

커먼레일식 디젤기관의 부분 예혼합 분사시기가 연소 및 배기특성에 미치는 영향

The Effects of Partially Premixed Pilot Injection Timing on the Combustion and Emission Characteristics in a Common Rail Diesel Engine

윤삼기* · 최낙정***†

Sam-Ki Yoon*, Nag-Jung Choi***†

(접수일 : 2013년 06월 05일, 수정일 : 2013년 09월 28일, 채택확정 : 2013년 09월 30일)

Abstract: An experimental study was performed to investigate the characteristics of combustion pressure and exhaust emissions when the pilot injection timing and EGR rate were changed in a CRDI 4-cylinder diesel engine. The pilot injection timing and EGR rate have a significant impact on the combustion and emission characteristics of diesel engine. In this study, the pilot injection timing and EGR rate variation were conducted to 2000rpm of engine speed with torque 50Nm. Combustion pressure and heat release rate were decreased under high EGR rate conditions but increased under the pilot injection timing 20°(BTDC). IMEP and the maximum pressure in cylinder(Pmax) were decreased under the same injection timing with the increase of EGR rate. The NOx emission was decreased with increasing the EGR rate. On the other hand, in the same injection timing conditions, CO, HC, CO₂ emissions were increased with increasing the EGR rate.

Key Words : Pilot Injection(예비분사), EGR(배기가스재순환), Combustion Pressure(연소압력), ECU(전자 제어기), Exhaust Emission(배기배출물), IMEP(도시평균유효압력)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 석유 자원 고갈과 고유가 시대를 맞이하여 저연비 기관에 대한 관심이 고조되고 원유 산유국들의 제한된 생산 물량으로 인하여 더욱더 저연비 기관에 대한 수요와 관심은 증가하고 있다.

이에 따라 자동차 제작사들은 기관 출력은 더욱

증대되고 배기량은 작아지는 다운사이징 기관들을 제작하여 저연비 고효율을 도모하고 있다. 이와 같은 소형 저연비 고효율 기관의 증가와 더불어 온실 가스의 주범인 CO₂ 배출량 또한 증가하고 있는 실정이다.

CO₂ 배출량 증가와 더불어 지구 온난화 현상으로 인한 자연 재해를 줄이기 위하여 세계 주요 국가들이 2005년 교토 의정서를 채택하였으며, 세계

*** 최낙정(교신저자) : 전북대학교 기계설계공학부

E-mail : njchoi@jbnu.ac.kr, Tel : 063-270-4765

*윤삼기 : 한국지엠

*** Nag-Jung Choi(corresponding author) : Division of

Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University

E-mail : njchoi@jbnu.ac.kr, Tel : 063-270-4765

* Sam-Ki Yoon : GM korea Company

각국의 배출가스 규제도 강도 높게 진행되어지고 있고 최근 유럽 주요 국가들은 2014년부터 더욱 강력해진 유로VI 기준에 의거 배기 오염 물질 규제를 더욱 강화할 예정이다. 이에 따라 진동 및 소음 부분의 단점에도 불구하고 높은 열효율과 우수한 성능을 보여주고 있는 디젤 기관은 강력한 배출가스 규제에 만족할 수 있는 연구와 실험들이 진행되고 있다.

Roh¹⁾등은 승용 디젤형 기관에서 예비 분사에 따른 디젤 기관의 연소 및 배출물 특성을 연구하였으며 그 결과 예비 분사 시 연소 압력이 TDC부근에서 완만하게 형성됨을 실험을 통하여 규명하였다. 또한 Carlucci²⁾등은 예비 분사가 주분사의 자기 착화 및 배출가스에 지대한 영향을 미치는 결과를 실험적으로 보고하였다.

A. Trueba³⁾등은 주분사와 예비 분사의 상관관계를 고찰하였으며 이때 주분사와 예비 분사시기에 의해서 출력과 매연의 관계를 실험적으로 고찰 비교 연구하였다.

J.R. Needham⁴⁾등과 Kim⁵⁾등은 디젤 기관에서 연료 분사 시기 및 연료 분사율에 따라서 기관 내부의 연소 특성이 어떻게 변하는지 또한 연소 되어진 배기 배출물은 어떤 특성을 갖는지 실험적으로 고찰하였다.

