

3중분사가 HSDI 디젤엔진의 성능과 배기에 미치는 영향

최 욱·박철웅·국상훈·배충식*

한국과학기술원 기계공학과

The Effect of Triple Injection on Engine Performance and Emissions in a HSDI Diesel Engine

Wook Choi · Cheolwoong Park · Sanghoon Kook · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received 8 May 2004 / Accepted 2 July 2004)

Abstract : The effects of triple (pilot, main and after) injection on combustion and emission characteristics in a HSDI (High-Speed Direct Injection) diesel engine were investigated using a single-cylinder optical diesel engine equipped with a common-rail injection system. The pilot injection affected the spray and combustion evolution of the following main injection. It was found that the pilot injection reduced the ignition delay, which led to lowered NO_x (Nitric Oxides) level, and increased IMEP (Indicated Mean Effective Pressure) due to slow combustion pace during an expansion stroke. The after-injection was shown to be effective in reducing PM (Particulate Matter) even when a small amount of fuel was added. The results suggest that a proper combination of individual injection strategy could bring about a good synergetic effect on engine performance and emission.

Key words : Triple injection(3중분사), Pilot injection(파일럿분사), Main injection(주분사), After-injection(후분사), Common-rail(커먼레일), Diesel(디젤)

Nomenclature

- BTDC : before top dead center
- ATDC : after top dead center
- ASOI : after start of (main) injection
- BSOI : before start of (main) injection

1. 서론

대형 상용자동차에서부터 승용차에 이르기까지 폭 넓게 사용되고 있는 디젤엔진은 내구성 및 신뢰성이 우수하고, 열효율이 높아 연료소비율이 낮은 장점이 있다. 반면 연소 과정에 있어 공기이용률이

낮은 확산연소의 특징으로 인해 매연의 발생이 많고, 국부적인 고온영역의 다발로 인해 NO_x (Nitric Oxides)가 많이 발생하는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 디젤엔진의 연소기술 개발을 위한 연구들이 많이 지속적으로 진행되고 있다.

그 중에서도 커먼레일(Common-rail) 형태의 연료 분사시스템은 연료의 양과 분사압력, 분사시기 등을 엔진의 회전수 및 부하와는 관계없이 독립적으로 제어할 수 있고, 고압 연료분사가 가능하여 출력 및 연비를 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁻³⁾ 또한 커먼레일시스템의 자유도를 활용한 파일럿분사(Pilot-Injection)을 적용할 경우, 연료의 착화지연을 단축시키고 급격한 열방출로 인한 엔진의 연소

*To whom correspondence should be addressed.
csbae@kaist.ac.kr

소음과 NOx 배출을 줄일 수 있는 반면, PM (Particulate Matter)이 증가하는 단점이 있다.^{4,7)} 또한 다단분사의 일종으로서, 주 연료의 분사 후의 추가적인 분사는 후분사(After-Injection)라 하는데, 이는 팽창과정에서의 재연소를 통해 PM을 저감시키는 효과를 갖는다.

본 연구에서는 커먼레일 분사 시스템을 장착한 직접 분사식 단기통 디젤 엔진을 이용하여 연료의 분사압력과 분사시기를 다르게 할 경우, 파일럿분사와 후분사가 엔진의 성능과 배기배출물의 형성에 어떤 영향을 미치는지 알아보려고 하였다.

2. 실험 장치 및 실험 조건

2.1 실험용 단기통 엔진

실험에 사용된 단기통 디젤엔진과 분사 시스템의 제원을 Table 1과 Table 2에 각각 나타낸다. 사용된 엔진은 가시화가 가능한 단기통 엔진으로서, 가시화창을 장착할 경우 실린더 내부의 유동특성이나 화염발달의 관찰이 가능하다.

Table 1 Specification of single cylinder diesel engine

Engine type	Single cylinder direct injection
Bore (mm)	83
Stroke (mm)	92
Displacement (cc)	489
Compression ratio	18.9

Table 2 Specification of fuel injection system

Fuel injection type	Common rail injection system
Injection pressure	0~150 MPa
Number of nozzle hole	5 hole sac type
Nozzle hole diameter	0.168 mm/hole
Injection angle (deg)	150

배기가스 측정 및 압력 데이터를 취득하는 경우에는 화염과 압력파에 의한 가시화 창을 손상할 방지하기 위하여 가시화 창을 더미 블록으로 대체하여 실험을 수행하였고, 화염 영상을 취득하는 경우에만 가시화를 위한 석영창 (Quartz Window)를 장착하였다.

