

## 승용차 디젤엔진의 연료 다단 분사가 연소 안정 및 배출물 특성에 미치는 영향

노 현 구<sup>1)</sup> · 이 창 식<sup>2)</sup>

한양대학교 대학원<sup>1)</sup> · 한양대학교 기계공학부<sup>2)</sup>

### The Effect of Multiple Injections on the Stability of Combustion and Emissions Characteristic in a Passenger Car Diesel Engine

Hyun Gu Roh<sup>1)</sup> · Chang Sik Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 9 October 2006 / Accepted 22 December 2006)

**Abstract** : This paper described the effect of the multiple injections on the stability of combustion and emission characteristics in a direct injection diesel engine at various operating conditions. In order to investigate the influence of multiple injections in a diesel engine, the fuel injection timing was varied one main injection and two pilot injections at various conditions. The experimental apparatus consisted of DI diesel engine with four cylinders, EC dynamometer, multi-stage injection control system, and exhaust emissions analyzer. The combustion and emission characteristics were analyzed for the main, pilot-main injection, pilot-pilot-main injection strategies. It is revealed that the combustion pressure was smoothly near the top dead center and the coefficient of variations is reduced due to the effect of pilot injection. Also, NO<sub>x</sub> emissions are dramatically decreased with pilot injection because the decrease of rate of heat release. However, the soot is increased at early pilot injection and main injection.

**Key words** : Multiple injection(다단 분사), Pilot injection(과일럿 분사), Injection(주 분사), Exhaust emission(배출물), Combustion stability(연소 안정화)

### 1. 서론

최근 자동차에 의한 환경 문제가 중요한 사회적 문제로 대두되면서 유해 배출가스의 저감을 목표로 하는 저공해 자동차의 요구는 더욱 중요한 기술적 과제로 되고 있다. 디젤 엔진은 연소 상태가 희박조건에서 연소하기 때문에 HC, CO가 가솔린에 비해 적게 배출된다. 그 반면에 진동 및 소음은 가솔린 엔진에 비하여 크므로 이러한 단점을 개선하기 위하여 많은 연구를 진행되고 있다. 국내외 자동차 업계

는 고출력, 저연비, 무공해 등을 동시에 만족시키기 위하여 승용 디젤 엔진 등을 비롯한 고압 연료 분사 장치를 적용하고 있다. 또한 지구 온난화를 억제하기 위하여 CO<sub>2</sub> 규제가 더욱 강화되는 이 시점에 디젤 엔진의 성능 및 배출 가스 저감은 매우 중요한 의미를 갖는다.

최근 주 분사 전에 소량의 연료를 분사하여 주 분사 연료의 급격한 연소를 방지하는 과일럿 분사 기술이 디젤 엔진에 적용되고 있다. 과일럿 분사는 부분 연소를 이용하여 주 분사의 점화 지연을 줄여주어 착화가 효과적으로 일어나도록 도와주는 역할을

\*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

한다. 그러나 파일럿 분사와 주 분사의 사이를 너무 짧게 하거나 너무 길게 하여 파일럿 연료가 연소가 되지 않는 경우 매연이 증가하는 요인으로 작용되고 있다.<sup>1)</sup> Choi 등<sup>2)</sup>은 다단분사 및 배출물 저감에 관한 연구로 합산소 연료를 다단 분사하였을 때의 배출물 중 P.M., NO<sub>x</sub>, CO 등의 저감효과를 분석하여 보고하였다. 그리고 Papagiannakis 등<sup>3)</sup>은 직분식 디젤엔진의 가스 연료 연소를 디젤 파일럿 분사로 연소시키는 연구를 수행하였다. 또한 Tanaka 등<sup>4)</sup>은 파일럿 분사가 연소 성능에 미치는 영향을 분석하여 열발생 및 착화 지연 등에 대하여 연구하였다. 그러나 다단 연료 분사의 경우 분사시기, 분사간격, 분사량 등에 따라 각각 엔진 성능 및 배출물 특성에 크게 영향을 미치므로 다단분사의 효과를 체계적으로 분석하는 것은 매우 중요하다.

