

선박용 노후 디젤기관의 성능에 미치는 연료 분사시기의 영향 (실습선 “해림호”를 중심으로)

임재근*† · 조상곤** · 이호현** · 임형섭**

* 군산대학교 동력기계시스템공학과 교수, ** 군산대학교

Effects of Fuel Injection Timing on Performance in Old Marine Diesel Engine (Using M/S “Hae Rim” of Training Ship)

Jae-Keun Lim*† · Sang-Gon Cho** · Ho-Heon Lee** · Hyung-Sup Im**

* Major in Power System Engineering, Kunsan National University, Gunsan, 573-701, Korea

** Kunsan National University

요 약 : 본 연구에서는 건조 후 20여년 운항한 군산대학교 실습선 해림호의 발전기를 대상으로 직접 선박현장에서 실험하여 최적 연료 분사시기를 규명해서 선박의 경제적이고 친환경적인 운항에 도움을 주고자 연구하였다. 실험은 기관회전속도 1,200 rpm으로 일정히 유지하고, 기관부하를 0 kW에서 90 kW까지 30 kW간격으로 변화시켰으며, 연료분사시기는 BTDC 19°에서 23°까지 2° 간격으로 변화시키면서 실험하였다. 실험결과 연료분사시기를 BTDC 21°에서 BTDC 23°로 앞당길 경우, 연료소비율은 1.37% 감소하였고, 질소산화물은 11.59% 증가하였으며, 매연은 23.5% 감소하였고, 아황산가스는 2.8% 감소하였다. 따라서 노후 발전기 엔진에 있어서 연료분사시기가 연소특성 및 배기배출물특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석·고찰한 결과, 최적 연료분사시기는 원래의 분사시기보다 2° 앞당겨진 BTDC 23°로 확인되었다.

핵심용어 : 연료분사시기, 상사점전, 연료소비율, 질소산화물, 매연, 아황산가스, 연소특성, 배기배출물특성

Abstract : In this study, the generator engine of training ship M/S “HAE RIM” of Kunsan National University which is being operated for 20 years was used in the experiment. The experiment was carried out under the engine speed of 1200rpm, then the load was varied 30 kW intervals from 0 to 90 kW and the injection timing was varied 2°CA intervals from BTDC 19° to 23°CA. In the case of advancing fuel injection timing from BTDC 21°CA to 23°CA, specific fuel consumption is decreased by 1.37%, NOx is increased by 11.59%, soot is decreased by 23.5% and SO₂ is decreased by 2.8%. According to the analysis of effects of fuel injection timing on combustion & exhaust emissions characteristics on an old marine diesel engine, it is proved that the optimum fuel injection timing is BTDC 23° which is 2° faster than that of original injection timing.

Key Words : Fuel injection timing, BTDC, Specific fuel consumption, NOx, Soot, SO₂, Combustion characteristics, Exhaust emissions characteristics

1. 서 론

최근에 지구 온난화로 인하여 날씨변화에 의한 자연재해와 생태계 파괴 및 해수면 상승 등의 문제가 생활의 어려움보다 생존의 문제로 부각되고 있으며, 화석연료의 감소

와 중동 산유국들의 정치적 불안으로 원유가격이 상승하고 있다. 지구 온난화의 주범인 대기오염은 주로 연소기관에서 배출되는 유해성분 물질인데, 육상용 연소기관의 유해 배기가스 규제(Jung et al., 2004; Ryu and Oh, 2004) 뿐만 아니라, 선박기관에 대해서도 이미 국제해사기구(IMO)에서 합의하여 규제하고 있다(Pradeep and Sharma, 2007).