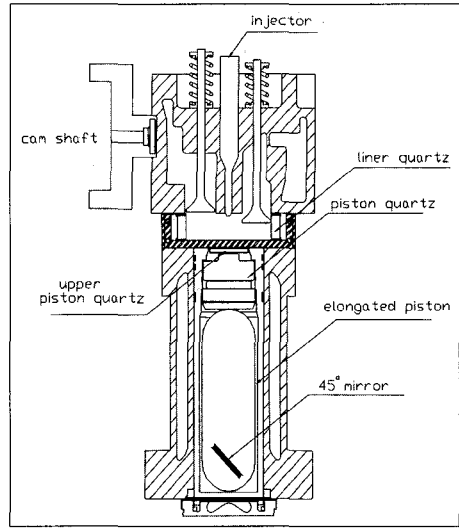


Fig. 1 Single cylinder optical diesel engine

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 단기통 가시화 디젤 엔진의 개략도이다. 그림에서 보는 바와 같이, 가시화엔진에는 피스톤 상부에 레이저 시트(laser sheet)를 입사시킬 수 있는 피스톤 상부 가시화 창(석영, 두께 5mm), 실린더 측면에서 연소 현상을 관찰할 수 있는 측면 가시화창(석영, 높이 40mm)을 장착하였다. 또한 연소실 내부를 관찰할 수 있도록 기존의 피스톤 대신에 기존의 피스톤 길이를 연장한 확장 피스톤을, 그리고 확장 피스톤의 하부 중앙에 45° 반사 거울을 통하여 연소실 내부를 관찰할 수 있는 피스톤 가시화창(석영, 유효관찰면적비 31.4%)을 장착하였다. 이를 이용해 실린더 내의 흡기 및 배기 밸브의 일부분과 실린더 중앙에 수직 방향으로 장착되어 있는 분사기로부터의 분무 형상 및 화염 발달의 관찰이 가능하였다.

2.2 실험 장치

Fig. 2의 실험장치 구성도에 나타낸 바와 같이, 단기통엔진의 구동을 위해 엔진의 크랭크축을 유도전동기(정격토크 140 Nm, 15 kW, 6극)에 연결하고 유도전동기의 회전수는 인버터(HYDRIVE - J300)로 귀환제어 하였다. 엔진의 캠축에 장치되어 있는 엔코더(3600 pulses/rev)의 신호를 이용하여 분사시기를 제어하였고, 연료 분사량을 제어하기 위해 전용 분사기 구동장치(TDA 300H, TEMS Ltd)를 사용하

였다. 커먼레일의 압력은 압력조절장치(PCV driver, TEMS Ltd.) 통하여 제어가 가능하였다.

유해배출물의 분석에는 광투과식 탁도계(Opacimeter, OP 100, EplusT Ltd.)를 이용하여 Smoke를 측정하였고, HC, NO_x, CO 등은 배기가스분석장치(HORIBA MEXA1500d)를 사용하여 분석하였다. 또한, 실린더 헤드에 장착한 piezo형 압력 센서(KISTLER 6052A, range 0-25 Mpa)를 통해 실린더 내부의 압력을 측정하였다. 측정된 압력과 유해 배출물의 분석데이터는 데이터취득장치(IOtech WaveBook512)으로 PC에 저장하였다.

2.3 실험 조건

Table 3은 본 연구에서 적용된 실험조건을 나타낸다. 연소 실험은 유도전동기를 이용해 800 rpm의 무부하 조건에서 이루어 졌고, 파일럿분사나 후분사를 하지 않는 경우에도 주분사 연료의 총량은 파일럿분사를 적용할 경우와 동일하다.

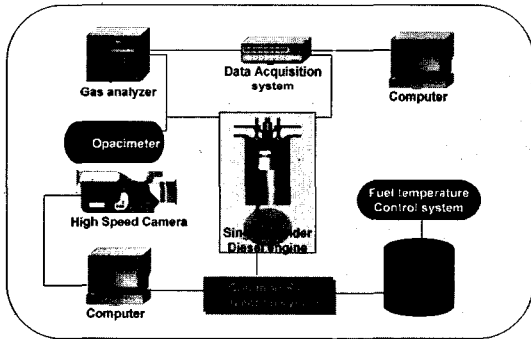


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

Table 3 Experimental conditions

Engine speed(rpm)	800
Engine load	Idling
Quantity of main injection	10mm ³ /stroke
Quantity of pilot/after Injection	1.5mm ³ /stroke
Main injection timing	BTDC 18 °CA ~ ATDC 5°CA
Pilot/After injection timing	BSOI/ASOI 10°CA-60°CA
Injection pressure	300, 600, 900, 1200 bar

