



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

저압형 SCR 시스템의 NO_x 저감성능에
관한 실험 연구

An Experimental Study on NO_x Reduction Performance
of Low Pressure SCR System



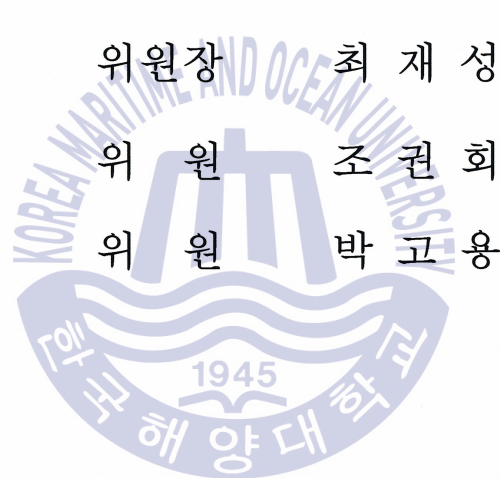
2017年 8月

한국해양대학교 대학원

기관시스템공학과

이 성 우

본 논문을 이성우의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 6월 20일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 방법	3
2. 대기오염물질 배출규제 동향 및 저감 기술	
2.1 대기오염물질의 종류 및 규제 동향	4
2.1.1 대기오염물질의 종류	4
2.1.2 배기배출물의 규제 동향	10
2.2 질소산화물의 생성원리 및 저감 기술	17
2.2.1 디젤기관의 질소산화물 생성원리	17
2.2.2 디젤기관의 질소산화물 저감 기술	23
3. 실험장치 및 실험방법	
3.1 실험엔진 및 동력계	34
3.1.1 실험엔진	34
3.1.2 동력계	37
3.2 SCR 시스템	38
3.2.1 SCR 시스템 설계기준	38
3.2.2 촉매모듈	42
3.2.3 기계장치	43

3.2.4	요소수용액 공급 시스템	47
3.2.5	계측용 센서	48
3.2.6	제어 시스템	50
3.3	가스분석 시스템	52
3.3.1	엔진 배기 후단 가스분석시스템	52
3.3.2	촉매반응기 전단 가스분석시스템	54
3.3.3	촉매반응기 후단 가스분석시스템	56
3.3.4	배출가스 통합모니터링 시스템	58
3.4	실험방법	60
3.4.1	SCR 시스템 구성품 작동실험	61
3.4.2	엔진 부하별 엔진 파라미터 획득실험	63
3.4.3	NO _x 저감성능 및 암모니아 슬립 측정실험	65
4.	실험결과 및 고찰	
4.1	SCR 구성품 작동실험	68
4.2	엔진 부하별 엔진 파라미터 획득실험	71
4.3	NO _x 저감성능 및 암모니아 슬립 측정실험	73
4.3.1	실험엔진 NO _x 배출 특성	78
4.3.2	반응기 입구와 출구 NO _x 농도 비교	79
4.3.3	암모니아 슬립	80
4.3.4	NO _x 저감 성능	81
5.	결론	
	참고 문헌	85
	감사의 글	87

List of Tables

Table 2.1 IMO SO _x emission control standard	14
Table 2.2 EU SO _x emission control standard	14
Table 2.3 CARB SO _x emission control standard	15
Table 2.4 MEPC BC emission control trend	16
Table 2.5 NO _x reduction treatment for marine diesel engine	24
Table 3.1 Specification of engine	35
Table 3.2 Fuel component	35
Table 3.3 Specification of hydraulic dynamometer	37
Table 3.4 Operation performance of 7,860 kW diesel engine	39
Table 3.5 Dosing flow rate calculation of urea for 7,860 kW diesel engine	41
Table 3.6 Specification of exhaust gas analysis system	53
Table 3.7 Specification of the gas analysis system before reactor	55
Table 3.8 Specification of the gas analysis system after reactor(Airwell)	57
Table 3.9 Specification of the gas analysis system after reactor(CLD)	58
Table 3.10 SCR system component operation test plan	62
Table 3.11 Parameter acquisition test plan for each engine load	64
Table 3.12 Test plan of NO _x reduction performance and ammonia slip	66
Table 4.1 Parameter acquisition test result by engine load	71
Table 4.2 Measurement result of NO _x reduction and ammonia slip test	74
Table 4.3 Coefficient u_{gas} for raw exhaust gas	82
Table 4.4 Test cycle for “Propeller-law-operated main and Propeller-law -operated auxiliary engine” application	82

List of Figures

Fig. 2.1 Distribution of diesel PM	8
Fig. 2.2 Typical NOx emission	21
Fig. 2.3 NOx emission status(2 stroke, MAN)	22
Fig. 2.4 NOx emission status(2 stroke, Wartsila)	22
Fig. 2.5 Relative change in SFOC and NOx at 75% load	23
Fig. 2.6 Schematic diagram of EGR system	25
Fig. 2.7 SCR reduction process	27
Fig. 2.8 Required temperatures for SCR related to sulphur content and exhaust gas pressure	29
Fig. 2.9 HP SCR system	30
Fig. 2.10 Layout of a high-pressure SCR system	31
Fig. 2.11 LP SCR system	32
Fig. 2.12 Layout of a low-pressure SCR system	33
Fig. 3.1 Engine performance curve	36
Fig. 3.2 Hydraulic dynamometer	37
Fig. 3.3 Design concept of mixed evaporator tube	38
Fig. 3.4 Technical specification for SCR catalyst	43
Fig. 3.5 Diagram of SCR system	45
Fig. 3.6 Drawings of machinery in SCR System	46
Fig. 3.7 Schematic diagram of urea solution supply system	48
Fig. 3.8 Installation diagram of sensor for control	49
Fig. 3.9 Configuration diagram of control system	51
Fig. 3.10 Installation diagram of exhaust gas analysis system	52
Fig. 3.11 Exhaust gas analysis system	54
Fig. 3.12 Gas analysis system before reactor	55
Fig. 3.13 Gas analysis system after reactor	56
Fig. 3.14 Concept of exhaust gas integrated monitoring device	59
Fig. 3.15 Exhaust gas integrated monitoring device monitor	60

Fig. 3.16 Load variation graph of SCR system component operation experiment	62
Fig. 3.17 Speed change graph of SCR system component operation experiment	63
Fig. 3.18 Load variation graph of Parameter acquisition test by engine load	64
Fig. 3.19 Speed change graph of parameter acquisition test by engine load	65
Fig. 3.20 Load variation graph of NOx reduction and ammonia slip test	66
Fig. 3.21 Speed change graph of NOx reduction and ammonia slip test	67
Fig. 4.1 3-way damper operation test (50%)	68
Fig. 4.2 3-way damper operation test (70%)	69
Fig. 4.3 Integrated monitoring system for 3-way damper operation	69
Fig. 4.4 Graph of engine speed change	70
Fig. 4.5 Graph of temperature change at SCR reactor inlet	70
Fig. 4.6 Graph of engine parameter change by engine load(1)	72
Fig. 4.7 Graph of engine parameter change by engine load(2)	75
Fig. 4.8 Dynamometer control monitor (25% load)	76
Fig. 4.9 Dynamometer control monitor (50% load)	76
Fig. 4.10 Dynamometer control monitor (75% load)	77
Fig. 4.11 Dynamometer control monitor (100% load)	77
Fig. 4.12 Graph of NOx concentration at SCR system reactor inlet	78
Fig. 4.13 Comparative graph of NOx concentration before and after reactor	79
Fig. 4.14 NOx reduction performance graph	80
Fig. 4.15 Ammonia slip graph of SCR system	81

저압형 SCR 시스템의 NOx 저감성능에 관한 실험 연구

이 성 우

한국해양대학교 대학원
기관시스템공학과

요 지

세계 운송시장에서 선박으로 운송되어지는 화물의 비중은 매우 크며 갈수록 증가하고 있다. 선박에 의한 운송은 전 세계 화물 운송량의 약 80%를 차지하면서 탄소배출량은 세계 탄소배출량의 3.3% 정도로 낮은 수준이기 때문에 선박은 타 운송수단과 비교하여 효율적이며 친환경적인 운송수단이라고 할 수 있다.

그러나 선박의 추진기관 및 발전기관으로 주로 사용되는 디젤엔진은 연소과정 중에 유해 배기가스인 질소산화물(NOx)을 다량으로 발생시키는 문제점을 가지고 있다. 이에 따라 국제해사기구(IMO)는 해양오염방지협약(MARPOL 73/78) 부속서 VI에 의해 선박 배기가스에 포함된 질소산화물의 배출 제한을 강화하였다. 이러한 배출 규제 기준을 만족시키기 위하여 현재 선박용 디젤엔진에서는 SCR 시스템이 널리 이용되고 있다.

본 연구에서는 SCR 시스템 중 저압형 SCR 시스템의 시제품을 육상 실험용 엔진에 직접 설치하여 IMO NOx Technical Code에 따라 Tier III 성능을 만족하는지에 대한 실증실험을 실시하였다.

육상엔진 실증실험을 통하여, 해당 저압형 SCR 시스템의 환원제 분사량 제어 상태 및 암모니아 슬립 상태 등을 확인하였으며 최종적으로 해당 저압형 SCR 시스템이 MARPOL 부속서 VI 제13규칙에서 규정하고 있는 Tier III의 NO_x 배출 기준치를 만족하는 NO_x 저감 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

KEY WORDS: 저압형 선택적 환원촉매 장치, 질소산화물,
IMO NO_x Technical Code, Tier III.



An Experimental Study on NO_x Reduction Performance of Low Pressure SCR System

Lee, Sung Woo

Department of Marine System Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

The share of freight transported by ship in the world transport market is very large and freight volume by ship is also increasing. Shipping by ship accounts for about 80% of the world's freight traffic. In addition, carbon emissions from shipping are as low as 3.3% of global carbon emissions. Therefore, ships are an efficient and environmentally friendly means of transportation compared to other modes of transportation.

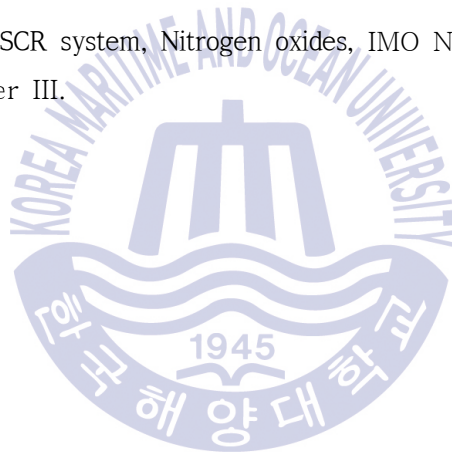
However, the diesel engine, which is mainly used as a propulsion engine and a power generation engine of a ship, has a problem that a large amount of NO_x(Nitrogen Oxide), which is harmful exhaust gas, is generated.

According to Annex VI of Maritime Pollution Prevention Convention(MARPOL 73/78), the IMO Tier III standard, which tightened the emission limits of nitrogen oxides contained in ship exhaust gases, was applied when ships built after 2016 navigate the NECA(NO_x Emission Control Area) since 2010. The SCR system is widely used to satisfy these emission control standards

In this study, the experimental equipment of SCR system was installed, which is widely used as the nitrogen oxides abatement system and the demonstration experiment was conducted to see if it meets the Tier III performance according to the IMO NO_x Technical Code.

The performance of the SCR system was verified through NO_x abatement performance test and ammonia slip test for each load variation and it was confirmed that the performance of the low pressure type SCR system satisfies the emission standard of Tier III as stipulated in Regulation 13 of MARPOL Annex VI.

KEY WORDS: LP SCR system, Nitrogen oxides, IMO NO_x Technical Code, Tier III.



제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

세계 운송시장에서 선박으로 운송되어지는 화물의 양은 다른 어떤 운송 수단보다 크며 선박량 또한 갈수록 증가하고 있다. 전 세계 선박량은 2005년 921,400,000 DWT에서 2015년 기준 1,746,400,000 DWT로 약 1.9배 가량 증가하였고, 물동량은 2005년 7,641,000,000톤에서 2015년 기준으로 10,718,000,000톤으로 약 1.4배 증가하였다^[1]. 선박에 의한 화물 운송량은 전 세계 화물 운송량의 약 80%를 차지하면서 탄소배출량은 세계 탄소배출량의 약 3.3% 정도로 낮은 수준의 탄소를 배출하므로 선박은 타 운송수단과 비교하여 효율적이며 친환경적인 운송수단이다^[2].

그러나 대부분의 선박에서 추진기관 및 발전기관으로 사용되는 디젤엔진은 연소실 내에 불균일한 혼합기를 형성함으로써 연소과정 중에 국부적인 고온영역이 발생하는 연소특성을 가지고 있으며 이와 같은 특성에 따라 유해 배기가스인 질소산화물(NOx, Nitrogen Oxides)을 다량으로 발생시키는 문제점을 가지고 있다.

현재 전 세계적으로 주요 이슈가 되고 있는 환경보호 문제와 관련하여 선박에 대한 탄소배출 규제와 친환경 산업에 대한 요구가 계속되고 있으며, 질소산화물, 황산화물(SOx, Sulphur oxides) 등의 배출가스는 이미 해양오염 방지협약(MARPOL 73/78)이 발효됨에 따라 배출량을 줄여야 하는 상황이다. 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 MARPOL 73/78 부속서 VI의 제13규칙에 의해 선박 배기가스에 포함된 질소산화물의 배출 제한을 강화한 IMO Tier III 기준이 2010년에 발효되어 적용되고 있다. 질소산화물의 경우 2011년 1월 1일 이후 건조된 선박은

Tier II의 배출기준을 만족하도록 강화되었으며, 2016년 이후 건조된 선박이 질소산화물 배출통제해역(NECA, NOx Emission Control Area)을 통항할 경우 Tier I 대비 질소산화물의 배출량을 80% 저감한 Tier III 배출기준을 만족하도록 요구하였다. 2016년 10월 개최된 해양환경보호위원회(MEPC) 70차 회의에서는 발틱해 및 북해지역을 질소산화물 배출규제해역으로 지정하고 2021년 1월 1일부터 요건의 발효일로 정하는 것에 동의하였다.

현재까지 디젤엔진의 주요한 유해 배출물인 NOx의 저감 방법으로 흡입 공기냉각, 연소실 최적화 설계, 선택적 환원촉매(SCR, Selective Catalytic Reduction) 시스템, 배기가스 재순환(EGR, Exhaust Gas Recirculation) 시스템, 연료분사제어 등이 연구되어 왔으며, 최근의 주요 관심사항은 EGR, SCR 등의 배기가스 후처리 기술을 적용하여 엄격한 NOx 배출 기준을 만족시키는 것이다.

현재 선박용 디젤엔진에서 널리 이용되고 있는 SCR 시스템 방식은 EGR 방식에 비하여 연소 압력과 압축비가 높고, 엔진의 열효율을 증가시켜 연비적인 측면에서 우수하다는 장점이 있다. 또한 SCR 시스템은 배기가스에 포함된 질소산화물의 90% 이상을 줄일 수 있는 장치이며, 그 원리는 NOx가 포함된 배기가스에 암모니아(NH₃)를 첨가하여 SCR 장치를 통과시키면 촉매 반응을 일으켜 환경오염과 무관한 질소와 물로 환원시켜 대기로 배출하게 되는 것이다.

본 연구에서는 질소산화물 저감 장치로서 주로 이용되고 있는 SCR 시스템 중 저압형 SCR 시스템의 시제품을 육상의 실험용 엔진에 직접 설치하고 해당 실험장치를 사용하여 IMO NOx Technical Code에 따라 실증실험을 실시하였다. 실험에서 측정된 데이터를 분석하여 각 부하 변동에 따른 NOx 배출 특성 및 NOx 저감 효율을 계산하고, 최종적으로 해당 SCR 시스템이 IMO의 Tier III NOx 배출기준을 만족하는 성능을 나타내는지 확인하는데 본 연구의 목적이 있다.

1.2 연구의 방법

제2장에서는 디젤엔진의 연소에서 발생하는 배기가스에 포함된 대기오염물질의 종류와 그 대기오염물질이 환경 및 인체에 미치는 영향에 대하여 조사하고 대기오염의 심각성 및 배출규제 필요성에 대하여 알아보았다. 또한 각 대기오염물질에 대한 국제적인 배출규제 기준 및 동향에 대하여 조사하였다.

여러 대기오염물질 중 최근 이슈가 되고 있는 NO_x에 초점을 맞추어 질소산화물의 화학적 생성원리와 Tier III의 NO_x 배출기준을 만족시킬 수 있는 NO_x 배출저감 기술현황을 조사하였다.

제3장에서는 실험에 사용된 장치에 대하여 기술하였다. 실험 장치는 크게 실험 엔진과 동력계, SCR 시스템, 가스분석 시스템의 3가지로 구분하였고 각 실험 장치의 구성요소와 제원을 조사하였다. 그리고 실험 장치를 통한 실험방법에 대하여 정리하였다.

제4장에서는 각 부하 변동에 따른 NO_x 배출특성 및 NO_x 저감 효율 측정을 위하여 SCR 구성품 작동 실험, 엔진(engine) 부하별 엔진 파라미터(parameter) 획득실험, NO_x 저감 성능 및 암모니아 슬립측정 실험 등 3가지 실험을 실시하고 그 결과를 고찰하였으며 각 실험에서 계측된 배기가스의 성분을 부하별로 분석하여 SCR 시스템의 NO_x 배출특성 및 NO_x 저감률을 계산하고 그 결과를 통해 실험장치의 성능이 Tier III의 NO_x 배출기준을 만족하는지에 대한 결론을 제5장에서 도출하였다.

제 2 장 대기오염물질 배출규제 동향 및 저감 기술

2.1 대기오염물질의 종류 및 규제 동향

2.1.1 대기오염물질의 종류

디젤엔진에서 연소가 일어나면 공기 중의 산소(O₂)가 연료 속의 탄소(C), 수소(H) 및 유황(S)과 반응하여 이산화탄소(CO₂), 물(H₂O), 아황산가스(SO₂)를 발생 시킨다. 공기 중의 질소(N₂)는 흡입공기 중에 존재하고 있는 수증기나 과잉 산소처럼 냉각제로서 엔진을 통과한다. 이 과정 중 배기가스에 부가적으로 생성되는 대기오염물질은 질소산화물, 탄화수소(HC), 일산화탄소(CO), 그을음(soot) 등이 있다.

이 절에서는 디젤엔진의 연소에서 발생하는 상기의 대기오염물질의 종류 및 해당 대기오염물질이 환경에 미치는 영향에 대하여 기술하였다.

2.1.1.1 일산화탄소(CO)

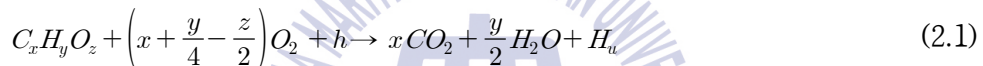
일산화탄소는 무색, 무미, 무취의 가스로 피부나 점막에 대한 자극이 없어 감지가 어려우며 물에 잘 녹지 않고 공기보다 약간 가볍다. 헤모글로빈(Hemoglobin)과의 결합력이 산소에 비해 250배 이상 커서 일산화탄소를 흡입할 경우 체내 산소운반작용을 저해하여 조직의 저산소증을 일으키고 중독 내지는 사망에 이르게 된다. 인지작용과 사고능력 감퇴, 반사작용 저하, 졸음과 협심증 유발, 무의식 및 사망을 유발하기도 한다. 임신 여성에 있어 태아성장 및 조직발달에도 영향을 미친다.

일산화탄소는 탄화수소계 연료의 불완전 연소로 인해 연소의 중간 단계에서 생성되는 화합물로서 디젤 연소의 경우 CO의 생성량은 공기 과잉을

과 연소온도 그리고 연소실 내부의 연료와 공기의 균질성과의 함수 관계에 있다. 일산화탄소의 발생량은 공기연료 혼합비에 따라 크게 영향을 받으므로 가솔린을 사용하는 자동차용 엔진에서는 문제가 되는 오염물질이지만 일반적으로 과잉공기가 공급되는 선박용 디젤엔진에서는 크게 문제가 되고 있지는 않다^[3].

2.1.1.2 이산화탄소(CO₂)

엔진 운전 시 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.



이산화탄소 배출량은 연료의 연소효율에 따라 다르게 되어, 연소된 연료가 많을수록 이산화탄소 배출량은 더욱 많아진다. 그러므로 이 배출물은 연소한 연료의 정해진 양에 대하여 최대로 증가되어야 하는데, 이것은 연소가 가능한 범위 내에서 완전히 이루어진다는 것을 나타낸다. 이산화탄소 배출 농도는 공연비의 영향이 크며 이론공연비($\lambda=1.0$)에서 배출농도가 가장 높고 희박과 농후영역으로 가면 낮아진다^[3].

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

기후변화에 관한 정부간 패널(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) 보고서에서는 지구온난화를 일으키는 온실가스(GHGs, Green House Gases)를 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)으로 분류하였으며, 이 중 온실 효과가 가장 큰 가스로 CO₂를 지목하였다. CO₂는 인위적으로 배출되는

전체 온실가스 양의 약 60%를 차지하는데 산업 활동 곳곳에 사용되는 석탄, 석유 및 천연가스 등의 화석연료연소 및 추출, 처리, 수송과정에서 주로 발생되며, 해운 분야는 2012년 기준으로 전 세계 CO₂ 배출량의 약 2.6%를 차지하는 것으로 보고되고 있다^[4].

2.1.1.3 탄화수소(HC, Hydrocarbon)

디젤연료는 가솔린에 비해 비등점(boiling point)이 높고 분자량(molecular weight)이 큰 성분이 많아 연료가 분무 되었을 때 열분해가 일찍 일어난다. 이런 이유로 폭넓게 분자성분이 분포하며 이 중에서 무게가 무거운 HC의 대부분은 미립자(PM)의 SOF(Soluble Organic Fraction)에 흡착되어 배출된다.

정상적인 연소에서의 HC 발생요인은 공연비가 과도하게 농후하거나, 희박한 두 경우를 고려할 수 있다. 연료의 초희박(overlean) 영역에서는 산화반응이 느리기 때문에 반응이 제대로 끝나지 못하여 미연소연료, 연료 분해생성물, 부분산화물(알데히드, 옥시탄트) 등이 생성된다. 초희박 영역에서의 HC 발생농도는 점화지연기간동안 분사되는 연료량과 분사된 연료가 공기와의 혼합되는 비율에 크게 지배된다. 즉, 점화지연기간에 분사되는 연료가 많거나 또는 점화지연기간이 길어지면 HC 발생량이 증가한다. 반면 분사된 연료가 과농하게 되는 경우는 노즐의 섹 볼륨(sac volume)에 남아 있던 연료가 연소과정 후기에 느린 속도로 분사되는 경우와, 연료가 처음부터 연소실에 과도하게 공급되는 경우의 두 가지로 볼 수 있다. 특히 섹 볼륨의 체적과 HC 발생량은 거의 비례하는 경향을 가지고 있다. 또한 HC는 기관의 부하에 따라 생성정도가 변화하고 특히 저부하에서 상당량이 생성하는 것을 알 수 있다^[3].

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

HC의 농도가 낮은 상태에서는 호흡기 계통을 자극하는 정도이나, 산화되어 알데히드가 발생되면 눈, 점막, 피부 등을 심하게 자극한다. 알데히드가 다시 산화되면 과산화물이 형성되어 광화학스모그의 원인이 되며 눈을 더욱 자극하게 된다. HC는 고분자량탄화수소(미연소), 저분자량탄화수소(열분해)로 대별되며 광화학스모그 생성성분을 함유하고 있다.

2.1.1.4 입자상 물질(PM, Particulate Matter)

미국 CARB(California Air Resource Board)에서 정의한 입자상 물질은 다음과 같다. 51.7°C 이하의 공기로 희석되어 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. PM은 크게 SOL(Solid fraction), SOF(Soluble Organic Fraction), SO₄(Sulfate particles)로 구성되어 있다. SOL은 탄소입자가 대부분이며 재(ash)도 포함된다. 배기가스온도 500°C 이상에서는 직경 15 nm~30 nm의 탄소입자나 입자의 덩어리(cluster)로서 H/C= 0.2~0.3의 건조 그을음(dry soot) 상태이다. 엔진기술이 향상됨에 따라 탄소 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 배기관 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 Fig. 2.1에서 보듯이 3 nm ~ 30 nm에 분포되어 있으며 10 nm ~ 20 nm에 집중되어 있다. 이 nano particles의 질량은 전체의 10% 이내이나 수량은 90% 이상이다.