디젤기관은 다른 종류의 기관보다 열효율이 높고, 대출

† Corresponding Author : jklim@kunsan.ac.kr, 063-469-1845

력의 기관을 만드는 것이 용이하며, 값이 싼 연료를 사용할 수 있고, 내구성과 신뢰성이 좋을 뿐만 아니라, 단위동력당 이산화탄소(CO₂)의 배출량이 적기 때문에 에너지 절약과 지구온난화 억제를 위해서도 바람직한 동력원임이 입증되었고(Ryu and Oh, 2007), 연료소비율을 줄이고 대기 환경오염물질을 저감시킬 수 있는 대책을 여러가지로 연구한 결과, 많은 진전이 있었지만(Kanne and Iwamoto, 1988; Lim and Cho, 2008; Lim and Cho, 2012a; Lim and Cho, 2012b), 앞으로도 더욱 노력할 필요가 있다.

그리고 디젤기관의 연소특성과 배기배출물특성에 영향을 주는 주요 인자는 연료의 분사시기, 분사율, 연료분무의 무화성 및 관통성 등등 여러 가지가 있는데, 이들은 서로 미치는 영향이 유기적이다(Satoh et al., 1997). 또, 디젤기관은 운전시간이 길어짐에 따라서 연료분사와 관련된 부품들이 마모되어 연료분사시기가 늦어지므로 일정한 운전시간이 지나면 연료분사시기를 재조정 할 필요가 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 우선 연료의 분사시기가 연소특성 및 배기배출물 특성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하고자 하며, 일반적으로 기관에 대한 연구는 실험실에 설치되어 있는 실험기관을 대상으로 하고, 신品的의 기관을 사용하는데, 본 연구에서는 건조 후 20여년 운항한 군산대학교 실습선 해림호의 노후한 발전기를 대상으로 직접 선박 현장에서 실험하여 최적 연료분사시기를 규명함으로써 선박기관의 경제적인 운전에도움을 주고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치의 구성도는 Fig. 1과 같고, 실험기관은 발전기용 디젤기관으로 주요 제원은 Table 1과 같다.

기관의 출력은 발전기에서 생산된 전력을 이용하였고, 연소실의 압력측정은 첫 번째 실린더에 계측기기(MIP2000)를 설치하여 계측하였으며, 연료소비율의 측정은 고정도 연료소비량계(OVAL, Flow PET-EN)를 사용하였고, 또한 배기배출물의 측정은 배기분석기(Testo 350M-XL)를 사용하였으며, 매연은 광투과식(MEXA-130S) 및 Bosch식 측정기를 사용하였다.

2.2 실험방법

실험에 사용된 연료유의 화학적 성분과 물리적 성질은 Table 2와 같고, 본 연구에서는 기관회전속도 1,200 rpm으로 일정히 유지하고, 기관부하를 0kW에서 90kW까지 30kW 간격으로 변화시키면서 실험하였으며, 연료분사각이 원래

BTDC 21° 이었으므로, BTDC 19°, 21°, 23°로 2° 간격으로 변화시키면서 실험한 결과를 분석하였다. 그리고 BTDC 25°와 27°로도 실험을 계획하였는데, 25°로 실험하는 중에 엔진에서 약간의 노킹현상이 발생되어 실습선발전기의 안전을 위해 실험을 중단하였다.

실험을 하는 동안 수냉식 열교환기를 사용하여 기관의 냉각수와 윤활유 온도를 일정하게 유지하였고 기관의 작동 및 연소 상태를 파악하기 위하여 지압선도, 연소실 압력상승률 선도 등을 취득하였으며, 각 부위(배기관 입·출구, 냉각수 입·출구, 윤활유, 흡입공기)의 온도를 계측하였다.

또 배기가스 분석기와 매연측정기를 “0”점 조정하고, 표준가스(측정범위의 80%인 보정용 가스)농도와 일치하도록 보정실험을 한 후에 각종 배기배출물을 측정하였다.