이상과 같이 디젤 기관의 연소 및 배기 특성을 규명하고 분석하기 위한 많은 연구가 진행되고 있

으나, 예비 분사시기 변화에 따른 출력 및 배기 특성에 대한 연구는 보고되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 커먼레일 4행정 사이클 4실린더 디젤 기관에서 주 분사전 부분적으로 예혼합이 이루어지도록 예비 분사를 실시하고, 예비 분사 시기와 EGR율을 변화시켰을 때 연소 및 배기 오염 물질 배출 특성을 실험적으로 규명하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2. 1 실험 장치

본 연구에서는 4실린더 커먼레일 디젤 기관에서 예비 연료 분사시기에 변화를 주었을 때 연소 및 배출 가스 특성을 알아보기 위해 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 터보차저가 장착된 4실린더 전자 제어식 커먼레일 디젤 기관과 220V 전원에 의해서 구동되는 연료 펌프를 장착한 연료 공급 장치, 배기가스 성분 분석을 위한 배기가스 분석 시스템, 연료 분사시기를 제어하기 위해 ECU와 연결된 제어 장치, 기관 동력의 제어를 위한 와전류 타입의 EC 동력계(DY-230KW) 등으로 구성하였다. 실험용 기관의 연소 압력은 예열 플러그가 장착된 자리에 압전 소자 방식의 압력센서(Kistler, 6056a)를 장착하여 데이터를 DAQ 보드(NI, PCI 6040E)모델을 사용하여 취득하였으며, 실린더 내 연소 압력은 연소 해석 장치를 사용하여 분석하였다. 그리고 기관의 ECU 내에 예

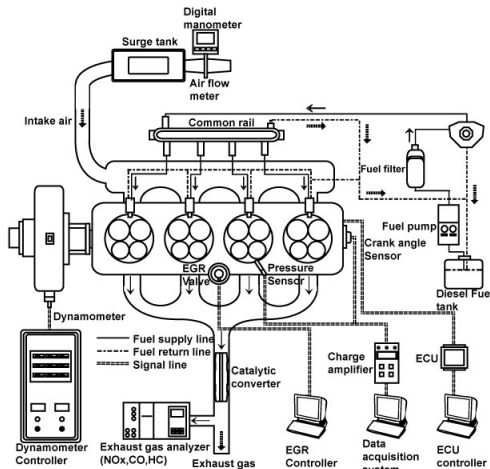


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

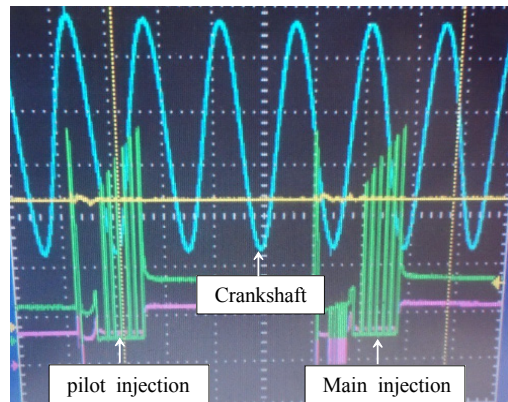


Fig. 2 Injector voltage scope of pilot injection timing

비 분사 시기 변화를 주었을 때 실시간으로 변화되는 분사 시기는 과형분석기(Tektronix TDS2024B)를 사용하여 확인하였다. Fig. 2는 예비분사시기에 변화를 주었을 때 과형분석기에 의한 인젝터의 전압파형을 나타낸다.

EGR은 배기가스가 수냉식 냉각기를 통하여 흡기로 들어가도록 하였으며, 가스 흐름율은 EGR 제어밸브를 컴퓨터로 듀티제어 하였다. EGR 흐름율은 EGR이 없을 때에 실린더로 흡입되는 신선한 공기량(Q₀)과 EGR이 주어진 때의 흡입되는 공기량(Q_{EGR})의 차이를 실린더에 흡입되는 신선한 공기량(Q₀)으로 나누어주는 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$EGR(\%) = \frac{Q_0 - Q_{EGR}}{Q_0} \times 100 \quad (1)$$

기관의 열발생율(dq/dθ)은 크랭크 회전각도(θ)에 대한 실린더 내에서 발생한 열량으로 주어지며, 실린더 압력으로부터 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$\frac{dq}{d\theta} = \frac{k}{k-1} v^p \frac{dv}{d\theta} + \frac{1}{k-1} v \frac{dp}{d\theta} \quad (2)$$

여기서, k는 비열비, v는 피스톤 위치에서 실린더 체적이다.

