

선박용 SCR 시스템에 대한 실험적 연구

남홍식 · 허재정¹ · 신동욱 · 노범석² · 류기탁² · 이윤형² · 강정구² · 이성우^{3*}
한국해양수산연수원 오션폴리텍팀 교수, ¹한국해양수산연수원 선박운영팀 교수,
²한국해양수산연수원 교육운영팀 교수, ³한국해양수산연수원 오션폴리텍팀 교관

Experimental study on marine SCR system

Hong-Shik NAM, Jae-Jung HUR¹, Dong-Uk SIN, Beom-Seuk RHO², Ki-Tak RYU², Yun-Hyung LEE²,
Jeong-Gu KANG² and Sung-Woo LEE^{3*}

Professor, Ocean Polytech Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

¹Professor, Ship Operation Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

²Professor, Education Management Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

³Instructor, Ocean Polytech Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

This study conducted the experiment for the development of the low pressure type SCR system. The experimental equipment of SCR system was installed, which was widely used as the nitrogen oxides abatement system, and the demonstration experiment was conducted to see that it met the Tier III regulation according to the IMO NO_x Technical Code. The SCR system demonstration experiment was divided into three stages: SCR system component operation test, engine parameter test by engine load, and NO_x abatement performance and ammonia slip verification test. The final performance of the SCR system was verified through analysis of NO_x abatement performance and ammonia slip test results for each load variation.

Keywords: Low pressure SCR system, Nitrogen oxides, Tier III

서론

세계 운송시장에서 선박에 의한 운송이 차지하고 있는 비중은 다른 어떤 운송수단보다 크다. 전 세계 선박량은 2005년 921,400,000 DWT에서 2015년 기준 1,746,400,000 DWT로 약 1.9배가량 증가하였고, 물동량은 2005년 7,641,000,000톤에서 2015년 기준으로 10,718,000,000톤으로 약 1.4배 증가하였다(Kim, 2012).

선박에 의한 운송은 전 세계 화물 운송량의 약 80%를

차지하면서도 이에 사용되는 에너지는 약 2% 정도이며 탄소배출량도 전 세계 탄소배출량의 2.6% 정도로 상대적으로 매우 낮은 수준이기 때문에 선박은 근본적으로 효율적이며 친환경적인 운송 수단이다(Kim et al., 2014). 그러나, 선박의 추진기관 및 발전기관으로 주로 사용되는 디젤엔진은 연소실 내에 불균일한 혼합기를 형성함으로써 연소과정 중에 국부적인 고온영역이 발생하는 연소특성을 가지고 있으며 이와 같은 특성에

*Corresponding author: kmu31@seaman.or.kr, Tel: +82-51-620-5789, Fax: +82-51-620-5769

따라 유해 배기가스인 NOx를 다량으로 발생시키는 문제점을 가지고 있다.

현재 전 세계적으로 주요 이슈가 되고 있는 환경보호 문제와 관련하여 선박에 대한 탄소배출 규제와 친환경 요구가 계속되고 있으며, 이미 질소산화물, 황산화물 등의 배출가스는 MAPOL협약이 발효되어 배출량을 줄여야 하는 상황이다. IMO의 해양오염 방지협약(MARPOL 73/78) 부속서 VI에 의하면 선박 배기가스에 포함된 질소산화물(nitrogen oxides, NOx)와 황산화물(sulphur oxides, SOx)의 배출 제한을 강화한 IMO Tier III 기준이 2010년에 발효되어 2016년부터의 신조선에 적용되고 있다. 이에 따라 세계적으로 배출규제 물질을 처리하기 위한 선박 배기가스 처리 시스템 개발에 많은 투자와 연구가 이루어지고 있다(Choi et al., 2005; Ryu et al., 2015; Ryu et al., 2017).

현재까지 디젤엔진의 주요한 유해 배출물인 NOx 저감 방법으로 흡입공기냉각, 연소실 최적화 설계, EGR (Exhaust Gas Recirculation), SCR (Selective Catalytic Reduction), 연료분사제어 등이 연구되어 왔으며, 최근의 주요 관심사항은 가스를 연료로 하는 엔진을 이용하여 EGR, SCR 등의 배기가스 후처리 기술을 적용하여 NOx의 엄격한 배기규제를 만족시키는 것이다.

현재 선박용 디젤엔진에서 널리 이용되고 있는 SCR 시스템 방식은 배기가스를 재순환하여 소기측으로 주입하는 EGR 방식보다 엔진의 열효율이 증가하여 연비적인 측면이 우수하다는 장점이 있다. 또한 SCR 시스템은 배기가스에 있는 질소산화물의 90% 이상을 줄일 수 있는 장치이며, 그 원리는 NOx가 포함된 배기에 암모니아(ammonia, NH₃)를 첨가하여 SCR을 통과하면서 촉매 반응을 일으켜 환경오염과 무관한 질소와 물로 환원시켜 대기로 배출하는 것이다(MAN, 2018).