3. 실험 결과

3.1 주분사(Main Injection)

Fig. 3는 연료분사시기와 분사압력에 따른 IMEP (Indicated Mean Effective Pressure)와 배기배출물의 변화를 나타낸다. 일반적으로 분사압력의 상승은 분사되는 연료의 미립화를 촉진시키기 때문에 착화 및 연소에 유리하게 작용한다.⁸⁾ 그러나, Fig. 3의 결과에서는 전반적으로 출력면에서 반대의 경향을 나타내고 있어, 분사압력이 낮을수록 분사시기에 관계없이 높은 IMEP를 갖는다. 연료가 저압으로 분사될 경우, 분사율이 낮기 때문에 총 분사시간은 늘어나게 되며, 이에 따라 연소 지속시간도 증가하게 된다. 증가된 연소 지속시간은 곧 팽창 행정 중의 연소에 의한 일의 증가로 나타난다. 연소압력의 최대값은 분사압력이 높을수록 높지만, TDC(Top Dead Center) 이전의 조기착화로 인해 압축일의 손실을 가져오며, 오히려 낮은 분사압력에 의해 긴 착화 지연을 갖는 경우, 팽창과정에서의 일은 증가하게 된다. 이러한 팽창기간 중의 일의 비중이 일반적인 고속운전조건보다 큰 점은 본 연구에서 적용한 저속운전(800 rpm)의 특수성 때문이기도 하다.

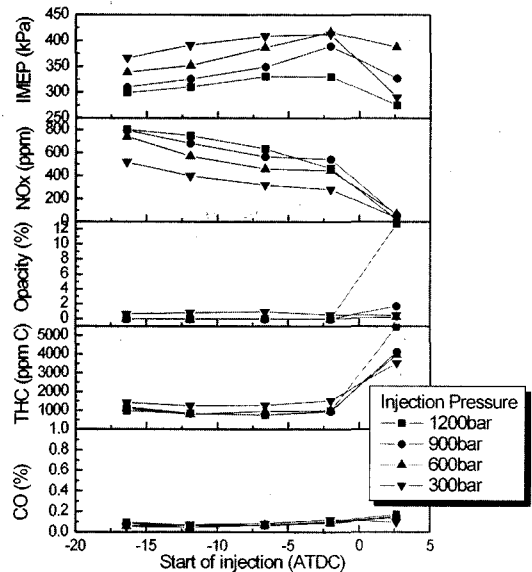


Fig. 3 Effect of injection timing and pressure on engine performance and emissions

분사시기를 진각 시킬수록 연료가 미립화되고 공기와 혼합되어 예혼합기를 조성할 수 있는 시간이 증가하므로, 예혼합연소에 의한 큰 열방출이 일어난다. 마찬가지로 분사압력을 높일수록 연료가 보다 빨리 미립화되어 공기와 잘 혼합되기 때문에 NOx의 배출은 증가하게 된다.⁹⁾ THC 배출 또한 저압으로 연료를 분사할 경우, 분사가 거의 끝날 무렵에 분사기의 끝에서 낮은 속도로 분사되는 연료가 고압으로 분사할 경우에 비하여 많고, 이렇게 낮은 속도로 분사되는 연료가 연소되지 않고 그대로 배출되므로, 저압연료분사시의 THC 배출수준은 고압으로 분사하는 경우에 비해 더 높다. 또한 저압으로 연료를 분사할 경우 착화기간이 길어지는 것도 THC의 배출이 증가하게 된 원인중의 하나이다.¹⁰⁾ 그러나 저압, 고압의 경우 모두 불완전 연소에 의한 CO나 smoke 배출의 특징적인 변화는 거의 나타나지 않았다. 앞서 기술한 분사압력에 따른 변화의 경향은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 연소실내부 압력선도와 열방출률 선도를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3의 결과로부터, 적용된 모든 분사조건에 대하여 분사압력에 대한 IMEP의 변화경향이 일관되게 유지되는 것으로 보아, 이러한 결과가 단순히 착화 지연에 의해 저압분사에 최적화된 조건에서 비롯된 것은 아님을 알 수 있다. 따라서 특정한 분사시기의 선정 없이도, 임의의 분사시기에 대한 실린더 내 압력 및 열방출률선도는 본 연구조건에서 나타난 연소현상을 충분히 대변할 수 있다.