따라서 본 연구는 커먼레일 디젤 엔진에서 파일럿 분사가 연소 안정화 및 배출가스 농도 특성에 미치는 영향을 분석하는데 주안을 두어 연구하였다. 이를 위해 파일럿 분사 유무 및 파일럿 분사의 횟수와 분사시기를 변화시켜 실험적으로 이 인자를 분석하고, 연소 안정화 및 배출물 특성에 미치는 영향을 여러 가지 분사 조건에 대하여 비교 검토하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 엔진 및 장치

본 연구에 사용된 엔진은 직접 분사방식의 디젤 엔진으로 최고 분사압력이 160MPa인 4기통 커먼레일 연료 장치가 적용된 디젤 엔진을 이용하여 실험을 수행하였다. 엔진의 배기량은 1.5L이며 주요 제원은 Table 1과 같다.

실험 장치는 EC 동력계, 연료 압력 및 연료 분사 제어 장치, 연소 및 배기 분석 장치를 구성하였으며 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 연소 압력을 측정하기 위해 예열 플러그 자리에 압전소자 방식의 센서(Kistler, 6055B80)를 장착하였다. 또한 크랭크 축에는 크랭크축 위치 센서를 장착하였으며 실린더 헤드에는 캠축 위치 센서를 장착하였다.

1 사이클당(2회전) 압력 및 성능 데이터는 DAQ 보드(NI, PCI 6251 & SC2345)와 소프트웨어(LabVIEW)를 이용하여 취득하였으며 200사이클의 데

Table 1 Specification of test engine

Engine type	4-stroke DI Diesel
Number of cylinder	4
Bore × Stroke	75 × 84.5
Displacement volume(cc)	1.493
Valve type	DOHC 4 valves
Compression ratio	17.8
Max. power(kW/rpm)	82.5/4,000
Max. torque(N · m/rpm)	240/2,000

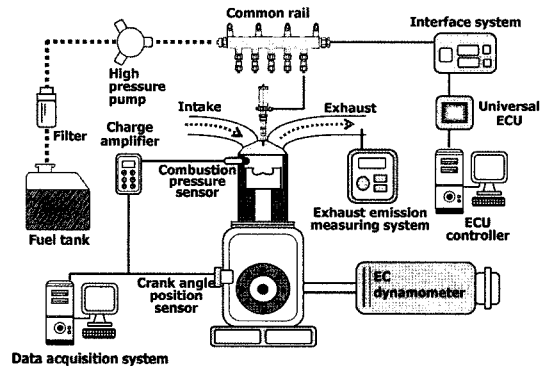


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

이터를 평균하여 사용하였다. 그리고 유해 배출물의 측정을 위해서는 광 투과 방식의 매연측정기(AVL, Smoke meter 407)와 배기가스 분석기(Horiba, MEXA-554JK)를 배기 시스템에 장착하여 계측하였다.

파일럿 분사유무 및 횟수를 제어하기 위해 유니버설 ECU 및 전용 프로그램을 이용하여 본 연구를 실시하였다.

### 2.2 실험 조건

연료 분사에 있어서는 3가지 조건으로 실시하였다. 파일럿 분사가 없는 주 분사만의 경우 ATDC 3°, ATDC 0°, BTDC 3°로 분사하여 실시하였다. 그리고 상기 주 분사 조건으로 한번의 파일럿 분사를 BTDC 15°부터 10°도 간격으로 실험을 실시하였다. 또한 두 번의 파일럿 분사의 경우 첫 번째와 두 번째 파일럿 분사 사이를 10°로 고정하고 파일럿 분사를 BTDC 15°에서 시작하여 10°간격으로 변화를 주며 실험을 실시하였다. 상기 조건에 대한 실험 조건은 Table 2와 같으며 분사 형태는 Fig. 2와 같다.