또한 배기가스 성분 분석을 위해서 그린 라인

Table 1 Specification of test engine

Item	Specification
Engine type	4-Cylinder
Bore×Stroke(mm)	81×96
Displacement(cc)	1979
Combustion type	Direct Injection
Injection Procedure	1-3-4-2
Compression Ratio	17.7 : 1
Max.Power(kW/rpm)	82/4000
Max.Torque(Nm/rpm)	260/2000
Max.Speed(rpm)	4500
Fuel Control	ECU Control
Fuel Pressure(MPa)	145

(Mk2)의 배기가스 측정 장비를 설치하였다.

본 실험에 사용된 4실린더 커먼레일 디젤 기관의 주요 제원은 Table 1과 같다.

2.2 실험 방법

본 실험에서는 압축행정에서 부분적으로 예혼합을 위해 분사되는 연료의 예비 분사시기가 연소 및 배기 배출에 미치는 영향을 알아보기 위하여 예비분사 시기를 제어할 수 있는 ECU 제어장치를 설치하였다. 본 실험에 적용된 기관 회전속도는 일반적으로 사용빈도가 높은 중속 구간인 2000rpm(부하 50Nm)을 선정 하였으며, 실험의 신뢰도를 확보하기 위해서 기관 냉각수 온도는 353 ± 3K, 흡입 공기 온도는 293 ± 3K로 유지 하면서 실험을 수행하였다. 예비 분사시기의 변화는 ECU 프로그램을 제어하는 ECU제어용 컴퓨터에서 주어졌으며, 변화된 예비 분사시기를 확인하기 위하여 과형분석기를 사용하여 실시간으로 예비 분사시기, 크랭크축 위치, 캠축 위치를 확인 하면서 실험을 실시 하였다.

Table 2 Experimental and operating conditions

Engine speed(rpm)		2000
Torque(Nm)		50
Injection timing(deg)	pilot	variable
	main(TDC)	0°
Cooling water temp(K)		353±3
Intake air temp(K)		293±3
EGR rate(%)		0, 20, 40

EGR을 변화는 배기가스 분석기를 통하여 NO_x 배출 값으로 실시간 확인하였다. 실험에 대한 상세 내용은 Table 2에 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연소 특성

Fig. 3은 EGR율이 없는 상태에서 예비 분사시기를 압축행정의 상사점전(BTDC) 0°, 20°, 40°로 변화시켰을 때 실린더 내의 연소압력과 열발생율

을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 연소 압력은 예비 분사시기가 빨라질수록 연소 압력이 높아지는 경향을 보였으며, 예비 분사시기가 40°(BTDC)인 경우에는 오히려 연소 압력이 낮아지고 있다. 이는 예비 분사와 주분사 사이의 간격이 멀어지면서 예비분사된 연료의 기화작용으로 인하여 주변 열을 흡수하여 연소실 온도의 상승효과가 떨어져 착화 지연 기간의 증가로 인하여 연소 압력이 낮아진 것으로 보인다.

또한 열발생율은 예비 분사 시기가 진각 되어질수록 열 발생 시점이 빨라졌으며 예비 분사시기가 40°(BTDC)에서는 실린더 내 연소압력과 마찬가지로 현저하게 감소되었다.

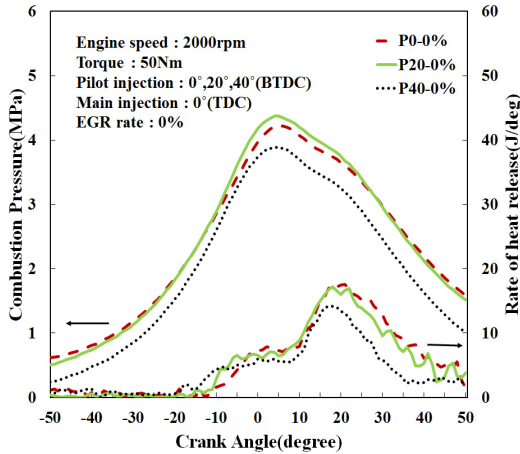
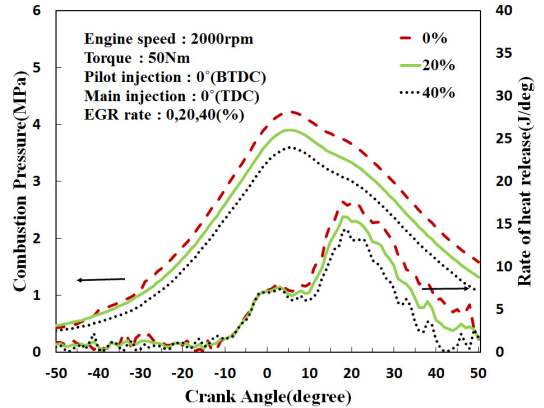