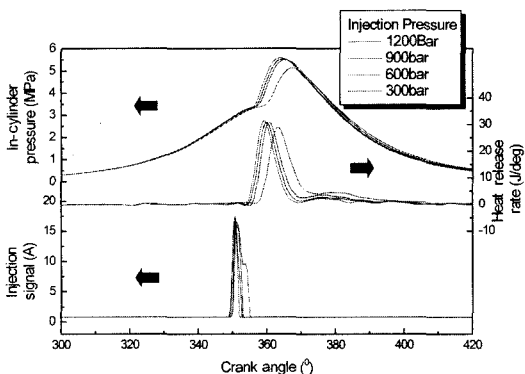


Fig. 4 Effect of injection pressure on combustion characteristic curve (Injection at BTDC 11.9 CA)

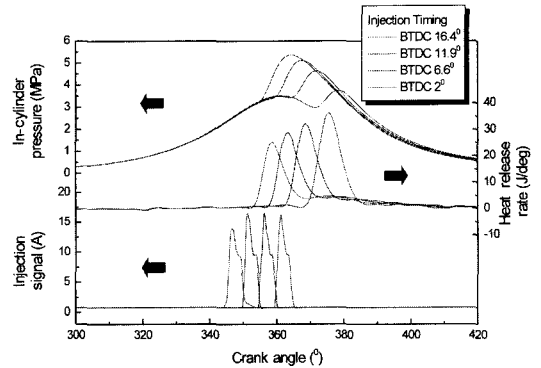


Fig. 5 Effect of injection timing on combustion characteristics

Fig. 4는 분사시기를 BTDC 11.9 °CA로 일정하게 하고 분사압력을 300 bar에서 1200 bar까지 변화시켰을 경우의 실린더 내부의 압력 변화와 열방출률을, 그리고 그래프의 가장 아래 부분은 연료분사 인가신호를 전류 값으로 나타낸 결과이다. 연소실 압력은 분사압력 300 bar인 경우를 제외하고는, 나머지 조건들의 경우에는 변화경향 뿐만 아니라 정량적으로도 매우 유사한 수준을 나타내고 있다. 다만 분사압력 300 bar인 경우는 착화지연이 확연히 길어서, 열방출에 의한 압력상승은 대부분 TDC 이후의 팽창행정에 기여한다. 그러나 분사압력이 높은 경우에 비해서, 연료 미립화 및 예혼합 수준의 차이에 따른 연소상태, 그리고 팽창행정에서 시작된 압력상승 때문에 최고압력은 낮다. 하지만, TDC 이전의 압력상승에 따른 압축일의 손실이 거의 없고, 팽창행정 중의 압력수준이 지속적으로 높은 점 등이 IMEP가 증가하는 결과를 낳은 원인으로 분석된다. 이와 같이, 분사시기는 피스톤 운동의 기구학적 타이밍과 적절한 조화를 이루어야 하며 이를 구체적으로 확인하기 위해, 본 연구에서 IMEP의 증가가 두드러진 분사압력 300 bar의 경우에 대하여 분사시기가 연소현상에 미치는 영향에 관해 보다 상세하게 살펴본다.

Fig. 5는 분사압력을 300 bar로 고정하고 분사시기를 BTDC 16.4 °CA부터 BTDC 2 °CA까지 변화시키면서 연소실 압력과 열방출률의 변화를 관찰한 결과이다. 분사시기를 지연시킬수록 착화지연의 증가로 인해 열방출률의 구배는 크게 증가하지만,

TDC 이후로 지나치게 지각된 경우는 연소실 내 압력 및 온도 상승에 기여하기 어렵기 때문에, 출력저하는 물론 배기조성에도 영향을 가져온다. 특히 NOx의 경우 열적기구 (thermal mechanism)에 주로 좌우되기 때문에, 저하된 연소가스 온도의 영향으로 인해 전반적으로 낮은 배출수준을 갖게 된다.

Fig. 6, 7은 분사시기 BTDC 5 °CA일 때, 분사압력을 300, 1200 bar로 달리한 경우의 연소진행상황을 나타낸 결과들이다. 사진을 통해 확인할 수 있듯이, 동일시각에 비교했을 때 분사압력이 300 bar인 경우는 예혼합 수준을 반영하듯, 착화위치가 분무자체에 국한되어 있는 반면, 1200 bar의 경우는 이미 푸른색의 청염이 발생할 정도로 가연혼합기의 형성수준은 대폭 향상된다. 또한 높은 휘도는 물론 국소적인 화염분포를 보이는 300 bar의 경우와는 달리, 1200 bar의 경우에는 연소실 전체에 걸쳐 형성된 가연혼합기에 의해 희박연소가 진행되는 결과를 확인할 수 있다.

할 수 있다.