인체 유해성을 보면 중량비율은 미미하나 입자수량 면에서 대부분을 차

지하고 있는 50 nm 이하의 nano particles의 유해도가 훨씬 큰 것으로 알려져 있어 앞으로 nano particles PM의 저감이 중요 과제로 다루어질 전망이다.

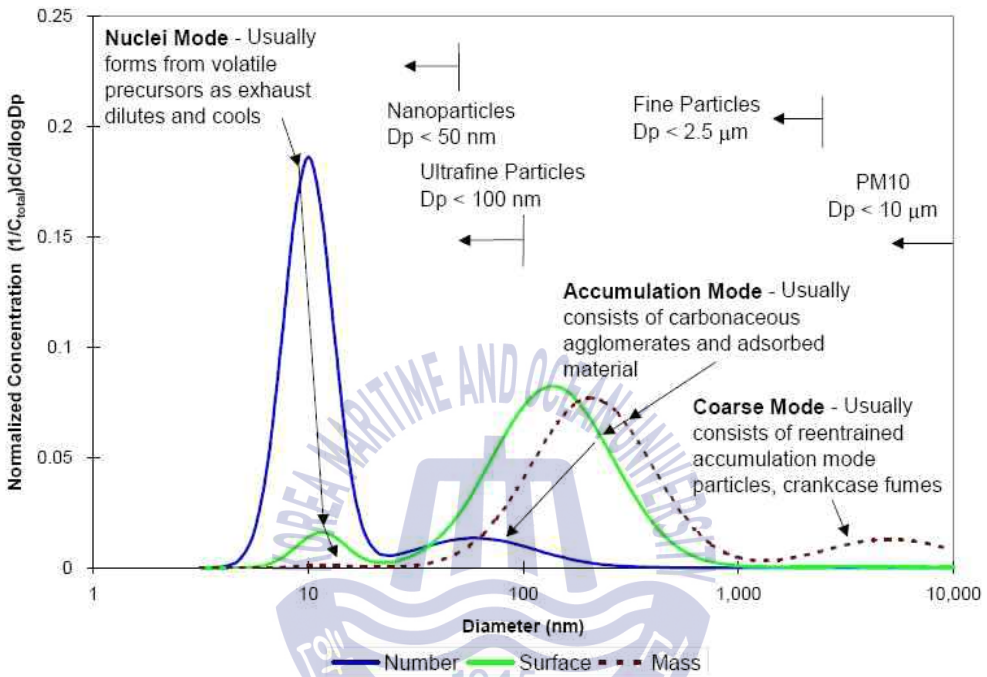


Fig. 2.1 Distribution of diesel PM^[5]

2.1.1.5 황산화물(SOx)

연료유 중의 유황분은 연소한 다음 아황산가스(SO₂)로 되고 그 중 일부는 무수황산(SO₃)으로 되어 수분과 화합하며 황산이 되어(SO₃ + H₂O = H₂SO₄) 실린더 라이너, 피스톤 링 등의 부식마모를 일으키고, 대기 중으로 방출되는 아황산가스는 매우 심각한 대기오염원이 되므로 연료유 내 유황분은 되도록 적은 것이 바람직하다.

연료 중 유황분의 연소로 발생한 아황산가스는 무색이며 자극성이 있는 기체로 물에 녹기 쉬우며 산성비의 주요한 원인 알려져 있다. 산성비는

엽록소를 파괴해 식물의 잎을 누렇게 변하게 하거나 말라죽게 한다.

아황산가스는 대기 중에서 약 12시간에서 2일간 존재하다가 물과 반응하여 쉽게 황산(H_2SO_4)으로 변하고 이는 산성비를 일으키는 원인이 된다. 황산은 점액과 함께 위속으로 들어가 위장장애를 일으킬 수 있고, 점막을 자극하거나 기관지염 또는 천식을 일으킨다. 또 건물의 경우에는 서서히 부식을 일으킨다. 따라서 대기오염뿐만 아니라 사람을 비롯한 생물에게 주는 피해가 크다.

2.1.1.6 질소산화물(NO_x)

질소산화물(NO_x)은 일산화질소(NO)와 이산화질소(NO_2) 등을 총칭한다. 일반적으로 엔진 연소실에서 발생하는 질소산화물의 대부분은 일산화질소이지만 유해성은 이산화질소가 더 심각하다. 이산화질소는 호흡 시 체내의 폐세포에 침투하여 점막 분비물에 흡착되어 강한 질산을 형성함으로써 호흡기 질환을 유발시킨다. 따라서 유행성 독감과 같은 호흡기성 전염병에 대한 감수성이 증가하고 폐수종, 기관지염, 폐렴을 일으킬 수도 있다. 또한 천식환자에게는 먼지나 꽃가루에 대한 감수성을 증가시킨다. 일산화질소는 그 자체만으로는 독성이 없으나 헤모글로빈에 고착되어 폐질환을 유발할 수 있다. 또한 일산화질소의 근본적인 영향은 이산화질소와 같은 과산화질소의 생성이다. 과산화질소는 용해가 잘 되지 않아 폐 기관의 깊은 곳까지 침투할 수 있어 폐 조직을 손상시켜 폐기종을 유발할 수 있다. 또한 환경적으로 질산염 미립자, 질산 에어로졸뿐만 아니라 이산화질소를 형성시켜 산성비의 원인이 되며, 수질계 오염을 악화시키고, 세균의 먹이 사슬인 토양 영양분의 과도한 공급에 기여하여 세균의 이상 증식을 초래한다.

미국에서 연구 결과로서 흥미로운 것은 질소산화물로부터 형성된 오염물질들은 장거리를 이동하는 특징이 있어서 질소산화물과 결합된 문제들이 질소산화물을 배출한 지역에 한정하지 않고 전혀 다른 지역에 큰 피해를 주고 있는 것이다. 이와 같이 질소산화물에 의한 피해는 지역적으로

국한되는 문제가 아니므로, 질소산화물을 억제하기 위해서는 발생 지역의 원인에 집중하는 것에서 나아가 전 세계적인 배출 저감 노력이 필요하다. 하지만 이 같은 노력이 진행되고 있음에도 불구하고 현재 질소산화물의 배출은 꾸준히 증가하는 추세이다^[5].

2.1.2 배기배출물의 배출 규제 동향

2.1.2.1 이산화탄소 배출 규제

국제해사기구와 기후변화에 대한 정부간 패널(IPCC)에서는 국제사회의 온실가스 저감 노력에 부응하여 선박의 탄소가스 규제를 논의하고 있다. 유엔기후변화협약(UNFCCC)의 국가별 차별화된 책임과 능력의 원칙에 따라 국가들을 선진국과 개도국으로 나누어 규제를 하고 있다. 그러나 선박은 전 세계를 운항하고 편의치적제도에 따라 국적도 모호하여 국가별 규제에서 제외되었으며 별도의 국제기구인 IMO로 탄소가스 감축규제가 위임되었다. 이에 따라 IMO 전문위원회 중 하나인 해양환경보호위원회(MEPC) 57차 회의(2008년)를 시작으로 선박의 탄소가스 규제 방안을 본격적으로 논의하게 되었다.

선박에서 이산화탄소 배출을 규제한다는 것은 선박에서 사용하는 연료량을 줄인다는 뜻이다. 선박 운항에 사용되는 연료의 연소과정에서 이산화탄소가 발생하고 그 발생량은 연료사용량에 비례하기 때문이다. 따라서 연료사용량을 줄이는 에너지효율과 이산화탄소 발생량이 중요한 용어로 사용되게 되었다. 선박에서 발생하는 이산화탄소를 감축하기 위해 국제해사기구가 논의하고 있는 내용들을 주요 주제별로 나누어보면 기후변화 관련 규정의 적용대상 선박, 신조선 에너지효율지수(EEDI, Energy Efficiency Design Index), 운항선 에너지효율운항지수(EEOI, Energy Efficiency Operational Indicator), 선박에너지효율관리계획서(SEEMP, Ship Energy Efficiency Management Plan)등이다.

신조선에 대한 이산화탄소 배출규제의 중요 논의 사항은 EEDI 계산식을 만드는 것이었으며, 이에 네덜란드와 일본의 전문가들이 EEDI 계산식을 만들어 제안하였다. 또한 국제해사기구는 2005년에 운항선 에너지효율 운항지수를 계산하는 EEOI 계산식을 결의서로 채택하여 각국 정부에게 이를 사용하도록 권고하였다.

이를 바탕으로 국제해사기구는 2013년부터 EEDI, SEEMP 등의 규제를 시행하게 되었고 향후 논의에 따라서 EEOI, MBM 등 파급효과가 큰 실질적 규제가 시행될 전망이다. 특히 MBM은 개별 선박의 탄소가스 배출량에 따라 탄소배출권을 구입 또는 판매하거나 탄소세를 부과하는 방식으로 시장에서의 수익성에 큰 영향을 미칠 수 있는 규제이며 해운시장에 매우 큰 파급효과를 불러일으킬 것으로 예상된다.

2.1.2.2 질소산화물 배출 규제

선박으로부터의 배출의 통제를 위한 규정 중 질소산화물에 대한 규제는 MARPOL 부속서 VI 제13규칙에서 규정하고 있으며, 그 기준에 대해서 자세히 살펴보겠다.

(1) 적용 대상

- ① 선박에 설치되는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤기관
- ② 2000년 1월 1일 이후 주요 개조가 이루어지는 출력 130 kW를 초과하는 선박용 디젤 기관. 단, 동일한 엔진으로 교체되었거나 ①항의 범위에 해당되지 않는 기관으로 교체되었다는 것을 주관청이 인정한 경우는 제외된다.

(2) 적용 제외

- ① 선박에 설치되어 비상시에만 사용할 목적의 어떤 장치나 기구에 동력을 공급하는 기관, 또는 구명정에 설치된 선박용 디젤기관
- ② 기국의 관할 또는 주권에 속해 있는 수역 내에서만 종사하고 있는

선박에 설치된 기관. 단, 그러한 기관은 주관청이 정한 대체의 NOx 제어 방법을 적용 받아야 한다.

(3) 적용 기준

① Tier I : 2000년 1월 1일 이후 그리고 2011년 1월 1일 전에 건조된 선박에 설치되는 선박용 디젤기관

- 분당회전수(rpm) 130 미만 : 17.0 g/kWh
- 분당회전수 130 이상 ~ 2000 미만 : $45.0 * n^{(-0.2)}$ g/kWh
- 분당회전수 2000 이상 : 9.8 g/kWh

② Tier II : 2011년 1월 1일 이후에 건조된 선박에 설치되는 선박용 디젤 기관

- 분당회전수(rpm) 130 미만 : 14.4 g/kWh
- 분당회전수 130 이상 ~ 2000 미만 : $44.0 * n^{(-0.23)}$ g/kWh
- 분당회전수 2000 이상 : 7.7 g/kWh

③ Tier III : NOx 배출통제해역(NOx Emission Control Area) 내에서의 선박용 디젤기관의 운전

- 분당회전수(rpm) 130 미만 : 3.4 g/kWh
- 분당회전수 130 이상 ~ 2000 미만 : $9 * n^{(-0.2)}$ g/kWh
- 분당회전수 2000 이상 : 2.0 g/kWh

Tier III 기준이 적용되는 질소산화물 배출통제해역(NOx Emission Control Area)은 2016년 1월 1일 이후 건조된 선박이 이 해역을 운항 할 때에만 효력을 가진다. Tier II 및 Tier III 로 증명되었거나 Tier II 로만 증명된 선박이 질소산화물 배출통제해역을 항해하는 동안에는 Tier III 기준을 만족하여야 하며, 질소산화물 배출통제해역 이외의 해역을 항해할 때는 Tier II 기준에 적합하여야 한다. Tier II 로 증명된 선박의 경우 디젤

엔진에 별도의 질소산화물 처리장치(예; SCR, EGR)를 장착하여 질소산화물 배출통제해역 항해 시 그 처리장치를 작동시켜 Tier III 기준을 만족시키도록 해야 한다. 위 규칙이 적용되는 선박이 질소산화물 배출통제해역에 들어갈 때 및 그 지역으로부터 나올 때, 혹은 배출통제지역 내에서 운전 상태가 변경될 때에는 해당 일시, 선박의 위치와 함께 디젤 엔진의 Tier 상태, 운전 상태를 주관청이 규정한 로그북에 기록하여야 한다^[6].

이번 MEPC 70차 회의에서는 영국 해협(English channel)을 포함한 발틱해 및 북해해역을 배출규제해역으로 지정하고 2021년 1월 1일부터 요건의 발효일로 설정함에 동의하였다.

(4) 기존선 적용 규칙

1990년 1월 1일 이후부터 2000년 1월 1일 사이에 건조된 선박에 설치된 선박용 디젤기관 중 출력 5,000 kW 초과 및 실린더 당 용적 90리터 이상의 기관은 Tier I 에 준하는 배출제한을 따라야 한다.

2.1.2.3 황산화물 배출 규제

국제적으로 황산화물들이 공기 중으로 나오지 않게 하기 위해서 황을 포함하지 않은 고품질의 연료를 사용하거나, 황이 적게 들어 있는 저유황 연료를 사용하도록 규제를 강화해 나가고 있다. 하지만 규제를 만족하는 연료유 개발은 계속 늦춰지고 있고 지정된 규제 날짜에 충분한 보급이 이루어질 수 있는지 불확실한 면이 있다. 이에 따라 국제해사기구에서는 해양환경보호위원회(MEPC)에서 매년 연료유의 황 함유량 모니터링 통계자료를 보고하고 있으며, 실질적으로 규제를 발효시키는데 있어서 기술적인 타당성을 확보해 나가고 있는 실정이다. 최근 2014년 열린 MEPC 66차 회의에서는 황산화물 배출통제구역(SECA : Sulphur Emission Control Area)을 통항하는 선박에서 사용되는 연료유의 황 함유량을 2020년까지 0.1% 이하로 맞추도록 기술개발을 독려했다.

SO_x 배출제한 규정(MARPOL 부속서 제14규칙)은 모든 해역에서 2011년

12월 31일까지 연료유 황 함유량을 4.5% m/m, 2012년 1월 1일 이후부터 3.5% m/m, 2020년 1월 1일부터는 0.5% m/m로 적용된다. 특히 황산화물 배출통제구역에서는 2010년 7월 1일전까지 연료유 황 함유량을 1.5% m/m, 2010년 7월 1일 이후부터 1.0% m/m, 2015년 1월 1일 이후부터는 0.1% m/m로 제한하고 있다. **Table 2.1, 2.2, 2.3**에 각 지역별 SOx 배출규제 기준을 표로 나타내었다.

Table 2.1 IMO SOx emission control standard

Application area	Application year & Emission limits		
Whole sea area	prior to 2012.1.1.	since 2012.1.1.	since 2020.1.1.
	4.5% m/m or less	3.5 % m/m or less	0.5 % m/m or less
Sulphur 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 SOx emission control standard

Application area	Regulations	Application year	Application
EU 항내 정박 시 / 내륙수로 전용선박	2005/33/EC	2010.01.01.	EU 항내 정박 시 / 내륙수로 전용선박에 사용되는 모든 연료유는 황 함량 0.1 % m/m 이하 연료유 사용

Table 2.3 CARB SOx emission control standard

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

2.1.2.4 입자상 물질 배출 규제

IMO 해양환경보호위원회(MEPC)에 선박에서 배출되는 PM 규제의 필요성에 대한 문건이 많이 제출되고 있다. 특히 PM 가운데 BC(Black Carbon)를 기후변화물질로 IMO규제에 도입하기 위한 논의가 급격히 진행되고 있다. **Table 2.4**는 최근 IMO MEPC 및 BLG(Bulk Liquids and Gases Sub-Committee)에서 논의된 선박배출 PM/BC 규제에 대한 최근의 진행상황을 요약한 내용이다.

즉, 선박배출 PM/BC 관련 IMO 움직임이 가속화 되고 있으며, 규제를 위한 동력원은 선박배출 PM/BC에 의한 기후변화(북극지방 해빙가속화에 따른 지구온난화 가속화)의 영향임을 분석할 수 있다. 또한, 선박배출 PM/BC 저감 기술개발을 주도하기 위해 선진국이 적극적으로 움직이고 있으며, 저감 기술개발의 방향은 규제의 정량적 목표 및 선박배출 PM/BC의 특성화와 연계되어 있다.

Table 2.4 MEPC BC emission control trend^[5]

IMO progress	Discussion agenda
MEPC 58 (2008.08)	제출 문건 : MEPC 58/INF.21 - MEPC 58/INF.21 (FOEI) : BC의 정의 및 영향을 논의
MEPC 60 (2010.03)	제출 문건 : MEPC 60/4/24, INF.20 - MEPC 60/4/24 (, 스웨덴, 미국) : BC 저감기술에 대한 소개 - MEPC 60/4/INF.20 (FOEI) : 북극지방 항해선박 배출
MEPC 62 (2011.07)	제출 문건 : MEPC 62/4/3, 10, 16, 18, INF.32, INF. 33 - 북극지방 운항 선박에서 배출되는 BC의 환경 영향(기후변화 등)을 고려하고, BC 배출 저감을 위한 IMO의 대응을 촉구 - MEPC 62/4/10 (노르웨이) : BC 감축을 위한 실질적인 작업 계획을 설정하기 위해서 BC의 정의, 측정방법, 감축방안 및 framework을 포함하는 보고서를 MEPC 65에 제출하겠다는 계획을 제시 - 결정 사항 : BLG 소위원회에서 상세 논의 결정
BLG 16 (2012.02)	제출 문건 : BLG 16/15/1~5, INF.5 - BLG 16/15/1 (노르웨이) : 국제항해 선박으로부터의 BC 배출에 대한 IMO 정의 방법 - BLG 16/15/2 (미국) : 북극지방 항해 선박에서 배출되는 BC의 영향 - BLG 16/15/3 (IPIECA, OCIMF) : BC 배출에 대한 고려 - BLG 16/15/4 (IMarEST) : BC의 정의 및 측정 - BLG 16/15/5 (EUROMOT) : 북극지방을 항해하는 선박의 BC 배출저감 - BLG 16/INF.5 (미국) : 연료유 품질과 선속 저감이 대기오염물질 배출에 미치는 영향
BLG 17 (2013.02)	- 정식 의제화 및 향후 규제 방향에 대한 본격적인 논의 준비중

2.2 질소산화물의 생성원리 및 저감 기술

2.2.1 디젤기관의 질소산화물 생성원리^[7]

디젤기관의 NO_x는 고온 연소과정 동안에 공기 중의 N₂나 연료 중에 함유된 질소분(N)이 O₂나 O₂의 혼합물로부터 해리(dissociation)에 의하여 생긴 산소원자와 고온 반응하여 모든 연료의 분무영역에서 다양한 농도로 생성된다.

이와 같이 디젤기관에서 생성 배출되는 NO_x는 높은 열효율을 위한 고온 사이클과 저속회전, 고압축비 등의 채용, 연료와 공기의 혼합과 연소과정 이 지극히 복잡한 디젤연소의 특성 등으로 인해 다른 열기관에 비해 생성 정도가 높은 편이다. NO_x의 생성을 지배하는 것으로 온도, 산소의 국부농도 및 연소의 지속시간이 있다. 연소온도의 상승에 따라 NO_x 농도는 증가한다. 질소의 기원과 생성 기구에 따라 분류하면 1,800K 이상의 고온 연소 영역에서 대기 중 N₂의 산화에 의해 생성되는 Thermal NO_x(열생성 질소산화물)과 연료 중에 함유된 질소분(N)의 산화에 의한 Fuel NO_x(연료기원 질소산화물)로 분류되고, 열생성 NO_x는 다시 혼합기의 당량비 차이에 의해 Zeldovich NO_x와 Prompt NO_x(속발 질소산화물)로 분류 할 수 있다.

대부분의 연소장치에서는 Thermal NO_x가 NO_x의 대부분을 차지 하지만 유기질소 화합물을 함유하고 있는 중유나 석탄을 연소 시킬 때는 Fuel NO_x가 중요한 NO_x의 생성원인이다. Prompt NO_x나 Fuel NO_x는 주로 연소영역이나 가스 반응영역으로부터 조금 떨어진 후류에서 생성됨에 반해 Thermal NO_x는 산소의 농도, 화염온도 및 체류시간이 적당하기만 하면 고온영역 어디에서나 발생한다. 실제 연소장치에 있어서 Thermal NO_x는 고온의 화염후류에서 연료가 희박한 연소상태에서 많이 발생한다.

2.2.1.1 Thermal NOx(열생성 질소산화물)

연소과정에서 대기 중의 질소에 의한 NO 생성은 많은 연구자들에 의해 오래 전부터 연구되었으며, 이에 관한 최초의 연구는 1946년 Zeldovich에 의하여 이루어졌다. NO 생성의 주된 반응식은 Zeldovich 메커니즘(mechanism)이라고 알려진 식 (2.2) ~ (2.4)으로 주어진다. 일반적으로 이 반응식은 연료와 공기의 혼합물이 이론공연비 부근 또는 연료의 희박연소 상태에 적용한다.



일반적으로 연소가스 중 산소분자는 1700℃ 전후의 고온에서 식 (2.2)의 분해반응에 의해 산소원자를 생성한다. 이 산소원자와 질소원자가 반응하여 식 (2.3)의 NO를 생성하고 동시에 질소 원자를 유리한다. 이 질소원자는 산소분자와 반응하여 식 (2.4)의 NO를 생성하고 산소원자를 발생시켜 연쇄반응을 일으킨다.

Lavoie등은 연료에 대한 산소의 비율이 적어지는 경우 식 (2.4)의 속도가 느려지고 이 상태에서 OH 기가 존재한다면 식 (2.5)의 반응도 NO 생성에 기여한다고 제안했다.



Thermal NO의 생성은 연소온도와 연소영역에서 산소농도가 높을 때, 고온영역에서 연소가스의 체류시간이 길 때 많아진다. 디젤 기관에서 발생하는 질소산화물은 대부분 Thermal NOx이다.

2.2.1.2 Prompt NOx(속발 질소산화물)

Fenimore는 에틸렌과 공기의 예혼합가스를 다공판을 사용한 버너에서

연소시켜 얻은 평면 화염면에서 상당한 양의 NO가 급격히 생성됨을 발견하고 이를 prompt NO라고 명명했다. prompt NO의 생성기구 식은 (2.6) ~ (2.10)이다.



Prompt NO의 생성은 연료의 농도가 낮은 화염에서는 Zeldovich 메커니즘에 의해, 연료의 농도가 높은 화염에서는 탄화수소기에 의한 Fenimore 메커니즘에 의해 연소영역에서 형성한다. 연소영역 부근에서 NO의 생성율이 평형상태에서보다 다소 클지라도 실제 연소장치에 있어 이러한 영역은 화염 후류 영역에 비해 작은 영역이므로, Thermal NO_x나 Fuel NO_x보다 비중이 크지 않다.

2.2.1.3 Fuel NO_x(연료기원 질소산화물)

Fuel NO_x는 연료 속에 화학적으로 결합하고 있는 질소성분이 연소 중에 NO_x로 전환된 것이다. Shaw와 Thomas는 기체연료에 유기질소화합물을 혼합하여 연소실험을 행한 결과 공기 중 질소의 존재유무에 상관없이 많은 양의 NO가 생성함을 관찰하고 그 생성원이 연료 속에 포함된 질소임을 확인하였다. Haynes와 Fenimore는 각기 다른 종류의 질소화합물에 에틸렌의 혼합화염에 첨가하여 Fuel NO_x의 생성을 연구하여 연료 중에 질소산화물은 열분해 또는 반응을 통해 일단 분자량이 작은 질소화합물(HCN, 또는 NH_i, i=(0,1,2,3)인 중간생성물(M)을 발생시키며, 이 중간생성물은 두 가지의 경쟁적 반응을 거쳐 최종 생성물로 생성하는데 그 중 한 가지 반응경로는 중간생성물이 산소를 함유한 화합물(R)과 반응해서 NO를

생성한다는 메커니즘을 제안하였다. 두 번째 경로는 M이 NO 또는 다른 M과 반응해서 N_2 를 생성하는 NO 분해반응이다.

