 제외)의 4%에 불과하다. 또한 NECA 해역 운항기간 동안 최대 기관부하는 31,920 kW, 40% MCR로 운항하였다.

52항차는 NECA 항해 시간이 74시간이고 그 중 NECA 입역에 따른 연료유 전환 시점부터 미국 타코마항 접안까지 시간이 52%를 차지하였다. 이는 50항차 및 51항차도 마찬가지였다. 52항차도 마찬가지로 대부분 25%~27% MCR로 운항하였고 일부 미국 타코마항에서 시애틀항까지 운항하는데 7% MCR로 운항하였다.

50항차~52항차의 기관부하 분석 자료를 보면 최대 기관부하를 40%~43% MCR로 하여 운항하긴 하나, 이는 일시적으로 도착예정시간에 맞추기 위해 부하를 상승한 것으로 사료되며 평균적으로 NECA 운항에 따른 기관 부하는 22%~29% MCR 임을 알 수 있다.

이는 항차별 NECA 항해시간의 약 96%~97%에 해당된다.

Table 4-3 Sailing profile of A vessel

		Voy 50	Voy 51	Voy 52
Annual NECA Sailing time(Hour)		675	684	666
NECA Sailing profile	~USTIW	27% MCR (52% Time/ 351h)	26% MCR (52% Time/ 360h)	25% MCR (52% Time/ 351h)
	USTIW~USSEA	9% MCR (3% Time/ 27h)	8% MCR (4% Time/ 27h)	7% MCR (4% Time/ 27h)
	USSEA~CAVAN	24% MCR (13% Time/ 99h)	22% MCR (13% Time/ 99h)	27% MCR (14% Time/ 90h)
	CAVAN~	28% MCR (30% Time/ 198h)	29% MCR (29% Time/ 198h)	26% MCR (30% Time/ 198h)
Maximum engine Load (kW, %)		33,070(41%)	31,920(40%)	34,170(43%)

4.2.2 선박 B호의 운항패턴 분석

Table 4-4에 따라 표본 선박 B호의 경우 NECA운항시간이 191시간~205시간으로 이 중 미국의 타코마항, 시애틀항 및 캐나다 밴쿠버 항에서의 정박시간을 각각 제외하면 실제 항해시간은 76시간~77시간임을 알 수 있다. 이를 바탕으로 1년 동안 항해시간은 약 684시간~693시간이 될 것이다.

Table 4-4 NECA Sailing Table of B vessel

	Voy 48	Voy 49	Voy 50
NECA operating time(Hour)	191	204	205
NECA in port time(Hour)	115	127	129
NECA Sailing time(Hour)	76	77	76
Annual NECA Sailing time(Hour)	684	693	684

Fig. 4-4, Fig. 4-5, Fig. 4-6은 위의 Table 4-4의 항차별 NECA 항해시간에 따른 선박 B호의 기관부하를 도식화 하였다. 선박 B호의 경우 선박 A호처럼 북아메리카 해역을 진입하기 전에 중유에서 저유황유로 연료유를 전환할 때의 경우 약 25,000 kW~30,000 kW로 운전하면서 연료유 전환을 진행하고 있고 이는 MCR 대비 약 31.2%~37.4%에 해당된다. 그 후 선박 A호 마찬가지로 미국 타코마 항에 입항하기 전에 기관부하가 증가하였다가 입항 시점에 다가가면 부하를 낮추어 미국 타코마 항에 입항함을 알 수 있다.

캐나다 밴쿠버항을 출항 한 뒤 NECA 지역을 통과하고 연료유 전환을 완료할 때까지도 NECA 지역을 진입 할 때와 마찬가지로 약 27.5%~31.2%의 저부하로 운전하고 있음을 알 수 있다.

다만 48항차의 경우 NECA 입역에 따른 연료유 전환 시작 시점부터 9시간 동안은 약 10,000 kW, 12.5% MCR의 부하로 운전하였고 캐나다 밴쿠버항을 출항 해서도 약 3,000 kW, 3.7% MCR로 운전을 하여 선박 A호 및 선박 B호의 타 항차와는 다른 운항 패턴을 보였다.