본 연구는 질소산화물 저감 장치로서 널리 이용되고 있는 SCR 중 LP SCR (Low Pressure SCR) 시스템에 대하여 실험 장비를 직접 설치하여 IMO NOx Technical Code에 따라 Tier III 성능을 만족하는지에 대한 육상 실증실험을 실시하였으며, 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.

재료 및 방법

질소산화물 배출 규제

선박에서 배출되는 질소산화물에 대한 규제는 MARPOL Annex VI Regulation 13에서 규정하고 있으며, 그 기준은 Table 1과 Table 2와 같다.

Tier III 기준은 질소산화물 배출통제해역을 항해하는 동안 만족하여야 하며, 질소산화물 배출통제해역 이외의 구역을 항해할 때는 Tier II 기준에 적합하여야 한다. 예를 들면, Tier II 사양의 디젤엔진에 별도의 후처리장치(예; SCR, EGR)를 장착하여 질소산화물 배출통제지역 항해 시 그 후처리장치를 작동시켜 Tier III 기준을 만족시켜야 한다. 위 규칙이 적용되는 선박이 질소산화물 배출통제 구역에 들어갈 때 및 그 지역으로부터 나올 때, 혹은 배출통제지역 내에서 운전 상태가 변경될 때에는 해당 일시, 선박의 위치와 함께 디젤 엔진의 Tier 상태, 운전상태를 주관청이 규정한 로그북에 기록하여야

Table 1. Application of MARPOL Annex VI

Application of MARPOL Annex VI	
Apply to	① each diesel engine with a power output of more than 130 kW which is installed on a ship constructed on or after 1 January 2000. ② each diesel engine with a power output of more than 130 kW which undergoes a major conversion on or after 1 January 2000 ③ Notwithstanding the provisions of sub-paragraph (①) of this paragraph, the Administration may allow exclusion from the application of this regulation to any diesel engine which is installed on a ship constructed, or on a ship which undergoes a major conversion.
Does not apply to	① emergency diesel engines, engines installed in lifeboats and any device or equipment intended to be used solely in case of emergency. ② engines installed on ships solely engaged in voyages within waters subject to the sovereignty or jurisdiction of the State the flag of which the ship is entitled to fly, provided that such engines are subject to an alternative NOx control measure established by the Administration.

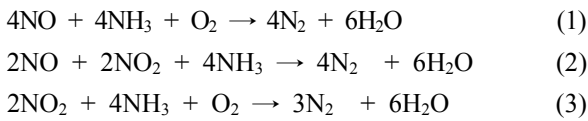
Table 2. Application standard of NOx code

Tier	Total weighted cycle emission limit (g/kWh), n=engine's rated speed (rpm)		
	n<130	n=130 - 1999	n≥2000
I	17.0	45.0*n (-0.2)	9.8
II	14.4	44*n (-0.23)	7.7
III	3.4	9*n (-0.2)	2.0

한다(Doo et al., 2007)

저압 방식(LP) SCR 시스템

SCR 방식은 EGR 방식보다 엔진의 열효율이 증가하여 연비적인 측면이 우수하다는 장점이 있다. SCR 시스템은 배기가스에 있는 질소산화물의 90% 이상을 줄일 수 있는 장치이며, 그 원리는 NOx가 포함된 배기에 암모니아(NH3)를 첨가하여 SCR을 통과하면서 촉매 반응을 일으켜 아래 화학 반응식과 같이 환경오염과 무관한 질소와 물로 환원시켜 대기로 배출하는 것이다.



SCR 방식은 고압 방식(HP) SCR 시스템과 저압 방식(LP) SCR 시스템으로 구분할 수 있으며, 엔진의 과급기(turbocharger) 후단에 위치하여 SCR 시스템을 설치 장소의 선택에 유연성이 제공되면 엔진 작업 공간 활용도가 높고 연료의 황함유량이 0.1% 또는 그 이하로 운전이 되어야 하는 경우에 적용 할 수 있는 것이 LP SCR 시스템이다. Fig. 1은 일반적인 LP SCR 시스템을 보여준다(MAN, 2018). 주요 구성품으로는 SCR 반응기(reactor), 혼합기(mixer), 분해 장치(decomposition unit, DCU)이며, DCU는 반응기 출구와 혼합기 입구 측에 설치되고, 송풍기(blower), 히터(heater) 그리고 증발기(vaporiser)로 구성되어 있다.

