

선박용 디젤엔진에서 이단지연분사에 따른 배기 배출물 저감에 관한 실험 연구

이원주¹ · 최재혁² · 조권희[†]

(Received March 2, 2015 ; Revised April 28, 2015 ; Accepted May 1, 2015)

Experimental Study on Reduction of Emissions for Marine Diesel Engines with a Double Post Injection

Won-Ju Lee¹ · Jae-Hyuk Choi² · Kwon-Hae Cho[†]

요약: 국제해사기구 해양환경보호위원회는 2016년 1월 1일부터 배출통제지역을 통항하는 선박에 대해서 Tier III를 적용하여 질소산화물 배출 규제를 더욱 강화하기로 결정하였다. 본 논문에서는 질소산화물 배출 저감을 위한 연구의 일환으로 한국해양대학교 실습선 한바다호를 이용하여 실제 운항 중에 주기관을 단일분사와 이단지연분사의 두 가지 조건으로 운전하여 부하별 배기가스, 실린더 압력, 연료소모량 등을 측정하였다. 그 결과 두 가지 운전조건 모두 엔진의 부하가 증가할수록 질소산화물과 이산화탄소 배출량도 함께 증가하는 경향을 보였으며, 일산화탄소의 농도는 감소하였다. 또한 이단지연분사 시에는 최대폭발압력이 약 10 % 이상 감소하였고, 이로 인해 배기가스 내 질소산화물의 농도는 약 25~30 % 정도 감소하였다. 하지만 질소산화물 배출 저감의 긍정적인 결과에 반하여 연료소비율이 약 3~5 % 정도 증가하는 상반관계가 확인되었다.

주제어: 이단지연분사, 질소산화물, 최대폭발압력, 상반관계, 연료소비율

Abstract: Marine Environment Protection Committee of the International Maritime Organization has decided to reinforce the NOx emission standards for ships passing an ECA(Emission Control Area) with Tier III standards from January 1, 2016. In this study, real-time measurements of the exhaust gas, cylinder pressure and fuel consumption were conducted at each load of a T/S Hanbada main engine of Korea Maritime and Ocean University, which is controlled by single injection and double post injection for reducing NOx emissions. The results showed that the quantity of CO₂ and NOx increased in proportion to the engine load, whereas the CO concentration was inversely proportional to the engine load. In addition, double post injection decreased 10 % of P-max and reduced 25~30 % of the NOx emissions compared to single injection, whereas there was a trade-off relation, such as increase 3~5 % of SFOC (Specific Fuel Oil Consumption).

Keywords: Double post injection, NOx, P-max, Trade-off, Specific fuel oil consumption

1. 서론

1.1 선박기인 질소산화물 배출에 관한 국제동향

1997년 9월 26일 MARPOL73/78(선박으로부터 오염방지를 위한 국제협약)의 당사국 회의는 “회의 결의서 2”로 선박용 디젤기관의 질소산화물(NOx) 배출제어에 관한 기술코드(NOx Technical Code)를 채택하였다. MARPOL Annex VI(선박으로부터 대기오염방지를 위한 규칙)이 2005년 5월 19일 발효됨에 따라 부속서의 제13규칙이 적용되는 각 선박용 디젤엔진은 이 코드의 조항들에 따라야 하며 단계적

으로 강화되는 질소산화물 배출 제한치를 만족시켜야 한다[1].

2008년 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)의 해양환경보호위원회(MEPC, Marine Environment Protection Committee)는 선박의 엔진 설치일을 기준으로 2016년부터 배출통제구역(ECA, Emission Control Areas)을 통항하는 선박에 대해 Tier III 요건을 도입하여 선박 질소산화물 배출 기준을 강화하기로 결정하였다.

2013년 5월에 개최된 MEPC 65차 회의에서 러시아가 중심이 되어 장비와 기술, 비용 장벽에 관한 우려를 이유로 MARPOL Annex VI의 13.5.1.1 규칙에 규정하는 NOx Tier III

† Corresponding Author: (ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1539-655X>): Department of Offshore Plant Management, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 606-791, Korea, E-mail: khcho@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4252

1 Department of Marine System Engineering Graduate School, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: skywonju@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4207

2 Department of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, E-mail: choi_jh@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4257

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

의 적용일을 2016년에서 2021년으로 유예하자는 수정(안)을 제안하였으나, 최근에 개최된 2014년 4월 MEPC 66차 회의에서 선박의 질소산화물 배출 규제 3단계 Tier III를 2016년 1월 1일부터 시행하자는 기존(안)을 만장일치로 승인하였다[2][3].

이에 따라 2016년 1월 1일부터 배출제한지역(ECA)인 북미 연안 및 카리브해에서 운항하는 출력 130 kW 이상의 디젤 엔진이 장착된 선박은 Tier I 대비 질소산화물 배출량의 80% 이상을 저감해야 한다.

