

분사 조건의 변화가 소형 커먼레일 디젤 엔진의 연소 및 배기 특성에 미치는 영향

김명윤¹⁾ · 이두진¹⁾ · 노현구¹⁾ · 이제형²⁾ · 이창식^{*3)}

한양대학교 대학원¹⁾ · 현대자동차²⁾ · 한양대학교 기계공학부³⁾

Effect of Injection Parameters on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a Small Common-rail Diesel Engine

Myung Yoon Kim¹⁾ · Doo Jin Lee¹⁾ · Hyun Gu Roh¹⁾ · Je Hyung Lee²⁾ · Chang Sik Lee^{*3)}

¹⁾Graduate School of Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Research & Development Division for Hyundai Motor Company & Kia Motors Corporation, Jangduk-Dong, Whasung-Si, Gyeonggi 445-706, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 10 March 2004 / Accepted 6 September 2004)

Abstract : The characteristics of combustion and emissions were investigated in a single cylinder DI diesel engine equipped with a common rail injection system. This study presents an experimental study of the effect of engine speed, injection timing, injection pressure and pilot injection timing on the combustion and exhaust emissions. The engine speeds were 1000 and 2000rpm and the corresponding injection pressures were 50 and 100MPa.

Experimental results show that NOx emissions decrease with retarded injection timing, while HC and CO emissions increases. Higher injection pressure increases NOx with lower soot emissions. For the case with the pilot injection prior to main injection, the ignition delay is shortened and the premixed combustion ratio decreases. Also NOx and soot emissions are decreased with increase of pilot injection advance.

Key words : Common rail(커먼레일), Diesel engine(디젤엔진), NOx(질소산화물), Emissions(배기), Pilot injection(과일릿 분사)

Nomenclature

P : pressure, bar
PM : particulate matter
m : mass, mg
IMEP : indicated mean effective pressure, bar
ROHR : rate of heat release
SOE : start of energizing

Subscripts

inj : injection
main : main injection
pilot : pilot injection

1. 서론

디젤기관은 가솔린 기관에 비하여 열효율이 높고 내구성이 우수하여 트럭 및 대형차량에 탑재하여 사용되고 있다.

*To whom correspondence should be addressed.
cslee@hanyang.ac.kr

이러한 디젤 엔진은 열효율이 높아 CO₂의 배출이 적기 때문에 강화되고 있는 전 세계적인 CO₂ 배출 규제에 대비할 수 있는 엔진으로 각광받고 있으나 한편으로는 다량의 NO_x와 입자상 물질을 배출하기 때문에 대기 오염의 주범으로 지목되고 있다.

그러나 최근 연료분사장치의 발달로 인하여 분사의 고압화와 전자제어가 가능해지고 터보차저 및 인터쿨러 등의 적용으로 가솔린 엔진에 필적하는 비출력을 가지게 되었다. 또한 소음-진동의 측면에서도 파일릿 분사의 도입으로 인하여 정숙성이 증대되어 디젤승용차에 대한 관심이 증가하고 있다.¹⁾

이러한 커먼레일 분사장치를 이용한 디젤기관은 고압의 연료를 커먼레일에 축압하여 전자 제어로 분사함으로써 분사시기, 분사압력 및 분사량을 정밀하게 조절할 수 있어 소음 및 배기 저감에 유리하다.²⁾ 또한 분사의 고압화로 인하여 연료 분무와 주위 공기와의 상호작용이 증대되어 연료의 미립화 및 혼합에 유리하다고 알려져 있다.^{3,4)}

기존의 디젤 엔진에서는 연소실에 분사된 연료가 바로 착화되지 않고 착화지연시간을 거쳐 급격히 연소하게 되어 소음과 NO_x가 발생하는 문제점이 있다. 그러나 커먼레일 분사 시스템의 적용에 따라 파일릿 분사가 가능하여져서 주분사 이전에 소량의 연료를 연소실에 분사하여 연소시킴으로써 착화가 쉬운 분위기조건을 형성하게 되어 기존의 디젤 엔진의 문제점이었던 착화지연에 이후에 발생하는 급격한 열발생을 줄여주게 되었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 파일릿 분사가 가능한 커먼레일 분사 장치를 장착한 소형 단기통 디젤 엔진을 이용하여 연료의 분사시기, 분사압력, 파일릿 분사 및 엔진 회전속도 등의 변화에 따른 연소 및 배기특성을 규명하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 기관

