500Ps급 상용차량 디젤엔진을 이용한 선박용 디젤엔진 개발 연구

심한섭[#]

(#경남과학기술대학교)

A Study for Development of a Marine Diesel Engine from a 500Ps Commercial Vehicle Diesel Engine

Han-Sub Sim[#]

(Received 11 November 2013; received in revised form 5 Decemember 2013; accepted 11 December 2013)

ABSTRACT

This study was carried out to develop a diesel engine for marine propulsion. This marine diesel engine was developed based on a 500Ps vehicle diesel engine. Many main parts, such as the intercooler, radiator, and engine controller were designed for the marine diesel engine. The intercooler was designed to be of sea water cooling type; inlet air is cooled by sea water. Engine coolant is cooled by sea water in the radiator too. The water cooling heat exchanger has high cooling performance. In the cooling system, consists of the intercooler and the radiator, the sea water passes through the intercooler and then the radiator, in sequence. This process is very effective compared to the reverse method in which sea water passes through the radiator and then the intercooler, in sequence. The control performance of the engine controller and the fuel injection rate were improved using an engine speed controller. This system was tested on an engine dynamometer and an exhaust gas analyzer using the marine diesel engine test method. Test results show that the 500Ps marine diesel engine satisfied the IMO NOx regulations; Tier II.

Key Words : Marine Diesel Engine(선박 디젤엔진), Cooling System(냉각장치), Engine Controller(엔진제어기), NOx(Nitrogen Oxide, 질소산화물)

1. 서 론

소형선박에 사용되는 디젤엔진은 주로 차량용 엔진의 구조를 변경하여 선박용으로 개발되고 있

다. 주요 선박용 디젤엔진 생산기업체는 차량, 중장비 등의 디젤엔진을 생산하고 있으며, 선박에 적용하기 위해 일부 품목을 추가로 개발하고 있다.

선박용 엔진을 위한 여러 가지 기술적인 요구조건은 선박안전법, 선박기관기준 등에서 규정하고 있으며, 그 내용은 기술적 요구성능, 안전성, 해양오염방지에 관한 것이다^[1-4]. 기술적 요구 성능 및 안전성은 해양의 특수한 환경에서 장시간 운항하는

[#] Corresponding Author:

Dept. of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology

E-mail : hansub@gntech.ac.kr

선박의 안전운항에 필요한 것이다. 또한 추진기관 및 보조기관 등으로부터 발생할 수 있는 기름의 유출, 대기오염 등을 방지할 수 있어야 한다. 해양 대기오염방지를 위하여 디젤엔진에서 발생하는 질소산화물(NOx)을 줄이기 위하여 국제해사기구(IMO) 및 국내의 배출가스 규제기준을 만족할 필요가 있다^[5]. 선박용 디젤엔진에서 발생하는 NOx를 줄일 수 있는 방법으로는 배기가스 재순환(EGR), 연료분사 및 제어시스템 최적화, 배기가스 후처리 장치(DPF, SCR, LNT), 연소실 내부에 물분사 등이 연구되어 왔다^[6-7]. 이들 중에서 연소실 내부에 물을 분사하는 방법은 물이 수증기로 변화되면서 기화열 흡수로 인하여 연소온도를 낮추고자 하는 목적이 있으나, 소형 엔진에서는 공간의 협소함으로 인하여 적용하기 곤란하다. 또한 EGR, SCR, LNT 등의 방법은 기술적인 효과가 높은 것으로 알려져 있으나, 개발기간이 길고 비용이 많이 소요되는 단점이 있다^[8-13].

따라서 이 연구에서는 냉각시스템과 연료 분사량의 최적화를 통하여 Tier II 기준에 맞는 선박용 디젤엔진을 개발하기 위하여, 기존의 500Ps급 상용차량 디젤엔진을 이용하여 선박용 추진기관으로 개발하는데 필요한 기술에 관하여 연구하였다.