현재 ECA 지역으로 지정된 미국을 운항하는 선박의 선복량은 전 세계 운항선박의 30%가 넘으며, 앞으로 지정될 ECA 지역이 유럽, 호주, 일본 등으로 확대 될 예정이다. 또한 세계 신조선 건조량이 3,600척이 넘으며, 30% 정도만 헤아려도 매년 1,080척 이상이 ECA 지역을 운항하는 선박으로 건조되고 있다. 또한 세계 105,004척의 선복량을 감안했을 때 3만척 이상의 선박이 ECA 지역을 통행하고 있는 것으로 볼 수 있다.

게다가 질소산화물로부터 형성된 오염 물질들은 장거리를 이동하는 특징이 있어서 질소산화물과 결합된 문제들이 질소산화물을 배출한 지역에 한정하지 않고 전혀 엉뚱한 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 이와 같은 노력이 진행되고 있음에도 불구하고 현재 질소산화물의 배출은 꾸준히 증가하는 추세이다.

1.2 연료분사제어를 통한 질소산화물 배출 저감법

디젤엔진은 연소실 내에 불균일한 혼합기를 형성함으로써 연소과정 중에 국부적인 고온영역이 발생하는 연소특성을 가지고 있으며 이와 같은 특성은 유해 배기가스인 질소산화물을 다량으로 발생시키는 문제점을 가지고 있다[4].

현재까지 디젤엔진의 주요한 유해 배출물인 질소산화물 배출 저감 방법으로 흡입공기냉각, 연소실 최적화 설계, EGR, SCR, 연료분사제어 등이 연구되어 왔으며, 최근의 동향은 가스를 연료로 하는 엔진을 이용하여 EGR, SCR 등의 배기

가스 후처리 기술을 적용함으로써 질소산화물의 배출량을 엄격한 배기규제에 만족시키는 것이다[5]. 그러나 이들 후처리 기술만으로 앞으로 더욱 강화되는 배기규제를 만족시키기에 는 비용 및 기술적 측면에 어려움이 있다. 따라서 엔진 연소 단계에서 질소산화물 배출량 저감을 실현할 수 있는 연소 기술에 대한 연구가 더욱 활발히 이루어져야 하며, 정밀한 연료 분사제어 등의 기술이 신 연소 기술의 실현에 중요한 요소로서 인식되고 있다.

현재 선박용 디젤엔진의 연료분사에 있어서 널리 이용되고 있는 전자제어 방식의 장점은 연료공급, 분사시기 및 횡수 등의 연료분사 조건을 더욱 유연하게 적용할 수 있는 점이다 [6]. 이를 이용한 연료의 이단분사 혹은 지연분사 기법은 엔진 연소실의 압력과 온도를 낮추어 줌으로써 질소산화물 배출량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구는 상기의 신 연소 기술 실현의 일환인 이단지연분사를 적용한 실제 운항중인 선박용 디젤엔진에서 배출된 배기가스를 측정한 데이터를 바탕으로 운전 및 분사 조건별 연소특성 및 배기특성을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 한다. 이는 선박용 전자엔진으로부터 실측한 배기 데이터를 제공함으로써 운전 및 분사 조건에 따라 발생량이 변화하는 유해 배기 배출물의 저감기술 선택에 매우 유용한 자료가 될 뿐만 아니라 다가올 더욱 강력한 환경규제에 선제적으로 대응할 수 있는 의미 있는 연구라고 생각한다.

2. 실측 대상 선박 및 계측 방법


2.1 측정 대상 선박의 개요

측정 대상 선박인 한바다호는 204명의 학생을 동시 수용 및 교육 가능한 동양 최대 규모의 실습선으로서 2005년 12월 STX shipyard로부터 인수되어 한국해양대학교에서 운영 중에 있으며 연간 약 120일 정도의 운항을 수행하고 있고 엔진의 운전시간은 약 8,000시간을 기록 중이다.

Table 1은 한국해양대학교 실습선 한바다호의 실물 이미지와 주요 제원을 타나낸 것이다[7].

한바다호의 주기관은 MAN Diesel & Turbo 사의 6L42MC/ME

Table 1: General Particulars of T/S HANBADA

Image	Items	Description
	Builder	STX Shipbuilding Co., Ltd.
	Length Overall	117.02 m
	Breath	17.80 m
	Maximum Speed	19.0 knots
	Service Speed	17.5 knots
	Engine Model	MAN B&W 6L42MC/ME
	MCR	8,130 bhp × 176 rpm
	NCR	6,910.5 bhp × 166.7 rpm
	SFOC at MCR	130 g/bhp·hr + 5 %
	Gross Tonnage	6,686 ton

엔진이 탑재되어 있으며 세계 유일의 MC(기계식) & ME(전자식) 이중(dual) 제어 방식을 채택하고 있다. 즉, 기계식 캠 구동(MC) 엔진으로도 운전이 가능하고 필요에 따라 관련 배관 및 프로그램을 변경하여 전자제어(ME) 엔진으로도 운전이 가능하다. 또한 전자제어 모드에서는 economy control(단일분사)와 emission control(이단지연분사) 두 가지 방법의 연료분사 조건을 선택할 수 있다.

