

# 소형 선박 디젤엔진의 질소산화물 저감에 관한 연구

심한섭<sup>#</sup>

## A Study on NO<sub>x</sub> Reduction for a Small Marine Diesel Engine

Han-Sub Sim<sup>#</sup>

(Received 20 May 2011; received in revised form 19 August 2011; accepted 6 October 2011)

### ABSTRACT

Air pollutants from a small marine diesel engine are increasing and the IMO(International Marine Organization) regulation asked for its reduction. In this study, NO<sub>x</sub> reduction technologies such as improvement of various cooling systems are applied to the small marine diesel engine. The various cooling systems are a intercooler, a heat exchanger for engine coolant, and an exhaust manifold by water cooling. These systems are tested on an engine dynamometer and a exhaust gas analyzer by a marine diesel engine test regulation. Test results are shows that the small marine engine are satisfied the IMO NO<sub>x</sub> regulations; Tire II.

**Key Words** : Marine Diesel Engine(선박 디젤엔진), Exhaust Gas(배출가스), NO<sub>x</sub>(Nitrogen Oxide, 질소산화물), NO<sub>x</sub> Rregulation(NO<sub>x</sub> 규제기준), Cooling System(냉각장치), Intercooler(인터쿨러), 열교환기(Heat Exchanger)

### 1. 서 론

해양을 운항하는 선박의 주동력원으로 내연기관이 사용되고 있으며, 여기서 발생하는 배출가스는 Fig. 1 과 같이 대기환경오염의 주요 물질로 인식되고 있다. 이에 따라, 국제해사기구(IMO)에서는 해양환경 보전을 위하여 선박 및 해양구조물에서 발생하는 대기오염물질에 대한 규제를 강화하고 있으며, 2005년 6월에는 NO<sub>x</sub>를 포함한 선박 디젤엔진에서 발생하는 대기오염물질에 대한 협약을 제정하였다<sup>[1]</sup>. 이에 의하면, 배출가스 규제기준을 만족하지 못하는 선박은 IMO에서 규정하는 특정지역을 운항할 수 없도록 되어있다. 선박에 적용되는 내연기관은 주로 디젤엔진이며,

NO<sub>x</sub>의 규제기준은 “NO<sub>x</sub> Technical Code”(IMO) 및 “선박용 디젤기관의 질소산화물 배출제어를 위한 검사 등에 관한 잠정기준”에 표기되어 있다<sup>[2-5]</sup>. 다음 Table 1은 NO<sub>x</sub>의 배출에 관한 규제기준과 적용년도를 표기하고 있으며, 점차 규제기준이 강화되고 있다<sup>[6]</sup>.

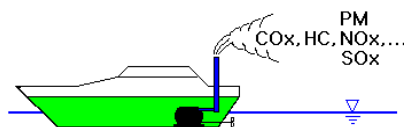


Fig. 1 Air pollutants from a ship

Table 1 NO<sub>x</sub> regulations(IMO)

Effect year	Regulation	Korea
From 1 Jan. 2000	Tire I	Regulation 1
From 1 Jan. 2011	Tire II	Regulation 2
After 1 Jan. 2016	Tire III	Regulation 3

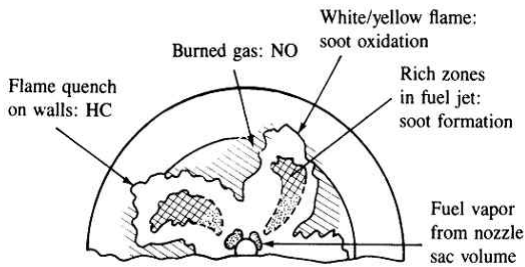
<sup>#</sup> 교신저자 : 경남과학기술대학교 자동차공학과  
E-mail : hansub@gntech.ac.kr

위의 NOx 배출 규제기준에 의한 국내의 연도별 적용은 디젤엔진의 출력등급에 따라 약간 차이가 있으며 그에 따른 적용년도는 다음과 같다.