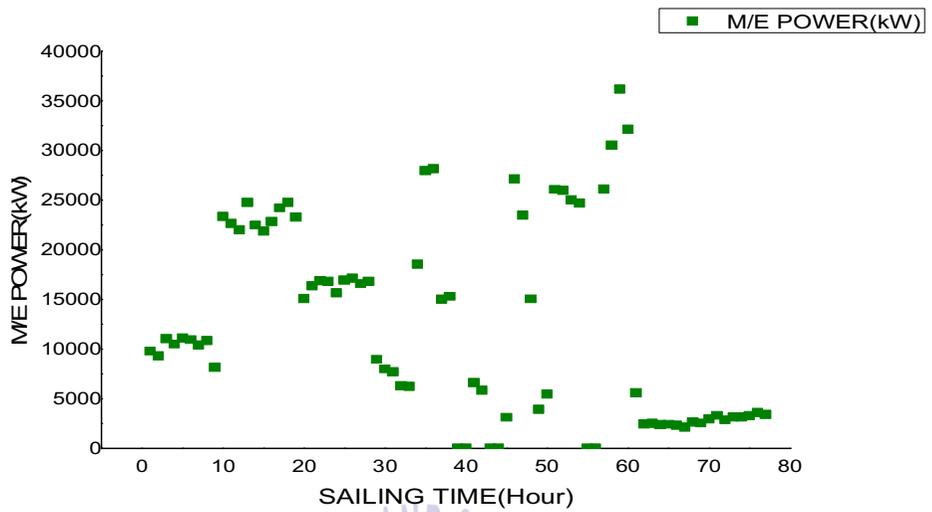


Fig. 4-4 M/E Power according to sailing time(VOY 48)

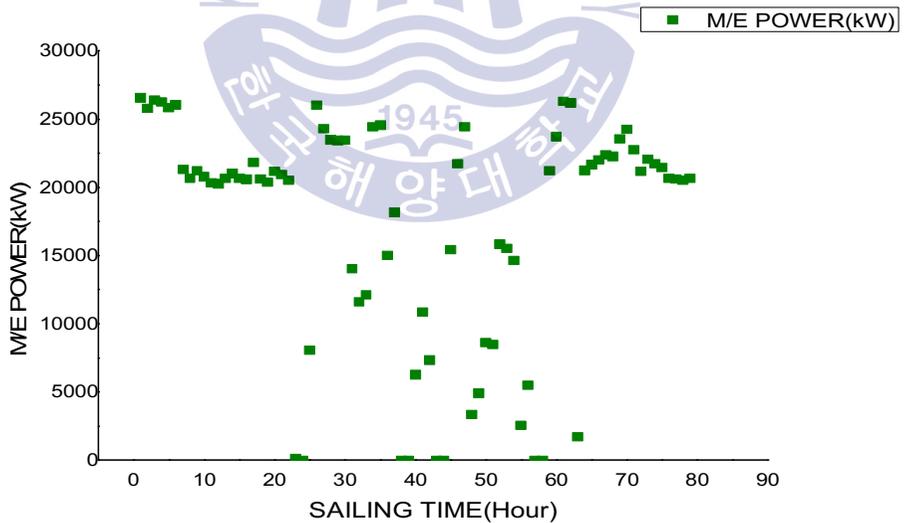


Fig. 4-5 M/E Power according to sailing time(VOY 49)

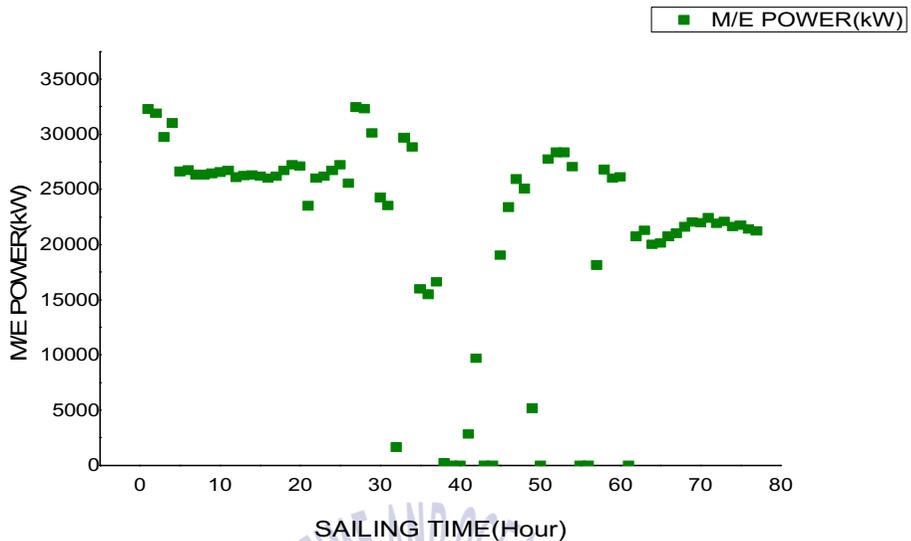


Fig. 4-6 M/E Power according to sailing time(VOY 50)

Table 4-5는 표본 선박 B호의 항차별 NECA 해역 운항에 따른 기관 부하를 분석하여 이를 패턴화 하였다. 또한 NECA 해역 진입에 따른 연료유 전환 시점을 기준으로 하여 미국 타코마항 접안까지 기관부하 분석, 미국 타코마항에서 미국 시애틀항까지 기관부하 분석, 미국 시애틀항에서 캐나다 밴쿠버항까지 기관부하 분석 및 캐나다 밴쿠버항을 출항하여 NECA 해역을 벗어나서 연료유 전환 완료시점까지 총 4가지 구간으로 분류하여 각각의 경우에 따른 기관부하의 변동 추이를 분석하였고 선박 A호와 마찬가지로 식(4.1)에 의거하여 산출하였다.