2. 선박용 디젤엔진 부품개발

선박용 디젤엔진 개발을 위한 기본엔진은 상용차량에 적용되는 엔진이며, 최대출력은 500Ps급이다. 디젤엔진의 기본규격은 Table 1과 같다. 디젤엔진의 배기량은 12,344cc이며, 6-기통 엔진이다. 연료량제어는 전자제어방식이며 유닛인젝터를 통하여 연료량을 제어한다. 또한 엔진으로 유입되는 공기량을 증대시키기 위하여 과급기와 공랭식 공기냉각기를 사용하고 있다.

상용차량 디젤엔진을 선박용으로 개발하기 위하여 새로 설계하는 부품은 Table 2와 같다. 연소과정에서 발생하는 다량의 연소열을 방출하여 엔진 냉각수의 온도를 적절하게 제어하기 위하여 차량에서는 공기를 이용하는 방열기를 사용하고 있으나, 선박용은 냉각효율을 높이기 위하여 바닷물을 이용하

Table 1 Basic specification of a marine diesel engine

Description	Specification
Engine type	6-cyl., 4-stroke DI engine
Rated power/Speed	500Ps/2,000rpm
Bore/Stroke	130mm x 155 mm
Compression ratio	17.2 : 1
Fuel injection	Unit Injector
Fuel Control	Electronic Fuel injection
Air aspiration	Turbocharger, Intercooler

는 방열기(또는 열교환기)를 사용하고 있다.

또한, 디젤엔진 내부로 유입되는 공기는 과급기(turbocharger)에 의해서 압축되면서 온도가 상승한다. 공기의 온도상승은 흡입공기량을 감소시키며, 연소온도의 높아져서 NOx 배출량이 증가하는 원인된다. 따라서 고온으로 압축된 흡입공기는 냉각할 필요가 있다. 엔진으로 유입되는 공기를 냉각시키기 위하여 상용차량에서는 외부공기를 이용하여 냉각시키는 인터쿨러를 사용하고 있으나, 선박엔진에서는 냉각성능 향상을 위하여 바닷물(해수)을 이용하여 냉각하는 구조로 설계할 필요가 있다.

디젤엔진에서 출력과 배기가스의 배출량의 제어는 연료의 분사 및 연소과정에서 발생하며, 이러한 기능의 직접적인 제어는 연료분사를 위한 유닛인젝터와 전자제어장치에 의하여 이루어진다. 따라서, 엔진출력과 배기가스의 배출특성을 고려하여 연료의 분사시기와 분사량을 적절하게 제어하는 것이 중요하다.

선박용 변속기는 상용차량에 비하여 매우 단순하며, 전진-중립-후진의 기능을 갖춘 감속기이다. 변속기의 감속비는 약3.5~4.5정도의 범위를 갖는다.

Table 2에 표기된 냉각시스템 및 엔진제어장치는 선박엔진에서 중요하게 여기는 내구성과 NOx 배출

Table 2 Parts for marine diesel engine

Parts design for a marine diesel engine
Sea water cooled radiator
Sea water cooled intercooler
Engine control system
Transmission
Pipe line

량에 큰 영향을 미친다. 이들을 적절하게 설계함으로써 안정적인 연소온도를 유지시켜 NOx 배출량을 줄일 수 있다.

3. 선박용 디젤엔진 부품개발

3.1 수냉식 방열기 설계

선박은 상용차량과 달리 고부하로 장시간 운항하는 비율이 훨씬 높으므로, 연소열을 원활하게 배출하여 고열에 의한 엔진손상을 방지할 필요가 있다.^[14] 상용차량에서 엔진 냉각수는 외부공기를 이용하여 냉각하고 있으나, 선박용 엔진에서는 공랭식 방열기에 의한 충분한 냉각효과를 기대하기 어려우므로 냉각성능 향상을 위하여 Fig. 1과 같이 바닷물을 이용한 해수냉각 방열기를 적용할 필요가 있다. 방열기가 갖추어야 될 필요한 성능은 냉각능력과 바닷물에 의한 부식을 방지할 수 있어야 된다. 따라서 선박용 디젤엔진의 방열기는 기본적으로 수냉식 열교환기이며, 저온의 바닷물을 이용하여 고온의 엔진 냉각수를 냉각시킨다. Fig. 2는 열전달 효율이 높은 대향류 열교환기에서 냉각유체의 온도변화를 나타낸 것이며, 대수평균온도차(LMTD)는 다음(1)과 같이 구할 수 있다.