Song등은 과농연료연소의 경우 Fuel NO_x 생성경로는 연료 질소로부터 HCN 으로의 전환은 정량적이고 매우 빠른 반응이므로 자세한 반응기구는 알 수 없으나 HCN은 과농 영역에서 초기 가스 상태의 질소산화물에만 영향을 미친다고 알려져 있으므로 Fuel NO_x 생성율을 예측하는데 큰 제한이 되지 않는다고 설명하고 있다. Haynes등이 제안한 Fuel NO_x 메커니즘에 의하면 chain carrier free radical인 O, H 및 OH는 HCN으로부터 수소 원자와 결합하여 시안화기가 된다. HCN은 동시에 OH기와 반응하여 HNCO의 중간체를 형성하며 CN기는 OH기와 반응하여 NCO를 생성한다. HNCO와 OCN은 고온에서 불안정하므로 수소원자와 반응하여 아민화합물(NHi)이 된다. 이렇게 해서 생성된 NH₂와 NH는 O, H 및 OH와 반응하여 NH기와 질소원자가 되며, 이 때 NHi화합물은 부분평형상태로 가정한다. 결국 Fuel NO는 NH 또는 질소원자가 OH 및 O와 반응하여 생성한다.

Fuel NO의 생성 기구를 정리하면 이론혼합비 또는 산소가 부족한 경우는 연료 중에 함유된 질소성분이 실험적으로 거의 Fuel NO_x로 전환되고 이 반응은 연소반응과 같은 속도로 일어난다. 그러나 연료가 과잉인 경우에는 연료 중에 결합된 질소가 우선적으로 HCN이 되고, 이어서 다른 중간생성물로 전환하여 결국 Fuel NO를 생성한다. 또한 Thermal NO와는 달리 온도의 영향을 받지 않으나, 연료 중에 포함된 질소의 양이 증가함에 따라 전체 NO 생성량은 증가하며 NO_x로의 전환율은 감소한다. Fuel NO는 연료전환과 산소의 분압저하에 의해 저감할 수 있다.

2.2.1.4 선박용 디젤기관의 NO_x 배출 특성

NO_x의 배출에 영향을 미치는 인자들은 여러 가지가 있지만, 그중에서 가장 큰 요소는 기관 회전수와 부하이다. Fig. 2.2는 2행정 저속 주기관과 4행정 중속 발전기관의 배출특성을 보여주고 있다. 그림으로부터 주기관

의 경우 NOx 배출농도는 중 부하(50%)에서 저 부하보다 약간 감소한 다음 직선적으로 증가하고, 발전기관의 경우 저 부하에서부터 포물선적으로 증가함을 보여주고 있다.

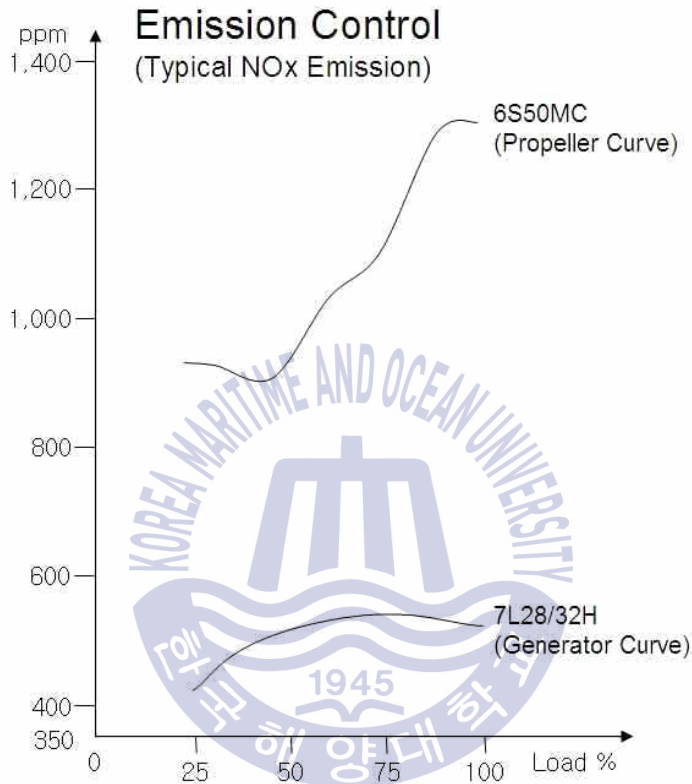


Fig. 2.2 Typical NOx emission^[3]

Fig. 2.3과 Fig. 2.4는 엔진 메이커 C사의 질소산화물 배출현황을 나타낸 것이다. 엔진이 대형화가 될수록 NOx 발생이 많아지는 경향을 알 수 있고, 현재 Tier III 적용 시 중형엔진보다는 대형엔진에서 NOx 저감에 많은 어려움이 있는 실정이다.

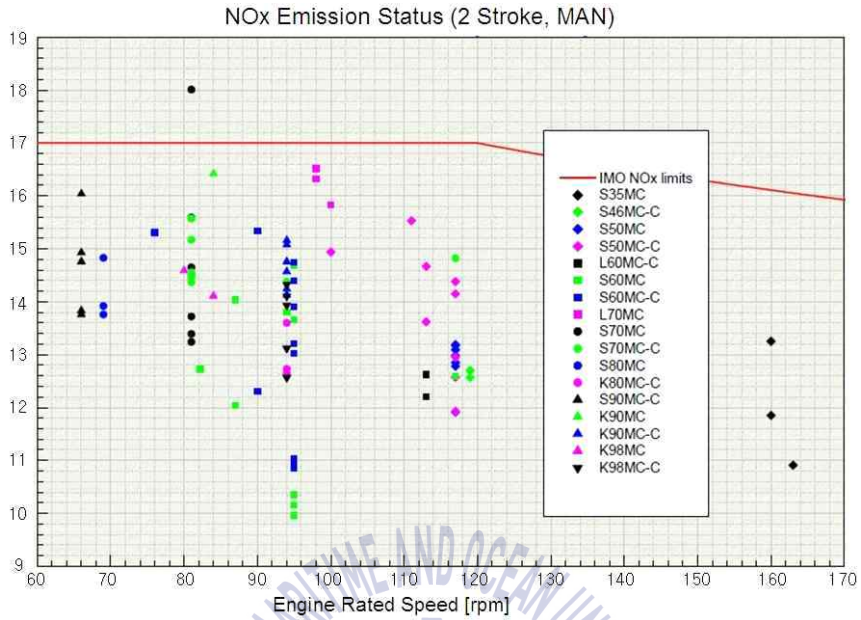


Fig. 2.3 NOx emission status(2 stroke, MAN)

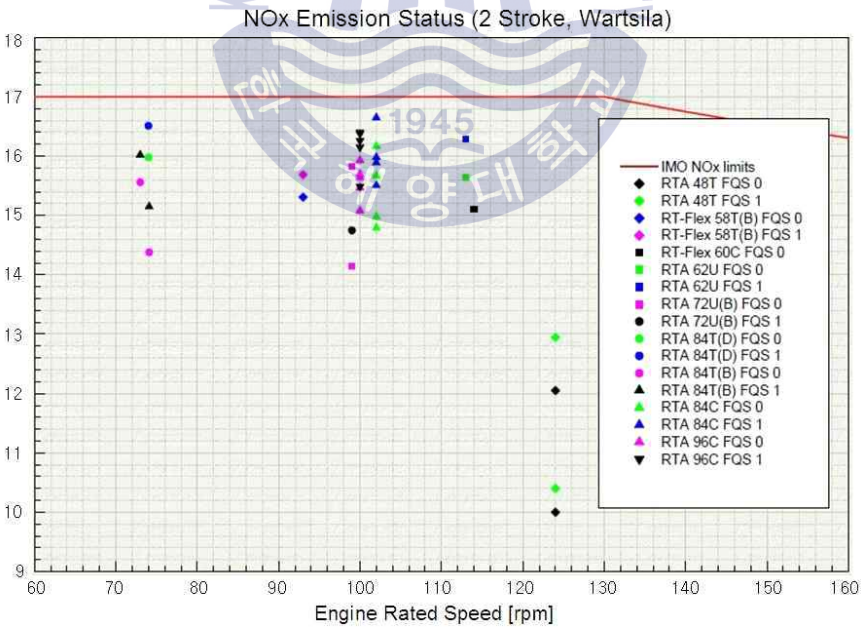


Fig. 2.4 NOx emission status(2 stroke, Wartsila)

Fig. 2.5는 75 %의 엔진부하에서 연료소비율과 NO_x 발생현황에 대한 그래프이며, 연료소비율이 감소할수록 NO_x의 발생은 증가하는 현상을 알 수 있다.

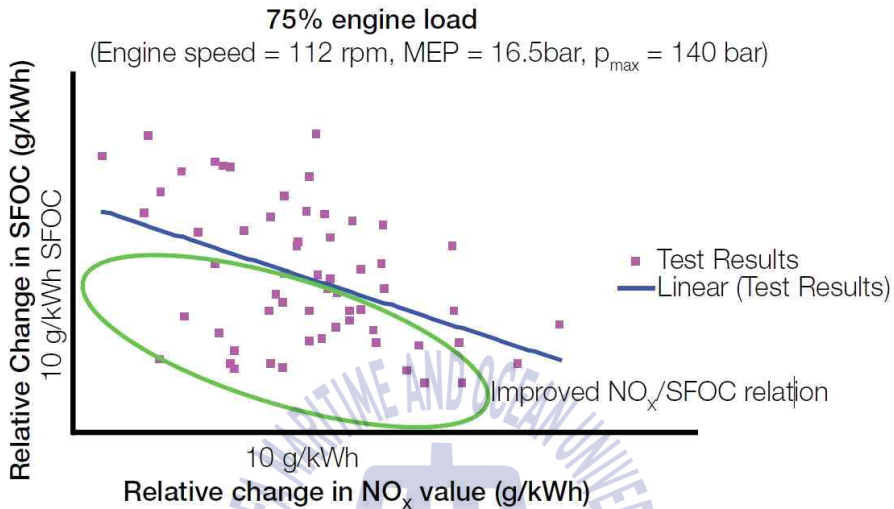


Fig. 2.5 Relative change in SFOC and NO_x at 75% load

2.2.2 디젤기관의 질소산화물 저감 기술

디젤기관에서 NO_x를 저감시키는 방법은 유해물 배출 저감의 관점에서 엔진 변수들(밸브 개폐시기, 연료분사 타이밍 및 터빈과급)을 최적화함으로써 연소 중에 생성되는 NO_x를 감소시키는 1차적인 대책과 기관의 연소실에서 발생된 배기가스를 추가적인 장치에 의해 후처리하는 2차적인 대책으로 나누어진다.

엔진의 변수들을 최적화하거나 물을 첨가하는 방법 등의 1차적인 대책을 통하여 NO_x 배출량을 약 30%~60% 정도 저감할 수 있으며 배기가스를 후처리하는 방법의 경우 NO_x 배출량을 약 90% 이상 저감할 수 있다. NO_x 저감기술의 자세한 종류는 Table 2.5에 나타내었다.

IMO MEPC 65차에 보고된 세계 NO_x 저감 기술 현황을 보면, EGR,

SCR, 그리고 이중 연료(dual fuel), 가스연료가 고려되었으며, 여기서 현실적으로 가장 적용 가능성이 높은 기술은 SCR 시스템이라고 보고되었다. 이 절에서는 NOx 배출량 저감 효과가 상대적으로 크고 Tier III 기준을 만족시킬 수 있는 EGR 및 SCR system에 대하여 자세히 살펴보겠다.

Table 2.5 NOx reduction treatment for marine diesel engine^[3]

Treatment	Method	Remark
Pre-Treatment	Substitute fuel	<ul style="list-style-type: none"> • Methanol • LNG • Emulsified fuel
Internal Treatment	Combustion	<ul style="list-style-type: none"> • Fuel Injection timing retard • Lean combustion • Rich combustion • Pre-chamber type combustion • Fuel valve nozzle spec. modification • High pressure of fuel injection
	Scavenging	<ul style="list-style-type: none"> • Scavenging air cooling
	Water injection into cylinder	<ul style="list-style-type: none"> • Water mixture(mixed valve) • Water mixture(independence valve)
	Water addition	<ul style="list-style-type: none"> • Water mixture into suction air
	Cycle modification	<ul style="list-style-type: none"> • De oxidised furnace • Exchange gas recirculation
Post-Treatment	Emission de-NOx	<ul style="list-style-type: none"> • Selective catalytic reduction • Catalytic decomposition

2.2.2.1 배기가스재순환(EGR)

EGR은 NOx 저감을 위한 가장 효과적인 방법의 하나로서 냉각기(cooler)에 의해 냉각된 배기가스의 CO₂나 H₂O 등과 같은 불활성 가스가 흡기의 일부와 치환되어 혼입됨으로써 혼합기의 열용량이 증대되어 실린더 내의 연소가스 온도상승을 억제하며 또한 공기과잉율을 낮추어 Thermal NOx 생성을 억제함으로써 전체 NOx 발생량을 줄이는 원리이다.

또한 흡기의 일부가 산소 농도가 낮은 배기가스로 치환되므로 연소실내 산소량이 감소하기 때문에 NOx 생성이 줄어든다. Fig. 2.6은 EGR system의 개략도이다.

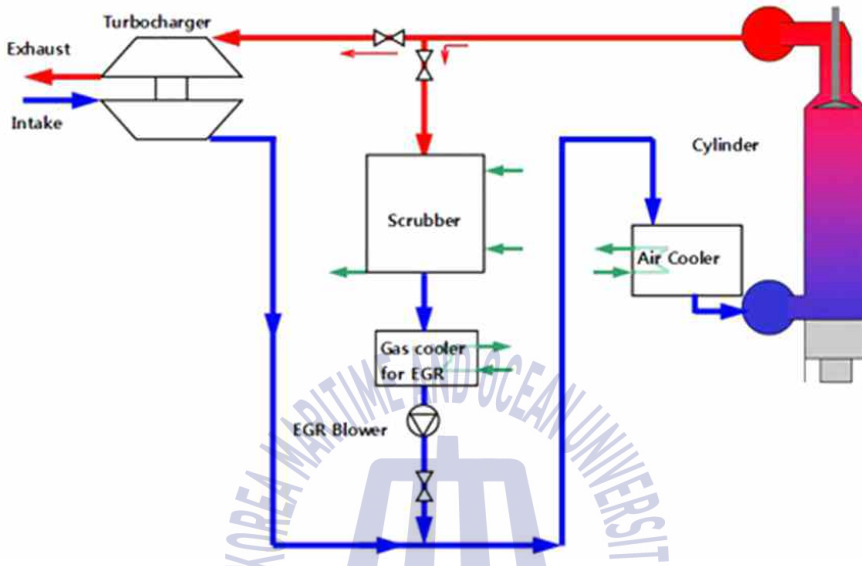


Fig. 2.6 Schematic diagram of EGR system

디젤기관에서 NOx 저감 메커니즘은 산소농도 저감이 근본적인 원인이라는 연구와 화염온도 감소가 원인이라는 연구가 각각 보고되었으며 어느 것이 옳은지에 대한 결론은 제시되지 않은 상태이다. EGR system을 통해 재순환되는 배기가스의 주성분은 N₂, CO₂, H₂O(수증기)이다. 이들이 연소 과정에 영향을 미치며 3가지 메커니즘에 의해 NOx를 저감한다^[8].

(1) 희석효과 (Dilution effect)

O₂를 N₂, CO₂, 수증기로 대체하여 흡기 내에 산소농도를 감소시킨다. 여러가지 실험을 통해 산소 농도의 감소가 NOx 배출량을 감소시키고 PM과 HC 배출량을 증가시키는 것으로 나타났다.

(2) 열적 효과 (Thermal effect)

수증기와 CO₂가 연소실내로 유입되면 흡기의 비열이 증가하게 되며, 비

열의 증가로 연소실의 최고 온도가 낮아지고, NO_x 배출량이 감소하게 된다. 과거의 수많은 연구를 통하여 공기를 대체하는 EGR의 흡입 열용량이 공기보다 높기 때문에, 이것이 연소 및 배기가스에 주로 영향을 미친다는 결과가 보고되었다.

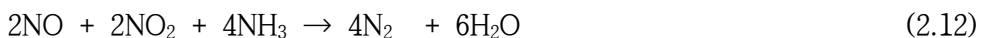
(3) 화학적 효과 (Chemical effect)

화학적 영향으로는 CO₂와 수증기의 열해리가 있다. 고온에서만 일어나는 활발한 흡열과정으로 연소 열에너지를 흡수하여 실린더 최고 온도를 낮추게 한다.

2.2.2.2 선택적 환원 촉매장치(SCR: Selective Catalytic Reduction)

(1) 저감원리

SCR 시스템은 배기가스에 있는 질소산화물의 90% 이상을 줄일 수 있는 장치이며, 그 원리는 NO_x가 포함된 배기에 암모니아(NH₃)를 첨가하여 SCR 반응기를 통과하면서 촉매 반응을 일으켜 아래 화학 반응식 (2.11)~(2.13)와 같이 환경오염과 무관한 질소와 물로 환원시켜 대기로 배출하는 것이다. Fig. 2.7에 SCR 환원 공정(process)을 개략적으로 나타내었다.



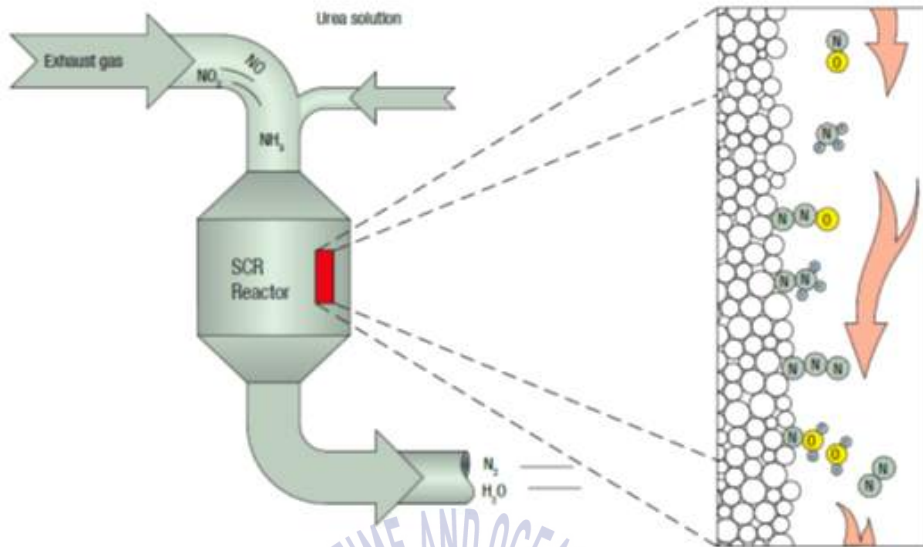


Fig. 2.7 SCR reduction process^[9]

SCR 시스템의 환원제로는 강한 독성과 부식성으로 인해 취급이 어려운 암모니아 가스 대신 요소수(UWS, Urea Water Solution)를 주로 사용하며 요소수를 사용하는 Urea-SCR 시스템은 배기가스에 요소수를 직접 분사하여 증발 및 열분해, 가수분해를 통해 NH_3 를 생성시킨다. 발생된 NH_3 는 촉매에서 NO_x 와 결합하여 N_2 와 H_2O 로 분해시켜 NO_x 를 저감시키게 되며 이 방식은 EGR 시스템 방식보다 NO_x 저감 효율이 높고 연소 압력과 압축비가 상승하며, 엔진의 열효율이 증가하여 연비적인 측면이 우수하다는 장점이 있다.

(2) NO_x 저감 효율에 영향을 미치는 조건

Urea-SCR 시스템은 SCR 촉매(반응기), DCU(Dosing Control Unit), 제어 시스템의 3가지로 구분할 수 있다. NO_x 저감효율에 영향을 미치는 요인으로는 배기가스온도, 배기유속(공간속도), 환원제량 등이 있다.

1) 배기가스온도

가스 상의 NH_3 는 약 $200^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ 사이에서 NO_x 와 반응하는데 배기가

스의 온도가 낮을 경우 촉매의 표면온도가 낮아 NH_3 가 촉매 표면에 흡착하기가 어려워 결국 촉매 활성화를 위한 기본 조건이 맞지 않아 NO_x 의 변환 효율이 떨어진다.

2) 배기유속

배기 유속은 기관의 회전수를 의미하고 배기 유속은 환원제가 촉매에 도달하기 전까지 열을 받아 NH_3 와 H_2CO 로 분해되며 다시 H_2CO 가 배기 속의 H_2O 와 반응하여 NH_3 와 CO_2 를 생성시킬 수 있는 시간을 확보하는데 가장 중요한 인자이다. 또한 배기 유속의 흐름 상태가 인젝터에서 분사되는 환원제의 입자 크기와 무화에도 영향을 미치는 인자이다. 배기 유속이 촉매 속을 통과할 때 공간속도로서 촉매에 흡착된 NH_3 가 배기 속에 있는 NO_x 와 반응하여 산화할 수 있는 시간 확보에도 중요한 역할을 하기 때문에 NO_x 저감효율은 배기유속에 반비례하며, 특히 배기온도가 낮은 경우 NO_x 변환효율에 중요한 역할을 한다.

3) 환원제량

환원제량은 NO_x 변환효율에 직접적인 영향을 미치는 인자로서 이미 많은 연구를 통하여 NO_x 와 NH_3 를 같은 양으로 분사하거나 NO_x 와 NH_3 를 1:2 또는 NO , NO_2 및 NH_3 를 1:1:3의 비율로 분사할 경우 최적의 것으로 나타나 있다. NO 와 NH_3 를 1:2의 비율로 분사할 경우 저온에서 변환효율은 다소 증가하나 고온에서는 같은 양의 비율에 의한 변환효율 성능과 비슷하며 오히려 과도한 NH_3 의 분사로 인한 NH_3 슬립 현상이 발생하여 2차 오염이 생기는 문제가 나타난다. 따라서 환원제량은 가능한 가스 상의 NH_3 를 환원제로 사용할 경우 같은 비율로 분사하는 것이 바람직하다. 환원제가 우레아인 경우 요소(urea)는 수용액 상태이므로 이것을 고압으로 분사하여야 한다. 그렇지 않을 경우 분사 초기나 분사 말미에 무화가 적절히 이루어지지 않아 NH_3 로 기화하지 못할 경우가 발생할 수 있다. 이를 고려해 볼 때 NO_x 와 우레아의 비율은 1이상으로 해야 할 것으로 예상된다.

(3) 설계방식에 따른 분류

SCR 시스템 설계 시 배기가스의 온도 및 연료의 황 함유량에 따라 고압형 SCR(HP SCR) 또는 저압형 SCR(LP SCR) 시스템이 정해진다.

연료유의 황 함유량이 높을 경우 배기가스 내에는 황산이 생성된다. 낮은 온도에서 황산은 암모니아에 의해 중화되고 이것은 끈적거리는 생성물인 NH_4HSO_4 (황산수소암모늄)를 형성하게 되며, 이는 SCR 촉매 표면에 축적된다. NH_4HSO_4 가 SCR 촉매 표면에 용착 될 경우 촉매를 손상시키고 촉매의 수명을 단축시킨다. 그러나 이 반응은 배기가스의 온도를 높게 유지함으로써 억제 시킬 수 있다. Fig. 2.8은 연료 황 함유량과 배기가스 압력 사이의 관계를 나타내었으며 NH_4HSO_4 의 형성을 피하기 위해 필요한 최소 온도를 나타내고 있다.

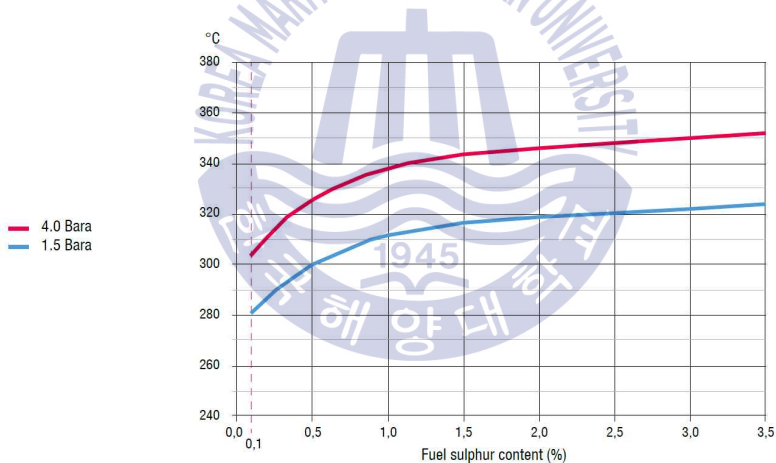


Fig. 2.8 Required temperatures for SCR related to sulphur content and exhaust gas pressure^[9]

SCR 운전 중에 연료의 황 함유량을 0.1% 이하로 제한 할 경우 SCR 시스템은 HP SCR 또는 LP SCR 두가지 시스템 중 선택이 가능하다.