48항차의 경우 앞서 언급했듯이 선박 A호 및 선박 B호의 타 항차와는 다른 운항 패턴을 보였기에 대부분 평균 20% MCR 이하로 운항하였고, 미국 타코마항에서 시애틀항까지는 4% MCR로 운항하였음을 알 수 있다. 그러나 일시적으로 캐나다 밴쿠버항을 출항하고 기관 부하를 36,200 kW, 45% MCR로 운항한 기록이 있다.

49항차의 경우 NECA 항해시간의 78%를 24%~25% MCR로 운항하였고, 미국 타코마항에서 시애틀항까지 8% MCR, 미국 시애틀항에서 캐나다 밴쿠버항까지

14% MCR로 운항하였음을 알 수 있다. 49항차는 선박 A호 및 선박 B호의 타항차와는 달리 NECA 항해시간 중 일시적으로 기관부하를 약 40% 이상 상승시킨 적이 없어 최대 기관 부하는 26,560 kW, 33% MCR에 불과했다. 50항차도 타항차와 마찬가지로 NECA 항해시간의 96%를 24%~30% MCR로 운항하였고 일부 4% MCR로 미국 타코마항에서 시애틀까지 운항하였다. 또한 최대 기관부하는 32,460 kW, 41% MCR 이었다.

48항차~50항차의 기관부하 분석 자료를 보면 최대 기관부하를 41%~45% MCR로 하여 운항한 기록이 있으나, 이는 일시적이었고 평균적으로 NECA 운항에 따른 기관부하는 24%~30% MCR 임을 알 수 있다. 또한 이는 항차별 NECA 항해시간의 약 95%에 해당된다.

Table 4-5 Sailing profile of B vessel

		Voy 48	Voy 49	Voy 50
Annual NECA Sailing time(Hour)		684	693	684
NECA Sailing profile	~USTIW	20% MCR (51% Time/ 351h)	24% MCR (49% Time/ 342h)	30% MCR (51% Time/ 351h)
	USTIW~USSEA	4% MCR (5% Time/ 36h)	8% MCR (5% Time/ 36h)	4% MCR (5% Time/ 36h)
	USSEA~CAVAN	20% MCR (13% Time/ 99h)	14% MCR (17% Time/ 117h)	24% MCR (13% Time/ 99h)
	CAVAN~	10% MCR (29% Time/ 198h)	25% MCR (29% Time/ 198h)	24% MCR (29% Time/ 198h)
Maximum engine Load (kW, %)		36,200(45%)	26,560(33%)	32,460(41%)

4.3 운항패턴 분석을 통한 배기가스 후처리 장치 용량 산출 및 비교

앞서 4.2에서는 표본 선박의 NECA 운항에 따른 운항 형태를 패턴화 하였다.

4.3에서는 MDT사의 CEAS 프로그램을 활용하여 실제 운항선의 운항 패턴을 바탕으로 배기가스 후처리 장치 중 SCR의 설치 용량을 산출해 보고, 운항 패턴에 따라 용량의 차이를 비교 및 분석하였다.

현재 공식적으로 배기가스 후처리 장치의 용량을 산출할 수 있는 프로그램은 MDT 사의 CEAS 프로그램이 있어 이를 활용하였고, CEAS 프로그램의 경우 MDT 사의 주기관 사양을 입력해야 하기에 표본 선박(HYUNDAI-SULZER)과 유사한 출력의 기관을 선택하여 SCR의 요소수 탱크 용량을 산출하고자 한다.

또한 대형 컨테이너선의 경우 주기관 크기 및 과급기 개수 등을 고려하여 SCR 중 LP SCR을 탑재한다고 가정하여 그 용량을 비교 및 분석하였다.

Table 4-6은 배기가스 후처리 장치 중 하나인 SCR의 설계 과정에 고려하는 사항 등을 나타내었다. 여기에서는 NOx TIER III 해당 해역의 운항 시간을 연간 600시간으로 고려하였고 이 해역의 기관부하에 따른 운항시간을 각각 25% MCR 일때 30% TIME¹⁾, 50% MCR 일때 30% TIME, 75% MCR 일 때 30% TIME 및 100% MCR 일 때 10% TIME 으로 가정하여 SCR 환원제의 탱크 용량을 산출하였다. 환원제로는 Urea 40%, 탱크 마진(Tank Margin)은 33%를 주었다^[44].

1) TIME : 항차점유시간

Table 4-6 Calculation of SCR data^[44]

	Specification
Ship	Bulk carrier
Size	182,000 DWT
Engine	6G70ME-C9.5
Power, SMCR	16,440 kW
Engine speed	83.0 rpm
SCR System	HP LS SCR
NECA Fuel Sulphur content%	0.1% S
Reducing agent	Urea 40%
Tank margin	33%
Bunker frequency	300 operating hours in NECA
NECA sailing time	600 h/year
NECA sailing profile 25% MCR	30% time/180 h
NECA sailing profile 50% MCR	30% time/180 h
NECA sailing profile 75% MCR	30% time/180 h
NECA sailing profile 100% MCR	10% time/60 h

4.3.1 C 타입 기관의 배기가스 후처리 장치 용량 산출

Table 4-7은 C 타입 기관에 탑재할 SCR의 설계 고려사항을 기입하였다. 12G95ME-C9.5 ENGINE TYPE으로 SMCR은 82,440 kW, NECA 항해시간은 연간 600시간 운항을 기준으로 하여 부하별 · 운항시간별로 구분하였다.