**Table 2 NOx regulation in Korea**

Engine power	Effect year
130kW~294kW	After 1 July 2011
294kW 이상	After 1 July 2009

한편, 디젤엔진에서 NOx의 발생과정은 연소온도가 높은 구역에서 질소와 산소가 결합되어 형성되며, 연소온도와 연소압력이 높을수록 그리고 연소기간이 긴 저속구간에서 많이 배출되는 것으로 알려져 있다<sup>[7,8]</sup>. 다음 Fig. 2는 디젤엔진에서의 연료분사, 착화, 연소, 연소가스의 형성과정을 보여주고 있다<sup>[7]</sup>. 고온-고압으로 압축된 공기 중에 분사노즐(또는 인젝터)를 이용하여 여러 개의 원주방향으로 연료가 분사된다. 이때 분사노즐에서 분사된 연료입자는 공기와 충돌하여 작은 입자로 분무모양을 이루며 분사되고, 분사된 연료 미립자는 고온공기와 접촉하면서 자체 자동발화(auto-ignition)가 일어나면서 착화-연소되며, 화염이 퍼져 나간다. 이 과정에서 연료의 불완전 연소에 의해 HC, CO, NOx, PM 등의 유해물질이 발생된다.



**Fig. 2 Combustion and pollutants formation**

또한, NOx를 줄일 수 있는 방법으로는 흡입공기 냉각, 연소실 최적화 설계, 연소실 내부에 물분사, 배기가스 재순환(EGR), 연료분사 및 제어시스템 최적화, 냉각시스템 최적화, 배기온도 감소, 배기가스 후처리장치(DPF, SCR 등) 등이 연구되어 왔다<sup>[8-12]</sup>. 이들 여러 가지 기술 중에서 흡입공기 냉각, 냉각시스템 최적화, 배기온도 감소 등은 NOx 저감효과가

다른 기술들에 비하여 상대적으로 적으나, 비교적 적은 비용으로 NOx 저감효과를 어느 정도까지 달성할 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 소형선박에 사용하는 디젤엔진 개발을 위하여 위 기술들을 적용하고, 엔진동력계와 배출가스 측정기를 이용하여 NOx 규제기준인 Tire II에 대한 검증시험을 수행하고자 한다.

## 2. 소형 선박용 디젤엔진 세부 사양

### 2.1 엔진 사양

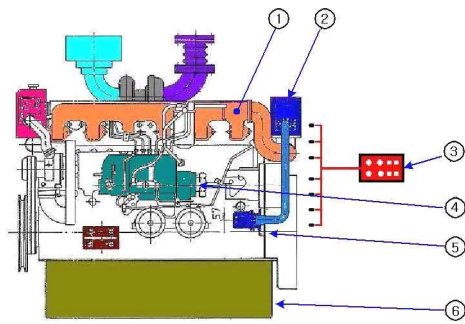
이번 연구에서는 디젤엔진을 소형선박에 적용하기 위하여 선박기관기준 및 NOx 규제기준에 적합하도록 주요부품을 설계하였으며, 세부사양은 Table 3에 표기하였다. 디젤엔진은 6기통-4행정으로 배기량은 11,150cc이며 출력은 246kW(335ps)급이다. 흡입공기량을 증대와 엔진출력향상을 위하여 터보차저와 인터쿨러를 갖추고 있다. 엔진 냉각수의 냉각시스템은 수냉식 열교환기로 설계하였다.

**Table 3 Specifications of a diesel engine**

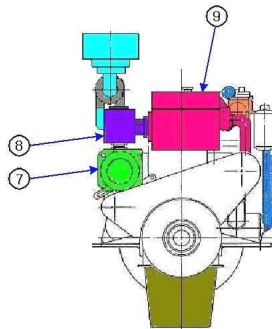
Description	Specification
Engine type	6-cyl., 4-stroke DI engine
Rated power/Speed	246kW(335ps)/2,150rpm
Displacement	11,150cc
Compression ratio	16 : 1
Fuel injection	Injection pump and nozzle
Air intake system	Turbocharger and intercooler
Engine cooling	Heat exchanger by sea water cooling

### 2.2 주요부품 설계

소형 선박용 디젤엔진으로 NOx 규제기준과 선박기관기준에 적합하도록 설계된 주요 부품은 Fig. 3에 나타내었다. 주요 부품은 ①흡기 매니폴드, ②인터쿨러(중간냉각기), ③엔진 동력/속도 제어장치, ④연료 분사량제어(조정), ⑤해수펌프, ⑥오일팬, ⑦열교환기, ⑧배기 매니폴드, ⑨냉각수탱크, 기타 부속 장치가 있다.