잘 알려진 바와 같이 기존의 캠 구동 엔진에서는 100 % 혹은 90 % 등의 지정된 한 포인트에서만 연소가 최적화되었기 때문에 상대적으로 저부하 혹은 부분 부하에서 운전성능 및 연소효율이 나빠지는 단점이 있었다. 전자제어 엔진에서는 각 부분 부하에 적합한 연료 분사 및 배기변 개폐 시점을 컴퓨터 프로그램에 의해 정확히 제어해줌으로써 사용자에게 의해 타이밍 조정이 가능하여 부분 부하에서도 최적의 연소가 가능하게 해준다. 이외에도 전자제어 엔진의 장점으로는 연료 소모량의 감소, 배기가스 상태의 개선, 실린더 오일 절감, 운전의 편의성 등이 있다[8].

Figure 1, 2는 실제 한바다호 신조 후 시운전 시에 75 % 부하에서 기계식 & 전자식 제어를 할 경우 각각의 실린더 압력 계측 자료를 도식화하여 비교한 것으로 기계제어 방식에 비해 전자제어 모드일 경우 각 기통의 압력이 편차 없이 고르게 나타나며 약 10 % 가량 실린더 압력이 증가한 것을 볼 수 있다.

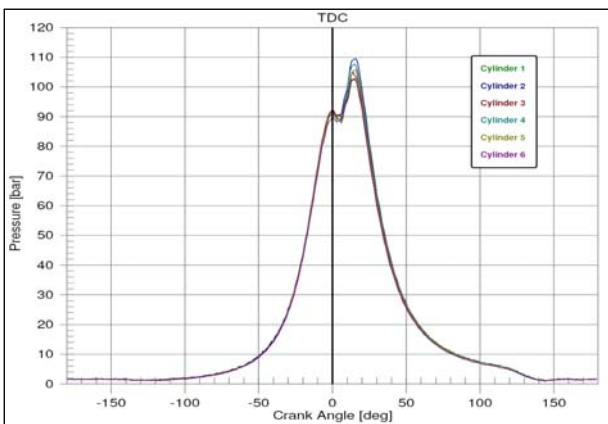


Figure 1: Cylinder pressure of the mechanical control mode at 75 % load

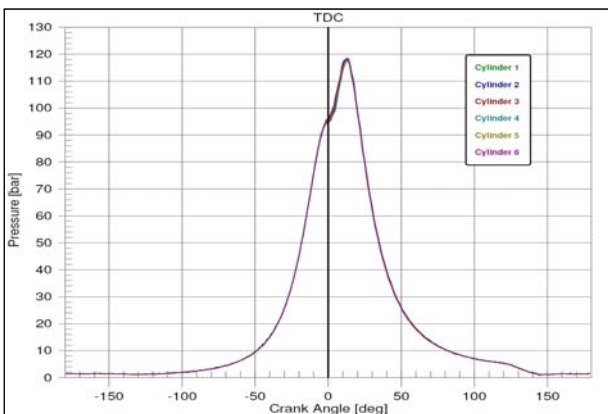


Figure 2: Cylinder pressure of the electronic control mode at 75 % load

2.2 측정 장비

최대폭발압력(P-max)과 평균유효압력(MEP)은 MAN Diesel & Turbo 사의 PMI-Online system으로부터 계측하였다. 가스 분석기는 Testo 350-XL을 이용하였으며, Table 2에 실험에 사용된 분석기 상세를 나타내었다.

Table 2: Specifications of the Gas Analyzer (Testo 350-XL)

Image	Parameter	Measuring Range
	O ₂	0 ~ 25 Vol. %
	CO	0~ 3000 ppm
	NO	0~ 3000 ppm
	NO ₂	0 ~ 500 ppm
	SO ₂	0~ 3000 ppm
	CO ₂	0~ 40 Vol. %

2.3 측정 방법

한바다호 주기관 배기 배출물 측정은 2014년 3월 한바다호가 한국해양대학교 실습선 부두를 출항하여 목포항까지 왕복 항해하는 동안 진행되었다.

실험에 사용된 연료유는 bunker-B(LRFO 3.0 %)이고 연료유의 상세를 보다 정확히 알기 위하여 한국석유관리원 석유기술연구소에 성분분석을 의뢰하였으며 그 결과는 Table 3과 같다.