Table 4-7 Assumptions of SCR installation for C type engine

	Specification
Ship	CONTAINER SHIP
Engine	12G95ME-C9.5
Power, SMCR	82,440 kW
Engine speed	80 r/min
SCR System	12G95ME-C9.5 WITH LP SCR & EGB (EGB : Exhaust Gas Bypass)
Turbocharger	MAN TCA88-21(4SETS)
NECA fuel sulphur content%	0.1& S
Reducing agent	Urea 40%
Tank margin	33%
Bunker frequency	300 operating hours in NECA
NECA sailing time	600h/year
NECA sailing profile 25% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 50% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 75% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 100% MCR	10% time / 60h
Ambient condition	ISO*(Scavenge air coolant temperature 25℃, Ambient air temperature 25℃)
Low calorific value of fuel oil	42,700 kJ/kg

Table 4-8, Table 4-9, Table 4-10은 12G95ME-C9.5 ENGINE TYPE에 대하여 Table 4-7의 조건에 따라 LP SCR의 요소수 탱크 용량을 산출한 것이다. 요소수 탱크 용량은 환원제의 소모량, NECA지역의 항해시간 및 운항 패턴과 병커링 시간을 고려하여 산출할 수 있다.

Electric power 의 경우 SCR의 보조시스템의 사용과 연관되어 있다. 환원제와 압축공기를 공급하는 전원, SCR 반응기의 예열을 위해 보조 블로워를 위한 전원 등이 필요하며 이는 SMCR(MW) 당 5 kW가 소모된다고 가정하여 산출하였다^[45].

CEAS 프로그램을 통해 12G95ME-C9.5 with LP SCR & EGB ENGINE TYPE은 Table 4-7에 따른 NECA 운항 패턴에 따르면 대략 73.9 m³의 요소수 탱크가 필요하다는 것 알 수 있다.

Table 4-8 Fuel consumptions and additional SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	50%	75%	100%
SFOC Tier III(g/kW·h)	167.5	160.5	162.6	168.5
SFOC Tier II(g/kW·h)	166.0	159.5	161.6	167.5
El.power(kW)	412.2	412.2	412.2	412.2
Urea(L/h)	430	740	930	1160

Table 4-9 Accumulated SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	50%	75%	100%	Total per hour	Total per year
NECA load profile Time	30%	30%	30%	10%		
El.power(kW)	123.66	123.66	123.66	41.22	412.2	247.32 MWh
Urea(L/h)	129	222	279	116	746	447.6 m ³

Table 4-10 Tank capacity of reducing agent

Item	Parameter	Volume	Margine	Tank size
Urea tank	300 hours	223.8 m ³	33%	73.9 m ³

Table 4-11은 표본 선박의 NECA 지역 운항 패턴을 최대 기관부하, 평균부하 등과 운항시간을 고려하여 표본화 시킨 값이다. 앞서 언급했듯이 미국 타코마항에서 시애틀항까지는 4%~9% MCR로 운항하지만 CEAS 프로그램의 경우 25% MCR 미만에서는 요소수 소모량이 산출되지 않기에 25% MCR 값을 최저값으로 하였다.

Table 4-11 SCR installation for C type engine in consideration of actual sailing profile

	Specification
Bunker frequency	350 operating hours in NECA
NECA Sailing Time	700h/year
NECA sailing profile 25% MCR	5% time / 35h
NECA sailing profile 30% MCR	90% time / 630h
NECA sailing profile 45% MCR	90% time / 35h

Table 4-12, Table 4-13, Table 4-14는 12G95ME-C9.5 ENGINE TYPE에 대하여 Table 4-11 조건에 따라 LP SCR의 요소수 탱크 용량을 산출한 것이다.

12G95ME-C9.5 with LP SCR & EGB ENGINE TYPE은 Table 4-11에 따른 NECA 운항 패턴에 따르면, 즉 현재 NECA 지역을 저속 운항하는 표본 선박의 운항 패턴에 따르면 대략 58.4 m³의 요소수 탱크가 필요하다는 것 알 수 있다.

이는 Table 4-7에 따라 산출된 요소수 탱크 용량(73.9 m³) 대비 20.9%가 감소하였음을 알 수 있다. 미국 타코마항에서 시애틀항까지 4%~9% MCR로 운항한 것을 25% MCR로 적용한 점 등을 고려했을 때 이 감소율은 더 컸으리라고 본다.