본 연구에서는 최고 분사압력이 135MPa인 커먼레일 시스템이 장착된 4밸브 단기통 승용 디젤엔진을 사용하였다. 연소실의 형상은 reentrant 형이며 기존의 toroidal 형의 연소실 형상보다 배기 행정 중에 도 피스톤 캐비티 내의 공기 유동이 감소하지 않고

지속되어 급속한 연소가 가능하다.⁵⁾

Table 1에는 단기통 기관의 주요 제원을 나타내었다.

Table 1 Specifications of test engine

Description	Specification
Stroke(mm)	84.5
Bore(mm)	75
Swept volume(cc)	373
Valve train	DOHC 4
Combustion chamber	Reentrant
Compression ratio	20.85
Injector hole number	6
Fuel injection system	Bosch common rail

2.2 실험 장치

Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타낸 것으로 기관은 DC 동력계(45kW)로 구동하였다. 연소실에 장착된 6공 커먼레일 인젝터는 별도의 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3200H)에 의하여 통전 시간을 조절하여 원하는 분사량을 분사할 수 있도록 하였다. 연료의 분사압력은 유니버설 ECU(Bosch, ETK 7.1)의 운전 맵을 인터페이스 장치(ETAS, ES690)와 소프트웨어(ETAS, INCA ver. 4.0)를 통하여 변화시켜 원하는 실험조건으로 변경할 수 있게 하였다. 인젝터 드라이버의 분사시작 시기를 제어하기 위한 트리거 신호를 생성하기 위하여 기관의 크랭크축에 설치된 엔코더(1800 pulse/rev)와 생성 장치를 이용하였다.

기관으로부터 배출되는 배기가스의 분석을 위하여 NO_x 분석기(Yanaco, BCL-511)와 매연 측정기

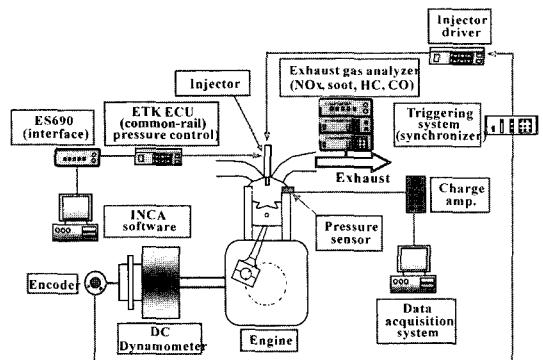


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

(DBC-1000), 그리고 HC, CO 분석기 등이 사용되었다. 또 연소실의 압력을 측정하기 위하여 압전식 압력센서(6052BI, Kistler)를 설치하였고, DAQ 보드(National Instrument, PCI-MIO-16E-1, maximum sampling rate: 1.25MS/sec)와 LabVIEW 언어로 작성된 프로그램을 이용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다.

2.3 실험 조건

Table 2는 본 연구에서 수행한 실험 조건을 정리한 것이다. 엔진 속도는 1000, 1500, 2000rpm의 세 가지 조건으로 하였으며, 분사압력은 50MPa과 100MPa의 두 가지 경우에 대하여 실험하였다. 또한 연료 분사시기의 영향을 알아보기 위하여 파일럿 분사와 주 분사의 시기를 다양하게 변화시켜 가면서 연소 및 배기 특성을 분석하도록 하였다.