Fig. 3 Effects of pilot injection timing without EGR on combustion characteristics

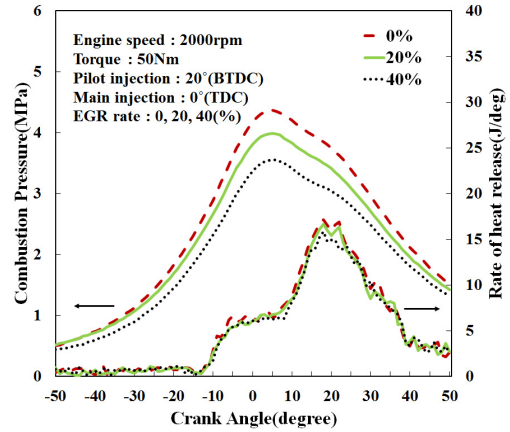
Fig. 4(a), (b), (c)는 분사 시기별 EGR율을 적용하였을 때 연소 압력과 열발생율을 보여주고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 연소 압력 및 열발생율은 동일 분사 시기에서 EGR율이 증가할 수록 낮아지는 경향을 보이고 있다.

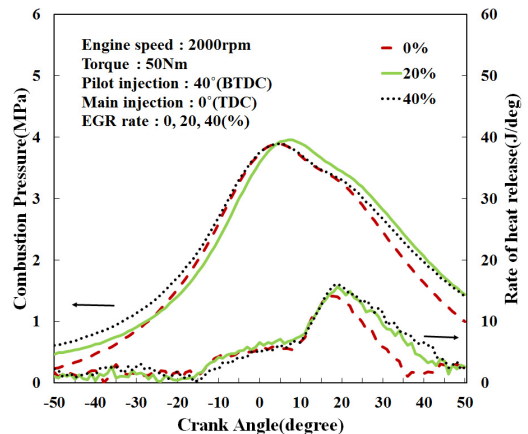
특히 Fig. 4(c)에서는 예비 분사시기를 40° 진각시켰을 때 연소 압력과 열발생율이 현저하게 낮아지고 있다. 이는 배기가스의 일부가 연소실에 들어가면 산소 성분의 결핍으로 압축 착화 연소 활성화를 억제하기 때문에 낮아진 것으로 보인다.



(a) Pilot injection timing 0°(BTDC)



(b) Pilot injection timing 20°(BTDC)



(c) Pilot injection timing 40°(BTDC)

Fig. 4 Effects of pilot injection timing and EGR rate on combustion characteristics

Fig. 5는 IMEP를 예비 분사시기별 EGR을 변화에 따라 비교한 값을 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 예비 분사시기가 빨라질수록 전체적으로 IMEP는 낮아지는 경향을 보이고 있으며, EGR율이 0%, 20%, 40%일 때 분사시기별 IMEP 값을 보게 되면 EGR율이 0%일 때 전체적으로 높은 압력 값을 나타내고 있다. 이는 연소된 배기가스가 연소실에 재순환이 되지 않고 순수 혼합기만 연소하므로 IMEP값이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있고, EGR율이 높을수록 전체적으로 IMEP값은 낮아지는 경향을 보였다. Fig. 6은

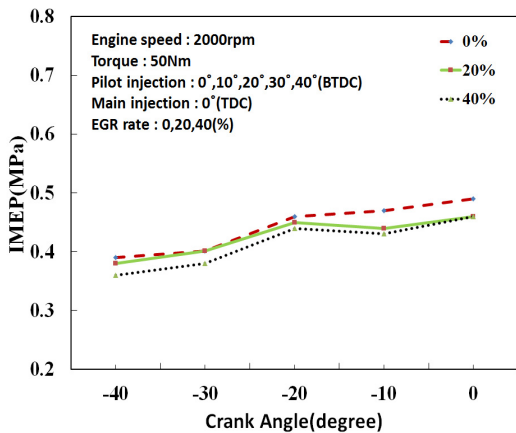


Fig. 5 Effects of pilot injection timing and EGR rate on indicated mean effective pressure