Fig. 8은 분사압력 300 bar이고 분사시기가 BTDC 15 °CA인 경우로서, 분사시기 BTDC 5 °CA인 Fig. 6의 결과와 비교할 수 있다. 분사시기가 이르기 때문에, TDC 이전에서 이미 강한 휘도를 갖는 휘염이 발생하기 시작하며, 약 ATDC 10°CA 이후에는 중심부에 화염의 존재가 거의 관찰되지 않는다. 따라서, 분사시기의 진각에 따른 급격한 열방출에 의해 높은 연소압력을 얻을 수는 있으나, TDC 이전의 압축과정에서 압력상승이 시작되므로 일의 측면에서는 손실이 발생함을 가시적으로 확인할 수 있다. 또한 분사시기의 진각에 따라 연소기간은 감소했지만, 예혼합연소에 의한 급격한 열방출 및 NOx 생성에 유리한 고온유지기간의 증가에 따라, NOx의 배출수준 역시 증가하였으며, 이를 사진을 통해 추정할 수 있다.

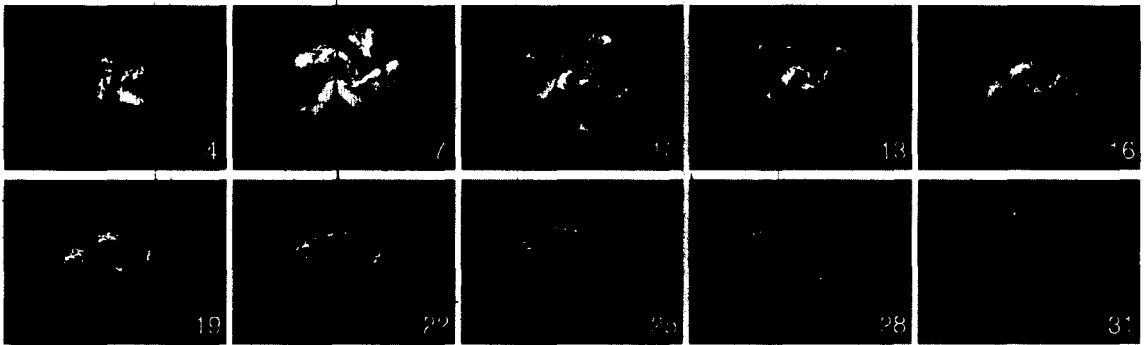


Fig. 6 High-speed images of combustion(crank angle with respect to TDC)
Test condition : 300 bar, injection at 5 degree BTDC

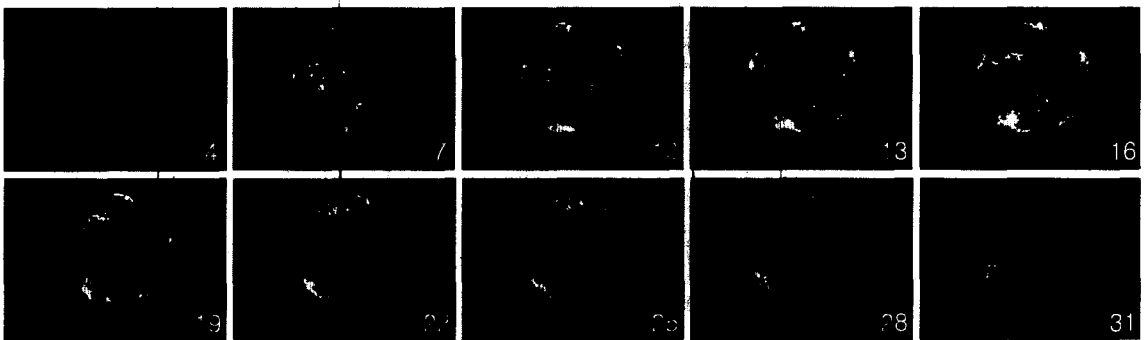


Fig. 7 High-speed images of combustion(crank angle with respect to TDC)
Test condition : 1200 bar, injection at 5 degree BTDC