Table 2 Test condition of the modified engine

Description	Test conditions
Engine speed(rpm)	1000, 1500, 2000
Injection pressure(MPa)	50, 100
Injection timing (deg ATDC)	main -104
	pilot -42-7
Coolant temperature(°C)	70
Oil temperature(°C)	70
Intake air temperature(°C)	33

3. 실험 결과 및 고찰

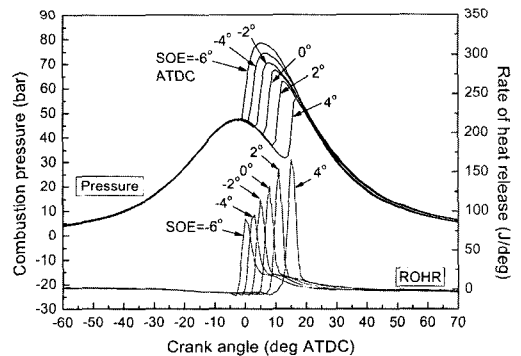
3.1 분사시기 및 기관속도의 영향

Fig. 2는 기관의 회전속도가 각각 1000rpm과 2000rpm인 경우의 분사시기 변화에 따른 연소특성을 나타낸 것이다. 분사 시기는 인젝터 드라이버의 구동신호에 의해 인젝터에 전류가 흐르기 시작하는 시점(SOE, start of energizing)을 기준으로 표시하였다.

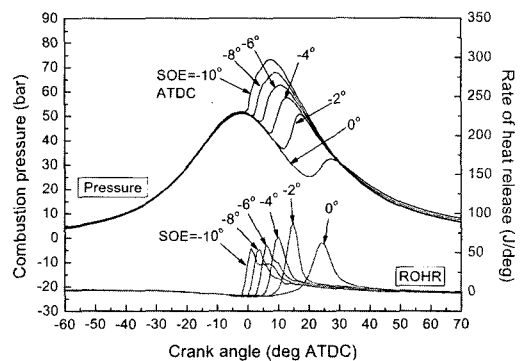
SOE가 지연됨에 따라 피스톤의 팽창 행정 중에 연소가 이루어져 연소 최고압력은 낮아지고 열발생율의 최고치는 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 분사시기가 지연되면 착화지연이 증가하게 되어 연료와 공기가 충분히 혼합된 후 예혼합 연소의 형태로 급격히 연소하기 때문이다. 그러나 2000rpm의 경우,

분사시기를 0°(TDC)까지 지연시킨 경우엔 느린 연소로 인해서 오히려 열발생율의 최고치가 감소하였다. 또 분사시기를 앞당길수록 착화지연이 감소하여 총 열발생량 중에 확산 연소로 연소되는 비율이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 엔진의 회전수가 증가하면 크랭크 각 사이의 시간간격이 짧아지게 되므로 분사시기를 앞당겨야 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 2의 그래프에서 회전속도가 1000rpm에서 2000rpm으로 하면 1000rpm에서의 동일한 시점에서 분사했을 때보다 연소압력의 상승이 매우 지각되며 열발생율의 최고치도 낮아지는 경향을 보인다. 또한 2000rpm의 경우에는 열발생율의 최고점이 낮아지고 완만한 경사를 이루는 것을 볼 수 있으며 이것은 엔진의 회전수가 증가함에 따라 연료가 분사되는 크랭크 각도가 길어지게 되고 분사된 연료가 증발되어 공기와 혼합되어 연소하는데 필요한 시간이



(a) 1000rpm



(b) 2000rpm

Fig. 2 Effect of injection timing on the combustion characteristics (2000rpm)

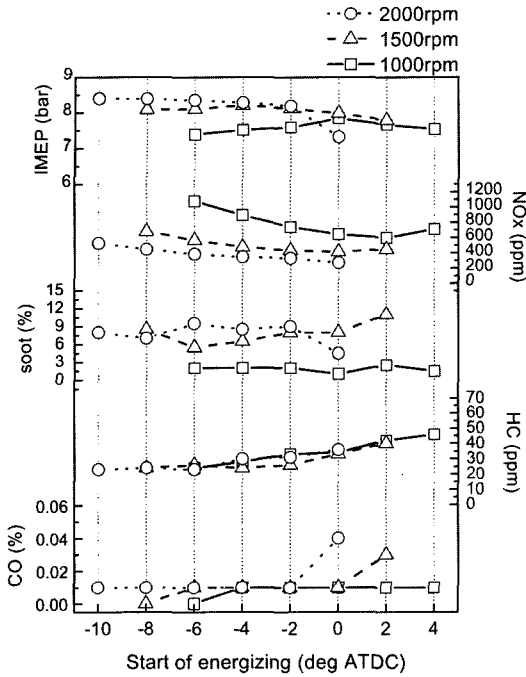


Fig. 3 Effect of injection timing and rpm on exhaust emissions(mfuel=9mg)

부족해진 때문으로 보인다.