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 3 Main design parts

### 3. 주요 부품 설계

#### 3.1 엔진냉각수 열교환기 설계

선박의 운항시에 주기관인 디젤엔진은 대부분 고부하 조건에서 운전되므로 엔진으로부터 다량의 열이 발생되어 공랭식 열교환기(radiator)로는 충분한 냉각효과를 기대하기 어렵다. 다량의 냉각수열을 효과적으로 방출하기 위하여 기존의 공랭식 열교환기를 해수(sea water)를 이용하여 냉각하는 수냉식 열교환기로 설계하였다. 다음 Fig. 4는 해수냉각식 수냉식 열교환기의 구조를 보여주고 있다. 열교환기는 적정 용량의 산정뿐만 아니라 해수를 사용하므로 이에 대한 내부식성도 고려하여 충분한 냉각효과와 내구성을 유지할 수 있도록 설계할 필요가 있다. 또한, 냉각효과를 높이기 위하여 엔진 냉각수와 해수는 서로 반대방향으로 흐르도록 대향류 방식으로 설계되었다.

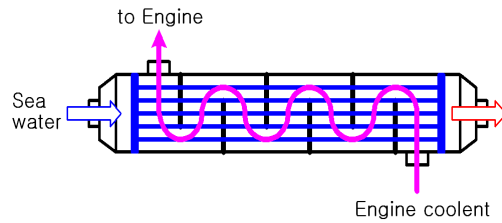


Fig. 4 Heat exchanger by sea water cooling

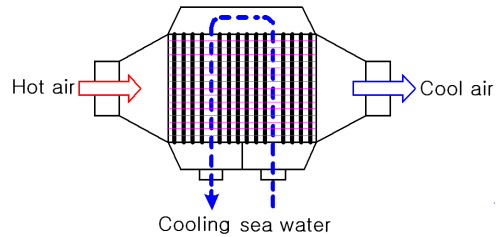


Fig. 5 Intercooler by sea water cooling

#### 3.2 인터쿨러 설계

소형 선박용 디젤엔진에서 흡입공기량 확보와 엔진 출력향상을 위하여 터보차저가 사용되며, 이에 따라 압축된 공기가 유입되므로 흡입공기의 온도가 상승하고 밀도가 낮아져서 공기질량이 감소한다. 따라서 공기의 온도를 낮추고 밀도를 높여 흡입공기량을 확보할 필요가 있다. 또한, 흡입공기의 온도가 낮아지면 연소온도가 낮아지므로 NOx 배출량도 어느 정도 감소되는 효과도 있다. 흡입공기의 냉각을 위하여 일반적으로 공랭식 인터쿨러가 사용되지만 소형 선박 엔진실의 공간적인 제약과 냉각성능을 향상을 위하여 수냉식으로 설계하였다. Fig. 5와 같이 냉각수의 유동경로는 유입되는 흡입공기에 대하여 대향류-U형으로 설계하였다. 또한, 해수에 대한 내부식성 향상을 위하여 핀(fin)과 튜브(tube)는 구리합금을 사용하였다.

#### 3.3 배기매니폴드 설계

고온으로 가열된 배기관은 NOx형성에 유리한 조건이며, 협소한 엔진실 내부에서 과열-화재의 위험성이 있으므로 충분히 냉각시킬 필요가 있다. 더욱이, 고부하 운전조건에서는 엔진에서 배출되는 고온의 배기가스에 의해 배기관이 과열되어 위험도가 더욱 증가한다.