Table 3: Fuel oil specifications

Test items	Unit	Results
Gravity API @60°F	-	0.9382
Specific Gravity @15/4°C	-	0.9377
Viscosity Kin. @50°C	mm ² /s	25.86
Flash Point (Energy disperse X-ray fluorometry)	°C	81.0
Sulfur (Pensky-Martens closed tester)	Weight %	1.76
Water Sediment	Volume %	0.30

엔진은 전자제어 모드에서 운전되었으며 분사 시스템은 economy control, emission control의 두 가지 방법으로 제어하였고, 기관 회전수를 100 rpm, 120 rpm, 150 rpm, 160 rpm의 구간으로 나누어 NO_x, CO 및 CO₂의 배출량을 측정하였다.

2.4 연료분사제어

디젤엔진에서 주를 이루는 질소산화물은 열생성 질소산화물(thermal NO_x)이고, 이 열생성 질소산화물의 생성을 지배하는 요인으로는 실린더의 높은 폭발압력에서 기인하는 높은 연소온도이다. 따라서 일반적으로 NO_x 생성은 연소온도에 크게 의존한다고 할 수 있으며, 연소 단계에서의 NO_x 저감 기술은 연소온도를 낮추는 것이 가장 핵심적인 요소라고 할 수 있다. Figure 3에는 연료분사를 통해 연소온도를 낮추어

NOx를 저감시키고 확산연소기간을 짧게 하여 PM을 저감시키는 연료분사제어의 기본기술을 나타낸다.

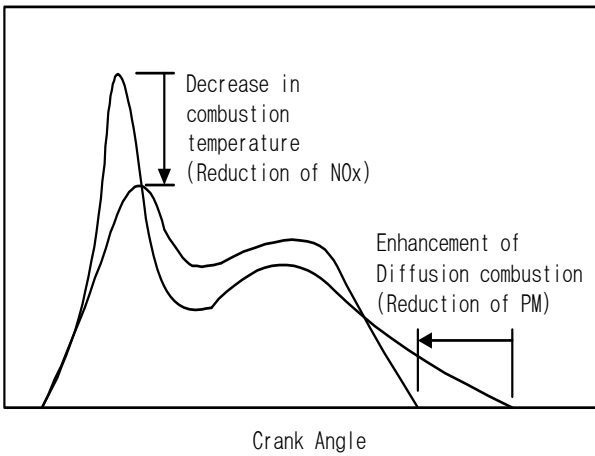


Figure 3: Reduction principle of emissions by improving combustion

Economy control은 일반적인 전자엔진의 연료분사와 같이 최적의 타이밍에 연료를 단일분사 하는 방법으로 경제적인 이득에 초점을 둔 운전 모드이고, emission control은 NOx 배출규제에 대응하기 위한 친환경(저 녹스) 운전 모드라고 할 수 있다. Emission control의 NOx 저감 원리는 연료분사제어를 통해 연료분사를 이단으로 나누고 주분사를 지연시키는 이단지연분사를 함으로써 실린더 내의 압력을 낮추어 연소온도를 떨어뜨리고 궁극적으로 NOx를 감소시키는 것이다.

Figure 4, 5는 MAN B&W 7S50ME-C 엔진의 75 % 부하에서 economy control과 emission control의 모드 변환에 따른 각각의 실린더 압력의 변화 및 연료분사형상을 나타낸다. 이 경우 emission control에서 30 bar 정도의 P-max를 떨어뜨리는 효과가 있고, 약 60 % 까지 NOx 저감효과를 가져오는 것으로 알려져 있다.

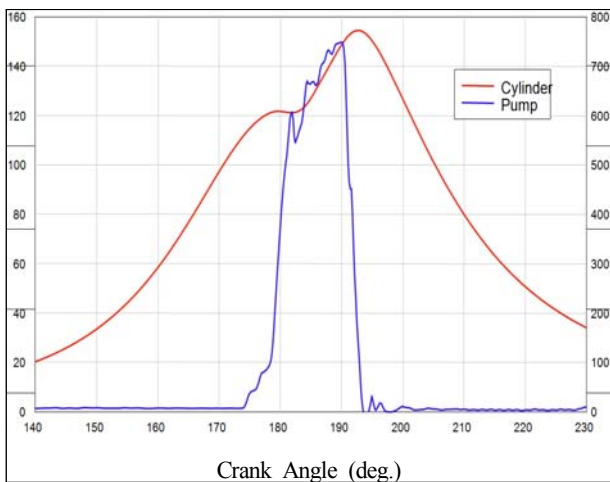


Figure 4: Fuel injection profile & cylinder pressure of economy mode on a 7S50ME-C engine at a 75 % load