Fig. 3은 엔진 회전속도가 각각 1000, 1500, 2000rpm 인 경우 분사시기에 따른 배기 특성을 나타낸 것이다.

도시평균유효압력(IMEP)을 살펴보면 1000rpm에서는 분사시기가 0°(TDC)일 때가 가장 높은 값을 가지지만 회전수가 빨라지면 조기에 분사한 경우에 IMEP가 증가함을 알 수 있다. 또한, 행정 당 공급되는 연료의 양이 동일함에도 불구하고 엔진 회전수가 높아질수록 IMEP 값은 대체로 증가하는 경향을 보이는데 이것은 높은 회전수에서 빠른 속도로 팽창 행정이 일어나기 때문에 열손실이 감소했기 때문으로 생각된다. NO_x의 발생량은 일반적인 디젤 엔진에서의 연소특성과 같이 분사시기가 지연될수록 감소하는 경향을 보이지만 분사시기가 어느 이상으로 지연되는 경우는 NO_x의 발생량이 조금 증가하는 경향을 보인다. 이것은 Fig. 2(a)의 그래프에서도 알 수 있듯이 분사가 지연됨으로 인하여 연소실 최고 압력은 감소하였음에도 불구하고 점화지연이 급격히 증가하여 예혼합 연소에 의한 급격한 연소

구간이 증가했기 때문으로 판단된다.

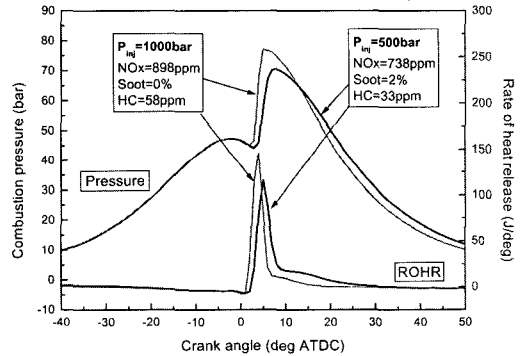
또한, 회전속도가 증가할수록 연료의 혼합시간 감소로 인하여 Soot의 발생량은 증가하는 경향을 보였으며 HC와 CO의 발생량은 대체로 분사시기가 지연됨에 따라 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2 분사 압력의 영향

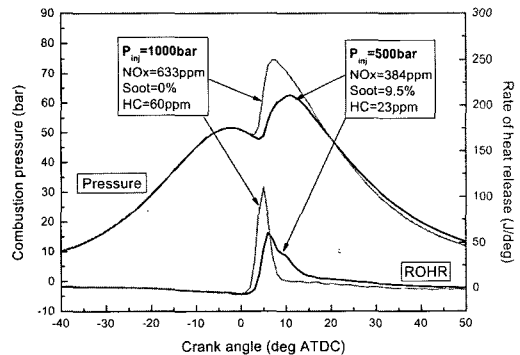
디젤 엔진에서 고압으로 연료를 분사하게 되면 분사가 조기에 종료되고 분무의 입경이 작아지게 되어 증발이 촉진되며 혼합기의 압축착화가 빨라지게 된다.³⁾

Fig. 4는 이러한 경향을 보여주고 있으며 엔진 회전수가 각각 1000rpm과 2000rpm일 때의 분사압력 변화에 따른 연소 및 배기특성을 나타낸 것이다.