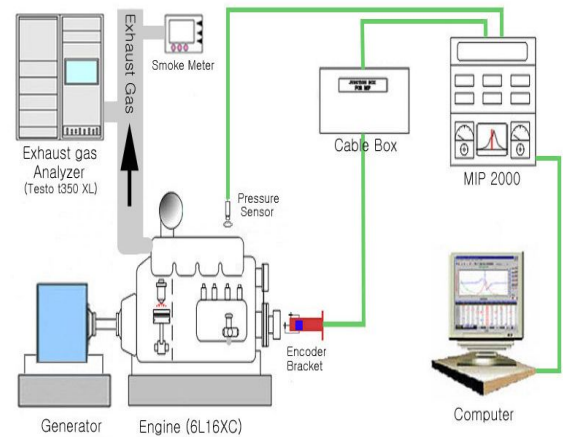


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Specification of test engine

Item	Specification
Number of cylinder	6
Type of engine	Water-cooled, supercharged
Cycle	4
Type of fuel injection	Direct injection
Bore × stroke (mm)	160 × 200
Piston displacement (cc)	24,126
Max. output (Generator)	480 PS / 1,200 rpm (320 kW/ 1,200 rpm)
Compression ratio	17 : 1
Fuel injection timing	BTDC 21°
Firing order	1-4-2-6-3-5

선박용 노후 디젤기관의 성능에 미치는 연료 분사시기의 영향 (실습선 “해림호”를 중심으로)

Table 2. Properties of test fuel

Item	Diesel fuel
Carbon residue(Wt.%)	0.06
Calorific value(MJ/kg)	42.8
Cetane number	45.8
Sulfur(%)	0.89
Flash point(°C)	68
Kinematic viscosity(cSt@40°C)	2.570
Water(%)	0
Specific gravity(15/4°C)	0.8449

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료소비율

Fig. 2는 기관회전수 1,200 rpm에서 부하의 변화와 분사시기의 변화에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다.

연료소비율은 부하가 증가함에 따라 점점 감소하는 경향이 있고, 연료분사시기가 앞당겨 질수록 점점 감소했으며, 부하 90 kw의 경우에 21° 기준으로 2° 앞당겨짐에 따라 4 g/kWh 감소되고, 2° 늦춤에 따라 7 g/kWh 증가되었다. 연료 분사시기가 2° 앞당겨지면 연소시작이 원래의 연소시작점에 근접하여 연소최고압력과 평균유효압력이 증가되어 연료소비율이 감소되며, 분사시기가 지연되면 상사점을 훨씬 지나서 연소최고압력이 형성되고, 이로 인하여 연소압력이 동력으로 변환되는 과정에서 손실이 발생될 뿐만 아니라,

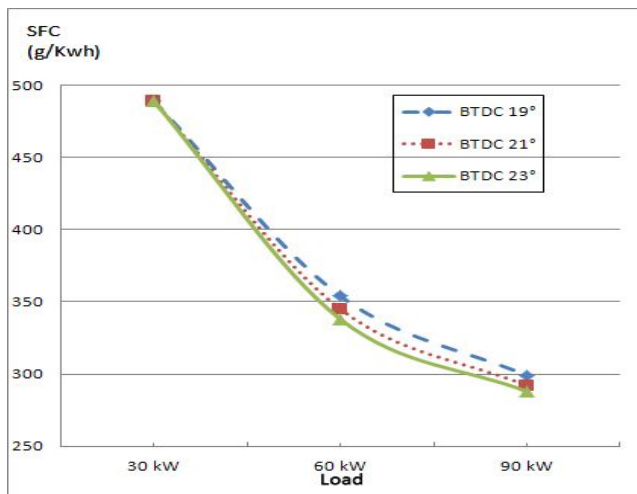


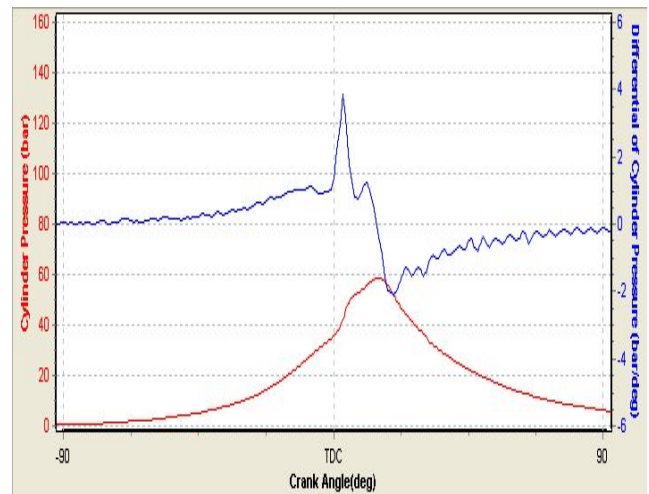
Fig. 2. Specific fuel consumption of various fuel injection timing at 1,200 rpm.