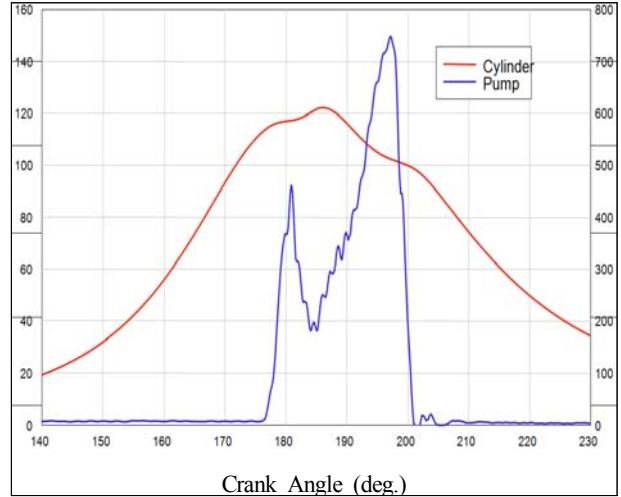


Figure 5: Fuel injection profile & cylinder pressure of emission mode on a 7S50ME-C engine at a 75 % load

3. 실험 결과 및 고찰

Figure 6은 주기관의 회전수 변화와 제어방식 변환에 따른 연료소비율을 나타내며 두 가지 모드에서 공히 부하가 증가할수록 연료소비율이 감소하는 전형적인 SFOC 곡선을 보여주고 있다.

Emission mode 일 경우, 주기관 회전수 120 rpm (부하 25 %) 구간에서 약 5 % 정도, 150 rpm (부하 50 %) 구간에서 약 3 % 정도 엔진의 연료소비율이 나빠지는 것으로 계측되었다. 즉 동일한 회전수에서 emission mode는 economy mode에 비해 연료소비율이 약 3 % 이상 증가하는 것으로 나타나며, 그 증가폭은 회전수가 높아질수록 감소하는 경향을 보인다. 그리고 회전수 150 rpm 이상에서는 연료소비율의 증가폭이 약 3 % 정도로 유지되는 것으로 미루어볼 때, emission mode에서 연료소비율의 손실을 최소화하기 위한 방법으로 엔진 회전수를 150 rpm 이상으로 운전하는 것이 유효하다고 판단된다.

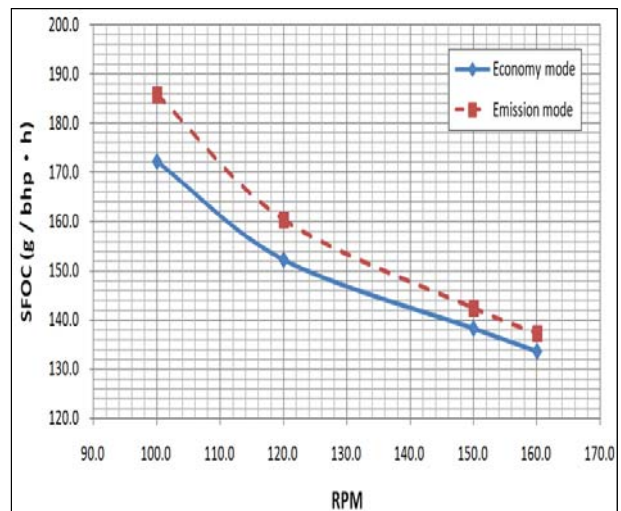


Figure 6: Specific fuel oil consumption on each injection mode according to M/E rpm

Figure 7은 주기관의 회전수 변화와 제어방식 변환에 따른 최대폭발압력을 나타내며, 전 회전수 구간에서 economy mode의 최대폭발압력이 emission mode보다 높게 나타났다. Emission mode는 최대폭발압력을 약 10 bar 이상 감소시켰음을 볼 수 있고, 이는 연소온도 저하로 이어져 NOx 생성을 억제시킬 것으로 예상된다.

Figure 8 과 9은 저 녹스 모드의 연소특성을 잘 나타내고 있는 회전수 100 rpm 영역에서 No.1 실린더의 제어방식 별 P-θ 선도를 나타내었다. 그림에서 보듯이 emission mode에서 착화시점의 지연으로 인해 최대폭발압력이 10 bar 이상 감소하고, P-comp와 P-max의 차이가 확연히 줄어들었음을 확인할 수 있다.

Figure 10은 주기관의 회전수 변화와 제어방식 변환에 따른 평균배기가스온도를 나타내며 전 회전수 구간에서 emission mode의 배기가스온도가 높다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 emission mode에서 높은 배기가스온도가 형성되는 것은 연료의 지연분사로 인한 후연소의 결과로 볼 수 있으며, 연료가 연소하여 생긴 열에너지가 일 에너지로 충분히 전환되지 못하고 내부에너지 상승에 소모된 것으로 설명할 수 있다. 이는 에너지효율적인 측면에서는 emission mode가 다소 불리하다는 반증이기도 하다.