본 실험은 저속 무부하 조건과 같은 아이들 영역

Table 2 Test condition

Test pattern	Injection quantity (mg/st)	Variable parameter
Without pilot	Variable	-3°, 0, 3°
One pilot	Pilot	0.5
	Main	Variable
Two pilot	1st pilot	0.5
	2nd pilot	0.5
	Main	Variable

Table 3 Operating condition

Engine speed	820 rpm	
Engine load	No load	
Water temperature	80 °C	
Intake air temperature	35 °C	
Fuel quantity injected	Pilot	0.5 mg/stroke
	Main	Variable
Injection pressure	27 MPa	
Booster pressure	100 kPa	

### 3.1 주 분사만 하는 경우의 연소 및 배출물 특성

디젤 엔진에서 연료의 분사 시기 및 분사량은 엔진 성능 및 배기 특성에 미치는 중요한 변수로 작용하게 된다.

Fig. 3은 파일럿 분사가 없는 주 분사만 수행한 연소 압력 특성을 나타낸 것이다. 분사 시기는 인젝터에 전류가 흐르기 시작하는 시점(start of energizing)을 기준으로 하였으며 분사시기가 진각됨에 따라 연소 압력이 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4는 주 분사시기에 따른 열 발생률을 나타낸 것이다. 연료 분사되는 시점에 연료의 증발 잠열에 의해 순간적으로 열 발생률이 떨어지는 경향을 보이며 분사 시기가 진각됨에 따라 연소 압력과 비슷하게 최고 열 발생률을 높아지는 경향을 보이고 있다.<sup>5)</sup>

Fig. 5는 주 분사 시기 변화시 배기 특성을 나타낸 것이다. CO와 HC는 주 분사 시기가 진각됨에 따라 감소하는 경향이 보이고 있다. 이는 분사 시점을 진각시 분사된 연료의 연소 시간이 길어지게 되어 CO와 HC가 감소하는 것으로 판단된다. 그러나 NO<sub>x</sub>와

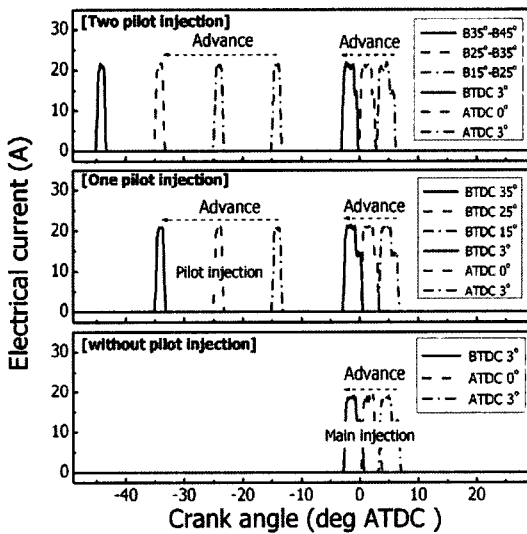


Fig. 2 Injection profile and test method

에서의 연소 안정성과 엔진의 소음진동측면을 살펴보기 위해 엔진 회전속도는 820rpm, 부하는 무 부하 상태에서 실시하였으며 배출 가스 및 엔진의 출력에 영향을 미칠 수 있는 흡기온도와 냉각수 온도 또한 일정하게 유지하면서 실험을 실시하였다. 엔진의 작동상태는 위명업이 된 상태로 각종 실험 조건은 Table 3과 같다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

주 분사시기와 파일럿 분사 시기, 분사횟수에 대한 실험을 수행하였으며 Table 2와 같은 실험 조건으로 실시하여 파일럿 분사 및 주분사 조건에 대한 영향을 살펴보았다.