후연소기간의 증가로 열효율이 저하되어 연료소비율이 증가되었다고 생각된다.

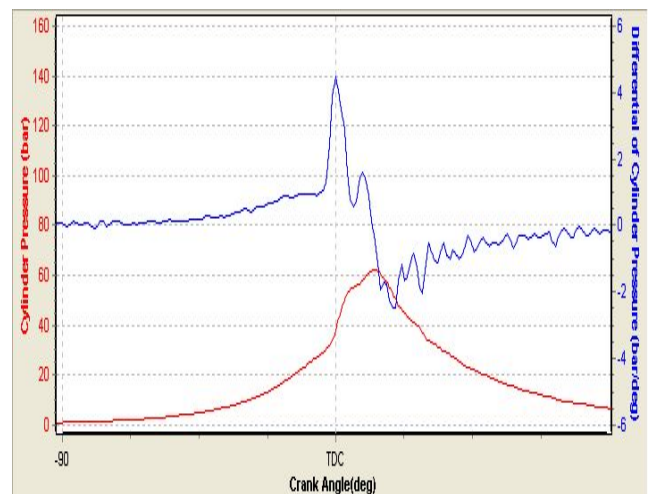
3.2 실린더 압력 및 압력상승율

Fig. 3은 크랭크 각도에 대한 실린더 압력과 압력상승율을 나타낸 그림으로 위의 선도가 압력상승율곡선이고, 아래 선도가 실린더 압력선도이다. 원래 제조사의 연료분사시기(BTDC 21°)에서 2° 앞당기면 실린더 최고압력이 1.76 bar가 증가하고, 2° 늦추면 2.22 bar가 감소하였다.

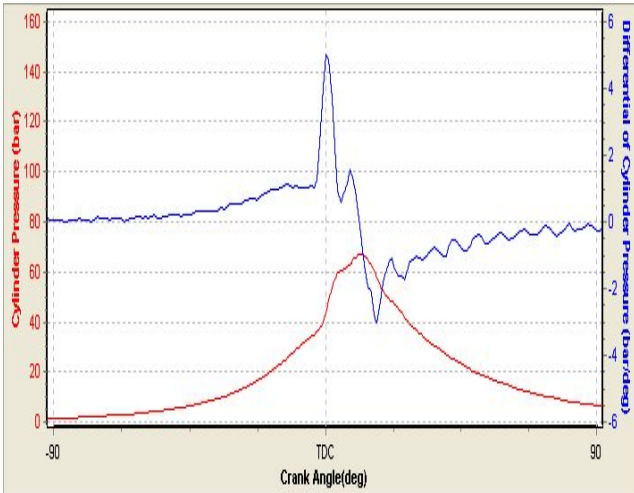
그 분사시기를 앞당기면 점화지연기간이 길어져 예혼합 연소기간이 증가되기 때문에 점화지연기간동안 연료의 증발이 지속되어 연료증기의 양이 많아지고, 발화가 일어나면 급격한 연소가 발생하여 실린더내의 압력이 증가된다고 생각된다.



(a) BTDC 19°



(b) BTDC 21°



(c) BTDC 23°

Fig. 3. (a)(b)(c) Cylinder pressure and rate of pressure rise of various fuel injection timing.