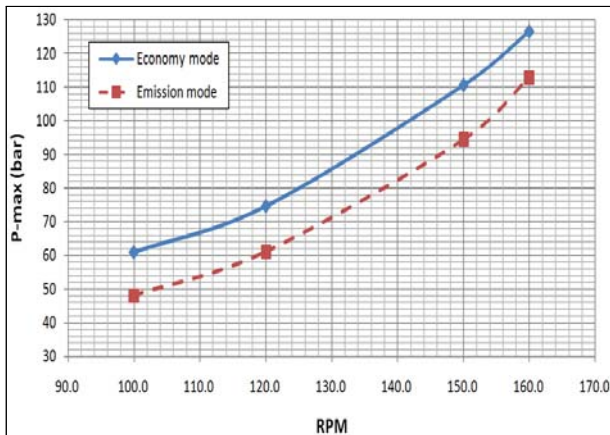


Figure 7: Mean P-max on each injection mode according to M/E rpm

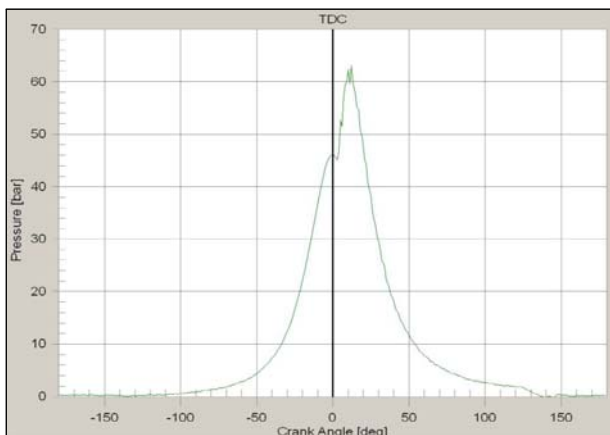


Figure 8: P-θ diagram on economy mode at 100 rpm

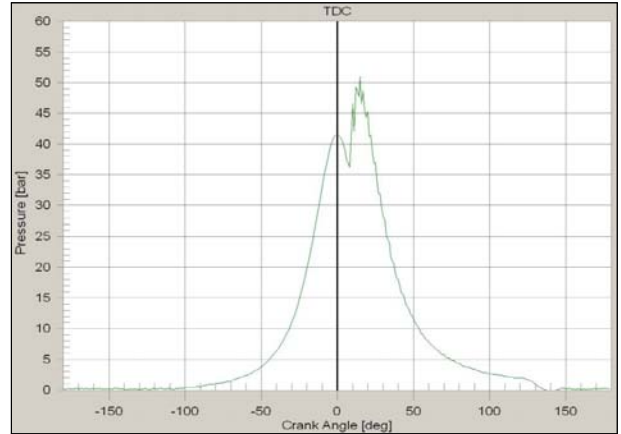


Figure 9: P-θ diagram on emission mode at 100 rpm

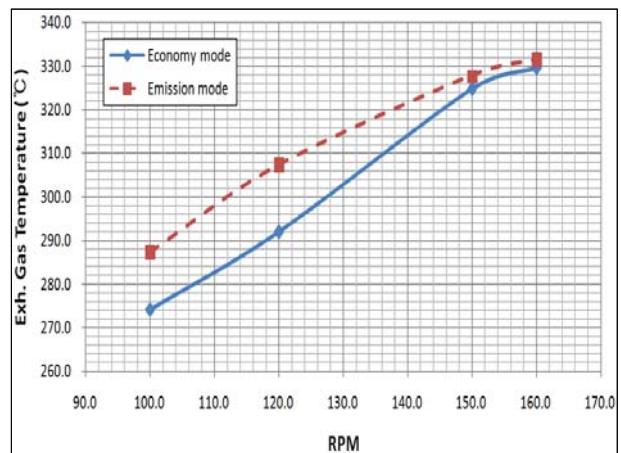


Figure 10: Mean exhaust gas temperature on each injection mode according to M/E rpm

Figure 11은 엔진 회전수 변화에 따른 운전모드별 소기압력의 변화를 나타내며, emission mode에서 economy mode보다 높은 소기압력이 계측되었다. 이는 emission mode의 상대적으로 높은 배기가스온도에서 기인한 과급기 효율 증가가 원인으로 판단된다.

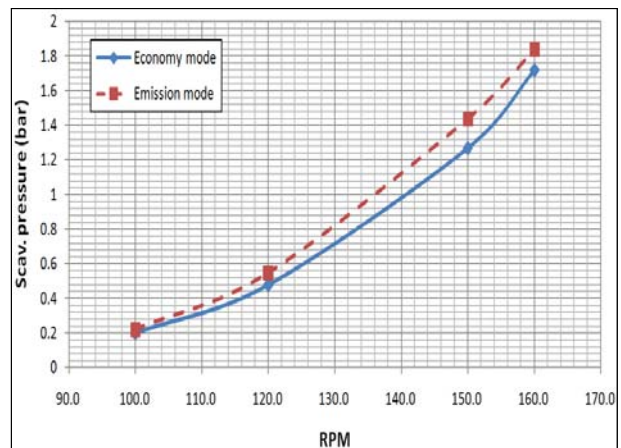


Figure 11: Scavenging air pressure on each injection mode according to M/E rpm

Figure 12에는 엔진 회전수 변화에 따른 운전모드별 NOx 농도 변화를 나타내었다. 엔진 부하가 증가할수록 NOx 농도가 증가함을 볼 수 있고, emission mode의 이단지연분사를 통해서 economy mode 대비 약 25~30 % 정도의 NOx 농도를 감소시켰다.