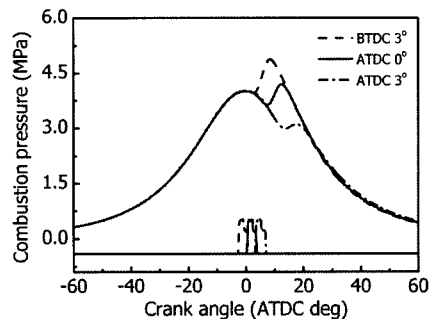


Fig. 3 Effect of main injection timing on the combustion pressure

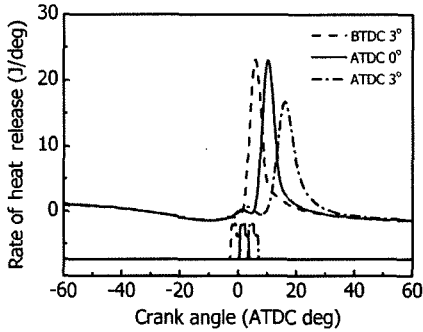


Fig. 4 Effect of main injection timing on rate of heat release

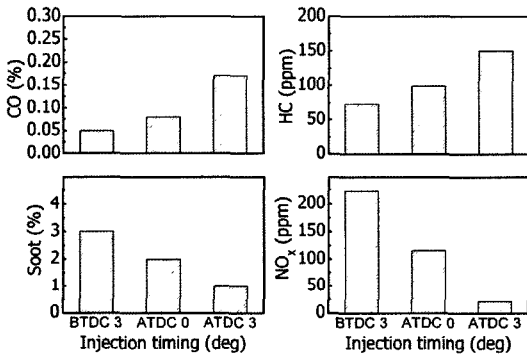


Fig. 5 Effect of advanced main injection on the exhaust emission characteristics

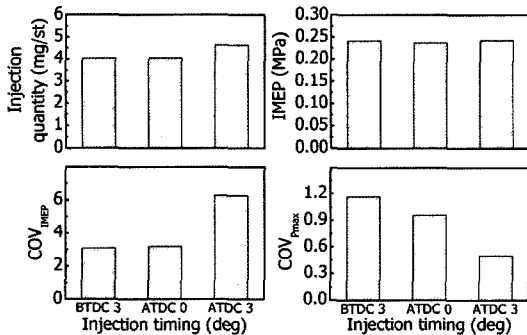


Fig. 6 Effect of advanced main injection on the fuel consumption and COV

Soot는 진각됨에 따라 CO와 HC의 배출 특성과 반대 경향을 보이는데 NO<sub>x</sub>는 연소 압력이 높아짐에 따른 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 분사시기를 변화시켰을 경우 기관의 평균유효압력(IMEP) 및 최고 압력(P<sub>max</sub>)의 변동을 나타낸 것이다. IMEP는 분사 조건에 그다지 영향을 받지 않는 결과를 보이고 있다. 그러나 IMEP 변동률은

분사 시기가 진각시 낮아지는 경향을 보이며, 최고 연소 압력 변동률을 살펴보면 ATDC 3°일 경우가 가장 낮았다. 이는 팽창 행정인 연소실 압력이 낮아지는 과정에서 연료를 분사 연소함에 따라 후연소와 같은 연소과정을 나타내고 있다. 따라서 ATDC 3°의 최고 연소 압력 변동률은 모터링 압력보다 연소압력이 낮게 되어 데이터의 안정성에 대한 신뢰성이 낮아지게 된다.

### 3.2 파일럿 분사가 연소 및 배출물 특성에 미치는 영향

#### 3.2.1 주분사와 1회의 파일럿 분사의 경우

Fig. 7은 TDC에서 주 분사만 실시하였을 때와 주 분사 시점은 동일하게 하고 파일럿 분사를 진각 했을 때의 연소 압력을 비교한 그래프이다. 파일럿 분사를 실시하면 주 분사만 했을 경우 보다 TDC 부근에서의 연소 압력이 부드럽게 이루어짐을 알 수 있으며 특히 BTDC 15°에서 파일럿 분사를 실시한 경우가 부드럽게 연소 압력이 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 열 발생율을 나타낸 것으로서 파일럿 분사를 BTDC 35°와 BTDC 25°의 경우 파일럿 분사를 하지 않은 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나 파일럿 분사를 BTDC 15°에 실시한 경우 열 발생율의 많은 감소가 이루어지고 있다. 또한 소량의 파일럿 분사시 압축 행정 말기에 분사 시에만 파일럿 분사의 연소가 발생하는 것으로 볼 수 있었다.