회전속도가 다른 두 경우 모두 분사압력이 증가하면 착화지연기간은 감소하며 열발생율의 최고값



(a) 1000rpm (SOE=ATDC -2°)



(b) 2000rpm (SOE=ATDC -6°)

Fig. 4 Effect of injection pressure on combustion characteristics (mfuel=9.2mg)

은 증가한다. 이것은 연료의 고압분사로 인하여 인젝터에서의 연료유량이 증가하여 조기에 분사가 종료되고 앞서서 설명한 바와 같이 고압분사에 의해 공기와의 혼합이 증가하여 조기 점화가 일어났기 때문으로 판단된다. 또 고압분사의 경우에는 연소실의 체적이 최소가 되는 TDC 부근에서 연소가 일어남에 따라 연소압력도 증가하는 경향을 보인다. 고압분사에 의한 연소기간 단축의 효과는 연료의 혼합 및 연소시간이 부족해지는 고속 구간에서 두드러지게 나타나고 있다.

연료분사압력을 100MPa로 증가시켜 분사시킨 경우에는 예혼합 연소의 증가로 인하여 NO_x의 배출이 증가하는 경향을 보이며 확산연소 구간은 감소하여 soot는 거의 배출되지 않는 것으로 나타났다. HC의 배출은 고압분사를 할 경우 2배 정도 증가하며 이것은 고압분사로 인하여 분무도달거리의 증가로 분무가 연소실 면에 부딪치며 발생한 것으로 보인다.

3.3 파일럿 분사 및 파일럿 분사 시기의 영향

디젤 엔진에서의 파일럿 분사는 연소실에서의 화학적, 물리적 반응을 촉진시키게 되어 분사된 연료의 착화지연기간을 줄일 수 있다. 따라서 디젤엔진에서 발생하는 급격한 예혼합 연소에 의한 소음, 진동의 발생을 억제할 수 있고 NO_x의 배출량 또한 감소시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.⁵⁾

Fig. 5는 인젝터의 구동 전류와 분사율 그리고 열 발생율과 연소압력을 종합적으로 나타낸 것이다. 분사율은 Bosch법(장관법) 분사율 측정 장치를 이용하여 측정된 값을 나타낸 것이다. 이 때의 엔진속도는 1500rpm이고 분사압력 50MPa이다. 파일럿 분사 시기는 BTDC 22°이며 1mg을 분사하였다.

인젝터의 분사율은 솔레노이드의 특성상 구동신호가 인가된 후 어느 정도의 시간을 가지고 흡인력이 형성되고 니들의 관성 등의 영향으로 인하여 구동전류 인가 후 실제로 분사가 시작되는 시점은 차이를 가지게 된다.

본 실험에 사용된 인젝터는 50MPa의 분사압력으로 분사한 경우, 구동신호가 인가된 후 약 0.29

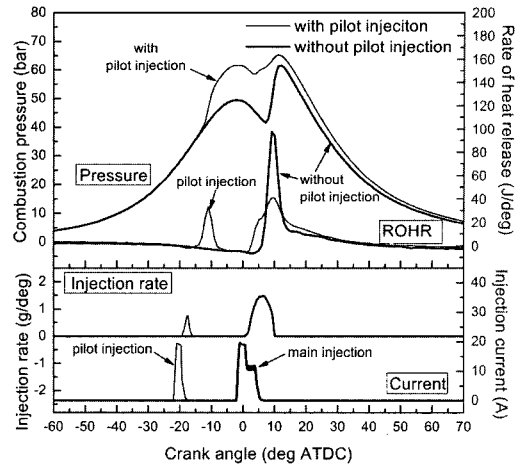


Fig. 5 Effect of pilot injection on combustion characteristics ($m_{main} = 9mg, m_{pilot} = 1mg$)

msec(2.61° crank angle) 후에 실제로 연료분사가 시작되었으며 분사가 종료되는 시점도 구동전류의 인가가 종료되는 시점보다 지연되고 있다.