Figure 13은 동일한 실험 조건에서 CO의 농도를 나타낸다. 엔진 회전수가 증가할수록 실린더 내부는 완전연소에 가까워지므로 불완전연소의 생성물인 CO 농도는 감소하게 된다. Emission mode에서 economy mode보다 CO 농도가 높게 나타나고 있는데 이는 emission mode 시 발생하는 지연분사에 기인한 후연소가 원인으로 추정된다.

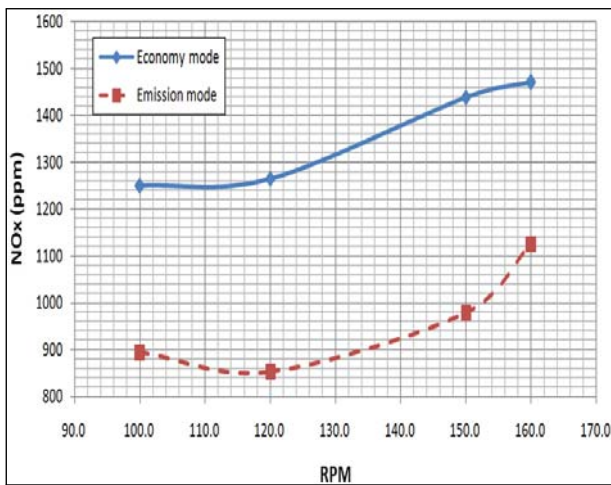


Figure 12: NOx concentration on each injection mode according to M/E rpm

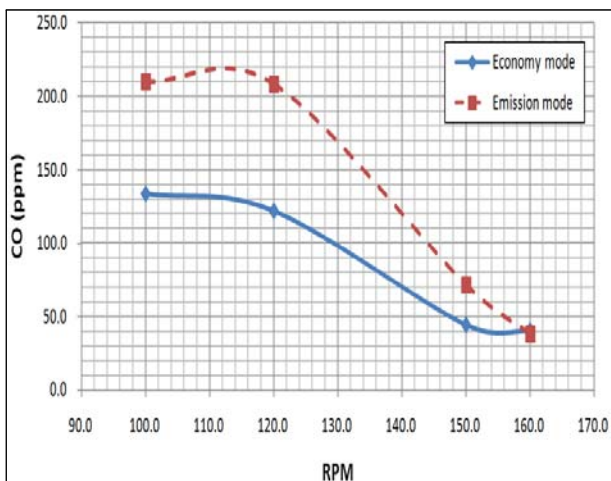


Figure 13: CO concentration on each injection mode according to M/E rpm

Figure 14은 동일한 실험 조건에서의 배기가스 내 CO₂ 농도를 나타낸다. 일반적으로 회전수를 상승시킬수록 연료량이

증가하게 되고, 따라서 CO₂ 농도가 함께 증가하는 전형적인 CO₂ 곡선을 보인다. CO₂ 농도는 economy mode에서 더 높게 나타난다.

Figure 15에는 엔진 회전수 변화에 따른 운전모드별 배기가스 내 O₂ 농도 변화를 나타내었고, 엔진 부하가 증가할수록 O₂ 농도는 감소하는 경향을 보인다. 또한 emission mode 일 때 economy mode보다 O₂ 농도가 높은 것으로 나타났다. 이는 emission mode에서 NOx와 CO₂의 농도가 낮기 때문에 상대적으로 O₂ 농도가 높아진다고 해석할 수 있으며, emission mode에서 economy mode보다 높은 소기압력이 형성되는 것과도 연관성이 있는 것으로 판단된다.