Table 4-12 Fuel consumptions and additional SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	30%	45%
SFOC Tier III(g/kW · h)	167.5	166.0	161.7
SFOC Tier II (g/kW · h)	166.0	164.5	160.6
El. power(kW)	412.2	412.2	412.2
Urea(L/h)	430	500	690

Table 4-13 Accumulated SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	30%	45%	Total per hour	Total per year
NECA load profile Time	5%	90%	5%		
El. power(kW)	20.6	370.98	20.61	412.2	288.54 MWh
Urea(L/h)	21.5	450	34.5	506	354.2 m ³

Table 4-14 Tank capacity of reducing agent

Item	Parameter	Volume	Margine	Tank size
Urea tank	350 hours	177.1 m ³	33%	58.4 m ³

4.3.2 D 타입 기관의 배기가스 후처리 장치 용량 산출

Table 4-15는 D 타입 기관의 탑재할 SCR의 설계 고려사항을 나타낸 것이다. 12G90ME-C10.5 ENGINE TYPE으로 SMCR은 74,880 kW, NECA 항해시간 등의 조건은 C 타입 기관 때의 고려사항과 동일하다.

Table 4-15 Assumptions of SCR installation for D type engine

	Specification
Ship	CONTAINER SHIP
Engine	12G90ME-C10.5
Power, SMCR	74,880 kW
Engine speed	84 r/min
SCR System	12G90ME-C10.5 WITH LP SCR & EGB
Turbocharger	MAN TCA77-26(4SETS)
NECA fuel sulphur content%	0.1& S
Reducing agent	Urea 40%
Tank margin	33%
Bunker frequency	300 operating hours in NECA
NECA sailing time	300h/year
NECA sailing profile 25% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 50% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 75% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 100% MCR	10% time / 60h
Ambient condition	ISO(Scavenge air coolant temperature 25℃, Ambient air temperature 25℃)
Low calorific value of fuel oil	42,700 kJ/kg

Table 4-16, Table 4-17, Table 4-18은 12G90ME-C10.5 ENGINE TYPE에 대하여 Table 4-15의 조건에 따라 LP SCR의 요소수 탱크 용량을 산출한 것이다.

12G90ME-C10.5 with LP SCR & EGB ENGINE TYPE은 대략 67.1 m³의 요소수 탱크가 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 4-16 Fuel consumptions and additional SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	50%	75%	100%
SFOC Tier III(g/kW · h)	166.5	159.5	161.6	167.5
SFOC Tier II(g/kW · h)	165	158.5	160.6	166.5
El .power(kW)	374.4	374.4	374.4	374.4
Urea(L/h)	390	680	840	1050

Table 4-17 Accumulated SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	50%	75%	100%	Total per hour	Total per year
NECA load profile Time	30%	30%	30%	10%		
El .power(kW)	112.32	112.32	112.32	37.44	374.4	224.64 MWh
Urea(L/h)	117.0	204.0	252.0	105.0	678.0	406.8 m ³

Table 4-18 Tank capacity of reducing agent

Item	Parameter	Volume	Margine	Tank size
Urea tank	300 hours	203.4 m ³	33%	67.1 m ³

Table 4-19, Table 4-20, Table 4-21은 12G90ME-C10.5 ENGINE TYPE에 대하여 현재 NECA 지역을 운항하는 표본 선박의 운항 패턴에 따른 요소수 탱크 용량을 산출한 것이다.

현재 NECA 지역을 운항하는 표본 선박의 운항 패턴에 따르면 대략 53.7 m³의 요소수 탱크가 필요하다는 것 알 수 있고 이는 Table 4-15에 따라 산출된 요소수 탱크 용량(67.1 m³) 대비 20.0%가 감소하였음을 알 수 있다.

Table 4-19 Fuel consumptions and additional SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	30%	45%
SFOC Tier III(g/kW · h)	166.5	165.0	160.7
SFOC Tier II(g/kW · h)	166.0	164.5	160.6
El. power(kW)	374.4	374.4	374.4
Urea(L/h)	390	460	630

Table 4-20 Accumulated SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	30%	45%	Total per hour	Total per year
NECA load profile Time	5%	90%	5%		
El. power(kW)	18.72	336.96	18.72	374.4	262.08 MWh
Urea(L/h)	19.5	414.0	31.5	465.0	325.5 m ³

Table 4-21 Tank capacity of reducing agent

Item	Parameter	Volume	Margine	Tank size
Urea tank	350 hours	162.8 m ³	33%	53.7 m ³

4.3.3 E 타입 기관의 배기가스 후처리 장치 용량 산출

Table 4-22는 E 타입 기관의 탑재할 SCR의 설계 고려사항을 기입하였다. 12S90ME-C10.5 ENGINE TYPE으로 SMCR은 73,200 kW, NECA 항해시간 등의 조건은 C 타입 기관 때의 고려사항과 동일하다.