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \quad (1)$$

또한, 방열기의 전열면적은 다음 식(2)과 같이 구할 수 있다.

Fig. 1 Radiator design

Fig. 2 Heat exchange in a radiator

$$A = \frac{H}{LMTD \cdot k} \quad (2)$$

여기서, H는 방열용량, k는 방열기의 재질을 의미한다. 방열용량은 최대 부하에서 장시간 운전에서 지장이 없도록 적정한 냉각수 온도를 유지하기 위해 엔진으로부터 방출되는 열량이다. 또한, 식(2)의 방열면적에는 안전계수를 고려하여야 된다.

3.2 수냉식 인터쿨러 설계

일반적으로 엔진내부로 유입되는 공기량을 증대시키기 위하여 과급기를 사용하여 공기를 압축하며, 압축과정에서 공기온도가 상승한다. 공기온도가 상승하면 밀도가 작아지므로, 상승된 공기온도를 냉각시킬 필요가 있다. 상용차량에서는 외부공기를 사용하여 고온-압축공기를 냉각하고 있으나, 선박용 디젤엔진에서는 냉각효율 향상을 위하여 바닷물을 이용하여 냉각할 필요가 있다. 저온의 바닷물을 이용하여 고온공기를 냉각하는 인터쿨러의 기술적인 요구성능은 냉각효율과 공기중에 섞여있는 염분에 의한 부식을 방지할 수 있어야 된다.

엔진으로 유입되는 공기의 온도(T)와 질량(m)의 관계는 다음 식(3)과 같이 기체방정식으로부터 계산할 수 있다.

$$m_{air} = \frac{PV}{RT} \quad (3)$$

여기서, P는 압력, V는 체적, R은 기체상수이다. 위 식(3)은 다음과 같이 기준온도($T_{15^\circ C}$)에서의 온도와 실제온도(T_{air})의 온도비율로 표시할 수 있다.

$$m_{air} = \frac{PV}{RT_{15^\circ C}} \cdot \frac{T_{15^\circ C}}{T_{air}} \quad (4)$$

위 식(4)로부터 디젤엔진에서 과급기에 의해 가압된 흡입공기의 온도(T_{air})변화에 따른 온도비율을

Fig. 3 Temperature ratio variation

그래프로 나타내면 다음 Fig. 3과 같다. 기준온도에서는 온도비율이 1.0이며, 온도가 상승할수록 감소되는 것을 알 수 있다. 이것은 흡입공기의 온도가 상승할수록 공기밀도의 감소에 의하여, 흡입공기량이 감소한다는 것을 의미한다. 과급기에 의해 공기온도가 140°C까지 상승하면 온도비는 약 0.7정도까지 감소된다.

또한, 과급기에 의한 흡입공기의 온도상승은 NOx 배출량을 증가시키므로 압축된 고온공기는 엔진 성능향상을 위하여 냉각시킬 필요가 있다. 인터쿨러에서 열전달에 의한 냉각효율을 높이기 위하여 대향류 방식으로 설계할 필요가 있다. Fig. 4는 인터쿨러의 설계도면(CATIA)이다. 대수평균온도차는 식(1)을 적용하며, 전열면적은 식(2)를 적용할 수 있다. 식(2)에서 고온 압축공기의 온도는 T , 해수 냉각수의 온도는 t 에 대입하면 된다.

3.3 방열기와 인터쿨러의 배치 설계

Fig. 4 Intercooler design

Fig. 5 Flow diagram of cooling system

선박용 디젤엔진에서 인터쿨러와 방열기는 차가운 바닷물을 공급하여 열전달에 의한 열교환작용을 통하여 엔진 냉각수의 고온 열을 배출시킨다. 이 경우에, 1개의 해수펌프를 사용하며 적정용량확보와 바닷물에 의한 부식을 방지하여야 한다. 따라서 Fig. 5와 같이 바닷물에 의한 냉각순서를 고려할 필요가 있다.