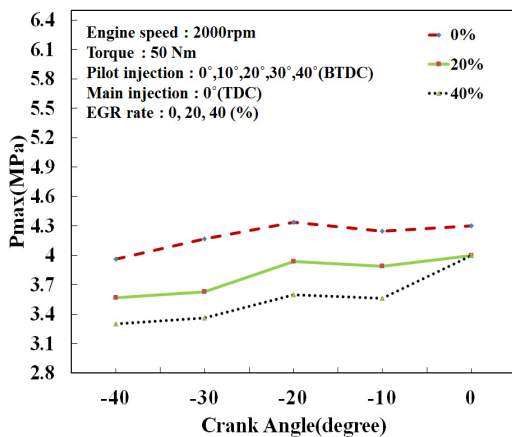


Fig. 6 Effects of pilot injection timing and EGR rate on peak combustion pressure

예비 분사시기를 BTDC 0°~40°까지 변화시켰을 때 연소 최고 압력을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 동일 분사시기별 EGR율을 증가시키면 전체적으로 최고 연소 압력이 낮아지는 경향을 보였으며, 동일 EGR율을 적용시켰을 때에는 예비 분사시기가 상사점 전 20°(BTDC) 부근까지는 연소 최고 압력은 다소 증가되어지고 그 이전 분사시기에서는 낮아지는 현상을 보여주고 있다.

3.2 배기 특성

Fig. 7(a), (b)는 EGR율과 예비 분사시기를 변화시켰을 때 CO 및 HC의 배출량을 나타낸 것이다.

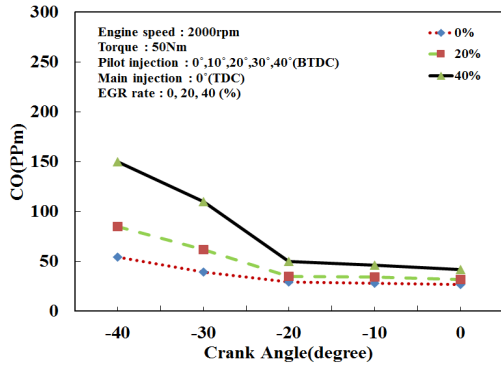
그림에서 보는 바와 같이 예비 분사를 상사점 전 20°(BTDC) 시점에서 분사를 했을 때에는 배출량이 다소 완만하게 증가하지만 그 이후에는 현저하게 증가하는 경향을 보이는데, 이는 상사점 전 20°(BTDC) 이전에서 예비 분사를 실시하면 연소실 내부의 연소 환경이 분사된 연료 입자들의 벽면 유막 유착 현상(wall wetting)으로 인하여 연소 불안정성을 초래하여 CO와 HC가 증가된 것으로 판단된다.⁶⁾

또한 예비 분사와 주 분사 사이의 간격이 증대되어 연소실의 온도 상승으로 인한 주 분사의 착화 지연을 줄여 주는 효과를 보지 못함으로써 배출량이 증가된 것으로 보여진다.

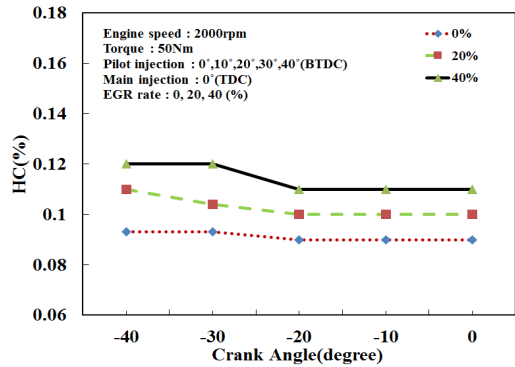
그리고 동일 분사 시기에서 EGR율을 높게 주었을 때 배출량이 증가된 것으로 보아 연소된 배출가스의 재순환으로 혼합기의 산소 농도가 부족하여 확산 연소가 제대로 이루어지지 않은 것으로 보인다.

Fig. 7(c)는 CO₂배출량을 나타낸 그래프로 상사점 전 20°(BTDC) 부근에서 다소 증가됨을 보이는데 이는 실험 조건 범위 내에서 상사점 전 20°(BTDC) 분사 시점 영역에서 연소 활성화가 촉진 되어진 것으로 판단된다. 또한 동일 분사시기에서 EGR율이 높을수록 배출량이 많아짐을 확인할 수 있다.