1) 고압형 SCR(HP SCR) 시스템

HP SCR 시스템은 엔진의 터보차저 전단에 설치된다. Fig. 2.9와 Fig.

2.10은 일반적인 HP SCR 시스템을 보여주고 있으며 SCR 반응기와 환원제가 주입되는 증발/혼합기로 구성되어 있다. 증발기에 환원제를 주입하여 배기가스와 환원제(reducing agent)를 혼합시킨 후, 가스를 SCR 반응기로 보내서 촉매와의 환원 작용에 의해 NO_x를 감소시킨다. HP SCR 시스템의 경우 엔진의 터보차저 전단에 설치되어 상대적으로 높은 압력과 온도에서 촉매 반응이 진행된다. 엔진 부하에 따라, 터보차저 전단의 배기가스 온도가 후단의 온도보다 약 50°C~175°C 정도 높다. 이로 인해 밀도가 높은 형태의 촉매를 사용하여 촉매 반응기의 크기를 줄일 수 있고 증발기와 반응기 외에 다른 장치가 필요 없다는 것이 장점이다. 그러나 터보차저 전단에 반응기가 설치되므로 열용량 증대에 따른 터보차저의 성능 저하가 발생하고 이에 따른 매칭이 필요하다. 또한 엔진에 부착되어 설치되어야 하므로 엔진 작업 시 공간 활용도가 낮아지고 높은 압력으로 발생하는 배기가스의 누설 등이 발생할 수 있다.

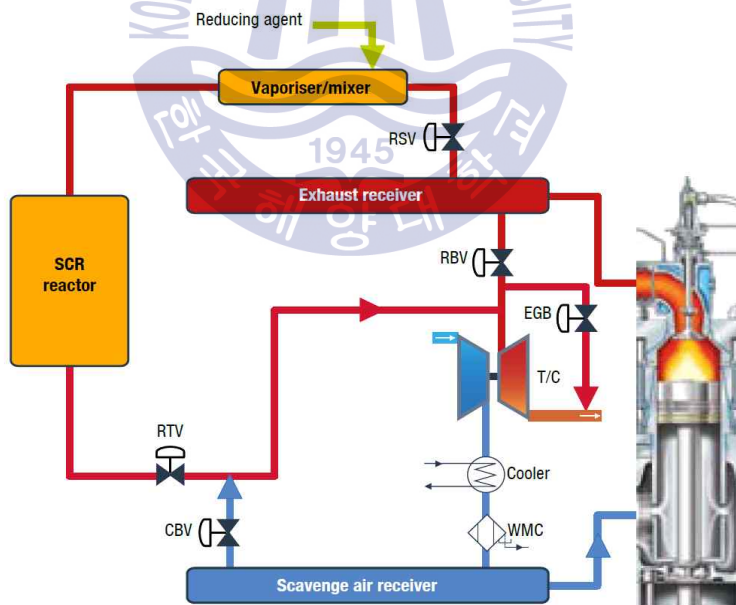


Fig. 2.9 HP SCR system^[9]

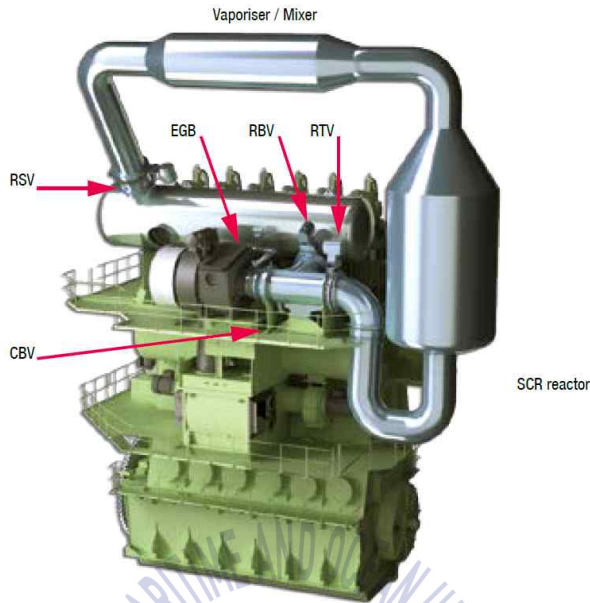


Fig. 2.10 Layout of a high-pressure SCR system^[9]

2) 저압 방식(LP) SCR 시스템

LP SCR 시스템은 SCR 시스템 운전 중 항 함유량이 0.1% 이하인 연료를 사용하고자 할 경우 설치가 가능하다. LP SCR 시스템은 터보차저 후단에 설치되므로 SCR 설치 장소의 선택에 유연성이 제공되며 엔진 작업 공간 활용도가 높다. 또한 반응기가 터보차저 후단에 설치되므로 터보차저의 성능 지연이나 매칭 측면에서 HP SCR 시스템에 비해 유리하다. 그러나 배기가스의 압력과 온도가 낮으므로 버너, 송풍기, 증발기 등의 설비가 추가적으로 필요하고 촉매 반응기의 크기가 커지게 된다. Fig. 2.11 과 Fig. 2.12는 일반적인 LP SCR 시스템을 보여주고 있으며, SCR 반응기 (Reactor), 혼합기(AIG, ammonia injection grid), 버너(Burner)와 증발기 (Vaporiser) 및 송풍기(Blower)로 이루어진 분해장치(DCU, Decomposition Unit)로 구성된다.

저유황 연료유를 사용할 경우에도 엔진 부하가 매우 낮거나 기온이 낮

을 경우, SCR 시스템을 운전하기에는 배기가스 온도가 너무 낮아지므로 배기가스 온도를 적정수준까지 상승시키기 위해, 터빈의 고압 측으로부터 배기가스의 일부를 바이패스 밸브(EGB)를 통해 바이패스 시켜 저압 측으로 보낼 수 있다. 이런 경우 SFOC는 증가하게 된다.

또한 연료유의 황 함유량이 적다하더라도 NH_4HSO_4 생성을 완전히 피할 수는 없으므로 DCU를 통해 적절한 양의 가스를 가열 및 재순환시켜 NH_4HSO_4 를 제거하게 된다.

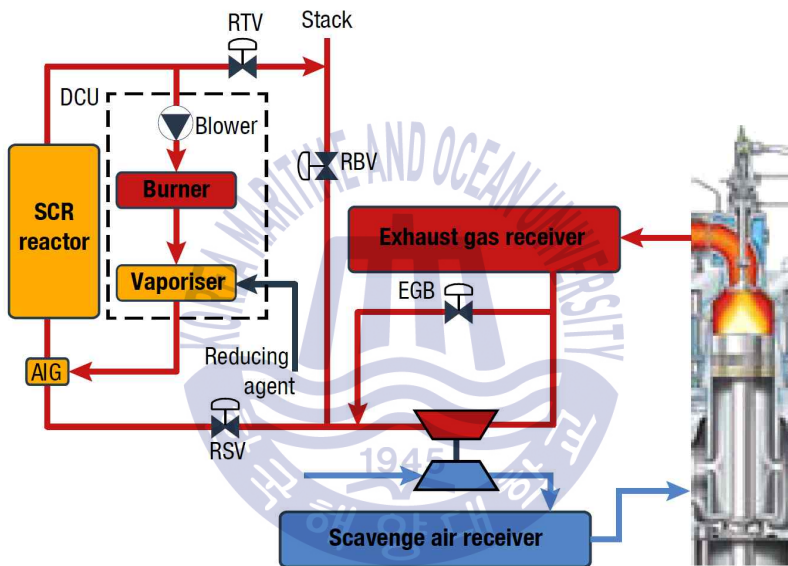


Fig. 2.11 LP SCR system^[9]

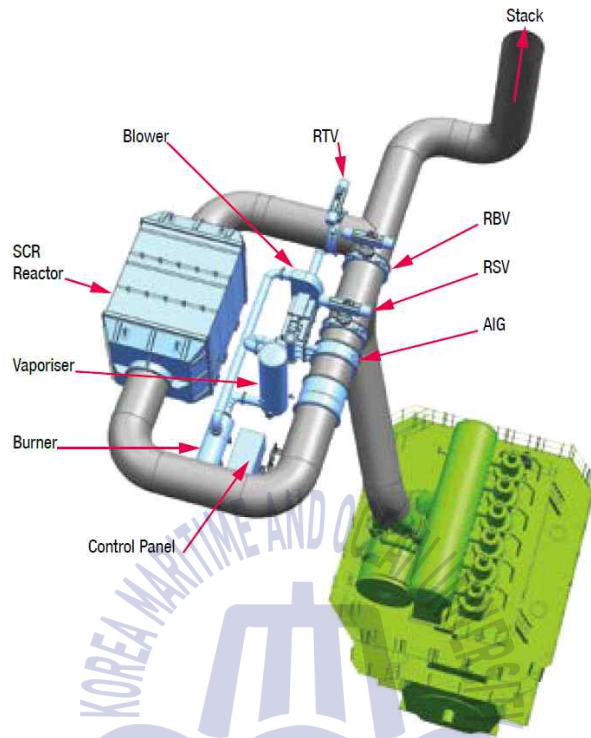


Fig. 2.12 Layout of a low-pressure SCR system^[9]

이와 같이 SCR 시스템은 질소산화물의 저감 효율이 높고 EGR 시스템과 비교하여 엔진의 열효율도 높다는 장점이 있으므로 앞으로 NOx 저감 장치 중 가장 현실적인 대안으로 여겨진다. 그러나 HP SCR 시스템의 경우 엔진의 설계 초기 단계부터 대상 엔진 및 과급기와의 매칭이 고려되어 설계되어야 하므로 선박용 대형엔진 제작업체를 제외한 국내업체의 독자적인 개발이 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 기존에 운항중인 선박에 추가로 제작 및 설치가 가능한 LP SCR 시스템의 개발과 육상엔진 실증실험을 통한 NOx 저감 성능에 관한 연구를 실시하였다.

제 3 장 실험장치 및 실험방법

실험장치는 크게 4부분으로 나누었으며, 엔진 및 운전설비, SCR 시스템, 가스분석 시스템, 통합 모니터링 시스템으로 구성되었다.

엔진 및 운전설비는 한국선급의 그린십 기자재 실험인증센터(TCC, 군산)에 구축되어있는 7,860 kW급 선박엔진과 수동력계를 이용하였으며, 개발된 SCR 시스템의 성능을 측정할 수 있는 3가지 가스분석기 시스템과 제어실에서 SCR 상태를 모니터링 할 수 있는 통합 모니터링 시스템을 구성하였다.

3.1 실험엔진 및 동력계

3.1.1 실험엔진

실험에 사용된 엔진은 MAN B&W사의 S46MC-C7 엔진으로 직렬 6기통에 7,860 kW, 2 stroke, 129 rpm의 선박용 엔진이며, 배기가스를 저감시키기 위한 장치가 별도로 설치되어 있지 않다. 현재 한국선급에 설치되어있으며 7,400 kW로 운영되고 있다. 따라서 실험계획도 7,400 kW, 129 rpm에 맞춰서 계획되어 실시하였다. Table 3.1에서 엔진의 세부사양을 나타내었으며 Table 3.2에는 각 실험에 사용되는 연료유의 조성을 표시하였다.

Table 3.1 Specification of engine

Item		Description	Remark
Model		MAN B&W S46MC-C7	-
Bore(mm)		460	-
Stroke(mm)		1,932	-
Power & Speed	Power(kW)	7,860	Currently used at 7400kW
	Speed(rpm)	129	-
	Mean effective pressure(bar)	19.0	-
Oil Consumption	Fuel Oil		Load 100%, 174 g/kWh Load 80%, 172 g/kWh
	Lub. Oil	System oil	0.15 g/kWh
		Cylinder oil	1.0~1.5 g/kWh

Table 3.2 Fuel component

component	ratio
H (mass%)	10.80
C (mass%)	87.70
S (mass%)	0.99
N (mass%)	0.13
O (mass%)	0.00
density (g/cm ³)	0.91

엔진 성능곡선은 엔진의 100% 부하 상태에서의 토크, 마력, 1시간당의 연료 소비율을 회전수에 대해서 나타낸 그림으로, 엔진 출력곡선이라고도 한다. Fig. 3.1의 성능곡선은 실험엔진의 50%~100% 부하에서 각 수치를

그래프로 나타낸 내용이며, 엔진의 성능을 한눈에 볼 수 있다.

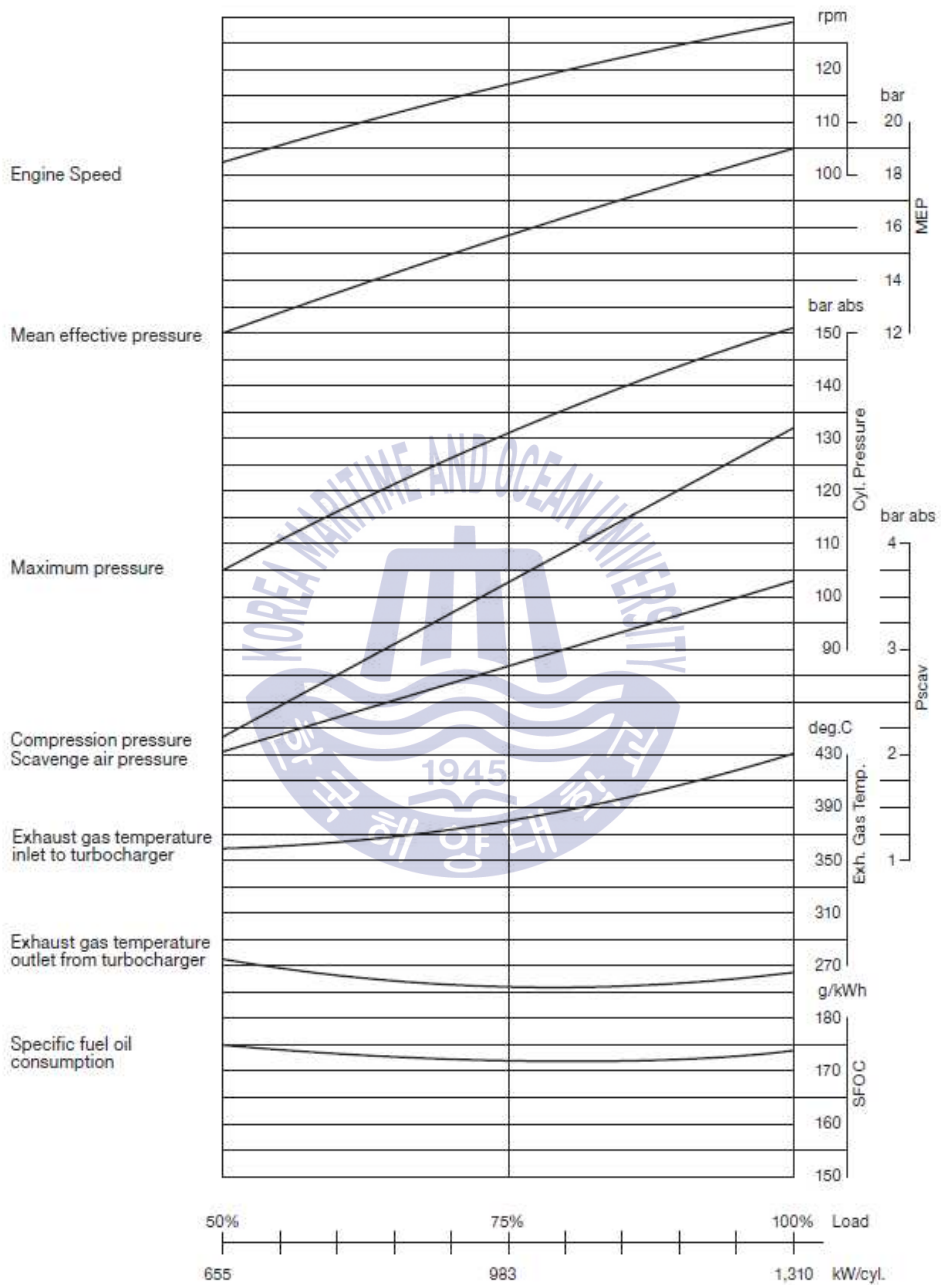


Fig. 3.1 Engine performance curve

3.1.2 동력계

대형 디젤엔진 동력계 시스템은 대형 2행정 선박엔진의 특성 및 성능을 실험하기 위하여 구축된 장비이며, 동력을 흡수하는 본체인 수력형 동력계와 토크(torque)량을 검출하는 하중 검출부, 토크를 제어/계측하는 제어반과 PC제어프로그램으로 구성되어 있다. Fig. 3.2와 Table 3.3에 동력계의 실물사진과 세부사양을 나타내었다.



Fig. 3.2 Hydraulic dynamometer

Table 3.3 Specification of hydraulic dynamometer

Item	Description	Remark
Model	Fuchino CFSR-20.0	-
Max. Power	26,471 kW at 200 ~ 400 rpm	-
Max. Torque	1,264,279 N · m at 128 ~ 200 rpm	-
Max. Revolution	400~500 rpm	-
Torque Measurement Method	Load cell	-
Dynamometer weight	60 ton	-

3.2 SCR 시스템

3.2.1 SCR 시스템 설계기준

3.2.1.1 혼합증발관

환원제인 요소수용액의 증발 및 열분해시간은 혼합증발관에서의 배기가스 유속에 따라 좌우된다. 혼합증발관의 직경은 배기가스의 유속에 직접 관계되므로 관련 자료(일본 미쯔비시사의 사례)를 참고하여 엔진 부하 100%에서 대략 12.5 m/s가 되도록 설계하였다. 또한 혼합증발관의 길이는 SCR 시스템의 육상 실험설비의 설치 위치를 고려하여 최대한 길게 설계하고 요소수용액의 분사모듈 설치 위치를 변경할 수 있도록 하여 향후 선박 내 설치 시 최적 길이를 도출하도록 하였다. Fig. 3.3에서 혼합증발관의 설계 개념도를 표시하였다.

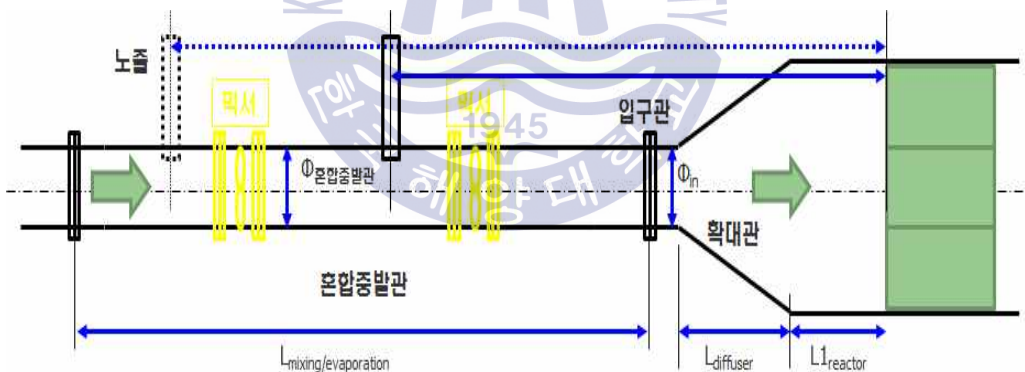


Fig. 3.3 Design concept of mixed evaporator tube

3.2.1.2 촉매반응기

엔진의 부하가 100%로 운전될 때 NO_x의 배출량 또한 최대가 되므로 부하 100%로 운전 될 때의 배기가스 유량과 온도를 기준으로 촉매 반응기의 촉매량을 계산하여 설계하였다.

Table 3.4는 본 SCR 시스템의 실험에 사용되는 엔진과 동일한 모델인 엔진 4기가 IMO NO_x Tier 1 인증시험을 시행할 때 측정된 운전 성능을 평균하여 나타낸 표이다. 이 값을 촉매량 계산에서 기준으로 활용하였다.

Table 3.4 Operation performance of 7,860 kW diesel engine

Engine Load [%]	25	50	75	100
Engine Power [kW]	1,965	3,930	5,895	7,860
Engine Speed [rpm]	81	102	117	129
Fuel flow [kg/h]	381.2	713.9	1,037.6	1,411.4
Max. combustion press. [bar]	75.2	104.3	132.4	150.5
Comp. press. [bar]	41.9	68.1	98.8	124.5
Scavenge air temp. before cylinder [°C]	29.3	25.0	29.0	35.5
Scavenge air press. before cylinder [bar]	0.3	1.0	1.9	2.6
Exhaust back press.[mmH ₂ O]	12.0	58.5	143.3	228.3
Ambient temp. [°C]	15.3	15.8	16.3	17.3
Absolute humidity [g/kg]	7.4	7.2	6.7	7.4
Exhaust Outlet temp. [°C]	260.0	250.0	228.8	247.5
Exhaust gas flow [kg/h]	21,814.1	38,515.3	55,151.6	68,788.2
NO _x concentration(dry) [ppm]	969.0	930.8	947.3	915.8
CO concentration(dry) [ppm]	106.9	93.6	55.7	62.8
CO ₂ concentration(dry) [%]	3.8	4.0	4.1	4.4
O ₂ concentration(dry) [%]	15.8	15.5	15.4	14.8
THC concentration(dry) [ppmC1]	106.2	116.7	107.3	97.8
Measured NO _x Specific Mass flow [g/kWh]	16.3	13.9	13.5	12.1
Measured NO _x Mass flow [kg/h]	32.1	54.5	79.3	95.4
ISO Corr. NO _x Specific Mass flow [g/kWh]	16.3	13.8	13.4	11.9
ISO Corr. NO _x Mass flow [kg/h]	32.1	54.3	78.8	93.4
Perf. Corr. NO _x Specific Mass flow [g/kWh]	18.7	16.5	16.4	13.8
Perf. Corr. NO _x Mass flow [kg/h]	36.8	64.9	96.4	108.1

3.2.1.3 환원제 유량

Table 3.5는 7,860 kW급 디젤엔진에서 NO_x 배출량을 IMO NO_x Tier III 수준으로 저감하고자 할 때 엔진 부하별 NO_x 저감량과 필요한 요소수용액의 투여량(dosing quantity)을 계산한 것이다. 요소수용액의 농도는 40%이며 NO_x의 배출량 계산은 IMO NO_x Technical Code 제5.12.6항의 계산식을 사용하였다.

엔진의 회전속도는 129 rpm 이므로 Tier II의 NO_x 배출 기준치는 14.4 g/kWh이고 Tier III 기준치는 3.4 g/kWh이다. 각 기준치를 만족하도록 Table 3.4의 동일 모델 엔진의 부하별 NO_x 배출량 변화 및 NO_x Technical Code의 가중치를 적용하여 부하별로 NO_x 배출량을 배분하면 Tier II의 경우 엔진 부하 25%에서 NO_x 배출량은 15.4 g/kWh(30,030 g/h), 엔진 부하 100%에서 13.9 g/kWh(108,420 g/h)이며, Tier III의 경우 엔진 부하 25%에서 4.4 g/kWh(8,580 g/h), 엔진 부하 100%에서 2.9 g/kWh(22,620 g/h)이다.

각 엔진 부하의 Tier III에서 NO_x 질량유량(g/h)값에서 Tier II의 NO_x 질량유량(g/h)값을 빼면 부하별 저감해야 하는 NO_x의 질량유량(g/h)값을 구할 수 있으며, 엔진 부하 25%에서 21,450 g/h, 100%에서 85,800 g/h이다. 따라서 NO_x 저감에 요구되는 요소수용액의 투여량은 엔진 부하 25%에서 524.03 mL/min, 엔진 부하 100%에서 2,096.13 mL/min이다.