저유황 연료유를 사용할 경우에도 엔진 부하가 매우

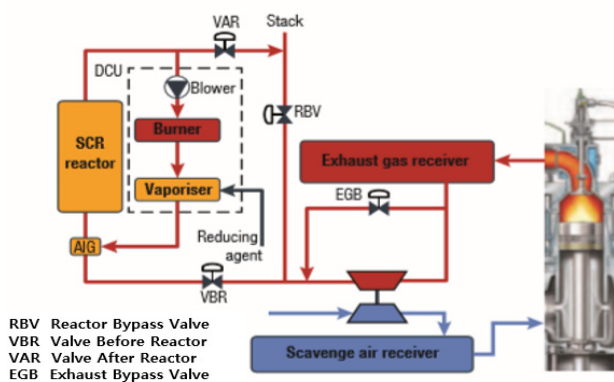


Fig. 1. LP SCR system.

낮거나 기온이 낮을 경우, SCR 시스템을 운전하기에는 배기가스 온도가 너무 낮아지므로 배기가스 온도를 적정수준까지 상승시키기 위해, 터빈의 고압측으로부터 배기가스의 일부를 바이패스밸브(EGB)를 통해 바이패스시켜 저압측으로 보낼 수 있다. 이런 경우 연료소비율(sfoc)은 증가하게 된다.

또한 연료유의 황 함유량이 적다하더라도 NH4HSO4 생성을 완전히 피할 수는 없으므로 DCU를 통해 적절한 양의 가스를 가열 및 재순환시켜 NH4HSO4를 제거하게 된다.

이와 같은 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 시정이다. 이에 본 연구에서는 기존의 운항중인 선박에 추가로 제작 및 설치가 가능한 LP SCR 시스템의 개발과 육상엔진 실증실험을 통한 NOx 저감 성능에 관한 연구를 실시하였다.

실험장치의 구성

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

엔진 및 운전설비는 직렬 6기통의 7,860 kW, 2-Stroke, 129 rpm의 선박용 엔진과 수력형 동력계(Fuchino CFSR-20.0, 26,471 kW at 200~400 rpm)를 이용하였으며, 개발된 SCR 시스템의 성능을 측정할 수 있는 3가지 가스분석기 시스템과 제어실에서 SCR 상태를 모니터링 할 수 있는 통합 모니터링 시스템을 구성하였다. SCR 시스템은 크게 기계장치, 요소수용액 공급시스템 및 제어시스템으로 구성되며 기계장치는 디젤 엔진의 배기가스가 배출되는 흐름 순서로, 배기가스 바이패스용 3-Way 밸브장치, 배기 파이프(스택), 혼합증발관, 촉매 반응기, 배기 파이프, 2-Way 밸브장치 등으로 구성된다.

배기가스 바이패스 3-Way 밸브장치와 2-Way 밸브장치는 SCR 시스템이 탑재된 선박이 국제해사기구(IMO)가 결정한 NOx Emission Control Area, NECA를 운항할 때만 촉매반응기로 배기가스를 통과하도록 하는 장치로

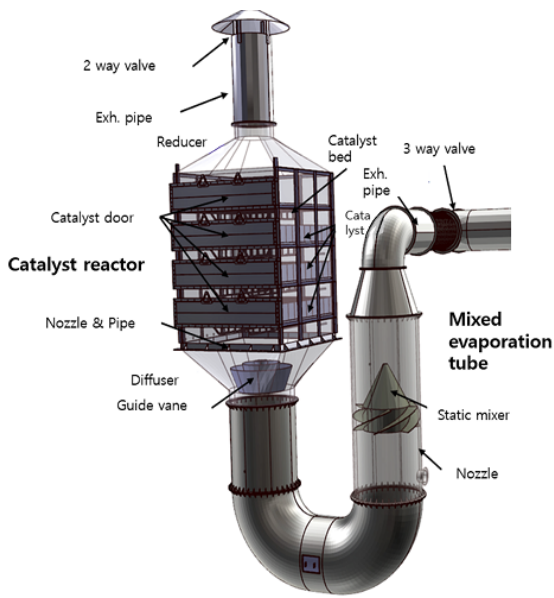


Fig. 2. Diagram of LP SCR system.

선박에 설치된 기존 파이프와 연결되므로 밸브장치 직경을 기존 파이프와 동일하게 한다. 배기 파이프(stack)는 3 Way 밸브장치와 혼합증발관을 연결, 촉매반응기 리듀서와 2-Way 밸브장치를 연결하는 것으로 혼합증발관 연결 배기 파이프(스택)는 디퓨저를 포함하고 촉매반응기 리듀서와 연결되는 배기 파이프(stack)는 리듀서(reducer)를 포함할 수 있다.