Fig. 9는 파일럿 분사에 대한 배출물 특성에 대한 그래프이다. HC와 NO<sub>x</sub>는 파일럿 분사에 따라 감소하는 경향을 보인다. 그러나 CO와 Soot는 파일럿 분사 조건에 따라 다소 차이는 나며 특히 Soot는 파일

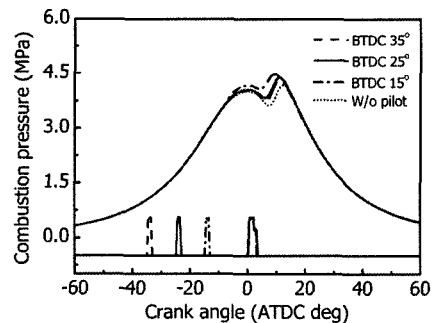


Fig. 7 Effect of advanced one pilot injection on the combustion pressure

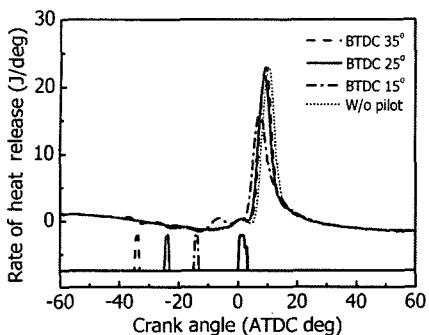


Fig. 8 Effect of pilot injection on the rate of heat release

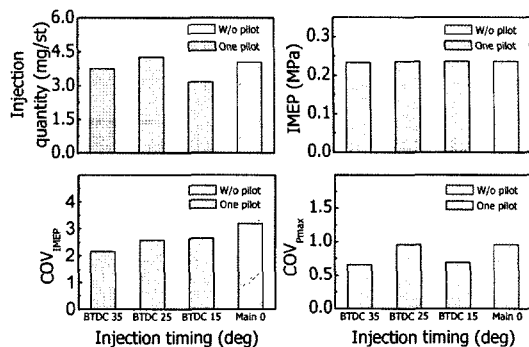


Fig. 10 Effect of advanced one pilot injection on the fuel consumption and COV

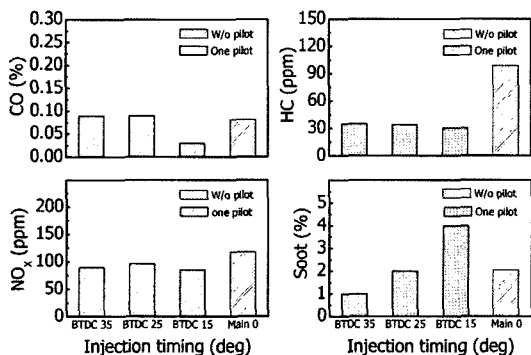


Fig. 9 Effect of one pilot injection on the exhaust emission characteristics

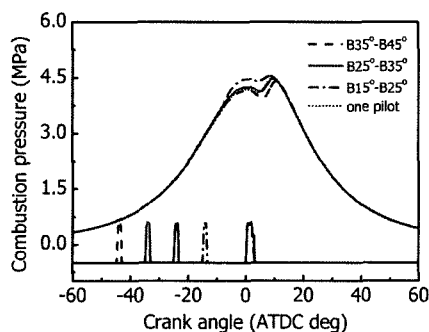


Fig. 11 Effect of advanced two pilot injections on the combustion pressure

릿 분사 시점에 따라서 Soot 형성이 크게 다르다는 것을 볼 수 있었다. 파일럿 분사가 주 분사와 가까워짐에 따라 파일럿 연료의 연소로 인한 주 분사 연료의 자기 착화가 촉진되어 주 분사 연료가 확산 연소를 함에 따라 Soot는 증가하게 된다.