같은 방법으로 Tier I의 NO_x 배출량을 Tier III 수준으로 저감할 경우 요구되는 요소수용액의 유량은 엔진 부하 25%에서 647.9 mL/min, 엔진 부하 100%에서 2,591.58 mL/min로 계산된다.

이 계산결과를 바탕으로 도징장치의 환원제 유량제어 범위는 엔진 부하 25%에서 Tier II의 NO_x 배출량을 Tier III 수준으로 저감하고자 할 때 필요한 환원제 유량의 90%(470 mL/min)를 최소로 하고 엔진 부하 100%에서 Tier I의 NO_x 배출량을 Tier III 수준으로 저감하고자 할 때 필요한 유량의 110%(2,850 mL/min)를 최대로 설계하였다.

Table 3.5 Dosing flow rate calculation of urea for 7,860 kW diesel engine

Load	%	25.00	50.00	75.00	80.00	
Power	kW	1,950	3,900	5,850	7,800	
Weighting factor		0.15	0.15	0.50	0.20	
Tier I (NOx Limit 17.00 g/kWh)						
NOx flow rate	g/kWh	18.00	17.50	17.00	16.50	
	g/h	35,100	68,250	99,450	128,700	
Spec. NOx flow rate	g/kWh	16.96				
Tier II (NOx Limit 14.40 g/kWh)						
NOx flow rate	g/kWh	15.40	14.90	14.40	13.90	
	g/h	30,030	58,110	84,240	108,420	
Spec. NOx flow rate	g/kWh	14.36				
Tier III (NOx Limit 3.40 g/kWh)						
NOx flow rate	g/kWh	4.40	3.90	3.40	2.90	
	g/h	8,580	15,210	19,890	22,620	
Spec. NOx flow rate	g/kWh	3.36				
Tier II ↓ Tier III	Reduction Nox	g/h	21,450	42,900	64,350	85,800
		g/h	34,964	69,927	104,891	139,854
	Needed urea	g/min	583	1,165	1,748	2,331
		g/s	9.71	19.42	29.14	38.85
Needed urea water solution	Liter/h	31.442	62.884	94.326	125.768	
	mL/h	524.03	1,048.07	1,572.10	2,096.13	
	mL/s	8.73	17.47	26.20	34.94	
Tier I ↓ Tier III	Reduction Nox	g/h	26,520	53,040	79,560	106,080
		g/h	43,228	86,455	129,683	172,910
	Needed urea	g/min	720	1,441	2,161	2,882
		g/s	12.01	24.02	36.02	48.03
	Needed urea water solution	Liter/h	38.874	77.747	116.621	155.495
		mL/h	647.90	1,295.79	1,943.69	2,591.58
mL/s		10.80	21.60	32.39	43.19	


3.2.2 촉매모듈

촉매모듈의 촉매량은 Table 3.4를 참고하여 엔진 출력 100% 상태일 때의 배기가스 유량 및 주요 구성 성분(H_2O , O_2 , CO_2 , NO_x , SO_2) 농도 및 배기가스 온도 240 °C를 기준으로 설계하였다.

촉매량 설계는 설계 조건을 기준으로 촉매 체원, 촉매활성물질 농도 등을 반영하여 이루어짐으로써 경제적으로나 성능보증적인 면에서 가장 적합한 촉매가 될 수 있도록 하였다.

Fig. 3.4에는 촉매 제작사에서 작성한 촉매 기술규격서를 나타내었다.

촉매의 주요 화학성분은 $V_2O_5-WO_3-TiO_2$ 이며 촉매량은 9.19 m^3 이다. 촉매모듈은 가로와 세로 150 mm, 높이가 420 mm인 단위 촉매를 사용하여 제작하였다. 가로, 세로 각 9개의 단위 촉매로 촉매층을 구성하였으며 촉매층수는 3개층으로 제작하여 총 243개의 단위 촉매가 소요되었다. 촉매의 공간속도(SV, Space Velocity)는 $5,956 h^{-1}$ 이며 촉매의 성능보증 조건으로는 엔진 출력 100% 상태에서 NO_x 제거 효율은 74.2% 이상이고 사용 수명은 16,000시간 또는 3년으로 하였다.

	SCR Catalyst 기술규격서 (Technical Specification for SCR Catalyst)	문서번호	
		DATE	
		Rev.	A

2. Bid Datasheet for catalyst

A. Catalyst

1) Manufacturer	NANO CO., LTD.
2) Type/Model	Honeycomb/NH-SCR-35
3) Chemical composition	V ₂ O ₅ -WO ₃ -TiO ₂
4) Number of catalyst layer per reactor (initial/future)	3 / 1
5) Number of Module installed per layer	81 (9 x 9)
6) Number of Catalyst installed per layer	324
7) Catalyst pitch, (mmW x mmL)	4.23x4.23
8) Catalyst wall thickness(mm)	0.55
9) Catalyst specific surface area (m ² /m ³)	Approx. 801
10) Catalyst density (g/cm ³)	0.5
11) Catalyst void fraction (%)	73.62
12) Catalyst block size(mmWxmmLxmmH)	150x150x420
13) Operating temperature, (°C)	240
14) Allowable temperature, min./max.(°C)	220 / 400
15) Allowable catalyst temperature rising rate (°C/min)	10°C/min up to 150°C Max. 60°C/min over 150°C
16) Duration of operating time at min./max. allowable temperature(hr)	continuously
17) Pressure drop at normal operation per layer Fresh/Dirty, mmH ₂ O	16.0 / 18.0
18) Initial Catalyst Volume (m ³)	9.19
19) Gas hourly space velocity (hr ⁻¹)	5,956
20) Area velocity (m/hr)	7.44
21) Gas linear velocity(m/s)	
- At the reactor	3.92
- In catalyst	5.32

Fig. 3.4 Technical specification for SCR catalyst

3.2.3 기계장치

7,860 kW급 SCR 시스템의 기계장치는 배기가스 바이패스용 3-way 밸브장치, 배기 파이프, 혼합증발관, 촉매반응기, 2-way 밸브장치 등으로 구성된다.

배기가스 바이패스 3-way 밸브장치와 2-way 밸브장치는 SCR 시스템이 탑재된 선박이 IMO가 결정한 NECA(NOx Emission Control Area)를 운항할 때만 촉매반응기로 배기가스를 통과하도록 하는 장치이다.

혼합증발관은 내부에 Static mixer가 설치된다. Static mixer 전단 또는 후단에 요소수용액 분사노즐이 설치되며 혼합증발관은 촉매반응기의 디퓨저와 연결된다.

촉매반응기는 디퓨저, 반응기 본체, 리듀서로 구분되며 반응기 본체는 내부에 촉매층, 촉매층 지지대, 촉매세정용 노즐과 파이프가 설치되고 본체 한 면에 촉매 문(door)이 촉매층의 개수만큼 설치된다.

촉매반응기의 디퓨저는 혼합증발관과 반응기 본체를 연결하는 것으로 내부에 안내 날개(Guide vane)가 설치되어 반응기 본체에 배기가스를 유동균일도가 90% 이상 되도록 공급하여 촉매층에서 질소산화물의 저감효율이 최대가 되게 하는 역할을 한다.

반응기 본체 내부에 설치된 촉매층 지지대 위에 설치된 촉매 문(door)를 통해 촉매모듈을 설치하고, 각 촉매모듈과 일정 거리를 두고 촉매세정용 노즐과 파이프를 설치한다.

반응기 본체와 배기 파이프를 연결하기 위한 리듀서는 배기가스 배압이 작게 걸리도록 설계 제작한다. Fig. 3.5에는 SCR 시스템의 기계장치 구성도를 나타내었고, Fig. 3.6에는 설계 도면을 나타내었다.

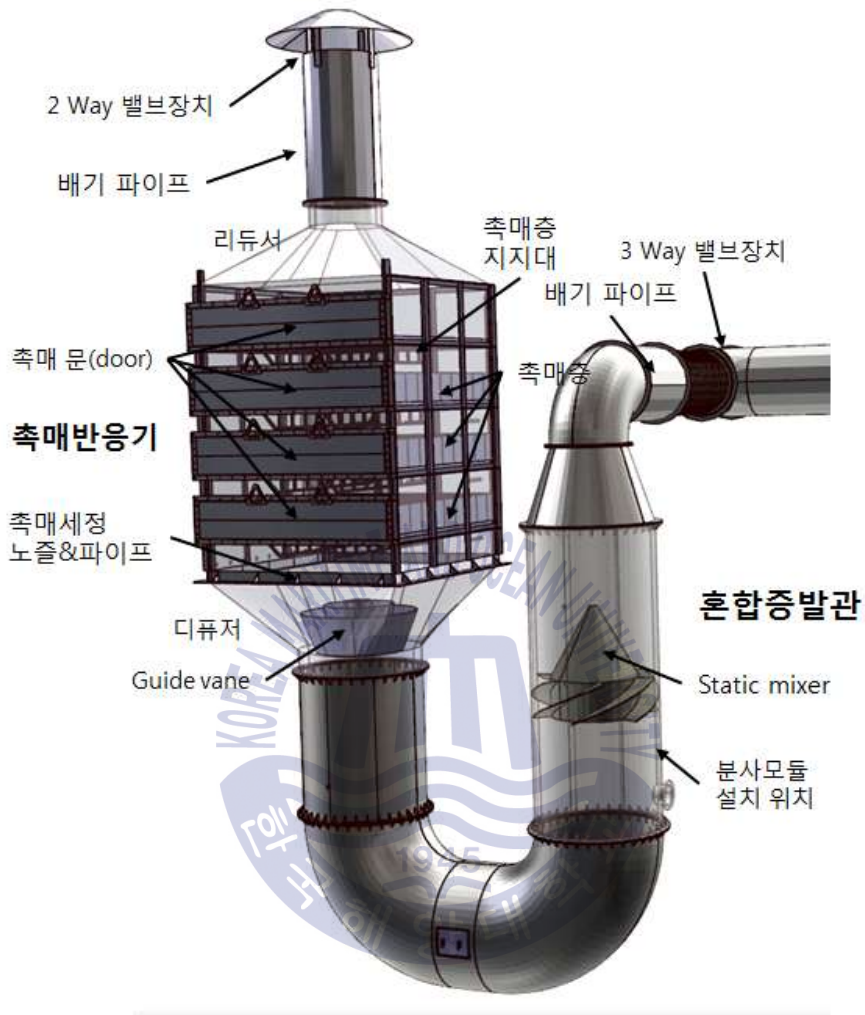


Fig. 3.5 Diagram of SCR system

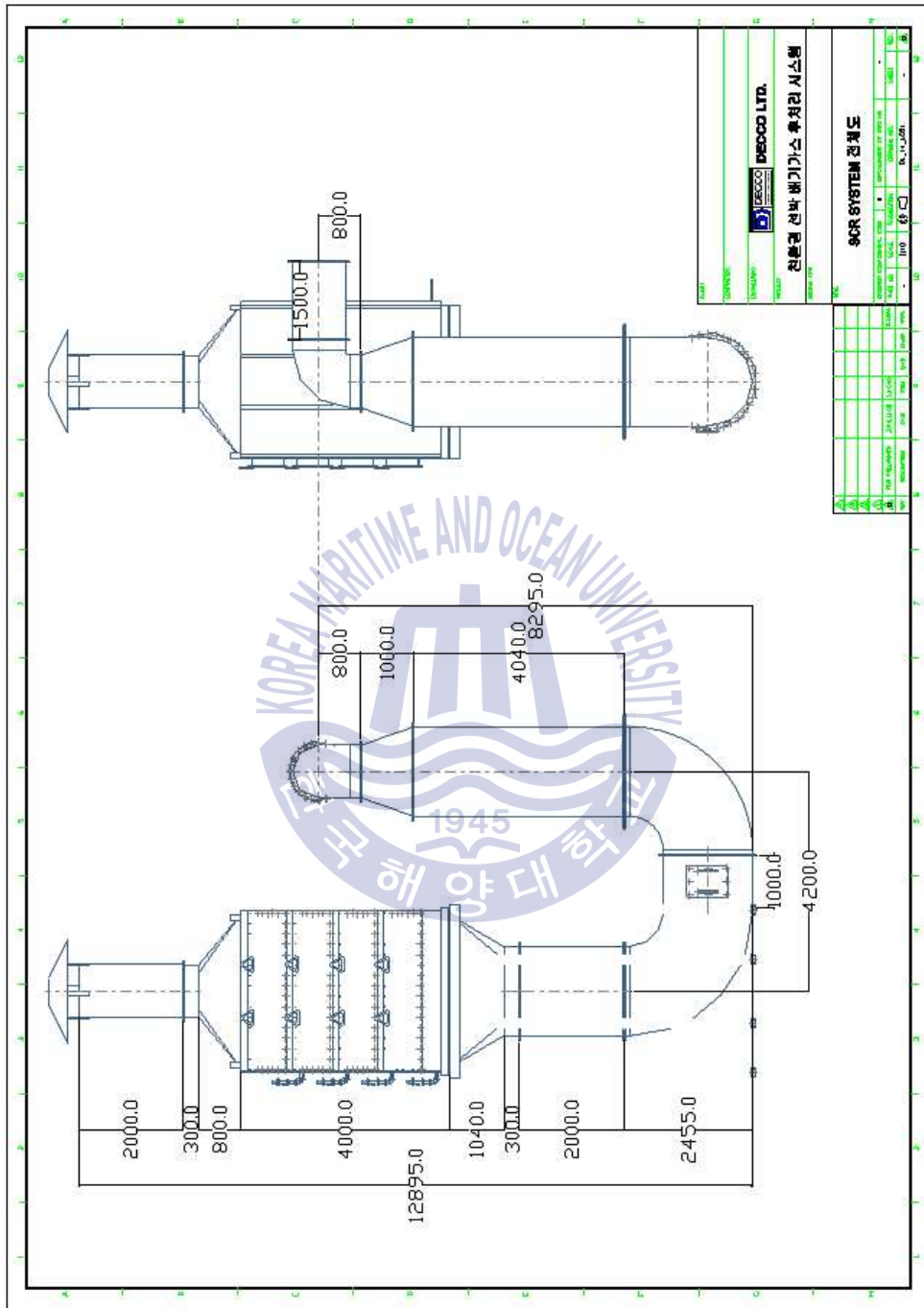


Fig. 3.6 Drawings of machinery in SCR System

3.2.4 요소수용액 공급 시스템

요소수용액 공급 시스템은 혼합증발관에 요소수용액을 분무 상태로 분사하는 분사노즐, 엔진에서 배출되는 질소산화물의 배출량과 연계되어 요소수용액량 및 공기량을 제어하며 분사노즐에 공급하는 분사제어장치(DCU, Dosing Control Unit), 요소수용액을 일정 압력으로 공급하는 펌핑장치, 엔진 운전시간동안 사용되는 요소수용액을 저장하는 저장장치의 4부분으로 구성된다. Fig. 3.7은 요소수용액 공급 시스템의 계통도이다.

요소수용액은 요구유량의 증감에 따라 단계적으로 분사량이 제어된다. 요소수용액 분사량 1차 제어요소는 엔진 출력, 연료 유량, 엔진 회전속도 및 급기압력, 배기가스 유량 중에서 선택할 수 있으며, 현재 시스템에서는 배기가스 유량을 선택하였다. 그리고 NO_x 온습도 보정을 위하여 대기 조건(실내 온도, 압력 및 습도)을 센서로 부터 받아 보정과정을 거쳐 적정량의 요소수용액을 분사한다. 촉매반응기 전후의 NO_x 센서 값에 따라 계산된 NO_x 제거효율을 목표 효율과 비교하여 요소수용액량을 시간적분 하여 수정하게 된다.

요소수용액은 펌핑장치에서 최대 유량의 2배 용량의 펌프를 통하여 가압되며 1차 압력 조절기(RV PRI, Primary Pressure Regulator)에서 잉여압력의 요소수용액이 저장탱크로 반환된다. 이로 인해 요소수용액 공급계통의 압력이 일정하게 유지된다.

요소수용액의 유량은 선형제어밸브(LC, Linear Control Valve)에 의하여 조절되며, 유량측정 센서(FT, Flow Transducer)로부터 받은 유량의 값이 피드백 되어 분사제어장치(DCU, Dosing Control Unit)에 의하여 제어된다.

분사용 고압 공기는 공기압축기(AC, Air Compressor)에서 압축된 공기가 에어 리저버(AR, Air Reservoir)에 저장된 후 2차 압력조절기(2nd Pressure Regulator)에 의하여 일정한 압력으로 공급된다.

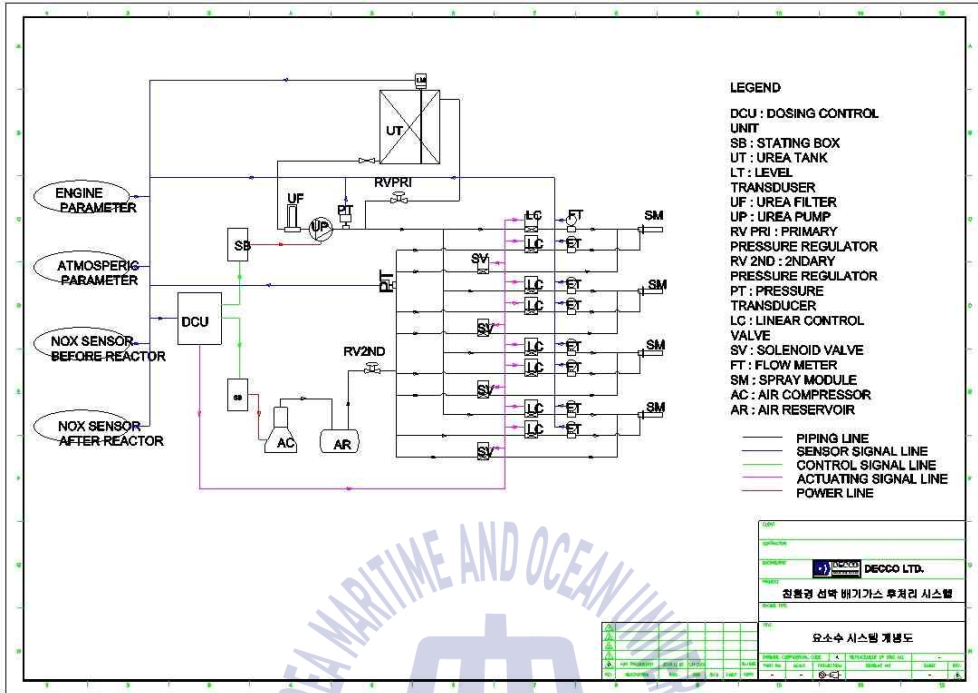


Fig. 3.7 Schematic diagram of urea solution supply System

3.2.5 계측용 센서(Sensor)

SCR 시스템 성능 및 제어를 위하여 여러가지 센서들이 엔진 및 SCR 시스템에 설치된다. Fig. 3.8에 센서의 설치도를 나타내었으며 각 센서별 용도는 다음과 같다.

- (1) NT(Engine speed Transducer) : 엔진의 회전수를 검출하는 센서로 엔진의 출력 조건과 NOx 배출량 추정치를 계산하는데 사용된다.
- (2) PT(Pressure Transducer) : 소기 압력을 검출하는 센서이며 엔진의 회전수와 함께 엔진 출력 조건과 NOx 배출량 추정치를 계산하는데 사용된다.
- (3) FT(Flow Transducer) : 3 Way 댐퍼 입구 쪽에 설치되는 가스유량계이며 엔진의 배기가스량을 측정하여 의해 NOx 배출량을 계산하는데 사용된다.

(3) TT(Temperature Transducer) : 배기가스, 믹서 입구, 반응기 입구 및 반응기 출구의 온도를 검출하여 3 Way 댐퍼의 개폐를 조절한다. 소기의 온도를 검출하여 NOx 온습도 보정치를 실측하고, NOx 배출량 추정치를 보정하는데 사용한다.

(5) HT(Humidity, Temperature Transducer) : 실내 습도 및 온도를 검출하는 센서이며 NOx 습도 및 온도 보정치를 결정하는데 사용된다.

(8) NX1, NX2(NOx Sensor) : 혼합증발관 전단과 반응기 출구의 NOx 농도를 검출하고 NOx 제거효율을 실측하여 요소공급량 제어의 비례정수를 수정하는데 사용된다.

(13) DPT(Differential Pressure Transducer) : 반응기 전후의 압력차를 검출하여 촉매의 오손정도를 추정하는데 사용된다.

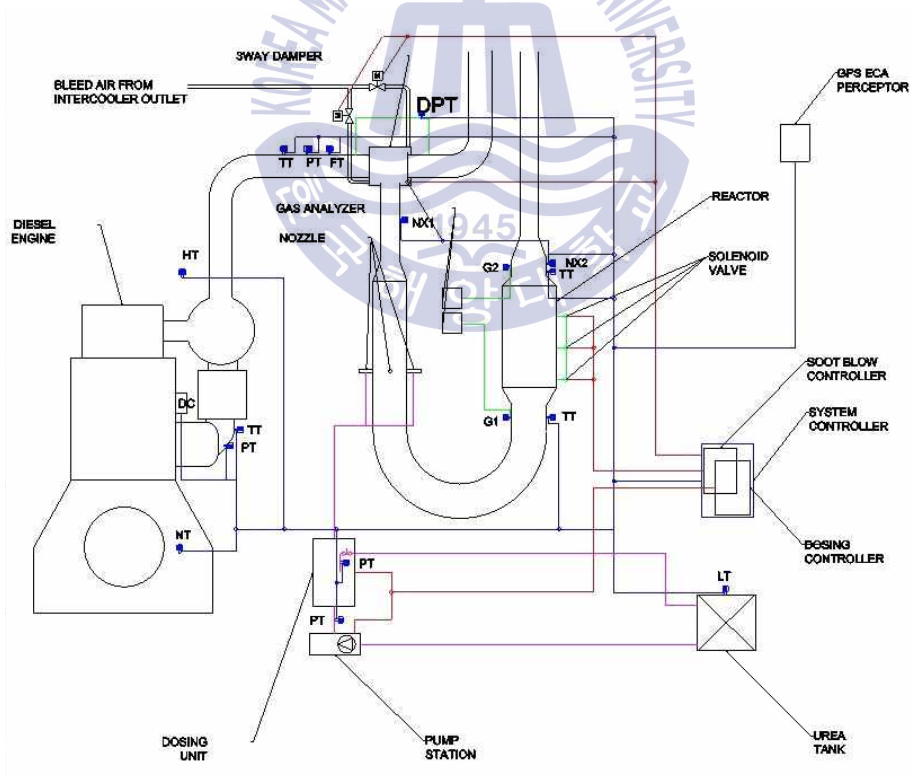


Fig. 3.8 Installation diagram of sensor for control

3.2.6 제어 시스템

SCR 시스템을 제어하기 위해 입출력 장치와의 통신하는 모듈들이 제어 장치와 Ethernet으로 통신할 수 있도록 하였다. 각 센서 신호 및 기타정보를 그래프로 나타내어 모니터링, 저장 및 출력이 가능하도록 하였으며 저장된 데이터를 현재 데이터와 비교 가능하도록 설계하였다. Fig. 3.9는 7860 kW급 SCR 제어 시스템의 전체 구성도를 나타낸 그림이다.

제어시스템에 사용된 인터페이스 장치, NI DAQ는 입출력 신호 형태에 따른 아날로그 입력 모듈(NI9208)과 아날로그 출력 모듈(NI9265), 디지털 입·출력 모듈(NI9375) 그리고 CAN 통신용 모듈(NI9862)로 이루어져 있다. NI9208에서는 센서 입력(배기가스 압력 및 온도, 엔진 회전속도, 실내 온·습도 등)을 4~20 mA의 전류 신호로 입력받아 모니터링하고 환원제의 도징량을 결정하는 요소로 활용하게 된다.

도징장치를 제어하기 위해서 요소수용액 및 압축공기의 유량센서 정보를 아날로그 입력인 NI9208에서 수신하고, 아날로그 출력모듈인 NI9265에서 제어밸브를 제어하는 신호를 출력한다. 퍼징을 위한 솔레노이드 밸브는 디지털 출력 모듈 NI9375에서 제어 신호가 출력된다. 또한 NI9375모듈은 펌핑장치의 전원제어를 위한 신호도 출력하게 된다. 그리고 촉매세정 장치를 제어하기 위해 NI9265에서 출력신호를 보내고, 배기가스 바이패스를 위한 3 Way 댐퍼로부터 출력된 피드백 신호를 다시 9208에서 수신하여 3 Way 댐퍼의 제어가 이루어지도록 하고 있다. 마지막으로 NI9862모듈에서는 질소산화물 측정 센서의 신호를 수신하여 처리할 수 있는 모듈로 CAN통신이 가능하도록 하는 모듈이다.