(a)에서는 바닷물이 방열기를 통과하고, 그 다음에 인터쿨러를 지나가는 과정이다. (b)의 경우에는 인터쿨러를 먼저 통과하고 나중에 방열기를 지나가는 방식이다. (b)의 경우가 (a)에 비하여 고온-흡입공기를 냉각시키는데 효과적이므로 (b)의 방법이 냉각성능이 우수하다. (a)의 방법은 바닷물이 방열기를 통과하면서 온도가 상승되므로 인터쿨러에서 고온-흡입공기를 냉각하는 성능이 떨어진다. 따라서, (b)의 방법을 선택하고, 해수펌프의 용량을 충분히 늘리는 것이 효과적이다.

3.4 엔진제어시스템 설계

상용차량 디젤엔진에 적용된 엔진제어시스템은 센서, 컨트롤러 및 액추에이터 등의 하드웨어는 동일한 것을 사용할 수 있으나, 제어프로그램인 SW

Fig. 6 Speed control system for diesel engine

Fig. 7 Base fuel injection

는 선박엔진용으로 설계되어야 한다. 상용차량은 부하에 따라 연료를 제어하는 방법이지만 선박용은 속도제어용으로 설계되어야 할 필요가 있다. 다음 Fig. 6은 디젤엔진 속도제어시스템을 블록선도로 표기한 것이다. 요구된 속도입력(r)과 피드백(feedback) 엔진회전속도(y)의 오차(e)에 따라 엔진제어기(ECU)는 적절한 연료분사량을 결정하여 분사출력신호(u)를 보낸다.

이 분사출력신호(분사기간)에 따라 인젝터 연료 분사량이 결정되어 토크증감이 발생하고, 이에 따라 엔진회전속도가 변화된다. Fig.7은 엔진제어기에서 적절한 분사량을 연료분사기간으로 변환하여 출력하기 위한 무차원 비례변수이며, 유닛인젝터의 분사특성을 포함한 값이다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험장치 및 방법

선박엔진용 500Ps급 디젤엔진에 적합한 방열기, 인터쿨러, 엔진제어장치를 포함한 주요부품을 설계

Fig. 8 Diesel engine and test

Table 3 Test procedure for main engine

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Speed	100%	91%	80%	63%
Load	100%	75%	50%	25%
W. Factor	0.20	0.50	0.15	0.15

-제작하고, 다음 Fig.8과 같이 엔진의 성능측정을 위한 실험을 수행하였다. 디젤엔진의 동력측정을 위해 수동력계(Go Power Systems, DT-3000), 배기가스분석계(HORIBA, MESA-7100D)와 각종 신호분석을 위한 데이터측정시스템이 활용되었다. 선박용 디젤엔진은 주기관(추진기관) 시험법을 적용하였다^[4]. 시험방법은 Table 3과 같다. 엔진회전속도, 부하 및 가중값이 다른 4개 mode가 있으며, 선박엔진에서 비교적 많이 사용되는 운항조건인 mode2가 가장 높은 가중값, 0.5를 적용하고 있다.

4.2 실험 결과 및 분석

냉각성능이 효과적인 바닷물을 이용하여 고온-압축공기를 냉각하는 인터쿨러의 공기온도 측정결과는 Fig. 9와 같다. Mode 1에서 약 18℃의 대기온도는 과급기의 압축과정을 거치면서 약 145℃ 정도 상승하였으나 인터쿨러를 통과한 후에는 약 57℃로 냉각되었다. Mode 2~4에서도 압축공기의 온도상승이 있었으나, 인터쿨러를 통과한 후에는 흡입공기의 온도가 낮아졌다.(mode 2: 50℃, mode 3: 44℃, mode 2: 40℃) 이 결과로부터 바닷물을 이용한 인터쿨러의 냉각효과가 양호한 것으로 나타났다.