혼합증발관은 내부에 고정 혼합기(static mixer)를 설치하고 고정 혼합기 전단 또는 후단에 요소수용액 분사 모듈(nozzle)을 설치하여 촉매반응기의 디퓨저(diffuser)와 연결된다. 혼합증발관으로 분사된 요소수용액 분무는 증발, 열분해, 가수분해 과정을 거쳐 암모니아로 변환되어 촉매반응기로 공급된다.

촉매반응기는 디퓨저, 반응기 본체, 리듀서로 구분되며 반응기 본체는 다시 내부에 촉매층, 촉매층 지지대,

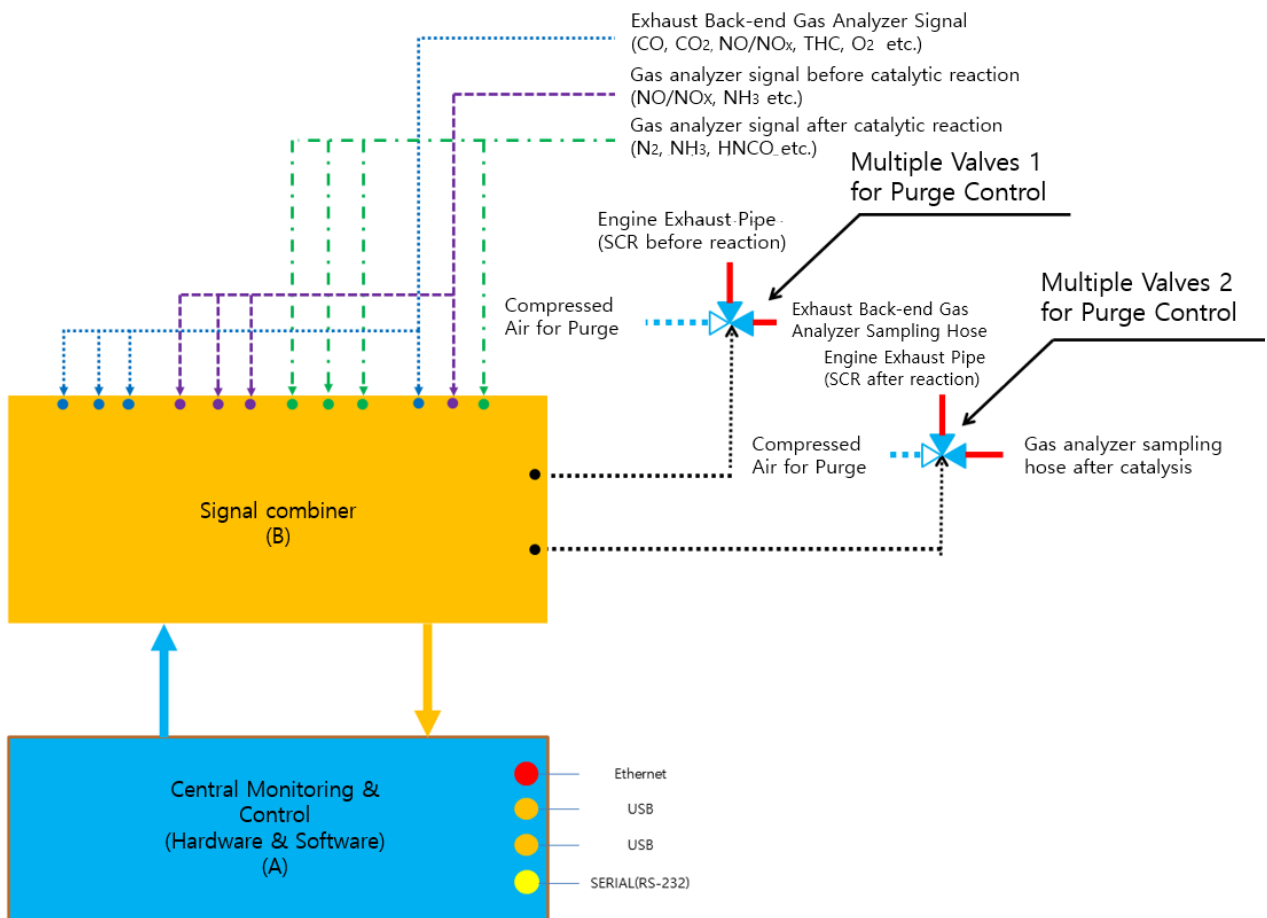


Fig. 3. Concept of exhaust gas integrated monitoring device.