연소특성을 살펴보면 파일럿 분사를 하지 않은 경우에는 연료가 분사되고 나서 분사지연 기간을 거치게 되어 분사된 연료가 공기와 혼합된 후 급격한 열발생을 보이며 연소되는 특성을 보이고 있다. 그러나 파일럿 분사 후에 주분사를 한 경우에는 파일럿 분사된 연료가 피스톤의 압축 행정 중에 연소되기 때문에 연소실 압력이 파일럿 분사를 하지 않은 경우와 비교하여 10bar 이상 증가하고 있으며 이로 인하여 주 분사된 연료의 착화가 촉진되게 되어 주 분사 연료는 거의 착화지연 기간 없이 연소되고 있다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 각각 파일럿 분사 시기가 연소 및 배기가스 특성에 미치는 영향을 파일럿 분사를 하지 않은 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 파일럿 분사량은 0.5mg으로 하였으며 파일럿 분사를 한 경우와 파일럿 분사를 하지 않은 경우 모두 분사된 연료의 총량은 9mg으로 동일하게 유지시켰다.

파일럿 분사를 하지 않은 경우의 연소특성은 착화 지연에 의하여 ATDC 5° 이후에서 연소가 시작되고 급격한 압축착화에 의한 높은 열발생을 특성을 나타내고 있으나 파일럿 분사를 한 경우에는 주 분사의 착화지연기간이 감소하고 열발생율의 최대값

이 감소하는 것을 볼 수 있으며 파일럿 분사시기가 주 분사 연료의 착화에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

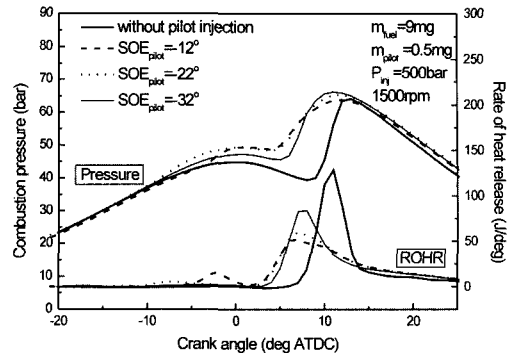
파일럿 분사 시기가 빨라지게 되면 연소실 온도와 압력이 낮은 압축과정 중에 분사가 이루어지게 되어 파일럿 분사 연료의 착화지연이 길어지게 되어 공연비가 희박한 상태에서 착화되게 된다. 따라서 파일럿 분사 연료의 열발생율의 최고값이 낮아지게 되고 파일럿 분사와 주 분사 사이의 간격이 길어짐에 따라서 파일럿 분사 연료에 의한 연소가 연소실 내에서 더욱 희석된 후에 주연료가 분사되게 된다.⁶⁾ 이러한 영향으로 인하여 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 파일럿 분사가 앞당겨 질수록 파일럿 분사에 의한 주 분사 연료의 착화 촉진 작용은 감소하게 되어 주 분사 연료의 착화지연은 조금씩 길어지게 되며 열발생율은 증가하는 경향을 보이고 있다.

또한 이러한 파일럿 분사와 주분사 상관관계에 의해서 파일럿 분사시기는 배출 가스 특성에도 많은 영향을 미치고 있다. 이러한 영향은 파일럿 분사에 의한 연소실의 온도 및 압력 상승뿐만 아니라 이때 발생한 연소가스가 주 분사 연료의 연소에 영향을 미쳐서 발생하게 되며⁷⁾ NO_x와 soot의 발생은 파일럿 분사시기가 앞당겨질수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

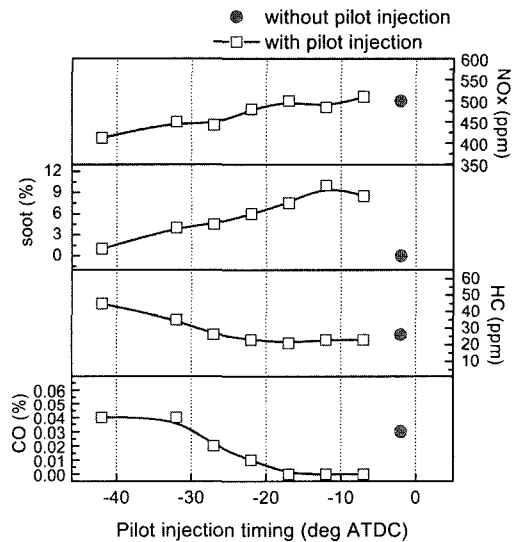
또한 파일럿 분사를 한 경우는 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 주분사 연료의 착화지연이 짧아지게 됨에 따라 예혼합 기간이 줄어들게 되어 파일럿 분사를 하지 않은 경우에 비하여 soot 발생량이 증가하는 경향을 보이고 있다.