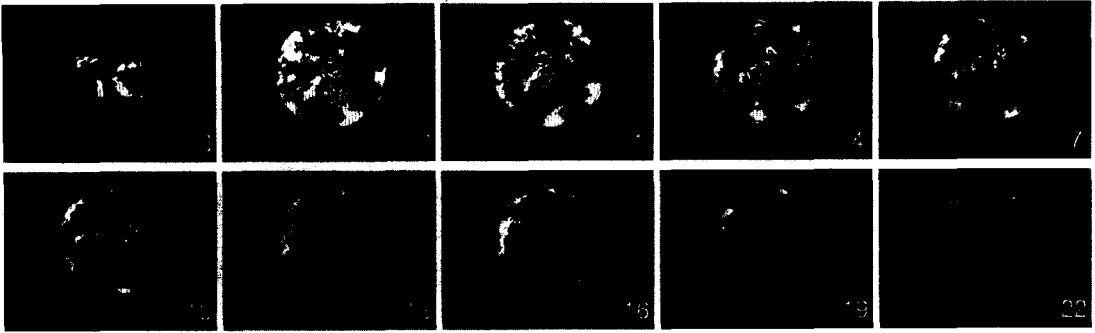


Fig. 8 High-speed images of combustion(crank angle with respect to TDC) Test condition : 300 bar, injection at 15 degree BTDC

3.2 파일럿분사(Pilot Injection)

일반적으로 파일럿분사를 적용할 경우, 주분사 연료의 착화지연을 단축시켜 급격한 열방출에 따른 소음과 질소산화물을 저감할 수 있는 장점이 있다.^{11,12)}

Fig. 9는 분사압력 300 bar, 주연료 분사시기 BTDC 6.6 °CA, 그리고 BTDC 26 °CA에서 파일럿분사를 실시한 경우와 하지 않은 경우의 연소실 내 압력과 열방출률의 변화를 각각 나타낸다. 결과를 통해 확인할 수 있듯이, 파일럿분사에 의해 착화지연이 단축되고 급격한 압력상승을 피할 수 있어, 질소산화물 및 소음의 저감에 효과가 있음을 추정할 수 있다. 다만 연소속도의 저하와 확산연소 단계로의 조기전환, 즉 예혼합연소분의 감소는 smoke를 증가시키는 원인이 되기도 한다.

Fig. 10은 Fig. 9와 동일한 조건에서의 파일럿 분사에 의한 IMEP 및 배기배출물의 변화를 나타낸다. 파일럿분사를 한 경우는 주분사 이전의 화염형성을 통해 열방출률의 최대값은 낮지만 TDC 전후의 매끄러운 압력상승구배를 갖는 반면, 파일럿분사를 하지 않는 경우에는 착화지연에 의해 열방출률은 높지만 발생위치가 지연되므로 연소실 압력상승에 완전하게 기여하지 못한다. 따라서 IMEP는 파일럿 분사를 적용한 경우에 전반적으로 높은 수준을 나타내었고, opacity는 확산연소기간의 증가로 인해 높은 배출수준을 보였다. PM과 trade-off 관계에 있는 NOx는 같은 이유로 파일럿분사를 적용하지 않는 경우가 다소 높은 수준을 나타내고 있다. 파일럿 분사가 CO에 미치는 영향은 미미하다고 판단되며,

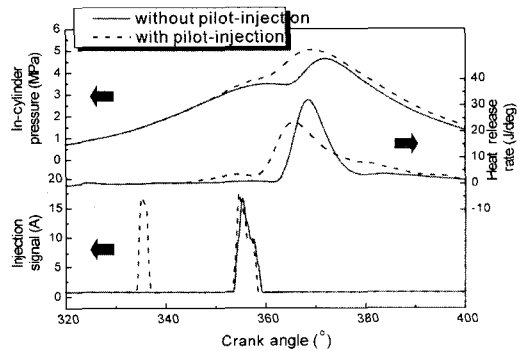


Fig. 9 Effect of pilot injection on combustion characteristics

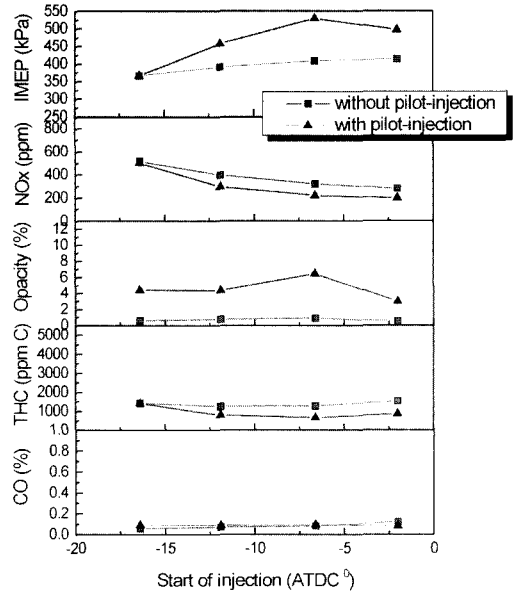


Fig. 10 Effect of pilot injection on engine performance and emissions

THC는 파일럿분사를 적용했을 경우 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 파일럿분사에 의한 예비화염의 조성이 연소에 효과적으로 사용되었음을 반증하는 결과라고도 볼 수 있지만, 한편으로는 늘어난 연소지속시간에 의해 팽창과정에서의 비교적 높게 유지되는 온도가 THC의 산화에 유리하게 작용한 결과로도 해석될 수 있다.