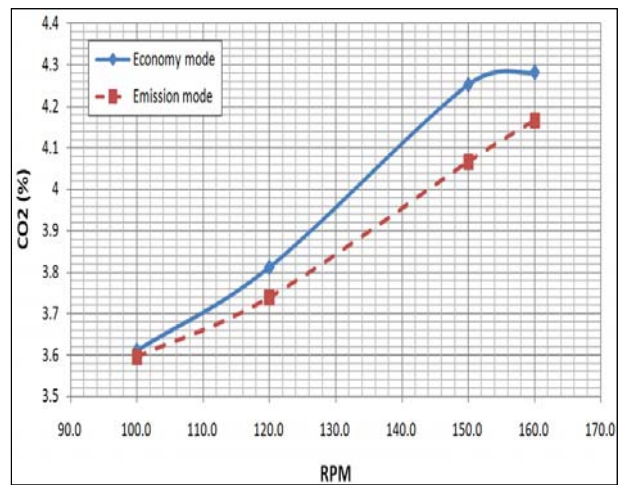


Figure 14: CO₂ concentration on each injection mode according to M/E rpm

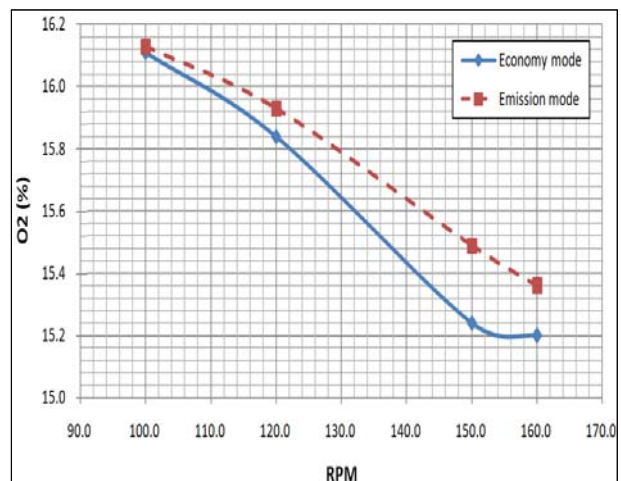


Figure 15: O₂ concentration on each injection mode according to M/E rpm

4. 결론

실제 운항중인 선박용 디젤엔진에서의 실험을 통해 엔진

회전수 및 연료분사조건의 변화가 주기관의 배기가스 내 유해물질 배출량에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 이 외에도 연료소비율, 배기가스온도, 소기압력, 최대폭발압력 등의 변화도 계측하였다.

특히 NOx 배출 저감에 효과가 있는 것으로 알려진 연료의 이단지연분사를 적용할 경우, 일반적인 단일분사에 비해서 NOx 배출량이 정량적으로 얼마나 감소하는지 검증하였으며, 여타 유해 배기 배출물 및 에너지효율과의 관계에 대해 살펴 보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 단일분사와 이단지연분사 모두 엔진의 약 70 % load인 160 rpm까지 엔진부하가 증가할수록 NOx와 CO₂ 배출량도 함께 증가하였다. 이를 통해 선박의 저부하 운전(slow steaming)이 NOx와 CO₂ 배출을 줄이면서 경제적 측면을 만족시킬 수 있는 방법임을 확인하였다.

② Emission mode의 이단지연분사는 최대폭발압력을 약 10 % 이상 감소시키고 연소실 온도를 낮추어줌으로써 배기가스 내 NOx 농도를 약 25~30 % 정도 저감시켰다. 하지만 연료소비율이 약 3~5 % 정도 증가하는 단점이 나타남으로써 NOx와 연료소비율 간의 상반관계(trade-off)가 입증되었다.

③ Emission mode(이단지연분사)의 경우 economy mode에 비해서 CO 발생량이 증가하고, CO₂ 발생량은 감소하는 것으로 나타났다.

④ 친환경적인 emission mode에서 경제적으로 이득을 얻기 위한 운전 영역은 회전수 150 rpm (부하 50 %) 이상으로 운전하는 것임을 확인하였다.

References

- [1] K. H. Cho, K. H. Park, S. D. Lee, J. R. Kim, and J. S. Choi, Measurement and Reduction Technology for Exhaust Gas of Ship's Diesel Engine, 1st ed., Dasom, 2012 (in Korean).
- [2] IMO, Marine Environment Protection Committee, 65th session, 2013.
- [3] IMO, Marine Environment Protection Committee, 66th session, 2014.
- [4] J. Y. Heo, Experimental Investigation of the Effect of Multiple Injection and EGR Rate on the Combustion and Emission Characteristics in a Compression Ignition Engine, M.S. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Korea, 2010.
- [5] K. M. Kim, A Study on the Recent IMO MEPC's Trend & Policy for Regulating of Air pollution and CO₂ from Ships, M.S Thesis, Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Korea, 2010.
- [6] S. D. Lee, A Study on the Proposal of the Modified EEOI Formula and the Reduction in CO₂ Emission from Ships, Ph. D. Thesis, Department of Control and Mechanical Engineering, The Graduate School Pukyong National University, Korea, 2014.
- [7] J. S. Choi, S. D. Lee, S. Y. Kim, K. W. Lee, K. W. Chun, Y. W. Nam, K. S. Jung, S. K. Park, and J. H. Choi, "A study on the characteristics measurement of main engine exhaust emission in training ship HANBADA," Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, vol. 19, no. 6, pp. 658-665, 2013.
- [8] S. H. Bae, "Introduction of electronically controlled engine (ME)," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 27, no. 3, pp. 331-339, 2003.