Table 4-22 Assumptions of SCR installation for E type engine

	Specification
Ship	CONTAINER SHIP
Engine	12S90ME-C10.5
Power, SMCR	73,200 kW
Engine speed	84 r/min
SCR System	12S90ME-C10.5 WITH LP SCR & EGB
Turbocharger	MAN TCA77-26(4SETS)
NECA fuel sulphur content%	0.1& S
Reducing agent	Urea 40%
Tank margin	33%
Bunker frequency	300 operating hours in NECA
NECA sailing time	300h/year
NECA sailing profile 25% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 50% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 75% MCR	30% time / 180h
NECA sailing profile 100% MCR	10% time / 60h
Ambient condition	ISO(Scavenge air coolant temperature 25℃, Ambient air temperature 25℃)
Low calorific value of fuel oil	42,700 kJ/kg

Table 4-23, Table 4-24, Table 4-25는 12S90ME-C10.5 ENGINE TYPE에 대하여 Table 4-22 조건에 따라 LP SCR의 요소수 탱크 용량을 산출한 것이다.

12S90ME-C10.5 with LP SCR & EGB ENGINE TYPE은 대략 65.4 m³의 요소수 탱크가 필요하다는 것 알 수 있다.

Table 4-23 Fuel consumptions and additional SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	50%	75%	100%
SFOC Tier III(g/kW · h)	167.5	160.5	162.6	168.5
SFOC Tier II(g/kW · h)	166.0	159.5	161.6	167.5
El.power(kW)	366.6	366.6	366.6	366.6
Urea(L/h)	380	660	820	1030

Table 4-24 Accumulated SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	50%	75%	100%	Total per hour	Total per year
NECA load profile Time	30%	30%	30%	10%		
El.power(kW)	109.98	109.98	109.98	36.66	366.6	219.96 MWh
Urea(L/h)	114.0	198.0	246.0	103.0	661.0	396.6 m ³

Table 4-25 Tank capacity of reducing agent

Item	Parameter	Volume	Margine	Tank size
Urea tank	300 hours	198.3 m ³	33%	65.4 m ³

Table 4-26, Table 4-27, Table 4-28은 12S90ME-C10.5 ENGINE TYPE에 대하여 현재 NECA 지역을 운항하는 표본 선박의 운항 패턴에 따른 요소수 탱크 용량을 산출한 것이다.

현재 NECA 지역을 운항하는 표본 선박의 운항 패턴에 따르면 대략 52.5 m³의 요소수 탱크가 필요하다는 것 알 수 있고 이는 Table 4-22에 따라 산출된 요소수 탱크 용량(65.4 m³) 대비 19.8%가 감소하였음을 알 수 있다.

Table 4-26 Fuel consumptions and additional SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	30%	45%
SFOC Tier III(g/kW · h)	167.5	166.0	161.7
SFOC Tier II(g/kW · h)	166.0	164.5	160.6
El.power(kW)	336.6	366.6	366.6
Urea(L/h)	380	450	610

Table 4-27 Accumulated SCR operating values

Engine Load, % MCR	25%	30%	45%	Total per hour	Total per year
NECA load profile Time	5%	90%	5%		
El.power(kW)	18.33	329.94	18.33	366.6	256.62 MWh
Urea(L/h)	19.0	405.0	30.5	454.5	318.2 m ³

Table 4-28 Tank capacity of reducing agent

Item	Parameter	Volume	Margine	Tank size
Urea tank	350 hours	159.1 m ³	33%	52.5 m ³

4.4 요약

이 절에서는 표본 선박 2척을 대상으로 질소산화물 배출규제해역을 진입하고 벗어남에 따른 항해시간을 구간별로 분류하여 구간별 평균 기관부하와 항해시간을 산정하여 NECA 운항 형태를 패턴화 하였다. 선박 A 및 선박 B호의 기관부하 데이터를 취합하여 보면 최대 기관부하를 41%~45% MCR로 하여 운항한 기록이 있으나 이는 일시적으로 입항 항구의 도착시간 등을 맞추기 위함이었다.

평균적으로 NECA 운항에 따른 기관부하는 22%~30% MCR 임을 알 수 있었고, 이는 항차별 NECA 항해시간의 약 95%~97%에 해당하였다. NECA 항해시간 중 나머지 구간은 미국 타코마항에서 시애틀항까지의 운항시간이었고 이는 NECA 항해시간의 약 3%~4%에 불과했고, 또한 평균 4%~9% MCR로 운항하였다. 이를 통해 표본 선박 2척의 경우 NECA 항해시간의 대부분을 22%~30% MCR로 운항함을 알 수 있다.

또한 **Table 4-29**와 같이 실제 운항선의 운항 패턴을 CEAS 프로그램을 활용하여 배기가스 후처리 장치 중 SCR의 요소수 탱크 설치 용량을 산출해 보고, 운항 패턴에 따른 용량의 차이를 비교한 결과 약 20% 가량 설계용량이 감소한다는 것을 알 수 있었다.