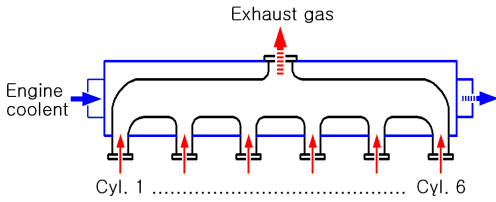


Fig. 6 Exhaust manifold by engine coolant

따라서, 이러한 조건을 고려하여 엔진냉각수를 이용하여 냉각하는 수냉식으로 설계하였다. Fig. 6은 수냉식으로 설계된 배기관을 나타내고 있다.

### 3.4 냉각시스템의 최적화 배치 설계

냉각시스템은 냉각 유체(해수)의 유동경로에 따라서 냉각 성능에 영향을 미칠 수 있으므로 이를 고려하여 적절히 배치되어야 한다. Fig. 7에는 냉각시스템 구성품의 배치 및 냉각수의 유동을 간략하게 표시하였다. 해수펌프(water pump)에 의해 공급되는 해수는 인터쿨러를 거쳐서 엔진 냉각수 열교환기(heat exchanger)를 통과한 후에 바다로 배출된다. 저온의 해수가 냉각수 열교환기를 먼저 통과한 다음에 인터쿨러로 유입될 경우에 냉각수 온도가 크게 상승하여 인터쿨러의 냉각 성능이 현저하게 감소할 우려가 있다. 엔진냉각수의 온도 상승에 따라 수온밸브(thermostat)가 열리면 엔진냉각수는 이를 통과하여 수냉식 배기관을 거쳐서 냉각수 열교환기를 통과한 후에 냉각수 펌프(feed pump)에 의하여 다시 엔진으로 순환되도록 설계되었다.

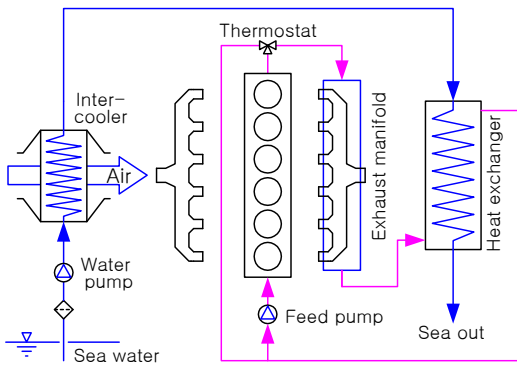


Fig. 7 Cooling system and Fluid flow

## 4. NOx 배출가스 검증시험

### 4.1 실험장치

선박용 디젤엔진의 주요부품의 성능과 엔진에서 배출되는 NOx 배출량을 검증하기 위한 주요 실험장치는 디젤엔진, 엔진동력계, 가스분석기, 데이터취득기 등이며, Fig. 8(사진)에 나타나 있다.

시험방법은 선박용 디젤엔진의 주기관에 적용하는 E3형 시험사이클에 따라 진행되었다<sup>[1,5]</sup>. NOx 특정 배출량의 계산법은 다음 식과 같다.

$$NO_X = \frac{\Sigma(M_{NO_{x,i}} \cdot W_{Fi})}{\Sigma(P_i \cdot W_{Fi})} \quad (1)$$

여기서, M은 질량, W는 가중치, P는 출력[kW]을 나타낸다. 시험조건(mode)별 가중치 W는 E3형 시험사이클에 규정된 값을 적용하였다.

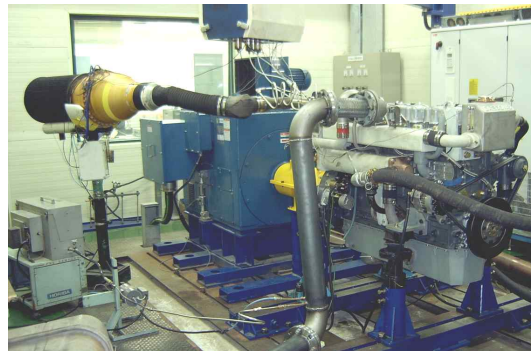


Fig. 8 Experimental setup for engine test

### 4.2 실험결과

Fig. 9는 수냉식 인터쿨러의 성능을 나타낸 실험 결과이며, 흡입공기의 온도변화를 나타내었다. 실험 조건은 최대부하 조건인 mode-1(속도-100%, 출력-100%)이다. 약 15℃(대기 조건) 내외의 흡입공기는 터보차저에 의해 압축되면서 143℃ 정도까지 상승되고, 인터쿨러를 통과하면서 열전달에 의하여 43℃까지 냉각되었다. 따라서, 흡입공기 온도는 최대 부하조건에서 인터쿨러의 냉각에 의하여 약 100℃ 정도의 감소효과가 나타났으며, 수냉식 인터쿨러의 냉각효과가 우수한 것으로 나타났다. 이때, 인터쿨러

로 유입되는 냉각수 온도는 32°C(여름 해수온도)로 일정하게 유지하였다.