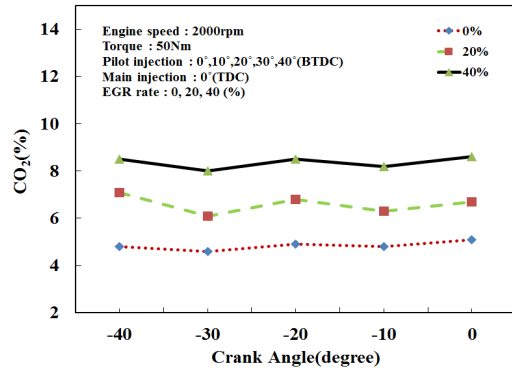
Fig. 7(d)는 NO_x 배출량을 나타낸 것으로 동일 분사 시기에서 EGR율이 높을수록 NO_x의 배출량이 감소됨을 확인할 수 있으며, 예비 분사 시기가



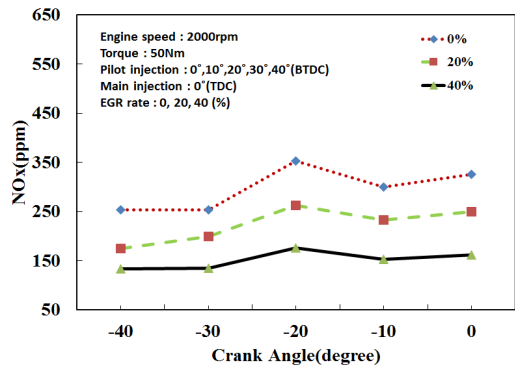
(a) CO emission



(b) HC emission



(c) CO₂ emission



(d) NOx emission

Fig. 7 Effects of pilot injection timing and EGR rate on pilot injection timing

진각 되어 질수록 NO_x의 배출량이 상사점 전 20°(BTDC)부근을 기점으로 점차 많아지다가 진각 될수록 배출량이 감소됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 4행정 사이클 4실린더 커먼레일식 디젤 기관에서 예비 분사시기 및 EGR을 변화가 기관의 연소 특성 및 배기 배출량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) EGR율을 0%로 고정하고 예비 분사 시기만 변화를 주었을 때 실린더 내 연소 압력은 예비 분사시기가 20°(BTDC)까지는 진각에 비례하여 높게 나타났으며, 예비 분사시기가 40°(BTDC)일 때에는

예비 분사시기가 0°(TDC) 일 때보다 낮은 값을 나타내었다. 이는 예비 분사시기가 40°(BTDC)까지 너무 빨라질 경우 오히려 메인 분사의 착화 지연 시간이 길어진 것을 확인할 수 있었다.

2) 예비 분사시기별 EGR율을 적용하였을 때 연소 압력과 열 발생률은 EGR율이 높아질수록 낮아짐을 알 수 있었으며, 이는 연소된 배기가스 성분이 연소실 내로 유입되어 산소 농도 저하로 인하여 낮아진 것으로 판단되어 진다.

3) IMEP와 Pmax값은 동일 분사시기에서 EGR율이 높아질수록 낮아지는 경향을 보였으며, 예비 분사 시기가 빨라질수록 착화지연 현상에 의한 연소 압력 저하로 나타남을 확인할 수 있었다.

4) CO와 HC 그리고 CO₂는 동일 분사 시기 조건에서 EGR율이 높을수록 높게 배출되는 경향을

보였으며, NO_x 는 동일 분사시기에서 EGR율이 높을수록 배출량이 낮은 경향을 보이고, 분사시기가 빨라질수록 예비 분사시기 20°(BTDC) 부근에서 다소 증가했다가 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

1. H. G. Roh, C. H. Lee, 2007, "The Effect of Multiple Injections on the Stability of Combustion and Emissions Characteristic in a Passenger Car Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 4, pp. 76-82.
2. P. Carlucci, A. Ficarella, and D. Laforgia, 2003, "Effects of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines," SAE 2003-01-0700.
3. A. Trueba, B. Barbeau, O. Pajot and K. Mokaddem, 2002, "Pilot Injection Timing Effect on the Main Injection Development and Combustion in a DI Diesel Engine," SAE Paper No, 2002-01-0501.
4. J. R. Needham, et. al., 1990, "Injection Timing and Rate Control a Solution for Low Emission", Journal of Society of Engineers, 900854.
5. J. S. Kim, K. H. Kim, H. S. Lee, S. W. Lim, H. Y. Kang and D. K. Koh, 2011, "Effects of the Fuel Injection Timing on the Characteristics Combustion in CRDI Diesel Engine" Kspse Vol. 15, No. 5, pp. 10-15.
6. J. P Cha, S. H. Yoon, S. W. Park and C. S. Lee, 2009, "Combustion and nano-particle emissions of a compression ignition engine fueled with biodisel according to EGR ratio", KSAE Annual Conference proceeding, pp. 528-533.