3.3 가스분석 시스템

엔진의 NO_x 배출량 확인 및 SCR 시스템의 최종 성능확인을 위해서 NO_x Technical Code를 만족하는 분석 장치로 시스템을 구성하였다.

3.3.1 엔진 배기 후단 가스분석시스템

엔진 후단의 배기가스를 분석하기 위하여 IMO NO_x Technical Code에서 규정한 사양을 만족하는 이동식 분석기 및 이동식 전처리 장치로 구성된 이동식 측정시스템을 Fig. 3.10과 같이 구성하였으며 상세사양은 Table 3.6에 표시하였다. Fig. 3.11은 실물사진을 나타내었다.

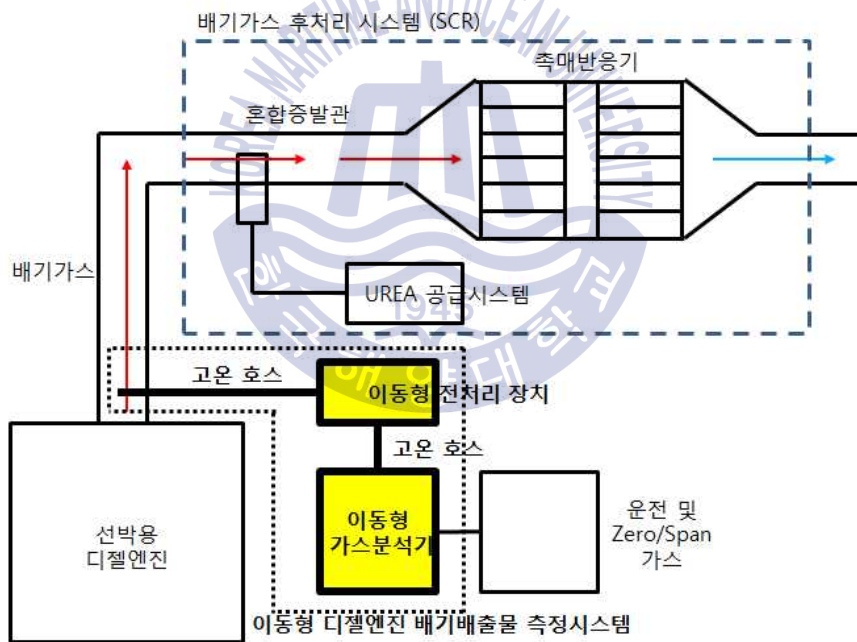


Fig. 3.10 Installation diagram of exhaust gas analysis system

Table 3.6 Specification of exhaust gas analysis system

Item		Description	Remark
Model		HORIBA MEXA-1600D	-
Item		NO/NO _x , CO, CO ₂ , THC, O ₂	-
Analysis method	NO/NO _x	CLD (Chemi-Luminescence Detection), dry	Satisfies requirements of NO _x Technocal Code
	CO, CO ₂	NDIR (Non-Disperdive InFared method), dry	
	THC	HFID (Heated Flame Ionization Detection), wet	
	O ₂	MPD (Magneto-Pneumatic Detection), dry	
Range	NO/NO _x	0~500/1000/2000/5000 ppm (4 ranges or more)	-
	CO	0~500/1000 ppm, 0~1/10 % (4 ranges or more)	-
	CO ₂	0~8/16 % (2 ranges or more)	-
	THC	0~500/1000/2000/5000 ppmC (4 ranges or more)	-
	O ₂	0~10/25 % (2 ranges or more)	-
Response time of analyzer (T90)	NO/NO _x	3.0 s or less	-
	CO	3.0 s or less	-
	CO ₂	2.0 s or less	-
	THC	2.0 s or less	-
	O ₂	2.5 s or less	-
Interference for each analyzer & Sensitivity for individual HC		Satisfies requirements of IMO NO _x Technical Code	-



Fig. 3.11 Exhaust gas analysis system

3.3.2 촉매반응기 전단 가스분석시스템

촉매 반응기 전단에는 요소수용액의 암모니아 변환성능 측정을 위해서 암모니아(NH_3)와 이소시아산(HNCO)의 측정이 가능하고, 디젤엔진의 배기 가스 상태 및 NO_x 배출량을 동시에 확인할 수 있도록 CO , CO_2 , HC , O_2 , NO , NO_2 가 측정 가능한 가스분석기를 설치하였다. 위 조건을 만족하는 모델 중 다양한 종류의 화합물을 동시에 측정 가능하고 신뢰성이 높으며, 이동이 용이하고 사용이 쉬운 가스분석기를 선정하였다.

Table 3.7에는 가스분석기의 상세사양을, Fig. 3.12에는 설치된 가스분석기의 사진을 나타내었다.

Table 3.7 Specification of the gas analysis system before reactor

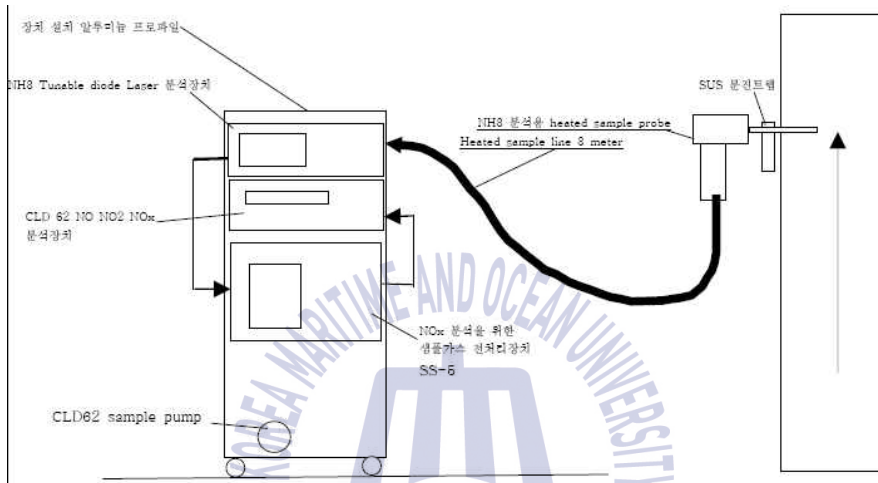
Item	Description
Maker / Model	Gasmet(Finland) / DX-4000
Features	<ul style="list-style-type: none"> - 가스분석장비의 교정장비로 활용됨 - 350여가지 가스 분석이 가능 - 최대 50가지 가스를 동시에 분석 가능 - 현장 측정에 유리한 휴대용 분석기 - 습 배기 가스를 Hot-Wet로 측정 - 측정범위가 매우 넓음 (낮은 ppm농도에서 고농도 % 까지 가능)
Analysis method	Fourier Transform Infrared, FTIR
Range	가스 흐름 및 측정 시간에 따라 보통 120초 이하
Gas Analysis Working Temp.	<ul style="list-style-type: none"> - short measurement : 0 ~ 40℃ - long measurement : 15 ~ 25℃



Fig. 3.12 Gas analysis system before reactor

3.3.3 촉매반응기 후단 가스분석시스템

촉매반응기의 질소산화물 전환 성능 및 암모니아 슬립 성능을 확인하기 위해 NO_x 및 NH₃ 가스분석기를 설치하였다. Fig. 3.13과 같이 질소산화물 및 암모니아 분석기를 동일한 샘플 프로브와 처리시스템으로 구축하였다.



(a) Diagram of Gas analysis system



(b) Gas analyzer & Pretreatment device

Fig. 3.13 Gas analysis system after reactor

암모니아 분석기는 가변다이오드 레이저(TDLAS, Tunable Diode Laser Spectrometric)분석기술을 탑재한 최신기술의 NH₃ 가스 성분 분석 장치이다. 가변다이오드 분광분석기술은 자동적으로 연속 포집된 가스 샘플에 해당 성분에 반응하는 파장의 레이저 빛을 투과시켜 해당 성분이 발광하는 것을 이용하여 암모니아에 반응한 미세한 전류의 변화 값을 측정 해주는 기술이다. 가스분석기의 상세 사양은 **Table 3.8**과 같다.

Table 3.8 Specification of the gas analysis system after reactor(Airwell)

ITEM	Description	Remark
Model	Airwell	-
Applied wavelength	Wavelength 1.5 μ m	-
Measuring range	0 -100 ppm (표시 정밀도 0.1ppm) *100ppm 이상시 1ppm	-
Concentration range of standard calibration	0 - 100 ppm	측정 센서의 안전을 고려한 최고농도 1000 ppm. (1000 ppm 농도이상 측정값은 표준 정확도 2% 이상의 비직선성을 갖을 수 있음)
accuracy	± 2 % of reading	-
Precision	$2\sigma \pm 0.9$ ppm	
Zero drift	1 h period	+/-2% 표준 가스 실험기준
Span drift	1 h period	+/-2% 표준 가스 실험기준
Sampling Flow rate	3 liter/min under 0.1bar	-
Sample gas conditions	Temperature : up to 190°C Moisture content : under 10% vol & dust free.	-

질소산화물 분석기는 화학발광(Chemiluminescence - CLD) 분석법을 이용한 기술로 광전 튜브(PMT, Photomultiplier)를 이용하여 NO가스를 증폭시켜 NOx를 분석해주는 장치이다. 상세 사양은 Table 3.9에 나타내었다.

Table 3.9 Specification of the gas analysis system after reactor(CLD)

ITEM	Description	Remark
Model	EcoPhysics CLD 60	-
Warm up	about 30 min	-
Step 4 measurement range	5, 50, 500, 5000 ppm	-
measurement unit	0.5 ppm	-
Zero noise	(1%) 0.2 ppm	-
Initial response time	1 sec within 1 meter distance	-
response time	T=90% 3 sec	-
Working temp.	5-40°C	-
Humidity Operating Range	5-95% rel. h	non-condensing, ambient air and sample gas
Sampling Flow rate	35 mL/min	-
Sampling pressure	대기압	-

3.3.4 배출가스 통합모니터링 시스템

배출가스 측정을 위하여 설치된 3종류의 가스분석기는 자체 측정량 모니터링 시스템을 구비하고 있으나, 실험 시 측정시각을 동기화하여 3종류의 가스분석기를 실시간으로 통합 모니터링, 데이터 분석 및 저장을 할 수 있도록 배출가스 통합 모니터링 시스템을 설치하였다.

Fig. 3.14는 디젤엔진, 촉매반응기, IMO 가스분석기(Horiba), FTIR 가스분석기(Gasmet), NOx/NH₃ 분석기(Airwell)로부터의 각각 데이터 신호를 입

력, 모니터링 및 퍼징 제어하는 배출가스 통합 모니터링 및 제어 장치의 개념도를 나타낸 것이며 Fig. 3.15는 배출가스 통합 모니터링 및 제어 장치의 모니터 화면이다.

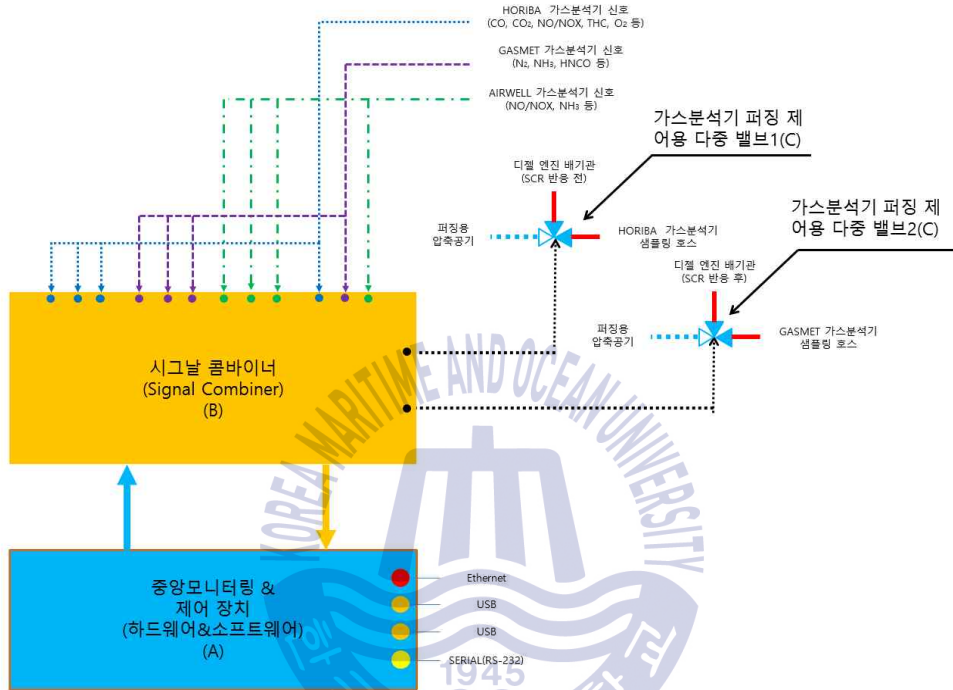


Fig. 3.14 Concept of exhaust gas integrated monitoring device

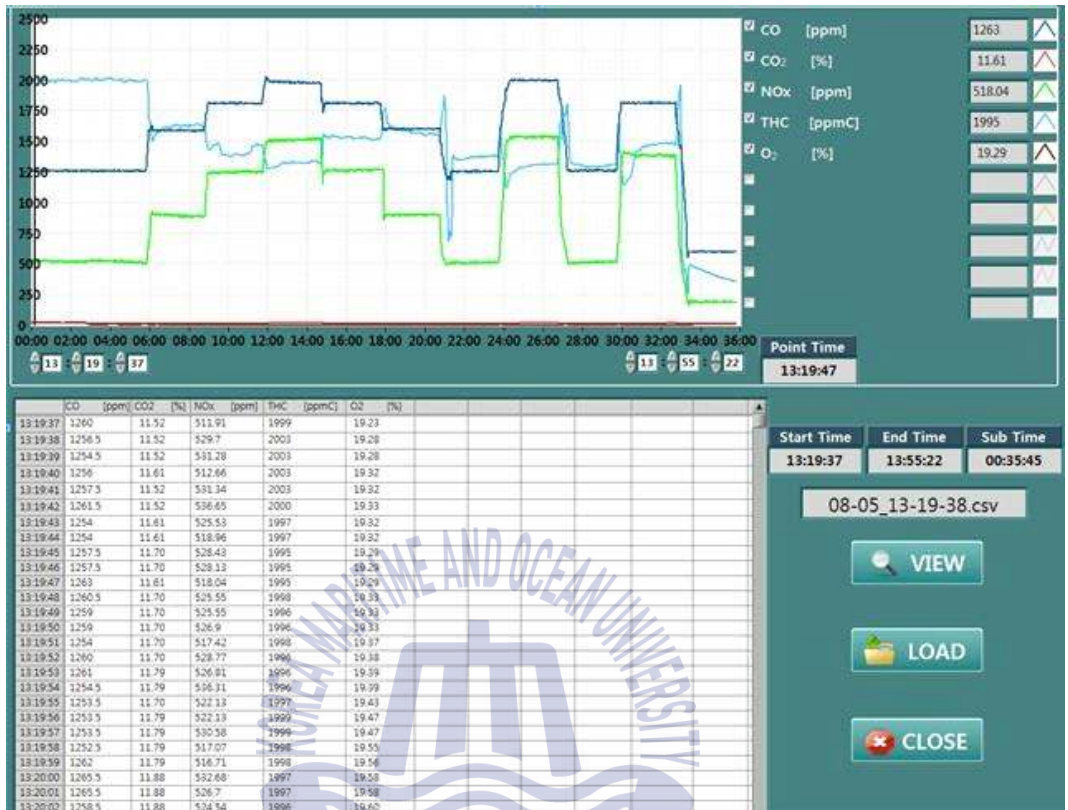


Fig. 3.15 Exhaust gas integrated monitoring device monitor

3.4 실험방법

SCR 시스템의 육상엔진 실증실험은 예비실험인 SCR 시스템 구성품 작동 실험, 엔진 부하별 엔진 파라미터 실험 및 본실험인 NOx 저감성능 및 암모니아 슬립 확인 실험의 3단계로 구분하여 진행하였다.

SCR 시스템 구성품 작동 실험은 NOx 저감성능을 측정하기 전에 SCR 시스템의 구성품들이 정상으로 작동하는지 여부와 엔진과의 트러블 확인을 위해 진행하는 실험이다.

엔진 부하별 온도 변화 및 엔진 파라미터 실험은 실험대상 엔진의 기본 성능 데이터와 별도로 SCR 시스템과 함께 작동될 때의 엔진의 기본 성능

을 알기위해 실시되는 시험이다.

NO_x 저감성능 및 암모니아 슬립 확인 실험은 환원제를 이룬 수치로 분사할 경우 NO_x 저감 성능 및 엔진 부하 변동에 따른 암모니아 변화 반응시간을 확인함으로써 SCR 시스템의 최종 성능을 확인하고 시스템 운용조건을 검토하는 실험이다.

3.4.1 SCR 시스템 구성품 작동실험

(1) 목적

SCR 시스템에 엔진의 배기가스가 유입되는 상태에서 SCR 시스템을 구성하는 주요 부품의 작동상태를 확인하고, 3 Way 댐퍼와 덕트 버너의 최적 작동 범위를 확인하기 위한 실험이다.

(2) 실험방법

초기 엔진 부하 변경 시 약 20분간의 충분한 부하변동 시간을 두고 부하를 증가시키고 50% 부하에서 약 40분간의 안정화시간이 필요하다. 엔진이 안정화가 된 후에 60분간 3 Way 댐퍼의 개폐 작동실험을 3회 반복하여 실시한다. 50% 부하에서 3 Way 댐퍼의 개폐 상태 변경에 따른 SCR 시스템의 작동상태 및 유량변화를 확인한다. 3 Way 댐퍼 작동실험 후 덕트 버너(Duct Burner) 점화실험을 실시하여 덕트 버너의 점화 상태와 SCR 반응기 전단에서의 온도변화를 확인한다.

75% 부하로 변동 후 배기가스온도가 안정되면 덕트 버너 점화실험을 다시 실시하고 온도보상 값을 확인한다. 엔진 정지 후 수트 블로워(Soot Blower)의 순차적 작동상태를 확인한다.

구성품 작동실험 계획과 부하 및 엔진 속도 변화 예상 그래프를 Table 3.10과 Fig. 16, Fig. 17에 표시하였다.

Table 3.10 SCR System component operation test plan

no.	Engine load / power		Engine speed (rpm)		Load change (min)	Stabilization time (min)	Test time (min)	Experiment time (min)
1	50%	3,700kW	80%	102	20	40	60	120
2	50%	3,700kW	80%	102	-	-	30	30
3	75%	5,550kW	91%	117	20	20	30	70
4	75%	5,550kW	91%	117	-	-	10	10
5	75%	5,550kW	91%	117	-	-	60	60
6	75%	5,550kW	91%	117	-	-	60	60
7	75%	5,550kW	91%	117	-	-	60	60
8	0%	0kW	0%	0	30	-	-	30
Total experiment time								440

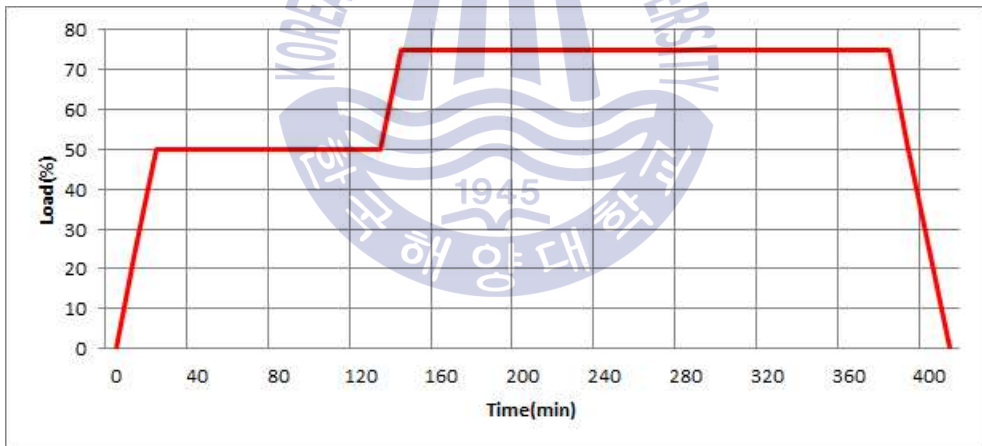


Fig. 3.16 Load variation graph of SCR system component operation experiment

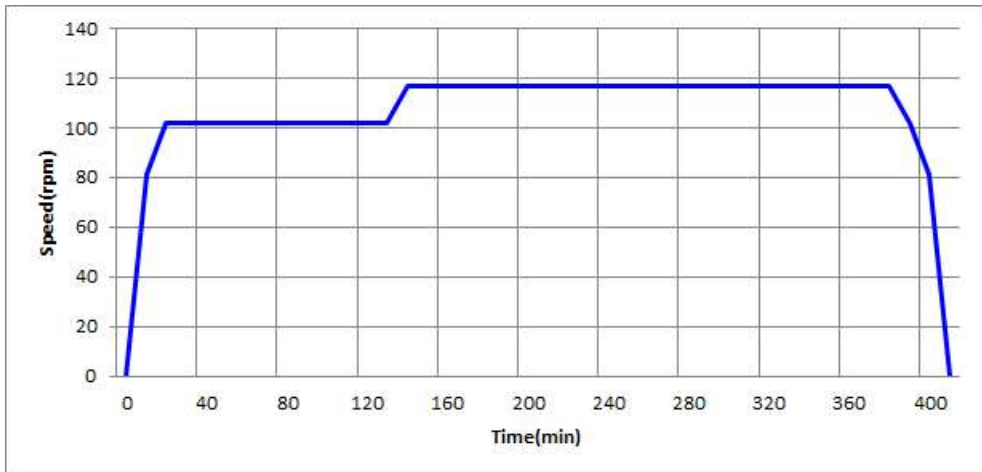


Fig. 3.17 Speed change graph of SCR system component operation experiment

3.4.2 엔진 부하별 엔진 파라미터 획득실험

(1) 목적

NO_x 배출량 및 SCR에 영향을 줄 수 있는 엔진의 기본 파라미터들을 확인함으로써 급기압력, 엔진 회전수, 출력, 배기가스량, 촉매 온도변화, NO_x 농도에 따라 요소수량 결정 알고리즘의 초기 입력치를 결정하기 위한 실험이다.

엔진의 기본 파라미터는 SCR의 성능을 제어하는데 가장 기초적인 데이터이며, 엔진 제조사에서 제공하는 성능실험 결과를 바탕으로 알고리즘을 개발하고 본 실험에서 실제 파라미터를 확인함으로써 세부적인 초기 입력치를 결정하게 된다.

(2) 실험방법

각 부하에서 NO_x 계산을 위한 파라미터 및 엔진의 배압과 배기가스의 수분함량을 확인한다. 100% 부터 25% 까지 부하를 줄여가며 실험하고, 각 부하별로 데이터 안정화 시간 포함하여 30분의 측정시간을 가진다. 단, 초기 100% 부하로 실험하기 전에 충분한 부하변동 시간(약 40분) 및

엔진 안정화시간(약 40분)이 필요하다.

엔진 부하별 엔진 파라미터 획득실험 계획과 부하 및 엔진 속도 변화 예상 그래프를 Table 3.11과 Fig. 18, Fig. 3.19에 표시하였다.