이러한 분사시기 및 파일럿 분사효과에 관한 연구의 이러한 경향은 Nehmer 등<sup>6)</sup>의 연구와 Carlucci 등<sup>7)</sup>의 연구 결과에서도 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 10에서 IMEP는 파일럿 분사 유무와 분사 조건에 그다지 영향을 받지 않는 결과를 보이고 있다. 그러나 IMEP 변동률은 파일럿 분사에 따라 낮아지는 경향을 보이며 연료 소비율 및 연소 압력 변동률은 파일럿 분사 조건에 따라 변화하는 것을 볼 수 있었다. 연료 소비율인 경우 BTDC 15°에서 가장 좋은 것으로 나타나고 있다.

### 3.2.2 주분사와 2회의 파일럿 분사의 경우

1회의 파일럿 분사 조건에서 전반적으로 실험결과가 좋은 BTDC 15° 조건과 2회의 파일럿 분사를

수행한 경우의 결과를 비교 분석을 하였다.

Fig. 11은 ATDC 0°의 주 분사에서 파일럿 분사 그룹을 BTDC 15°에서 분사하여 BTDC 35°까지 진각 하였을 때 연소 압력을 비교한 것이다. 파일럿 분사가 1회인 경우와 비교를 해보면 BTDC 15°-BTDC 25°의 조건과 BTDC 25°-BTDC 35°에서 파일럿 분사 한 그룹의 결과는 1회의 파일럿 분사한 경우의 연소 압력보다 TDC 부근에서의 연소 압력이 부드럽게 이루어짐을 알 수 있었다. 특히 BTDC 15°-BTDC 25°의 파일럿 그룹의 경우에는 아주 완전한 연소 압력이 형성되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 12는 2회 파일럿 분사시의 열 발생률-크랭크 각 선도를 나타낸 그래프이다. 이 경우 파일럿 분사를 BTDC 25° 이전인 압축되는 과정에서의 실시한 경우 1회 파일럿 분사한 경우와 비슷하거나 열 발생률이 다소 높아지는 경향을 나타내었다. 그러나 파일럿 분사를 BTDC 15°-BTDC 25°에 실시한 경우 열 발생률이 많은 감소가 발생함을 볼 수 있다. 또한 2

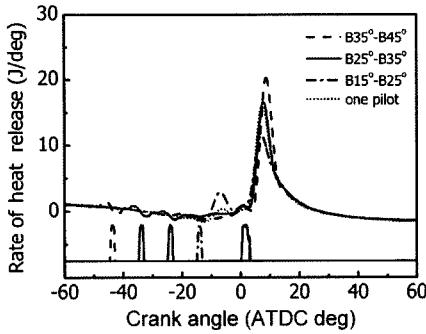


Fig. 12 Effect of advanced two pilot injection on the rate of heat release

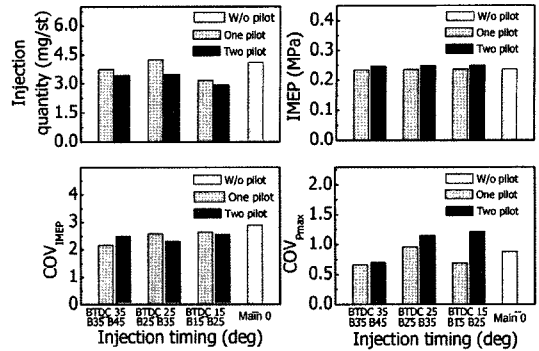


Fig. 14 Effect of advanced two pilot injections on the fuel consumption and COV

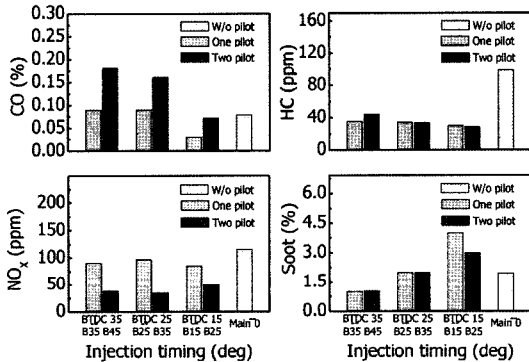


Fig. 13 Effect of advanced two pilot injections on the exhaust emission characteristics

회의 소량 파일럿 분사시의 열 발생률이 1회의 파일럿 분사한 경우에 비해 약 2배로 상승하며 이로 인하여 주 분사의 열 발생률은 많은 감소를 가지고 온 것으로 판단된다.