Table 4-29 Tank capacity of reducing agent of each engine

		Urea Tank size	Remark
C type engine	Guidance Value	73.9 m ³	20.9% ↓
	Sample vessel A & B	58.4 m ³	
D type engine	Guidance Value	67.1 m ³	20.0% ↓
	Sample vessel A & B	53.7 m ³	
E type engine	Guidance Value	65.4 m ³	19.8% ↓
	Sample vessel A & B	52.5 m ³	

제 5 장 결 론

질소산화물 배출규제해역인 북아메리카 서부해역을 운항하는 표본 선박 2척을 대상으로 선박의 연료소모량과 운항자료를 분석하고, 기관부하 분석을 통한 운항 형태를 패턴(Pattern)화 하였다. 이를 바탕으로 배기가스 후처리 장치의 설계 용량을 산출하고 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 표본 선박의 경우 저속운항 등의 연료절감 및 최적화된 운항 스케줄에 의한 선박운항이 이루어지고 있고 약 16.4 노트 ~ 18.8 노트로 운항하고 있었다.

둘째, 저속운항에 따라 표본 선박의 경우 일일 연료소모량은 중유를 약 76.70 M/T ~ 102.92 M/T 소모하고 있었고, 연간 약 3,200 M/T ~ 4,000 M/T의 저유황 유를 소모하고 있었다.

셋째, 표본 선박의 경우 NECA지역을 운항 할 때 최대 기관부하를 41%~45% MCR로 하여 운항한 기록이 있으나, 평균적으로 22%~30% MCR로 운항하였고, 이는 항차별 NECA 항해시간의 약 95%~97%에 해당하였다.

넷째, 표본 선박의 운항 패턴을 바탕으로 SCR의 요소수 탱크 설계용량을 산출하여 비교한 결과 표본 선박의 운항 패턴(저속 운항)일 경우 약 20% 가량 설계 용량이 감소하였다.

다만, 현재 선박용 경유 등의 비용 및 기술적인 한계로 NECA 지역을 저속으로 운항하고 있으나, 전속(Full speed)으로 항해하는 등 운항 패턴을 달리 할 경우 이에 따른 배기가스 후처리 장치의 설계용량은 재산출 되어야 한다.

참고문헌

- [1] 한국선주협회, 2016, 「2016 해사통계」, p.52, p.70.
- [2] IMO, 2015, 「THIRD IMO GREENHOUSE GAS STUDY 2014」, p.1.
- [3] 손애리, 2009, 「선박기인 대기오염규제에 대한 해운기업의 인식도 및 대응 전략」, 중앙대학교 글로벌인적자원개발대학원 석사학위 논문, p.79.
- [4] Lloyd's Register Marine, 2015, 「Your options for emission compliance」, p.13~16., p.32~36.
- [5] IMO, 2015, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.67~68
- [6] 한국해양수산개발원, 2015, 「LNG 추진선 도입에 따른 항만의 대응전략」, p.100~104.
- [7] 박두열, 황철원, 정창훈, 손장호, 2011, 「활동도를 이용한 2006년도 부산항 선박배출량 산정에 관한 연구」, 한국환경과학회지, 20(5), p.501~610.
- [8] MDT(MAN Diesel & Turbo), 2016, 「Reference List for engines with NOx emission control」, p.1~2.
- [9] 조권희 외 4명, 2016, 「선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측」, p.121, p.143.
- [10] 조권희 외 4명, 2016, 「선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측」, p.123~124.
- [11] 조권희 외 4명, 2016, 「선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측」, p.125~126.
- [12] 조권희 외 4명, 2016, 「선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측」, p.130~132.
- [13] 조권희 외 4명, 2016, 「선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측」, p.133~134.

- [14] 조권희 외 4명, 2016, 「선박용 디젤엔진의 배기저감기술 및 계측」, p.143.
- [15] IMO, 2016, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.21.
- [16] 박진우, 2015, 「SCR 촉매의 셀 밀도에 따른 질소산화물 제거 효율에 관한 실험적 연구」, 경북대학교 석사학위 논문, p.2~7.
- [17] 한국해양수산개발원, 2015, 「LNG 추진선 도입에 따른 항만의 대응전략」, p.11~12.
- [18] Lloyd's Register, 2012, 「LNG-fuelled deep sea shipping-The outlook for LNG bunker and LNG-fuelled newbuild demand up to 2025」, p.6.
- [19] Korean Register, 2016, 「Briefings of IMO Meeting MEPC 70」, p.5.
- [20] Lloyd's Register Marine, 2015, 「Your options for emission compliance」, p.8.
- [21] IMO, 2016, 「[http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx)」, Accessed 7 Nov. 2016.
- [22] 한국해양수산개발원, 2015, 「LNG 추진선 도입에 따른 항만의 대응전략」, p.13~14., p.18
- [23] Lloyd's Register Marine, 2015, 「Your options for emission compliance」, p.9~11.
- [24] Korean Register, 2015, 「0.10% 연료유 황 함유량 규제」, p.12~13.
- [25] Korean Register, 2015, 「0.10% 연료유 황 함유량 규제」, p.9.
- [26] Lloyd's Register Marine, 2015, 「Your options for emission compliance」, p.13~14.
- [27] WIKIPEDIA, 「http://en.wikipedia.org/wiki/Marine_LNG_Engine」, Accessed 7 Nov. 2016.
- [28] 중소기업청, 2013, 「선박에서 배출되는 블랙카본 및 황산화물 저감장치 개발」, 중소기업 R&D 기획지원 사업 최종보고서, p.16.