3.2.1 저압분사

Figure 11은 연료 분사압력이 저압인 300 bar 인 경우에 대하여 파일럿분사시기가 연소성과 배기배출물에 미치는 영향을 나타낸다. 여기서 “Pilot Injection Advance”는 주연료 분사시기에 대한 파일럿분사시기의 차이를 크랭크각도로써 나타낸 값이다.

주분사만 이루어진 경우와 비교할 때, 같은 양의 연료가 분사되었음에도 불구하고 파일럿분사를 적용한 경우에는 분사시기의 진각이 30 °CA미만이면 출력은 크게 증가한다. 그러나 30 °CA 보다 진각된 40 °CA 나 50 °CA인 경우는 주연료만 분사한 경우와 비슷하거나 오히려 더 낮은 값을 보이고 있다. 이는 파일럿분사시기가 주분사에 비해 30 °CA이상 이 른 경우에 파일럿분사에 의해 조기에 분사된 연료가 연소되어 출력을 증가하는데 쓰이지 못하고 실린더 내부의 벽에 충돌하거나 기화되어 혼합기의 상태가 지나치게 희박해지기 때문으로 판단된다. 즉, 희박 혼합기가 충분히 연소되지 못한 상태에서 배기가스로 배출된다는 의미이다. 특히 주연료 분사시기가 TDC이후로 상당히 지각된 상태에서 이른 시기의 파일럿분사를 적용하는 경우 THC가 증가하는 현상은 이러한 추론을 뒷받침하는 근거라 할 수 있으며, CO의 배출경향 역시 THC와 같은 맥락에 해석할 수 있다. Opacity는 파일럿분사의 효과가 뚜렷하게 나타나는 10, 20 °CA 간격의 경우, 조기 확산연소의 이행으로 인해 PM이 증가하는 결과를 낳은 것으로 판단되며, 약 30 °CA 이상 주분사와 간격을 갖는 경우에는 오히려 불완전연소로 인해 입자상물질의 핵자(seed)가 되는 soot의 발생이 억제되므로 THC, CO만 증가하게 된다. NOx는 파일럿분사시기와는 거의 무관하게 주분사의 지연에 따라 배출수준이 결정되었다.

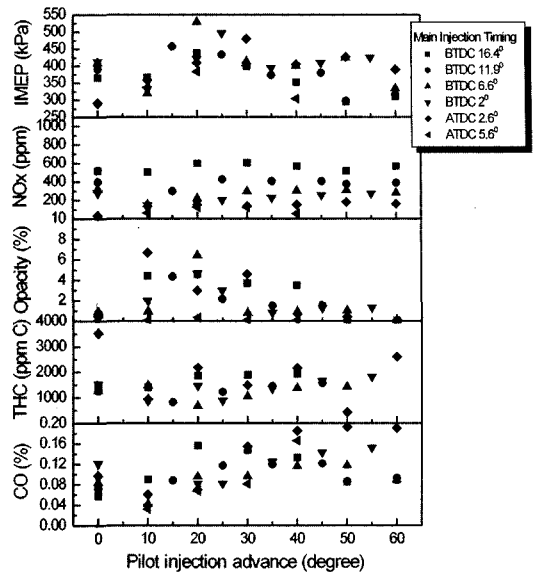


Fig. 11 Effect of pilot injection timing on engine performance and emissions at injection pressure of 300 bar

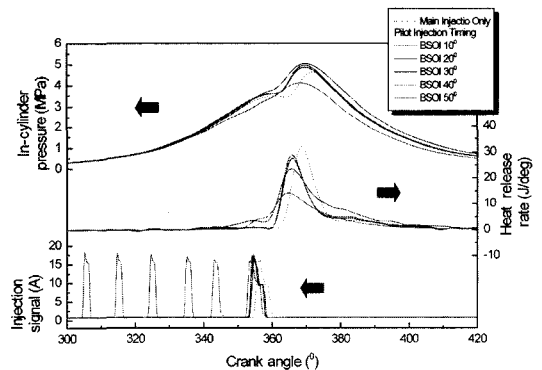


Fig. 12 Effect of pilot injection timing on combustion characteristic curves for 300 bar injection pressure