3.3 일산화탄소(CO)

CO의 배출량은 Fig. 4와 같으며, 부하가 증가하면 할수록 아래로 볼록한 형태로 감소하는 경향이고, 연료분사시기가 BTDC 21°CA에서 가장 적게 나타났다. 일반적으로 디젤기관에서는 저부하로 갈수록 CO농도가 증가하는데, 국부적으로 분무확산연소로 인하여 혼합이 좋지 않기 때문에 산소가 부족하여 CO가 발생하고, 발생한 CO가 온도가 낮아 완전한 연소를 하지 못한 상태에서 배출되기 때문으로 생

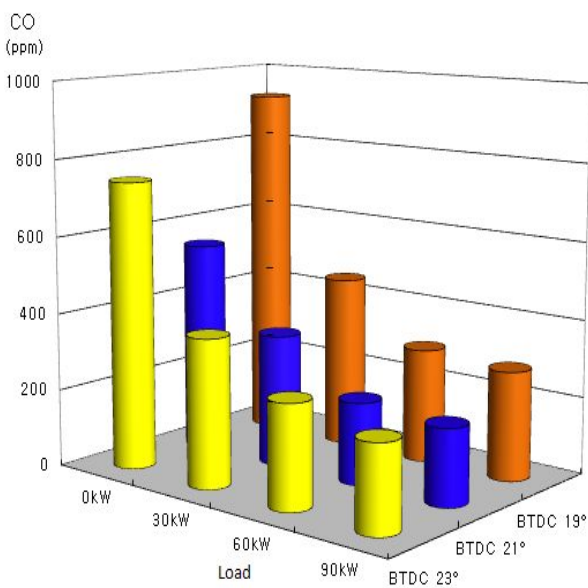


Fig. 4. CO emission characteristics of various fuel injection timing.

각된다(Bowman, 1975).

본 실험결과 90 kW 부하경우 19°에서 21° 및 23°로 앞당겨 짐에 따라 282.2 ppm에서 197.4 ppm, 224 ppm으로 변화되었다.

3.4 질소산화물(NOx)

NOx의 배출량은 Fig. 5와 같으며, 부하가 증가할수록 NOx의 배출량이 증가하는 경향으로 나타났고, 연료분사시기가 앞당겨 질수록 더욱더 많이 발생되었다. 즉, 부하가 90 kW일 경우, BTDC 19°에서 21° 및 23°로 2°씩 앞당겨질 때 NOx의 배출량은 628 ppm에서 992 ppm 및 1107 ppm으로 증가되었다.

그것은 연료분사시기가 앞 당겨짐으로써 착화지연이 원래의 정상연소 상태에 근접하여 실린더내의 압력이 상승하므로 연소실 온도가 증가되어 NOx의 생성량이 많아진 것으로 생각된다.

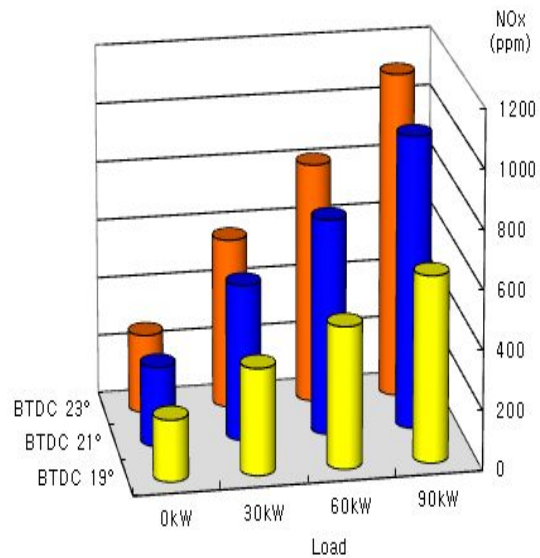


Fig. 5. NOx emission characteristics of various fuel injection timing.

3.5 매연(Soot)

매연의 배출량은 Fig. 6과 같다. 부하가 증가할수록 아래로 약간 볼록한 형태로 증가했으며, 연료분사시기가 앞 당겨질수록 감소하는 경향을 나타내었다.

이것은 Needham et al.(1990)이 발표한 직접분사식 디젤기관에서 연료분사시기를 앞당기면 매연의 배출이 감소한다는 내용과 일치한다. 즉, 부하 90 kW일 경우 연료분사시기가 BTDC19°에서 Bosch NO. 2.6, 21°에서 1.7(-34.6%) 및 23°

선박용 노후 디젤기관의 성능에 미치는 연료 분사시기의 영향 (실습선 “해림호”를 중심으로)

에서 1.3(-50%)으로 감소되었다.