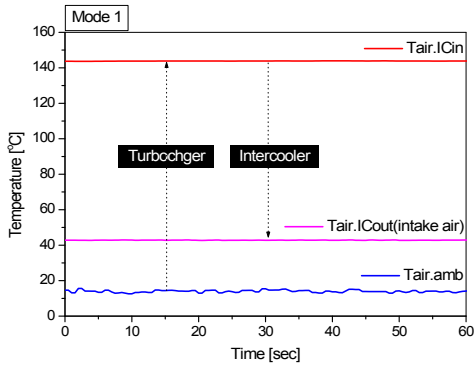


Fig. 9 Intake air temperature(mode 1)

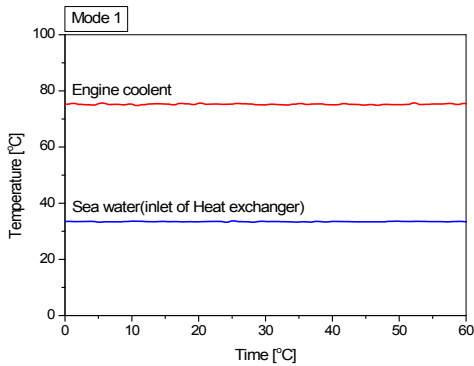


Fig. 10 Coolant temp. from E/G outlet(mode 1)

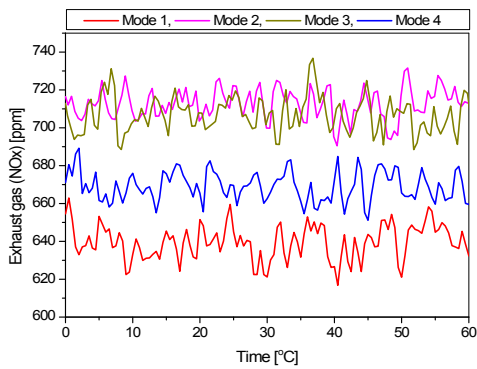


Fig. 11 NOx exhaust flow(mode 1, 2, 3, 4)

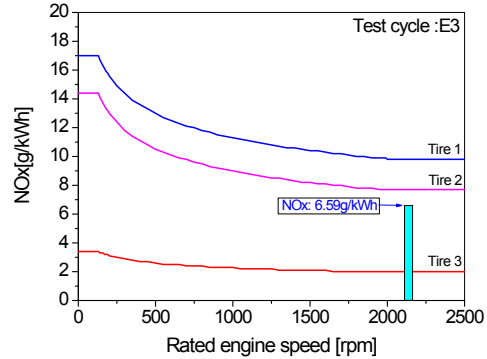


Fig. 12 NOx emission value and its regulation

Fig. 10은 최대부하 조건인 mode-1(속도-100%, 출력-100%)에서 해수냉각 수냉식 열교환기의 성능을 측정한 실험결과이다. 냉각수의 입구 온도는 32°C이며, 엔진 냉각수 온도는 약 75°C 내외로 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 최대부하조건에서의 실험값이며, 저부하 구간에서도 수냉식 열교환기의 냉각성능이 충분히 유지되고 있음을 확인하였다.