Fig. 9 Air temperature in the intercooler

Fig. 11 NOx exhaust at the various mode

Fig. 10 Coolant temperature in the radiator

Fig. 10은 고온의 엔진냉각수를 냉각시키는 방열기에서 입구 및 출구 온도를 그래프로 나타낸 것이다. 방열기의 입구에서 엔진냉각수 온도는 디젤엔진의 냉각수 출구온도이며 mode 1 ~ mode 4까지 약 95°C를 유지하고 있다. 고온의 엔진 냉각수는 방열기를 통과하면서 냉각되며, 75°C(mode 1), 73°C(mode 2), 71°C(mode 3), 70°C(mode 4)로 감소되었다. 따라서 엔진의 냉각수는 온도가 95°C로 적정하게 유지되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 디젤엔진의 배기관으로부터 배출되는 질소산화물(NOx)의 배출량(농도)을 그래프로 표시한 것이다.

NOx 배출량(농도)는 디젤엔진의 시험조건에 따라서 mode 1에서는 1004 ppm, mode 2에서는 1987 ppm, mode 3에서는 1802 ppm, mode 4에서는 805

Fig. 12 NOx exhaust results on the 500Ps marine diesel engine

ppm으로 나타냈다. Mode 3과 mode 4에서는 부하는 작으나, 엔진 회전속도가 작은 구간이므로 연소기간이 증가하여 NOx의 농도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 NOx 배출량(농도) 결과 Fig. 11로부터 질량유량을 구하고, NOx 배출량 계산법에 의해 산출된 NOx의 배출량을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 (a)는 Fig. 5(a)와 같이 바닷물이 방열기-인터쿨러의 순서대로 통과한 것이며, (b)는 Fig. 5(b)와 같이 바닷물이 인터쿨러-방열기의 순서로 공급된 것이다. (b)의 경우가 (a)보다 NOx 배출량이 10.81% 감소하는 것으로 나타났으며, Tier II 규제기준(7.7 g/kWh)을 만족하고 있다. 그러므로 바닷물을 이용한 선박용 디젤엔진의 냉각시스템에서 인터쿨러와

방열기의 배치순서는 (a)보다 (b)의 경우가 더 효과적임을 알 수 있다.

5. 결 론

상용차량 500Ps급 디젤엔진을 이용하여 선박용 추진기관으로 개발하는데 필요한 기술에 대하여 연구하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 인터쿨러, 방열기 및 엔진제어시스템을 선박용 디젤엔진에 적합한 규격으로 개발하였다.
2. 인터쿨러 및 방열기는 바닷물(냉각유체)을 이용해서 냉각하는 수냉식으로 설계하였다. 또한, 냉각시스템은 바닷물이 인터쿨러-방열기의 순서대로 통과하도록 배치하는 것이 효과적임을 확인하였다.
3. 선박용 추진기관의 NOx 배출시험 및 검사방법을 적용하여 500Ps급 디젤엔진에 대한 실험결과에서 NOx 배출량이 Tier II 기준보다 적게 배출되었다. 따라서, 이 연구를 통하여 선박용 추진기관의 기관기준에 적합한 500Ps급 디젤엔진의 개발이 가능하게 되었다.

후 기

이 논문은 2012년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Ministry of Oceans and Fisheries, Marine engine standard, Korea, 2013.
2. Ministry of environment, Enforcement Rule for A Law of Atmospheric Environment Preservation, Korea, 2013.
3. Ministry of Oceans and Fisheries, Rule for Pollution Preservation in a Ship, Korea, 2013.
4. Ministry of Oceans and Fisheries, A Provisional Test Standard for NOx Exhaust control of Marine Diesel engine. Korea, 2013.
5. IMO, Revision of MARPOL Annex VI and the NOx Technical Code.
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. H. S. Sim, "A Study on NOx Reduction for a Small Marine Diesel Engine", KSMPE, Vol. 10, No. 5, pp. 79-84, 2011.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Y. J. Yang, H. S. Sim, "Study on Simulation of Water Cooling Heat Exchanger for Small Marine Diesel Engine", KSMPE, Vol. 11, No. 6, pp. 201-207, 2012.