Fig. 13은 2회의 파일럿 분사에 대한 배출물 특성에 대한 그래프이다. 두 번의 파일럿 분사를 한 경우 CO의 배출량은 약 2배로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 파일럿 분사량이 증가함에 따라 연소실에서의 파일럿 연료로 인한 증발 잠열이 증가하게 되어 압축열은 감소하게 되고 그 감소하는 압축열로 인한 CO 배출량이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 NO<sub>x</sub>는 두 번의 파일럿 분사시 1/2 정도로 감소하는 경향을 보이는데 이 또한 연소실 압축열이 감소하게 되어 NO<sub>x</sub>는 감소하는 효과로 나타나게 된다. 그러나 HC, Soot의 저감하는 효과는 1회 파일럿 분사한 경우에 비해 미미하거나 다소 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 연료 소비율은 파일럿 분사 1회의 경우보다 감소하는 경향을 보이며 IMEP는 약간 상승하는 경향을 보였다. 또한 IMEP 변동률은 BTDC 15°-BTDC 25°와 BTDC 25°-BTDC 35°에서 낮아지는 경향을 나타내었다.

#### 4. 결론

파일럿 분사의 횟수, 파일럿 분사시기 등에 따른 커먼레일 디젤엔진의 연소 및 배출물 특성을 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 주 분사시기를 진각하면 연소 압력, 열 발생률, NO<sub>x</sub> 등은 증가하는 경향을 나타내었으며 파일럿 분사를 한 경우 연소 압력은 TDC 부근에서 완만한 연소 압력이 형성되었으며 특히 2회의 파일럿 분사시에는 연소 압력이 더욱더 완만하게 형성되는 것이 확인 되었다.
- 2) 주 분사에 파일럿 분사를 추가한 경우 열 발생률은 낮아지는 것을 볼 수 있었으며 파일럿 분사를 2회로 한 경우 주 분사 열 발생률은 더욱 낮아지는 경향을 보였다.
- 3) 주 분사와 파일럿 분사 시기가 근접한 경우 Soot는 증가하는 경향을 나타냈으며 파일럿 분사시 NO<sub>x</sub>는 감소를 하며 특히 2회의 파일럿 분사를 실시한 경우 많은 효과를 볼 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금 수행한 최우수실험지원사업

및 한국과학재단 목적기초연구(grant No: R01-2006-000-10932-0)지원으로 수행되었으며 이에 관계기관에 대하여 감사드립니다.

### References

- 1) A. Trueba, B. Barbeau, O. Pajot and K. Mokaddem, "Pilot Injection Timing Effect on the Main Injection Development and Combustion in a DI Diesel Engine," SAE 2002-01-0501, 2002.
- 2) C. Y. Choi and R. D. Reitz, "An Experimental Study on the Effect of Oxygenated Fuel Blends and Multiple Injection Strategies on DI Diesel Engine Emissions," Fuel, Vol.78, pp.1303-1317, 1999.
- 3) R. Papagiannakis and D. T. Hountalas, "Combustion and Emission Characteristics of a Dual Compression Ignition Engine Operated Pilot Diesel Fuel and Natural Gas," Energy Conversion & Management, Vol.45, pp.2971-2978, 2004.
- 4) T. Tanaka, A. Ando and K. Ishizaka, "Study on Pilot Injection of DI Diesel Engine using Common-rail Injection System," JSAE Review Vol.23, pp.297-302, 2002.
- 5) M. Y. Kim, D. J. Lee, H. G. Roh, J. H. Lee and C. S. Lee, "Effect of Injection Parameters on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a Small Common-rail Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.9-15, 2004.
- 6) D. A. Nehmer and R. D. Reitz, "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NO<sub>x</sub> Emissions," SAE 940668, 1994.
- 7) P. Carlucci, A. Ficarella and D. Laforgia, "Effect of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines," SAE 2003-01-0700, 2003.