Table 3.11 Parameter acquisition test plan for each engine load

no.	Engine load / power		Engine speed (rpm)		Load change (min)	Stabilization time (min)	Test time (min)	Experiment time (min)
1	100%	7,400kW	100%	129	40	40	10	90
2	90%	6,660kW	100%	129	10	20	10	40
3	75%	5,550kW	91%	117	10	20	10	40
4	67.5%	4,995kW	91%	117	10	20	10	40
5	50%	3,700kW	80%	102	10	20	10	40
6	45%	3,330kW	80%	102	10	20	10	40
7	25%	1,850kW	63%	81	10	20	10	40
8	22.5%	1,665kW	63%	81	10	20	10	40
Total experiment time								370

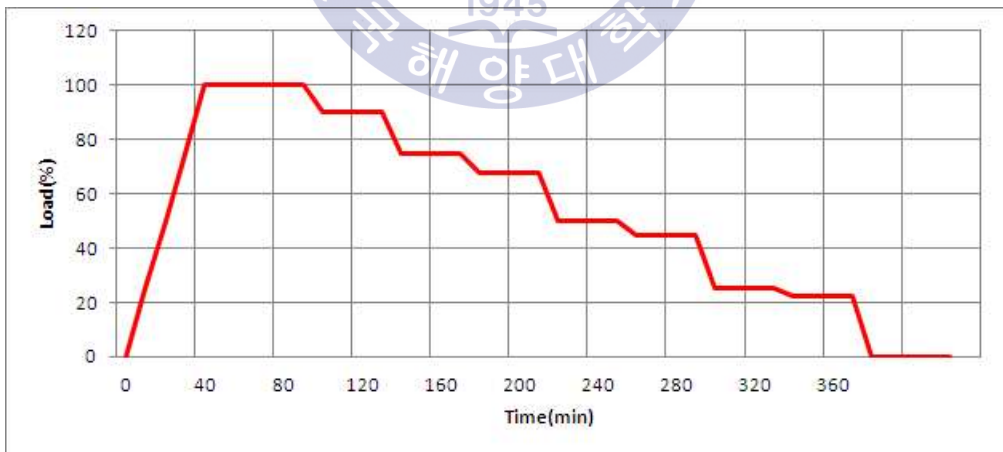


Fig. 3.18 Load variation graph of Parameter acquisition test by engine load

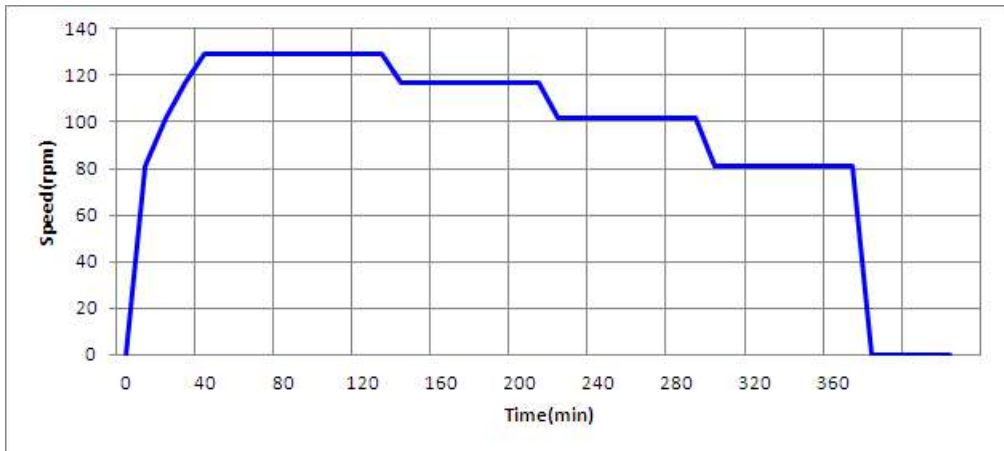


Fig. 3.19 Speed change graph of parameter acquisition test by engine load

3.4.3 NOx 저감성능 및 암모니아 슬립 측정실험

(1) 목적

엔진 파라미터 획득실험에서 획득한 실제 엔진의 각 파라미터를 요소수 용액 공급 시스템의 알고리즘에 대입하여 요소수용액 최적 분사량을 결정하고 본 SCR 시스템의 최종 NOx 저감성능을 확인하기 위한 실험이다.

(2) 실험방법

각 부하에서 환원제를 이론 당량비로 분사하여 반응기 후단의 NOx 배출농도 및 암모니아 슬립(Slip)량을 측정한다.

100% 부터 25% 까지 부하를 줄여가며 실험하고, 각 부하별 안정화시간을 포함하여 30분의 측정시간을 가진다. 25%에서 75%까지의 부하 변동에 따른 SCR 시스템의 반응 속도를 확인한다. 각 부하별로 측정하기 전에 촉매가 일정 온도를 유지할 때까지의 시간을 기록한다.

NOx 저감성능 및 암모니아 Slip 확인실험 계획과 부하 및 엔진 속도 변화 예상 그래프를 Table 3.12와 Fig. 3.20, Fig. 3.21에 표시하였다.

Table 3.12 Test plan of NOx reduction performance and ammonia slip

no.	Engine load / power		Engine speed (rpm)		Load change (min)	Stabilization time (min)	Test time (min)	Experiment time (min)
1	100%	7,400kW	100%	129	40	40	10	90
2	75%	5,550kW	91%	117	10	20	10	40
3	50%	3,700kW	80%	102	10	20	10	40
4	25%	1,850kW	63%	81	10	20	10	40
5	75%	5,550kW	91%	117	20	20	10	50
6	25%	1,850kW	63%	81	20	20	10	50
Total experiment time								310

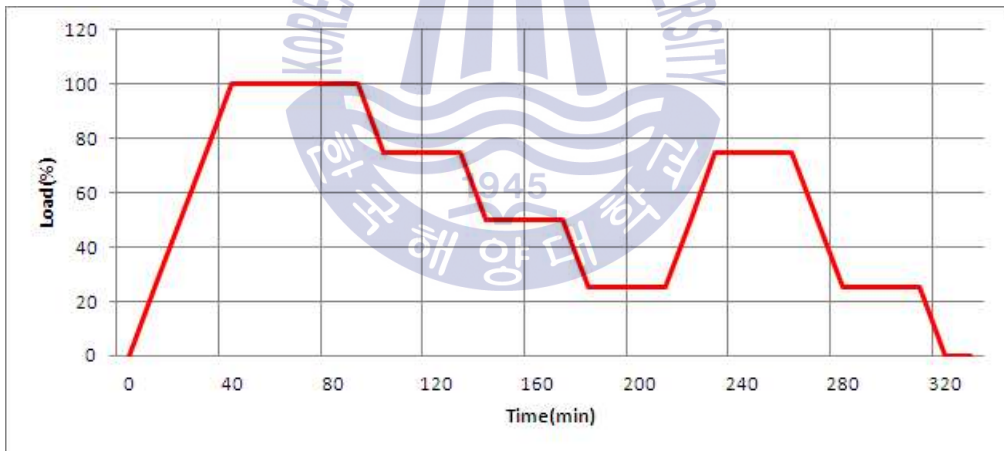


Fig. 3.20 Load variation graph of NOx reduction and ammonia slip test

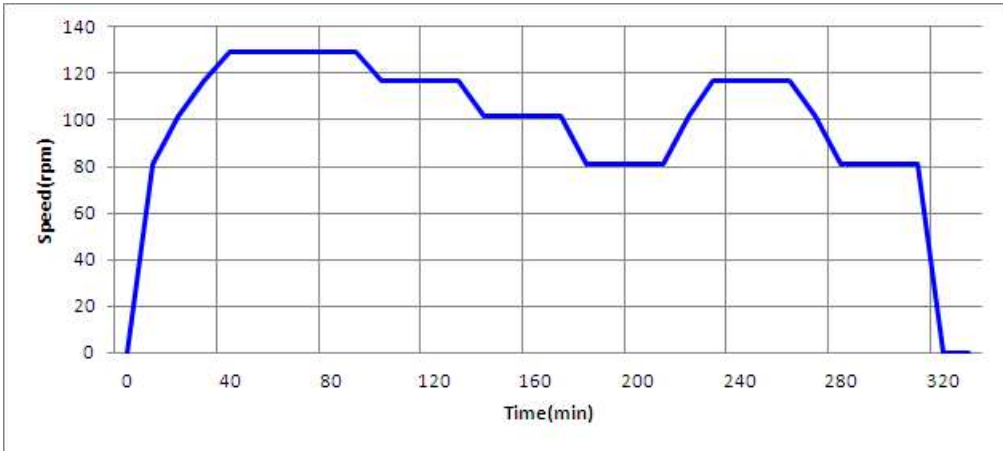


Fig. 3.21 Speed change graph of NO_x reduction and ammonia slip test



제 4 장 실험결과 및 고찰

3.4절의 실험계획에 따라 SCR 시스템의 육상엔진 실증실험을 실시하였다. 각 실험의 배출가스 측정은 IMO NOx Technical code의 제5장의 NOx 배출 측정절차에 따라 진행하였으며 실험결과는 다음과 같다.

4.1 SCR 시스템 구성품 작동실험

50% 부하에서 3-Way 댐퍼의 개폐상태를 변경하여 작동실험을 하였으며, 완전 열림 및 닫힘 상태에서의 배관 봉인상태가 양호함을 확인하였다. 배기가스가 SCR 시스템 쪽으로 흐르게 한 뒤 각종 센서들의 작동상태를 확인한 결과 정상적으로 작동함을 확인 하였다.

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 3-Way 댐퍼의 작동상태를 보여주고 있으며 Fig. 4.3의 SCR 제어화면에서 각종 센서의 정상 작동 상태를 알 수 있다.

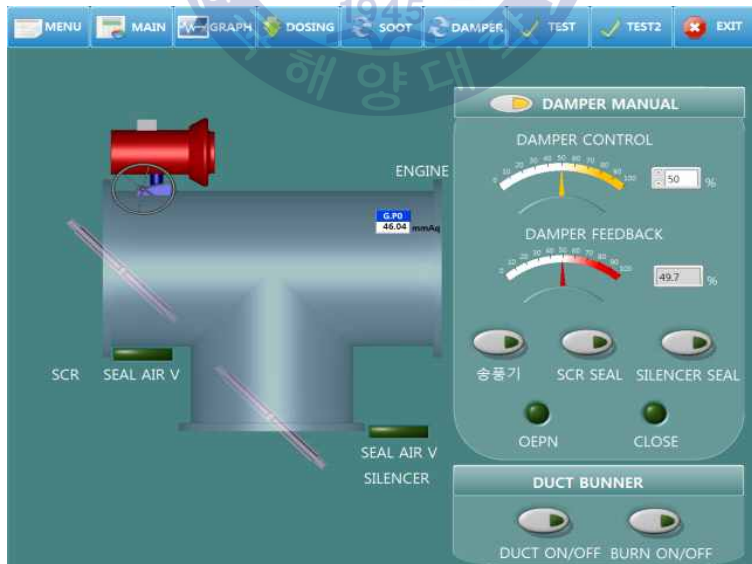


Fig. 4.1 3-way damper operation test (50%)

50%, 75% 부하에서 Duct Burner의 점화 상태와 SCR 반응기 전단에서의 온도변화를 확인하였다. Fig. 4.4는 엔진 속도 변화를 나타내고 Fig. 4.5는 속도에 따른 엔진 후단의 배기가스 온도와 반응기 전단의 온도변화를 나타낸다.

Fig. 4.5에서 엔진 출구의 배기가스 온도는 엔진 속도가 상승함에 따라 유사한 형태로 증가하고 있음을 알 수 있다. 반응기 전단의 온도는 서서히 증가하여 안정화되기까지 일정 시간이 소요됨을 알 수 있다.

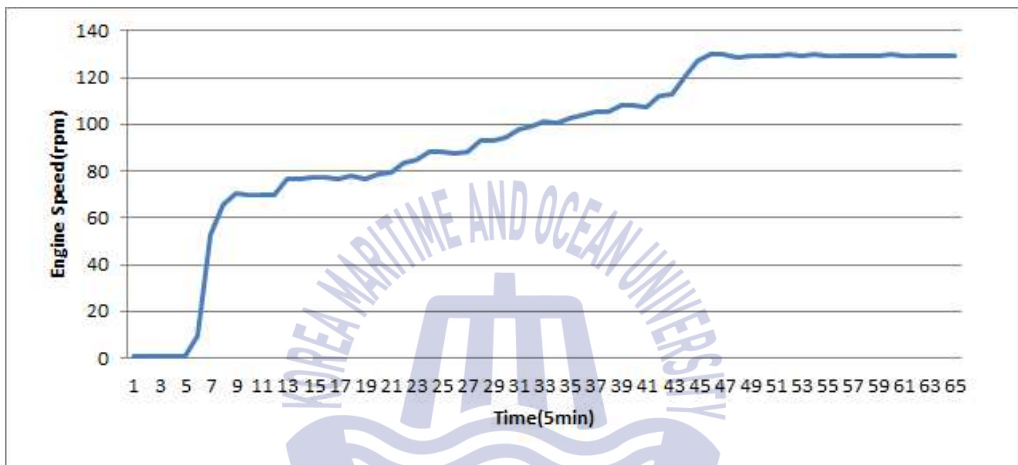


Fig. 4.4 Graph of engine speed change

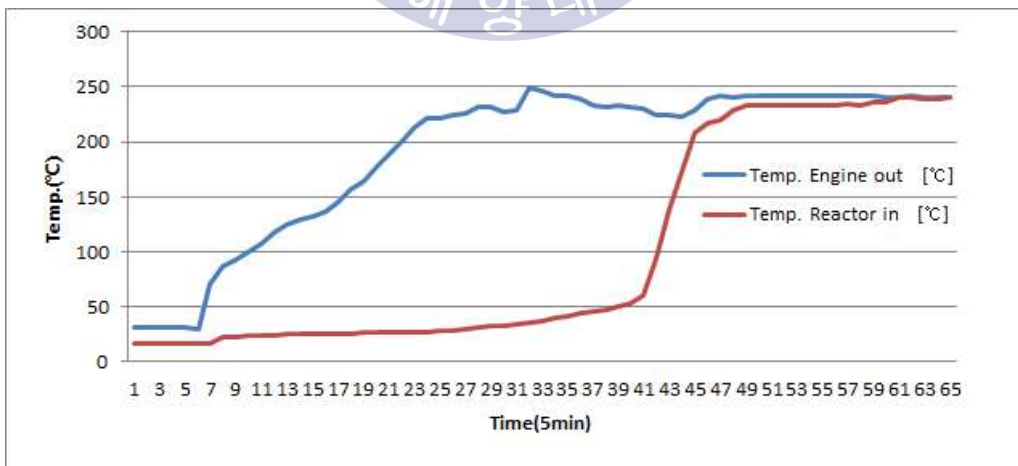


Fig. 4.5 Graph of temperature change at SCR reactor inlet

4.2 엔진 부하별 엔진 파라미터 획득실험

엔진 부하를 100%부터 75%, 50%, 25%로 변동하며 파라미터를 획득하기 위한 실험을 진행하였으며 실험 중 엔진 파라미터들을 측정하고 측정값을 Table 4.1에 나타내었고 Fig. 4.6은 그래프로 나타낸 것이다.

Table 4.1 Parameter acquisition test result by engine load

Item		unit	Measured value			
Engine	Load	[%]	100	75	50	25
	Power	[kW]	7,400	5,550	3,700	1,850
	Speed	[rpm]	129	117	102	81
	Fuel flow rate	[L/h]	1,538.8	1,124.5	776.0	407.7
	Fuel temp.	[°C]	15.0	15.0	15.0	15.0
	Charge air temp.	[°C]	43.0	41.0	38.0	42.0
	Charge air press.	[kPa]	0.344	0.252	0.143	0.054
	Exh. gas temp. of engine outlet	[°C]	241.57	223.63	240.78	248.61
	CO	[ppm]	36.0	28.0	25.9	36.0
	CO ₂	[vol%]	4.4	3.9	3.8	3.5
	NOx	[ppm]	1,178.0	1,217.0	1,222.0	1,162.0
	O ₂	[vol%]	15.0	15.5	15.7	16.8
	HC	[ppmC]	61.0	57.0	63.0	88.0
atmosphere	Temp.	[°C]	12.0	12.0	12.0	13.0
	Humidity	[R.H.%]	62.00	53.00	46.00	43.00
	press.	[hPa]	1,013	1,013	1,013	1,013
Tier I NOx emission limit		[g/kWh]	17.0			
NOx emission rate		[g/kWh]	16.705			

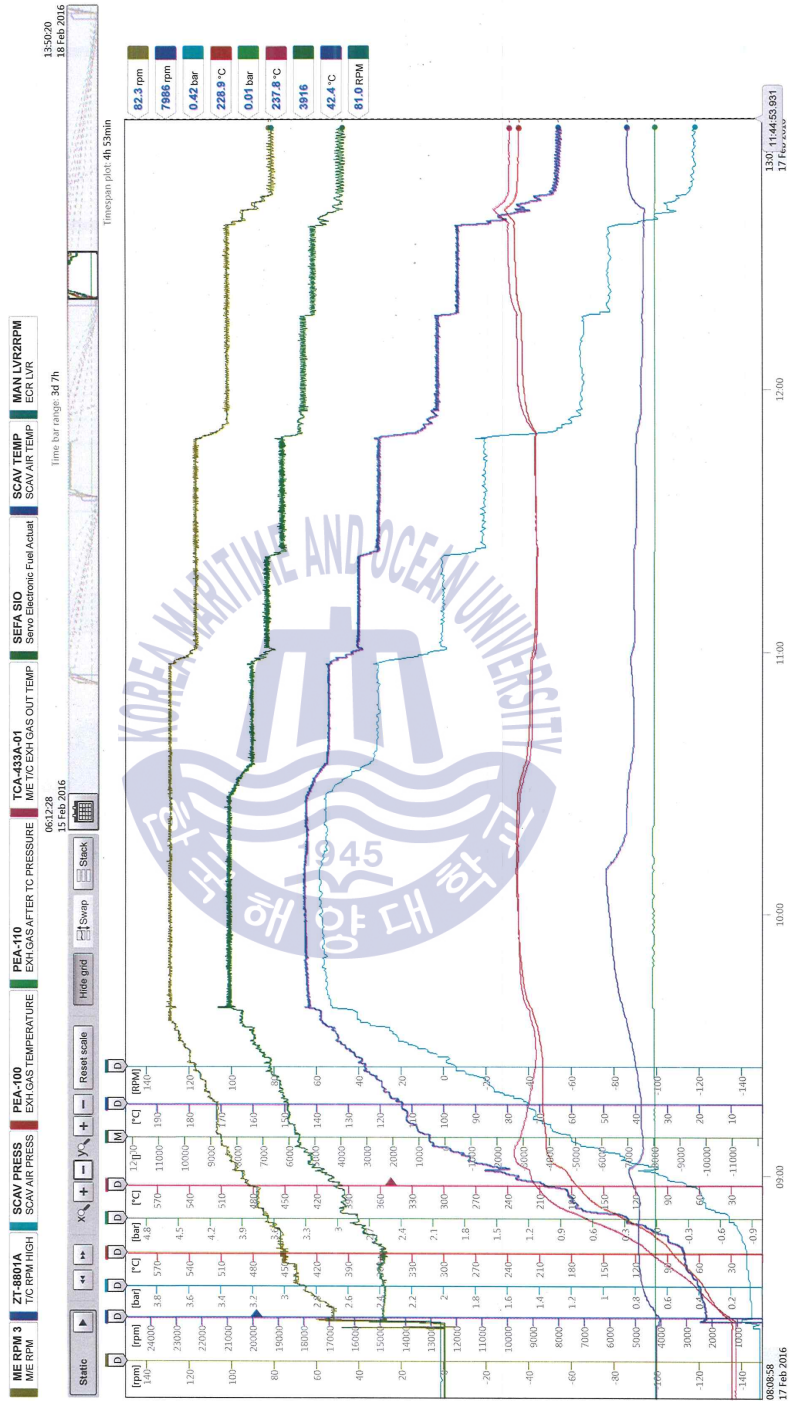


Fig. 4.6 Graph of engine parameter change by engine Load(1)

엔진 부하별 파라미터 획득 실험 결과 배기가스의 온도는 248℃에서 223℃ 정도로 변화되고 있으며, 75% 부하에서 가장 낮은 온도를 보이고, 25% 부하에서 가장 높은 온도를 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 엔진의 Shop Test report와 유사한 결과로 엔진 본래의 배기가스 온도특성을 유지하고 있음을 알 수 있다.

실험 대상 엔진은 NOx 배출기준 Tier I으로 설계된 엔진으로 각 배기가스의 농도와 NOx 배출량을 계산한 결과 Tier I 기준(17.0 g/kWh)과 비슷한 수준인 16.705 g/kWh의 NOx 배출률을 나타냄을 확인할 수 있었다.

4.3 NOx 저감성능 및 암모니아 슬립 측정실험

엔진의 부하를 100%부터 75%, 50%, 25%로 변동하며 NOx 저감 성능 및 암모니아 슬립을 측정하기 위한 실험을 진행하였으며 실험 중 엔진 파라미터와 환원제 분사량, NOx 저감률을 측정하고 그 측정값을 Table 4.2에 수치로 표시하였으며 Fig. 4.7에는 그래프로 나타내었다. 동력계는 실험 중 부하별로 제어되었으며 Fig. 4.8에서 Fig. 4.11까지 각 부하별 출력값을 표시하였다.