촉매세정용 노즐 & 파이프가 설치되고 본체 한 면에 촉매 문(door)이 촉매층 만큼 설치된다. 촉매반응기 디퓨저는 혼합증발관과 반응기 본체를 연결하는 것으로 내부에 안내 날개(guide vane)가 설치되어 반응기 본체에 유동균일도 90% 이상인 배기가스를 공급하여 촉매층에서 질소산화물의 저감효율이 최대가 되도록 한다. 반응기 본체 내부에 설치된 촉매층 지지대 위에 본체 한 면에 설치된 촉매 문(door)을 통해 촉매모듈을 설치하고, 각각의 촉매모듈과 일정 거리를 두고 촉매세정용 노즐 및 파이프를 설치한다. 반응기 본체와 배기 파이프(스택)를 연결하기 위한 리듀서는 배기가스 배압이 작게 걸리도록 설계 제작한다.

Fig. 2에는 SCR 시스템의 기계장치 구성도를 나타내었다. 가스분석을 위하여 엔진 배기 후단과 촉매 반응기 전·후단에 IMO NOx Technical Code에서 규정한 사양을 만족하는 이동식 분석기 및 이동식 전처리장치의 측정시스템을 구성하였다.

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

Fig. 3은 디젤엔진, 촉매반응기, IMO 가스분석기(exhaust back-end, HORIBA MEXA-1600D), FTIR 가스분석기(before catalytic reaction, Airwell), NOx/NH3 분석기(after catalytic reaction, Ecophysics CLD 60)으로 부터의 각각 데이터 신호를 입력, 모니터링 및 퍼징(purging) 제어하는 배출가스 통합 모니터링 및 제어 장치, 퍼징용 다중밸브의 개념도를 나타낸 것이다.

실험 방법

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

SCR 시스템 구성품 작동 실험은 NOx 저감성능을 측정하기 전에 SCR 시스템의 구성품들의 정상작동여부와 엔진과의 트러블 확인 및 환원제 분사노즐 위치 확인하기 위한 실험이다. 실험시에는 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 작동 실험을 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 점화상태와 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. 엔진 부하별 온도 변화 및 엔진 파라미터 실험은 실험대상 엔진의 기본 성능 데이터와 별도로 SCR시스템과 함께 작동될 때의 엔진의 기본 성능을 알기위해 실시되는 실험이다. 실험 시에 각 부하에서 NOx 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.

NOx 저감성능 및 암모니아 슬립(slip) 확인 실험은 환원제를 이룬 수치로 분사할 경우 NOx 저감 성능 및 엔진 부하 변동에 따른 암모니아 변화 반응시간을 확인함으로써 SCR 시스템의 최종 성능을 확인하고, 시스템 운용조건을 검토하는 실험이다. NOx 저감에 요구되는 요소수용액의 유량은 엔진 부하 25%에서 547.9 mL/min, 엔진 부하 100%에서 2,591.58 mL/min이다. 따라서 도징장치의 유량제어 범위는 IMO NOx Tier II 수준을 IMO NOx Tier III 수준으로 저감하고자 할 때의 엔진 부하 25%에서 필요한 도징유량의 90% (470 mL/min)를 최소로 하고 IMO NOx Tier I 수준을 IMO NOx Tier III 수준으로 저감하고자 할 때의 엔진 부하 100%에서 필요한 도징유량의 110% (2,850 mL/min)를 최대로 분사하여 반응기 후단의 NOx 배출농도 및 암모니아 슬립 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.

결과 및 고찰

SCR 시스템의 육상엔진 실증 실험을 실시하고 각 실험의 배출가스 측정은 IMO NOx Technical Code의 제5장의 NOx 배출 측정 절차에 따라 진행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

실험 결과

SCR 시스템 구성품 작동 실험

50% 부하에서 3-Way Damper의 위치를 10% 단위로 변경하여 작동실험을 하였으며, 완전 열림 및 닫힘 상태에서의 배관 봉인 상태가 양호함을 모니터링 시스템과 현장 댐퍼궤도를 통해 양호함을 확인하였다.

Fig. 4는 배기가스가 SCR 시스템 쪽으로 흐르게 한 뒤 현장 온도와 모니터링 시스템에서 확인되는 온도를 비교하여 각종 센서들이 정상적으로 작동하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 5는 엔진 속도 변화를 나타내고 Fig. 6은 속도에 따른 엔진 후단의 배기가스 온도와 반응기 전단의 온도

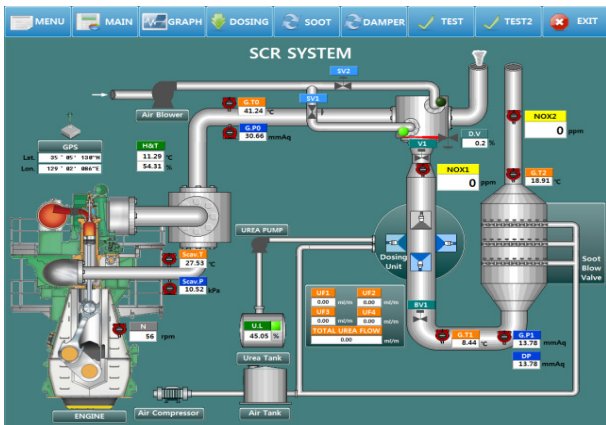


Fig. 4. Integrated monitoring system for 3-way damper operation.