HC의 발생량은 파일럿 분사시기가 ATDC -20° 정도까지는 파일럿 분사를 하지 않은 경우와 비슷한 경향을 보이나 이보다 파일럿 분사시기를 앞당길 경우에는 발생량이 다소 증가하고 있다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이 파일럿 분사시기의 진각으로 인하여 파일럿 분사 연료의 착화지연이 길어지게 되어 희박한 공연비에서 연소하게 되므로 실화된 연료에 의하여 발생한 것으로 보인다.

CO의 배출량은 파일럿 분사와 주 분사와의 간격이 가까운 경우에는 파일럿 분사를 하지 않은 경우



(a) Combustion characteristics



(b) Exhaust emission characteristics

Fig. 6 Effect of pilot injection on combustion and exhaust emission characteristics (mfuel=9mg)

보다 줄어들었으나 주 분사와의 간격이 길어질수록 발생량은 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결론

단기통 소형 디젤엔진을 이용하여 운전조건의 변화에 따른 연소, 화염 및 배기 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분사시기가 빨라질수록 총 연소 중에 예혼합 연소의 형태로 연소되는 비율은 감소하며 확산 연소 구간은 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 착화지연기간은 분사시기가 늦어질수록 길어지

게 되어 급격한 예혼합 연소에 의한 압력 상승을 초래하였다.

- 3) 엔진의 회전속도가 빨라질수록 연소실 압력이 낮아져 NO_x의 발생량이 감소하였으나 공기와 의 혼합시간의 부족과 후연기간의 증가 등으로 인하여 soot 발생량은 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 분사압력이 증가하게 되면 연료분사가 조기에 종료됨에 따라 연소압력 및 열발생율의 최고값은 증가하며 이에 따라 NO_x의 발생량은 증가하였으나 고압 분사의 영향으로 soot는 거의 발생하지 않는 결과를 보였다.
- 5) 파일럿 분사를 주분사 전에 분사시킨 경우에는 주 분사 연료가 거의 착화지연기간 없이 연소되어 급격한 예혼합 연소에 의한 압력 상승이 줄어드는 것으로 나타났다.
- 6) 파일럿 분사를 진각시킬수록 NO_x의 발생량은 감소하는 것으로 나타났으며, 파일럿 분사시기를 -42°까지 진각시킨 경우에는 파일럿 분사를 하지 않은 경우에 비하여 NO_x 발생량이 18% 정도 감소하였으나, HC와 CO는 증가하는 경향을 나타내었다.

후 기

본 연구는 (주) 현대자동차의 산학협동 연구로서 수행되었으며, 연구를 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- 1) M. Y. Kim, H. P. Heo, C. I. Kim and K. H. Choi, "Development of Medium-Duty Diesel Engine with CP3.3 Common Rail - Concept Study and Initial Experimental Work," Transactions of KSAE, Vol.11, No.2, pp.69-74, 2003.
- 2) J. Schommers, "Potential of Common Rail Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines," SAE 2000-01-0944, 2000.
- 3) S. W. Park, H. J. Kim and C. S. Lee, "Investigation of Atomization Characteristics and Prediction Accuracy of Hybrid Models for High-Speed Diesel Fuel Sprays," SAE 2003-01-1045, 2003.
- 4) C. Arcoumanis, S. T. Cho, M. Gavaises and H. S. Yi, "Spray and Combustion Development in a Four-Valve Optical DI Diesel Engine," SAE 2000-01-1184, 2000.
- 5) L. Zhang, H. Kurihara, T. Ueda, T. Takatsuki and K. Yokota, "The Combustion Improvement of Reentrant Chamber in DI Engines; The Effect on In-Cylinder Flow," IPC-8, No.218 (JSAE), 1995.
- 6) 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.
- 7) P. Calucci, A. Ficarella and D. Laforgia, "Effect of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines," SAE 2003-01-0700, 2003.