그것은 점화지연기간 동안 분사된 연료의 증발이 지속되어 연료증기의 양이 많아지게 되고 급격한 연소로 실린더 내의 온도가 증가하여 매연입자가 산화될 수 있는 기간이 증가하기 때문이다(Needham et al., 1990; Miyamoto and Ogawa, 1990).

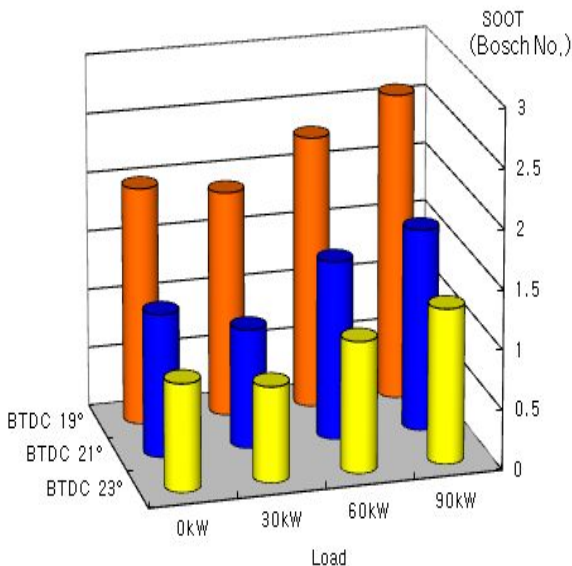


Fig. 6. Soot emission characteristics of various fuel injection timing.

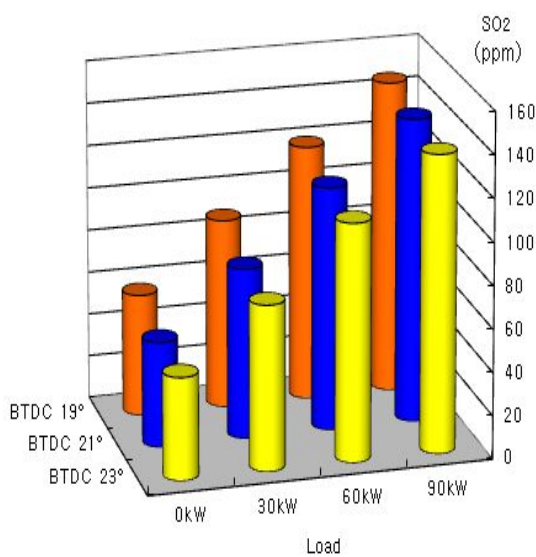


Fig. 7. SO2 emission characteristics of various fuel injection timing.

3.6 아황산가스(SO₂)

연소과정에서 연료에 포함된 모든 황 성분은 연소생성물에서 SO₂ 또는 SO₃로 나타나는데 이 두가지를 합쳐서 SO_x라 하며, SO₂와 SO₃의 발생율은 40~80:1로 생성되므로 대부분이 SO₂이다.

Fig. 7은 SO₂ 배출물을 나타낸 그림으로 부하가 90 kW일 경우, 연료분사시기가 BTDC 19°에서 21° 및 23°로 앞당겨짐에 따라 SO₂ 발생량은 146 ppm에서 142 ppm 및 138 ppm으로 감소되었는데, 그것은 연료소비율이 감소되었기 때문으로 생각된다.

4. 결론

건조 후 20여년 운항한 군산대학교 실습선 해림호 발전기를 대상으로 직접 선박현장에서 실험하여 최적 연료분사시기를 규명해서 선박의 경제적이고 친환경적인 운항에 도움을 주고자 연구하였다. 발전기 엔진에 있어서 연료분사시기가 연소특성 및 배기배출물특성에 미치는 영향을 종합적으로 분석·고찰한 결과, 최적 연료분사시기는 원래의 분사시기인 BTDC 21° 보다 2° 앞당겨진 BTDC 23°로 확인되었으며, 부하 90 kW의 경우 그 주요한 내용은 다음과 같다.