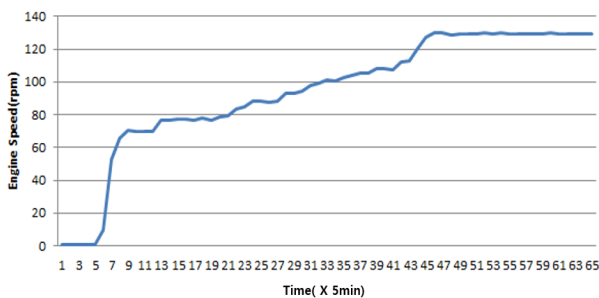


Fig. 5. Graph of engine speed change.

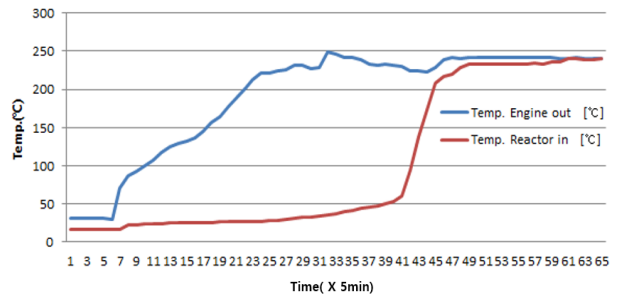


Fig. 6. Graph of temperature change at SCR reactor inlet.

변화를 나타낸다.

Fig. 6에서 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.

엔진 부하별 엔진 파라미터 획득실험

엔진 부하를 100%부터 75%, 50%, 25%로 변동하며 파라미터(parameter)를 획득하기 위한 실험을 진행하였

Table 3. Parameter acquisition test result by engine load

Item	Unit	Measured value			
Load	[%]	100	75	50	25
Power	[kW]	7400	5550	3700	1850
Speed	[rpm]	129	117	102	81
Fuel flow rate	[L/h]	1538.8	1124.5	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
Engine 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
CO2	[vol%]	44	3.9	3.8	3.5
NOx	[ppm]	1178.0	1217.0	1222.0	1162.0
O2	[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]	1013	1013	1013	1013
Tier I NOx emission limit	[g/kWh]	17.0			
NOx emission rate	[g/kWh]	16.705			

으며 실험 중 엔진 파라미터들을 측정하고 측정값을 Table 3에 나타내었다.

엔진 부하별 엔진 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 공장 시운전 보고서(shop test report)와 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.

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 4에 수치로 표시하였다.

결과 검토

실험엔진 NOx 배출특성

반응기 입구에서의 각 부하별 NOx 배출 농도를 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. 그래프를 보면 기관부하 25%에서 1028 ppm으로 낮은 수준을 보이다가 50%와 75%의 부하에서 직선적으로 증가하였다. 엔진의 연소상태가 안정화 되는 100% 부하에서는 NOx의 배출농도가 1124 ppm으로 75% 부하 시의 NOx 배출 농도보다 약간 감소하였다.

반응기 입구와 출구 NOx 농도 비교

반응기 입구에서의 각 부하별 NOx 배출 농도와 SCR 시스템을 통과한 반응기 출구에서의 NOx 배출 농도를 비교하여 Fig. 8에 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.

Table 4. Measurement result of NOx reduction and ammonia slip test

Item	Unit	Measured value				
Load	[%]	100	75	50	25	
Power	[kW]	7400	5550	3700	1850	
Speed	[rpm]	129	117	102	81	
Fuel flow rate	[L/h]	1538.8	1124.5	776.0	407.7	
Engine 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	
Reactor inlet	CO	[ppm]	35	29	29	30
	CO2	[vol%]	4.3	3.8	3.1	3.3
	NOx	[ppm]	1124	1138	1046	1028
	O2	[vol%]	15.2	15.9	15.9	16.5
	HC	[ppmC]	68	64	61	72
	Temp.	[°C]	247	264	239	237
SCR Reactor outlet	CO	[ppm]	88.0	99.0	76.0	53.0
	CO2	[vol%]	4.3	3.7	3.9	3.3
	NOx	[ppm]	155.0	159.0	151.0	149.0
	O2	[vol%]	14.7	15.3	15.6	16.7
	HC	[ppmC]	6.5	8.4	3.1	4.2
	NH3	[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]	3000	2560	1700	760	
Temp.	[°C]	14.0	14.0	14.0	14.0	
Atmosphere Humidity	[%]	49.00	53.00	49.00	49.00	
Press.	[hPa]	1027	1026	1026	1026	
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				