- [29] 권대회, 2014, 「4행정 디젤기관의 배기가스 측정결과에 따른 IMO Tier III 대응을 위한 연구」, 목포해양대학교 석사학위 논문, p.25.
- [30] IMO, 2015, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.108.
- [31] IMO, 2015, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.109.
- [32] MDT(MAN Diesel & Turbo), 2016, 「Emission Project Guide」, p.47.
- [33] 중소기업청, 2013, 「선박에서 배출되는 블랙카본 및 황산화물 저감장치 개발」, 중소기업 R&D 기획지원 사업 최종보고서, p.17.
- [34] 정문화, 2016, 「가스연료 추진선박용 연료공급시스템의 운전특성에 관한 연구」, 한국해양대학교 석사학위 논문, p.11.
- [35] IMO, 2015, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.122.
- [36] 정문화, 2016, 「가스연료 추진선박용 연료공급시스템의 운전특성에 관한 연구」, 한국해양대학교 석사학위 논문, p.13~14.
- [37] 중소기업청, 2013, 「선박에서 배출되는 블랙카본 및 황산화물 저감장치 개발」, 중소기업 R&D 기획지원 사업 최종보고서, p.24.
- [38] IMO, 2015, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.123~125.
- [39] IMO, 2015, 「STUDY OF EMISSION CONTROL AND ENERGY EFFICIENCY MEASURES FOR SHIP IN THE PORT AREA」, p.114~115., p.118.
- [40] IMO, 2015, 「THIRD IMO GREENHOUSE GAS STUDY 2014」, p.21~22.
- [41] Korean Register, 2012, 「북아메리카 배출규제해역의 발효에 따른 조치 사항」, p.3.
- [42] 한국수출입은행, 2012, 「그린쉽 조선산업의 새로운 도전과 기회」, p.41, p.43.

- [43] MDT(MAN Diesel & Turbo), <http://marine.man.eu/two-stroke/ceas>,
Accessed 21 Nov. 2016.
- [44] MDT(MAN Diesel & Turbo), 2016, 「Emission Project Guide」, p.65.
- [45] MDT(MAN Diesel & Turbo), 2016, 「Emission Project Guide」, p.59, p.63.



감사의 글

학업에 대한 갈망은 대학교 졸업 후 늘 마음속에 간직하고 있었지만 시간이 부족하다는 등의 핑계로 2015년을 시작으로 이제야 석사과정을 마치게 되었습니다.

평일에는 울산에서 부산까지 수업을 듣고, 주말에는 우리 아들 녀석을 사랑하는 아내에게 맡기고 대학원 수업을 수강하러 다녔지만, 항상 열정적으로 강의해 주신 해양플랜트운영학과 교수님이 계셨기에 가족들에겐 미안했지만 대학원으로 오가는 걸음은 늘 즐거웠습니다.

이번 대학원 수업을 통해 국제협약의 개정에 따른 신산업 트렌드를 알고 이에 따른 해운산업계의 현재와 미래에 대해 더욱 구체적으로 알게 되었던 것 같습니다. 그리고 빠르게 변화하는 산업계의 동향을 이해하고 이에 발맞춘 정부의 지원과 제도적 장치 마련이 무엇보다 중요하다는 것을 재차 느끼게 되었습니다.

항상 신설 학과인 해양플랜트운영과의 미래에 대해 함께 고민하고 학생들의 얘기를 들어주신 이명호 학과장님, 언제나 수업 때마다 엔지니어로서 感들을 일깨워 주신 조권희 교수님, 논문 지도에 아낌없는 가르침을 주신 예병덕 교수님, 그리고 산업현장의 해박한 지식강의와 석사학위 논문에 큰 힘이 되어 주시고 늘 격려 해 주신 이강기 지도교수님 등 여러 교수님들의 지도와 격려로 여기까지 오게 된 것에 진심으로 감사드립니다.

그리고 석사 대학원생의 기본지식과 엔지니어인 본인에게 항해사의 직무지식을 이해하기 쉽게 가르쳐 주신, 지금은 아직 저 멀리 미국에 계신 조익순 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

또한 지금은 어느덧 5살이 되어 버린 우리 아들 녀석과 이제 약 3달여 가량 사랑하는 아내 뱃속에 있는 우리 콩콩이, 그리고 일하라 공부하라 외적으로 바쁜 남편을 뒷바라지고 하고 항상 든든한 지원자가 되어 준 사랑하는 아내에게도 너무 감사하고 사랑한다고 전하고 싶습니다.

마지막으로 이번 석사논문에 많은 정보를 제공해 주시고 진심어린 조언을 아끼지 않으셨던 많은 분들께 감사드리며, 다시한번 학업에 대한 뜨거운 열정을 키워주신 교수님들께 진심으로 감사드립니다. 끝.