1. 연료소비율은 분사시기를 BTDC 21°에서 BTDC 23°로 앞당기면 292 g/kWh에서 288 g/kWh로 1.37% 감소한다.
2. 일산화탄소 배출물은 연료분사시기를 BTDC 21°에서 BTDC 23°로 앞당기면 197.4 ppm에서 224.0 ppm으로 13.48% 증가한다.
3. 질소산화물 배출물은 연료분사시기를 BTDC 21°에서 BTDC 23°로 앞당기면 992 ppm에서 1107 ppm으로 11.59% 증가한다.
4. 매연 배출물은 연료 분사시기를 BTDC 21°에서 BTDC 23°로 앞당기면 Bosch No. 1.7에서 Bosch No. 1.3로 23.5% 감소한다.
5. 아황산가스 배출물은 연료분사시기를 BTDC 21°에서 BTDC 23°로 앞당기면 142 ppm에서 138 ppm으로 2.8% 감소한다.

참고 문헌

[1] Bowman, C. T.(1975), Kinetics of Pollutant Formation and Destruction in Combustion, Progress Energy & Combustion Science, 1, pp. 33-45.
 [2] Jung, S. H., M., S. Kim, S. H. Jang, D. K. Koh, and S. K. Ahn(2004), Analysis of Combustion Characteristics of

- Bio Diesel Fuel in a DI Diesel Engine Using PXI and LabVIEW, Journal of the Korea Society for Power System Engineering, Vol. 8, No. 2, pp.12-17.
- [3] Kanne, D. D. and R. Y. Iwamoto(1988), A Novel Approach to the Control of Heavy-Duty Diesel Particulate Emissions, SAE 880634, pp. 1-12.
- [4] Lim, J. K and S. G. Cho(2008), Effects of Biodiesel Fuel on Characteristics of Specific Fuel Consumption and Exhaust Emissions in DI Diesel Engine, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 14, No. 1, pp. 83-87.
- [5] Lim, J. K and S. G. Cho(2012a), Effects of Fuel Injection Timing on Exhaust Emissions Characteristics of Biodiesel Blend Oil in Diesel Engine, KOSME, Vol. 36, No. 5, pp. 603-608.
- [6] Lim, J. K and S. G. Cho(2012b), Effects of Fuel Injection Timing on Combustion Characteristics of Biodiesel Blend Oil in Diesel Engine, KSPSE, Vol. 16, No. 3, pp. 10-15.
- [7] Miyamoto, N. and H., Ogawa(1990), Analysis of Diesel Soot Formation under Varied Ignition Lag with a Laser Light Extinction Method, SAE 900640, pp. 1-6.
- [8] Needham, J. R., M. P. May, D. M. Doyle, S. A. Faulkner, and H. Ishiwata(1990), Injection Timing and Rate Control a Solution for Low Emissions, SAE 900854, pp. 8-10.
- [9] Pradeep, V. and R. P. Sharma(2007), Use of HOT EGR for NOx control in a compression ignition engine fuelled with bio-diesel from Jatropha oil, Renewable Energy, Vol. 32, pp. 1136-1154.
- [10] Ryu, K. H. and Y. T. Oh(2007), Combustion Characteristics and Durability of Diesel Engines Burning BDF 20, Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 3, pp. 18-28.
- [11] Ryu, K. H. and Y. T. Oh(2004), Durability Test of a Direct Injection Diesel Engine Using Biodiesel Fuel, Journal of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 12, No. 1, p. 32.
- [12] Satoh, K., Takahashi, S., Nishinura, T. and K., Yokota(1997), Effect of Fuel Injection Rate Profile on Combustion and Emissions in a DI Diesel Engine, SAE 971259, pp. 29-34.

원고접수일 : 2013년 08월 28일

원고수정일 : 2013년 10월 22일

게재확정일 : 2013년 10월 25일