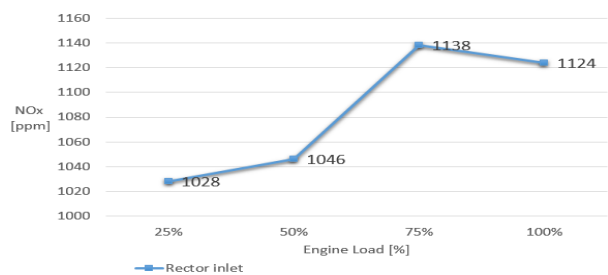


Fig. 7. Graph of NOx concentration at SCR system reactor inlet.

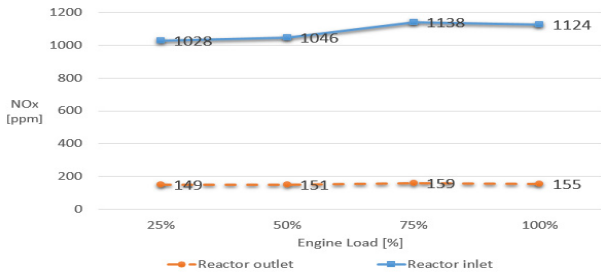


Fig. 8. Comparative graph of NOx concentration before and after reactor.

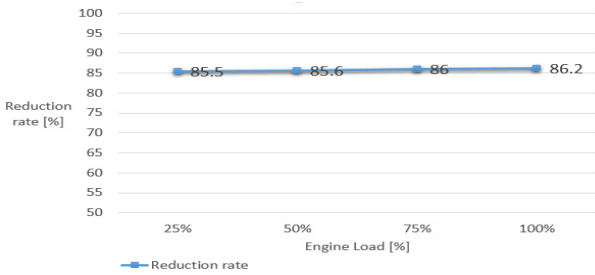


Fig. 9. NOx reduction performance graph.

Fig. 9는 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.

암모니아 슬립

암모니아 슬립 농도 및 환원제 첨가율을 비교하여 Fig. 10에 그래프로 나타내었다. 각 부하별로 반응기 출

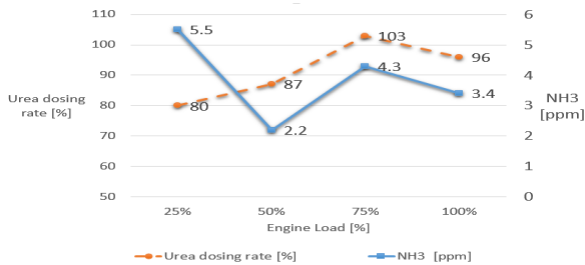


Fig. 10. Ammonia slip graph of SCR system.

구의 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 4 ppm 정도의 농도를 나타내고 있다. 이를 환원제 첨가율과 비교하여 보면 50%에서 100% 부하까지는 환원제의 첨가율과 비례하여 암모니아 슬립이 발생하는 반면 25% 부하에서 첨가율이 가장 낮음에도 암모니아의 배출 농도가 가장 높은 수준을 보이고 있다. 이는 저부하 상태에서 배기가스 온도가 낮아 요소수의 암모니아 변환 및 환원반응이 활발하게 일어나지 않아 암모니아 슬립이 증가하였다.

NOx 저감 성능

NOx Technical Code 제5장 5.12.5.2항에 명시된 NOx 배출질량유량(emission mass flow rate of NOx)의 계산식을 식 (4)에 나타내었다.

$$q_{mgas} = u_{gas} \cdot c_{gas} \cdot q_{mew} \cdot k_{hd} \text{ (for NOx)} \quad (4)$$

식 (4)에서 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 배출질량 유량(kg/h), k_{hd} 는 NOx의 습도보정계수이다.

NOx의 밀도는 NOx Technical Code 제5장 5.12.5.1항의 밀도계수를 적용하였으며 Table 5에 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. NOx Technical Code 제5장에 명시된 NOx 배출량의 계산식을 식 (5)에 나타내었다.

$$gas_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (q_{mgasi} \cdot W_{Fi})}{\sum_{i=1}^{i=n} (P_i \cdot W_{Fi})} \quad (5)$$

식 (5)에서 gas_x 는 NOx 배출량(g/kWh), q_{mgas} 는 식 (4)의 NOx 배출질량유량(g/h), WF 는 가중계수, P 는 제동출력(kW)을 의미한다.