Table 4.2 Measurement result of NOx reduction and ammonia slip test

Item		unit	Measured value				
Engine	Load	[%]	100	75	50	25	
	Power	[kW]	7,400	5,550	3,700	1,850	
	Speed	[rpm]	129	117	102	81	
	Fuel flow rate	[L/h]	1,538.8	1,124.5	776.0	407.7	
	Fuel temp.	[°C]	15.0	15.0	15.0	15.0	
	Charge air temp.	[°C]	44.0	41.0	38.0	43.0	
	Charge air press.	[kPa]	335	246	141	054	
	Exh. gas temp. of engine outlet	[°C]	242	228	244	249	
SCR	Reactor inlet	CO	[ppm]	35	29	29	30
		CO ₂	[vol%]	4.3	3.8	3.1	3.3
		NOx	[ppm]	1,124	1,138	1,046	1,028
		O ₂	[vol%]	15.2	15.9	15.9	16.5
		HC	[ppmC]	68	64	61	72
		Temp.	[°C]	247	264	239	237
	Reactor outlet	CO	[ppm]	88.0	99.0	76.0	53.0
		CO ₂	[vol%]	4.3	3.7	3.9	3.3
		NOx	[ppm]	155.0	159.0	151.0	149.0
		O ₂	[vol%]	14.7	15.3	15.6	16.7
		HC	[ppmC]	6.5	8.4	3.1	4.2
		NH ₃	[ppm]	3.4	4.3	2.2	5.5
		Temp.	[°C]	250	256	263	244
	Reactor gas pressure drop	[mmAq]	208	160	88	42	
	NOx reduction rate	[%]	86.2	86.0	85.6	85.5	
	Urea dosing rate	[%]	96	103	87	80	
Urea dosing quantity	[ml/min]	3,000	2,560	1,700	760		
Atmosphere	Temp.	[°C]	14.0	14.0	14.0	14.0	
	Humidity	[%]	49.00	53.00	49.00	49.00	
	Press.	[hPa]	1,027	1,026	1,026	1,026	
Humidity correction factor			0.93	0.93	0.93	0.93	
Tier III NOx emission limit		[g/kWh]	3.40				
NOx emission rate		[g/kWh]	2.27				

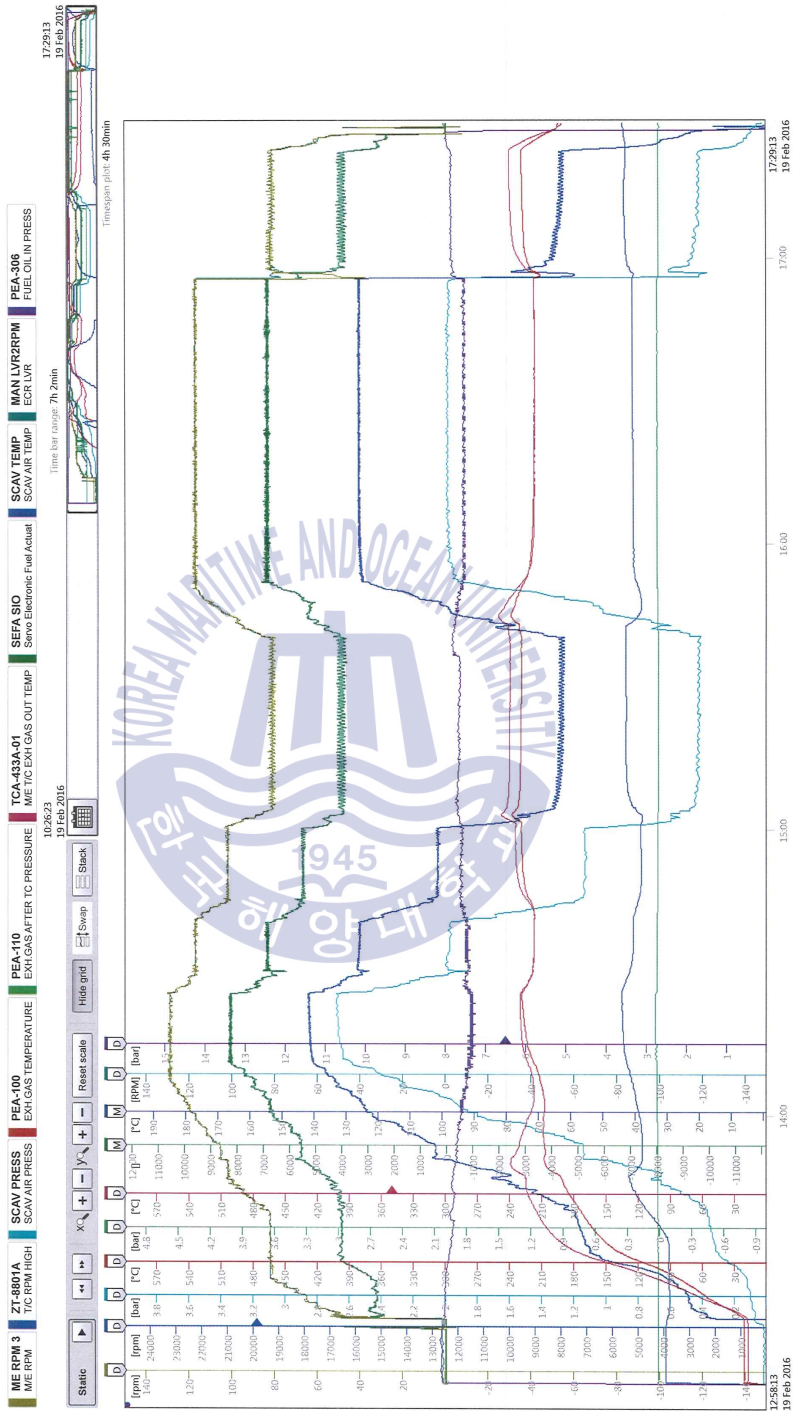


Fig. 4.7 Graph of engine parameter change by engine Load(2)



Fig. 4.8 Dynamometer control monitor (25% load)



Fig. 4.9 Dynamometer control monitor (50% load)

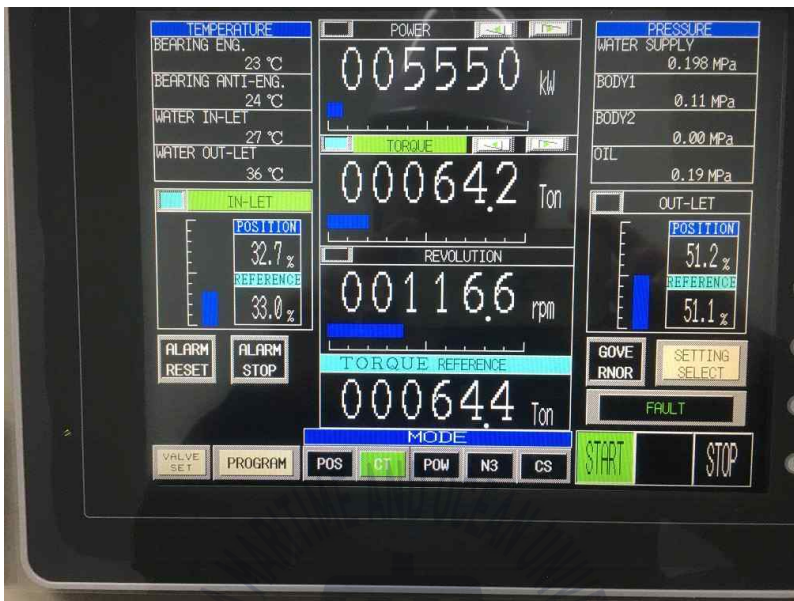


Fig. 4.10 Dynamometer control monitor (75% load)



Fig. 4.11 Dynamometer control monitor (100% load)

4.3.1 실험엔진 NOx 배출특성

반응기 입구에서의 각 부하별 NOx 배출 농도를 Fig. 4.12에 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 기관부하 25%에서 1,028 ppm으로 낮은 수준을 보이다가 50%와 75%의 부하에서 급격히 증가하였다. 엔진의 연소상태가 안정화 되는 100% 부하에서는 NOx의 배출농도가 1,124 ppm으로 75% 부하 시의 NOx 배출 농도보다 약간 감소하였다. 이는 앞서 Fig. 2.2에서 나타낸 2행정 저속 주기관의 NOx 배출특성과 유사한 패턴을 보여주고 있음을 알수 있다.

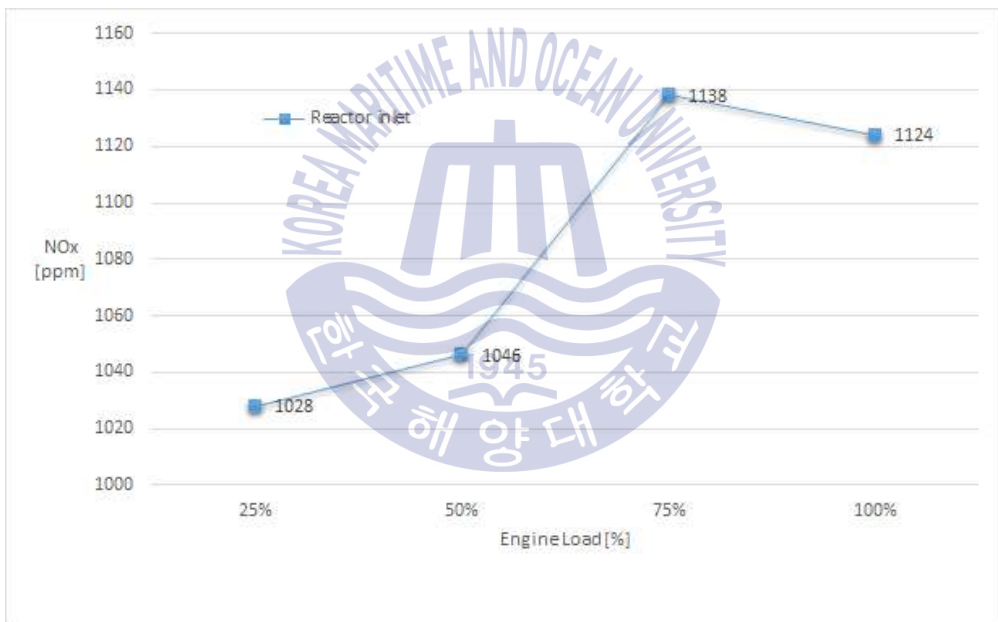


Fig. 4.12 Graph of NOx concentration at SCR system reactor inlet

4.3.2 반응기 입구와 출구 NOx 농도 비교

반응기 입구에서의 각 부하별 NOx 배출 농도와 SCR 시스템을 통과한 반응기 출구에서의 NOx 배출 농도를 비교하여 Fig. 4.13에 그래프로 나타내었다.

반응기 출구에서의 NOx 배출 농도는 반응기 입구에서의 농도와 비교하여 현저히 낮은 수준으로 나타났으며 기관부하 75%에서 159 ppm으로 가장 높았고 25%에서 149 ppm으로 가장 낮았으며 10 ppm 정도의 편차를 보여 일정한 수준의 농도를 나타내었다.

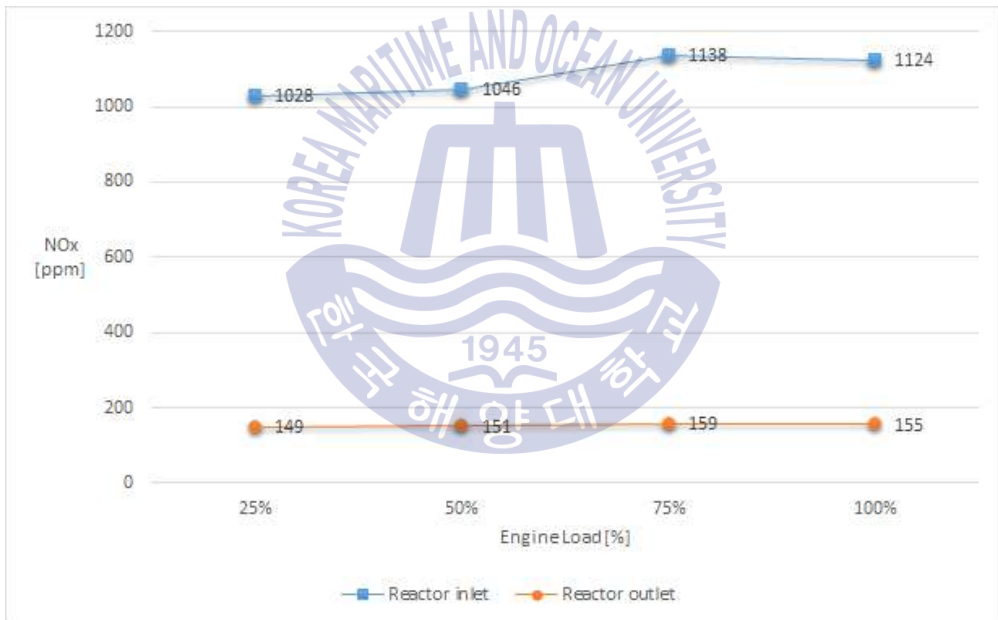


Fig. 4.13 Comparative graph of NOx concentration before and after reactor

Fig. 4.14는 반응기 입구와 출구의 NOx 배출 농도의 비를 취하여 각 부하별 NOx 저감율을 그래프 나타낸 것이다. 100%의 부하에서 86.2%로 최대 저감 효율을 나타내었고 25%의 부하에서 85.5%가 저감 되었다. 평균적으로는 85.8%의 NOx 농도 저감율을 보여 부하별로 거의 일정한 NOx 농도 저감율을 나타내었다.

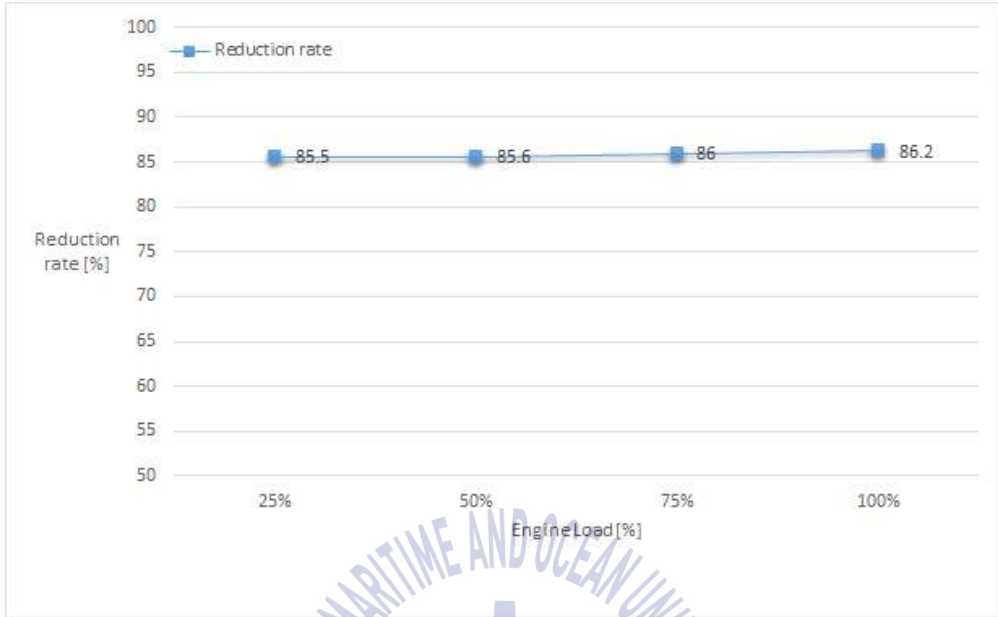


Fig. 4.14 NOx reduction performance graph

4.3.3 암모니아 슬립

암모니아 슬립 농도 및 환원제 투여율(Urea dosing rate)을 비교하여 Fig. 4.15에 그래프로 나타내었다. 각 부하별로 반응기 출구의 암모니아 배출 농도를 보면 50% 부하에서 2.2 ppm으로 가장 낮은 배출 농도를 나타내었으며 25% 부하에서 5.5 ppm으로 가장 높은 배출 농도를 나타내었다. 전체적인 암모니아 배출 농도는 모든 부하에서 10ppm 이하로 측정되었으며 평균적으로 약 4ppm 정도의 농도를 나타내고 있다. 이를 환원제 투여율과 비교하여 보면 50%에서 100% 부하까지는 환원제의 투여율과 비례하여 암모니아 슬립이 발생하는 반면 25% 부하에서 투여율이 가장 낮음에도 암모니아의 배출 농도가 가장 높은 수준을 보이고 있다. 이는 저부하 상태에서 배기가스 온도가 낮아 요소수의 암모니아 변환이 활발하게 일어나지 않아 암모니아 슬립이 증가한 것으로 예상된다.



Fig. 4.15 Ammonia slip graph of SCR system

4.3.4 NOx 저감 성능

NOx Technical Code 제5장 5.12.5.2항에 명시된 NOx 배출질량유량 (emission mass flow rate of NOx)의 계산식을 식 (4.1)에 나타내었다.

$$q_{mgas} = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mew} \cdot k_{hd} \quad (\text{for NOx}) \quad (4.1)$$

위 식에서 q_{mgas} 는 NOx의 배출질량 유량(g/h), u_{gas} 는 NOx의 밀도와 배기가스 밀도의 비율, c_{gas} 는 순수배기가스 중 NOx의 농도(ppm), q_{mew} 는 배기가스의 배출질량유량(kg/h), k_{hd} 는 NOx의 습도보정계수이다.

NOx의 밀도는 NOx Technical Code 제5장 5.12.5.1항의 밀도계수를 적용하였으며 **Table 4.3**에 순수배기가스에 대한 밀도계수를 나타내었다. 배기가스의 배출질량유량과 습도보정계수는 NOx Technical Code 부록 6과 NOx Technical Code 제5장 5.12.4.6항의 중간 공기냉각기를 장착한 압축점화엔진의 습도보정 계산식을 사용하여 계산하였다.

Table 4.3 Coefficient u_{gas} for raw exhaust gas

Gas	NOx	CO	HC	CO2	O2
$\rho_{\text{gas}}[\text{kg}/\text{m}^3]$	2.053	1.25	depending on fuel	1.9636	1.4277

NOx Technical Code 제5장에 명시된 NOx 배출량의 계산식을 식 (4.2)에 나타내었다.

$$gas_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (q_{mgasi} \cdot W_{Fi})}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cdot W_{Fi})} \quad (4.2)$$

위 식에서 gas_x 는 NOx 배출량(g/kWh), q_{mgas} 는 식 (4.1)의 NOx 배출질량 유량(g/h), W_F 는 가중계수, P는 제동출력(kW)을 의미한다.

가중계수는 NOx Technical Code 제3장 3.2.4항 프로펠러를 구동하는 주기 및 보조엔진의 시험 주기 및 가중계수 표에 명시된 수치를 적용하였으며 Table 4.4에 가중계수를 나타내었다.

Table 4.4 Test cycle for “Propeller-law-operated main and Propeller-law-operated auxiliary engine” application

Test cycle type E3	Speed	100%	91%	80%	63%
	Power	100%	75%	50%	25%
	Weighting factor	0.2	0.5	0.15	0.15

최종적으로 본 실험에서 획득한 데이터를 식 (4.1)과 식 (4.2)에 대입하여 계산한 결과 SCR 장치를 사용할 때의 NOx 배출량은 2.27 g/kWh로 계산되었다. 이는 기관의 분당회전수가 130 미만인 엔진을 설치한 선박이 NOx 배출통제해역 내에서 운항 시 적용되는 Tier III의 NOx 배출 규제기준 3.4 g/kWh와 비교하여 해당 SCR 시스템이 Tier III 기준을 만족하는 질소산화물 저감 성능을 나타냄을 알 수 있다.

제 5 장 결론

본 연구에서는 엔진의 부하별 NO_x 배출 특성과 저압형 SCR 시스템의 성능을 확인하기 위하여 육상의 7,860 kW급 엔진에 실험용 SCR 시스템의 시제품과 가스분석 시스템을 설치하고 실증 실험을 실시하였으며 그 결과를 아래와 같이 정리하였다.

(1) 실험에서 측정된 데이터를 NO_x 배출량 계산식에 대입하여 계산한 결과 본 SCR 장치를 사용할 때의 NO_x 배출량은 2.27 g/kWh로 확인되었다. NO_x 배출통제해역에서 운항 시 적용되는 Tier III의 NO_x 배출 규제기준이 기관의 분당회전수가 130 미만일 때 3.4 g/kWh 이하이다. 그러므로 해당 SCR 시스템의 NO_x 저감성능이 MARPOL 부속서 VI 제13규칙에서 규정하고 있는 Tier III의 배출 기준치를 만족하는 것을 확인하였다.

(2) 촉매 반응기 입구와 출구의 NO_x 배출 농도를 비교하여 각 부하별 NO_x 저감율을 계산한 결과 각 부하별로 거의 일정한 비율의 저감율을 나타내었으며 평균적으로 85.8%의 비율로 NO_x가 저감됨을 확인하였다. 이로써 환원제의 분사가 각 부하별로 정상적으로 제어되는 것을 확인하였다.

(3) 반응기 입구에서의 각 부하별 NO_x 배출 농도를 관찰한 결과, 저부하 상태에서 낮은 배출 농도를 보이다가 75% 부하에서 배출 농도가 급격히 증가하고 엔진의 연소상태가 안정화 되는 100% 부하에서는 NO_x의 배출농도가 75% 부하 시의 NO_x 배출 농도보다 약간 감소함을 알 수 있었다. 이는 일반적인 2행정 저속 주기기관의 NO_x 배출특성과 유사한 패턴을 보이고 있음을 확인하였다.

(4) 반응기 출구의 암모니아 배출 농도는 평균적으로 약 4 ppm 정도의 농도를 나타내고 있다. 각 부하별 암모니아 배출 농도를 환원제 투여율과

비교하면 50%에서 100% 부하까지는 환원제의 투여율과 비례하는 반면 25% 부하에서 투여율이 가장 낮음에도 암모니아의 배출 농도가 가장 높은 수준을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 저부하 상태에서 배기가스 온도가 낮으므로 요소수의 암모니아 변환이 활발하게 일어나지 않아 암모니아 슬립이 증가한 것으로 예상되며 이를 개선하기 위한 방안에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

본 연구에서는 시제품으로 제작된 저압형 SCR 시스템을 육상의 실험용 엔진에 설치하고 실증실험을 실시하였다. 그리고 해당 SCR의 NO_x 저감 성능이 MARPOL 부속서 VI 제13규칙에서 규정하고 있는 Tier III의 배출 기준치를 만족함을 확인하였다.

그러나 본 연구는 육상에 설치된 엔진에서 실험을 하였다는 한계가 있다. 해당 SCR 시스템을 실제 운항중인 선박에 설치하여 운전할 경우 진동이나 높은 기관실 온도 등 선박에서의 다양한 환경적 변화에 노출되므로 이러한 열악한 선박의 환경에서의 내구성 및 성능에 대한 검증이 필요하다. 추후 해당 SCR 시스템을 운항중인 실제 선박에 설치하여 내구성 및 성능 검증을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 한국선주협회, 2016. 2016 해사통계, 서울:한국선주협회.
- [2] 김성운, 김민, 2012. 선박용 질소산화물(NOx) 저감장치 개발의 필요성 및 규제현황. KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp.69-74.
- [3] 조권희 등, 2012. 선박용 디젤엔진의 배기 저감기술 및 계측. 다솜출판사.
- [4] IMO, 2015. THIRD IMO GREENHOUSE GAS STUDY 2014, p.1.
- [5] 이원주, 2014. 선박용 디젤엔진에서 이단지연분사에 따른 배기 배출물 저감에 관한 실험 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- [6] IMO, 2009. Revised MARPOL Annex VI : regulations for the prevention of air pollution from ships and NOx technical code 2008. 해인출판사.
- [7] 박우영, 2016. 디젤엔진의 NOx저감을 위한 Solid-SCR 환원제 발생특성에 관한 연구. 석사학위논문. 서울:국민대학교.
- [8] 정용일 외 1인, 2000. 자동차와 환경. 한성대학교 출판부.
- [9] MAN Diesel & Turbo(MDT), 2016. Emission Project Guide for Marpol Annex VI Regulations. MDT.
- [10] 김승석, 2012. Development Status of IMO Tier III Technology by MDT. KOSCO SYMPOSIUM 논문집, pp.113-150.
- [11] 김성운, 2011. 선박용 디젤주기관을 운항중 NOx 배출량 예측에 관한 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- [12] 김성운, 이영호, 김민, 박삼식, 2015. 선박용 SCR 시스템 NOx 측정 및 분석 방식의 특성 연구. 한국마린엔지니어링 학회지, 39(4), pp.387-392.

- [13] 남정길, 김준호, 최주열, 2003. 선박용 디젤엔진 NOx 농도 값의 공장 및 본선 테스트에 대한 비교연구. 한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집, pp.9-16.
- [14] 두현욱, 이재우, 남정길, 2007. 선박으로부터 배출되는 대기오염물질 배출규제 강화를 위한 IMO의 최근동향. 한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집, pp.143-144.
- [15] 서성진, 이운호, 2009. NOx 배출량 선상계측 - NOx Code의 요건과 적용방법. 한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집, pp.45-48.
- [16] 양희성 외6명, 2006. 선박 디젤엔진용 NOx 배출저감을 위한 SCR 시스템 상용화. 한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집, pp.23-24.
- [17] 이연, 2015. Urea-SCR을 적용한 디젤 배기가스의 NOx 저감을 위한 수치적 연구. 박사학위논문. 아산:호서대학교.
- [18] 이원석, 2006. Urea-SCR 촉매를 사용한 대형디젤기관의 배출가스 특성에 관한 실험적연구. 석사학위논문. 서울:국민대학교.
- [19] 조권희, 1999. 선박용 디젤기관의 배기배출물에 관한 실험연구. 석사학위논문. 부산:부경대학교.
- [20] 장성환, 2003. 선박 주기관용 SCR 시스템 개발에 관한 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- [21] 정문화, 2015. 가스연료 추진선박용 연료공급시스템의 운전특성에 관한 연구. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교.
- [22] Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., 2012. IMO TIER III NOx Emission Control Technology(SCR & EGR). 한국마린엔지니어링학회 학술대회 논문집, pp.11-17.

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 허재정 기관장님, 이원주 교수님께 감사드립니다. 또한 실습선에서 물심양면으로 응원해주시고 배려해주신 한국해양수산연수원의 한진석 선장님, 박용선 교수님, 노범석 교수님, 김홍중 기관장님, 김종필 교수님, 류원 교수님, 이운형 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 항상 든든한 지원을 아끼지 않는 동기 신동욱 교수님, 김태훈 교수님께도 감사드립니다. 부족한 저를 묵묵히 도와주시고 든든한 버팀목이 되어주시는 김무겸 교관님, 김홍범 교관님, 권승철 교관님께도 감사의 말씀을 전합니다. 특히 학업에 정진할 수 있도록 업무적으로 배려해준 김준수 교관님과 항상 옆에서 도와주신 신재현님께도 감사의 말씀을 드립니다.

같은 시기에 입사해서 동료애로 서로를 격려 해주는 김이남 교관님, 김선태 교수님, 남홍식 교수님 감사드립니다.

제가 힘들고 지칠 때마다 큰 버팀목이 되어주는 나의 오랜 벗, 황금수, 이동훈에게도 심심한 감사를 드립니다.

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. 또, 힘

들 때마다 저에게 든든한 지원군이 되어준 성수 형님 고맙습니다. 그리고 제 곁에서 항상 믿어주고 응원해주는 사랑하는 아내 경숙, 든든한 장녀 경림, 애교만점인 둘째 경림, 귀염둥이 막내 효림이와 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 6월 이성우 드림.