Fig. 11은 E3형 시험사이클의 4가지 시험조건(mode-1, 2, 3, 4)에서 측정한 NOx 배출량을 표시한 그래프이다. 측정방법은 각각의 시험조건에 대하여 안정적인 운전조건에서 60초간의 측정자료를 기록하였다. NOx 배출량은 mode-1(속도-100%, 부하-100%)의 경우에는 620~665ppm, mode-2(속도-91%, 부하-75%)의 경우에는 690~730ppm, mode-3(속도-80%, 부하-50%)의 경우에는 690~735ppm, mode-4(속도-63%, 부하-25%)의 경우에는 650~690ppm으로 나타났다. 이 측정값은 NOx 배출량을 ppm 단위로 표시한 것이며, 전체 배기량을 고려하여 질량유량으로 표기하면, mode-1-1.405kg/h, mode-2-1.254kg/h, mode-3-0.871kg/h, mode-4-0.510kg/h으로 환산된다. 따라서 일반적인 디젤엔진과 유사하게 고부하 운전조건에서 연소온도와 압력이 증가할수록 NOx 배출량이 높게 나타나는 경향을 보이고 있다.

Fig. 12는 NOx 배출량을 가스배출량 계산법, 식(1)에 의하여 산출한 값을 표기하였다. 그래프에는 규제기준(Tire I, II, III) 값을 엔진 정격회전수에 따라 표기하였다. 이 실험결과로부터 시험엔진의 NOx 배출량(6.59g/kWh)이 Tire II 규제기준 값보다 적게 배출되고 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 소형 선박용 디젤엔진 개발을 위하여 NOx 형성-배출에 영향을 미치는 주요 엔진부품을 설계하였으며, 배출가스 성능시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 소형 선박용 디젤엔진에 적합하도록 공랭식 주요 부품(인터쿨러, 엔진 냉각수 열교환기, 배기 매니폴드 등)을 수냉식으로 설계하였다. 또한, 여러 가지 주요 엔진부품이 적절한 성능을 발휘하도록 냉각유체의 유동경로를 고려하여 냉각시스템을 배치-설계하였다.
2. 수냉식으로 설계한 주요 엔진부품에 대하여 엔진 동력계를 이용하여 다양한 운전조건에서 시험한 결과 고속-최대부하 조건에서도 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.
3. 소형 선박용으로 개발한 디젤엔진에 대하여 유해가스 배기시험을 수행한 결과, NOx 배출량(6.59g/kWh)이 규제기준(Tire II) 값보다 적게 배출되었다.

위 결론으로부터 선박안전기준 및 해양대기환경 기준(Tire II)에 적합한 소형 선박용 디젤엔진을 개발할 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 교육과학기술부·지식경제부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. IMO, Revision of MARPOL Annex VI and the NOx Technical Code.
2. 국토해양부, 선박기관기준, 2009. 11. 30.
3. 환경부, 대기환경보전법 시행규칙, 2010. 12. 31.
4. 국토해양부, 선박에서의 오염방지에 관한 규칙, 2011. 4. 11.
5. 국토해양부, 선박용 디젤기관의 질소산화물 배출 제어를 위한 검사 등에 관한 잠정기준, 1999. 12. 22.

6. J. G. Nam, D. C. Lee, "Recent regulation and research trends for prevention of air pollution from ships by IMO".
7. J. B. Heywood, "Internal Combustion Engine Fundamentals", pp. 567-667, 1988.
8. K. J. Kang, S. H. Kim, E. C. Kim, "A study on the NOx Emission status and reduction technologies of domestic marine engine", Journal of the korean society for marine environmental engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 57-63, 2004.
9. M. S. Jang, C. D. Koh, S. H. Kim, "A review on the techniques for on-board NOx monitoring system", Journal of ships and ocean engineering. Vol. 38, 2004.
10. W. H. Yoon, B. S. Kim, D. H. Kim, K. D. Kim, J. S. Ha, "The Optimization of Fuel Injection Nozzles for the Reduction of NOx Emissions in a Large Diesel Engine", Transactions of KSAE, Vol. 12, No. 6, pp. 60-65, 2004.
11. J. G. Nam, "A Study on the Urea-SCR System for NOx Reduction of a Light-Duty Diesel Engine", Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 5, pp. 57-63, 2005.
12. J. S. Han, J. M. Oh, K. H. Lee, J. H. Lee, "Study on the Conversion Performance of Lean NOx Trap for a 4-stroke Diesel Engine", Transactions of KSAE, Vol. 19, No. 2, pp. 78-83, 2011.