Table 5. Coefficient ρ_{gas} for raw exhaust gas

Gas	NOx	CO	HC	CO2	O2
ρ_{gas} [kg/m ³]	2.053	1.25	depending on fuel	1.9636	1.4277

Table 6. 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

가중계수는 NOx Technical Code 제3장 3.2.4항 프로펠러를 구동하는 주기 및 보조엔진의 실험 주기 및 가중계수 표에 명시된 수치를 적용하였으며 Table 6에 가중계수를 나타내었다.

최종적으로 본 실험에서 획득한 데이터를 식 (4)와 식 (5)에 대입하여 계산한 결과 SCR 장치를 사용할 때의 NOx 배출량은 2.27 g/kWh로 확인되었다. 이는 기관의 분당회전수가 130 미만인 엔진을 설치한 선박이 NOx 배출 통제해역에서의 운항시에 적용되는 Tier III의 NOx 배출 규제기준 3.4 g/kWh 대비 낮게 확인되어 해당 SCR 시스템이 Tier III 기준을 만족하는 질소산화물 저감 성능을 나타냄을 알 수 있다.

결 론

본 연구에서는 엔진의 부하별 NOx 배출 특성과 저압형 SCR 시스템의 성능을 확인하기 위하여 육상의 7860 kW급 엔진에 실험용 SCR 시스템의 시제품과 가스분석 시스템을 설치하고 실증 실험을 실시하였으며 그 결과는 아래와 같다.

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

2. 촉매 반응기 입구와 출구의 NOx 배출 농도를 비교하여 각 부하별 NOx 저감율을 계산한 결과 각 부하별로

거의 일정한 비율의 저감율을 나타내었으며 평균적으로 85.8%의 비율로 NOx가 저감됨을 확인하였다. 이로써 환원제의 분사가 각 부하별로 정상적으로 제어되는 것을 확인하였다.

3. 반응기 입구에서의 각 부하별 NOx 배출 농도를 관찰한 결과, 저부하 상태에서 낮은 배출 농도를 보이다가 75% 부하에서 배출 농도가 직선적으로 증가하고 엔진의 연소상태가 안정화 되는 100% 부하에서는 NOx의 배출농도가 75% 부하 시의 NOx 배출 농도보다 약간 감소함을 알 수 있었다.

4. 반응기 출구의 암모니아 배출 농도는 평균적으로 약 4 ppm 정도의 농도를 나타내고 있다. 각 부하별 암모니아 배출 농도를 환원제 첨가율과 비교하면 50%에서 100% 부하까지는 환원제의 첨가율과 비례하는 반면 25% 부하에서 첨가율이 가장 낮음에도 암모니아의 배출 농도가 가장 높은 수준을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 저부하 상태에서 배기가스 온도가 낮으므로 요소수의 암모니아 변환 및 환원반응이 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 NOx 저감 성능이 MARPOL 부속서 VI 제13규칙에서 규정하고 있는 Tier III의 배출 기준치를 만족함을 확인하였다.

References

- Choi JS, Cho KH, Lee JH, Lee JW, Kim JG, Jang SH, Yang HS, Ko JH and Park KY. 2005. An experiment of SCR system on-board ship. Journal of the Korean Society of Marine Engineering 3, 306-312.
- Doo HW, Lee JW and Nam JG 2007. Recent regulations trend of prevention of air pollution from ships in IMO. Journal of the Korean Society of Marine Engineering 2007. 06 Conference, 143-144.
- Kim SS. 2012. Development status of IMO Tier III Technology by MDT. KOSCO Symposium, 113-150.
- Kim SW, Jung KS, Kim HS and Choi JS. 2014. Prediction of NOx emission for marine diesel engines of existing ship. Journal of the Korean Society of Marine Engineering 6,

674-680. <https://doi.org/10.5916/jkosme>. 2014.38.6.674.
Ryu YH, Kim HY, Cho GB, Kim HS and Nam JG. 2015. A study on the installation of SCR system for generator diesel engine of existing ship. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 4, 412-417. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.4.412>.
Ryu YH, Kim TW, Kim JS and Nam JG. 2017. Experimental study of NOx reduction in marine diesel engines. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 3, 216-221.

<https://doi.org/10.5916/jkosme.2017.41.3.216>.
MAN Energy solutions. 2018. Emission project guide for marpol annex VI regulations. Copenhagen, Denmark. 1-111.

2020. 02. 06 Received
2020. 03. 02 Revised
2020. 04. 01 Accepted