Fig. 12는 Fig. 11의 결과 중 전반적으로 가장 높은 출력성을 보인 주연료 분사시기가 BTDC 6.6°CA로 고정된 경우에 대하여, 파일럿 분사시기에 따른 연소실 내 압력 및 열방출률의 변화를 나타낸다. 파일럿분사를 적용할 경우, 주분사연료의 착화 이전에 발생하는 소폭의 열방출에 의해 주분사 연료에 의한 급격한 열방출 및 압력상승이 경감되므로, 연소소음 및 연소온도가 저감되고 따라서 NOx 또한 저감되는 경향이 일반적이다. 그러나 Fig. 12의 결과에서 확인할 수 있듯이, 파일럿분사

시기의 간격이 주분사와 20 °CA이내인 경우에만 파일럿분사에 따른 예비 열방출이 일어나며, 그 이상의 간격을 갖는 경우에는 주분사만 적용한 경우에 비해 오히려 열방출 및 압력의 상승폭이 감소된 결과를 볼 수 있다. 다만 파일럿분사와 주분사시기의 간격이 10 °CA인 경우는 착화지연을 감소시킬 수는 있으나, 열방출 및 압력상승 면에서는 비교적 큰 손실을 보이게 되며, 20 °CA의 간격을 갖는 경우 가장 이상적인 연소성능을 갖게 된다. 파일럿분사간격 30 °CA 이상에서 파일럿분사의 효과를 얻지 못하는 원인은 Fig. 11에서 설명한 바와 같이 파일럿분사에 의해 조성된 혼합기의 지나친 희박화 때문으로 추정된다.

Fig. 13은 파일럿 분사시기를 BTDC 26 °CA 고정하고 주 연료 분사시기를 변화(BTDC 16.4, 11.9, 6.6, 2 °CA)시키면서 실린더 내의 압력 및 열방출률 변화를 나타낸 결과이다. 실선은 주분사 외에 파일럿분사가 적용된 경우이고, 점선으로 나타낸 부분은 주 연료만 분사된 경우를 나타낸다. 파일럿분사를 적용할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 전반적으로 착화지연이 단축되고, 그 기간은 조건에 따라 다르지만 최대 약 2.6 °CA로 파일럿분사의 효과를 확인할 수 있다. 그러나, 이전의 결과와 마찬가지로 주분사와의 간격이 약 14 °CA 이내로 좁고 시기가 이른 BTDC 16.4, 11.9 °CA의 경우에는 조기 압력상승으로 인한 압축일의 손실을, 반대로 분사시기의 간격이 길고 시기가 늦은 BTDC 2 °CA의 경우에는 팽창일의 손실을 예상할 수 있다.

Fig. 14, 15는 분사압력 300 bar, 주분사시기

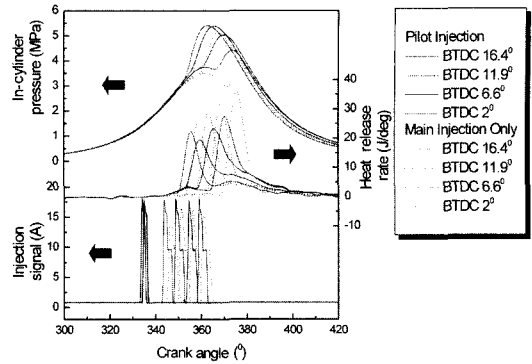


Fig. 13 Effect of pilot injection on combustion characteristics for injection pressure of 300 bar

BTDC 5 °CA, 그리고 파일럿분사시기를 각각 BTDC 25 °CA와 BTDC 45 °CA로 달리 하였을 때의 화염사진을 각각 나타낸다. 전자의 경우는 먼저 파일럿분사에 의한 착화가 일어나 희미한 화염이 관찰되다가, 주분사에 의해 연료가 도입되면 화염이 존재하는 부분을 시작으로 하여 분부를 중심으로 화염이 발달하게 된다. 이 때, 파일럿분사된 연료의 연소에 의해 주연료만 분사된 경우 볼 수 없었던 주분사 연료분부 화염의 형상을 눈으로 확인할 수 있다. 화염의 강도가 주 연료만 분사된 경우에 비해 훨씬 높고 연소 지속시간도 상당히 길어졌다. 이에 비해 후자의 경우는 압력이 충분하게 상승하지 않은 이른 시기에 파일럿분사가 이루어지기 때문에, 전자에 비해 조기에 연료가 연소될 내로 도입되었음에도 불구하고 최초의 착화는 오히려 늦게 관찰된다. 즉, 착화가 일어나지 않고 기화된 상태로 존재하던 희박 혼합기가 주연료의 분사에 따라 함께 연소됨을 확

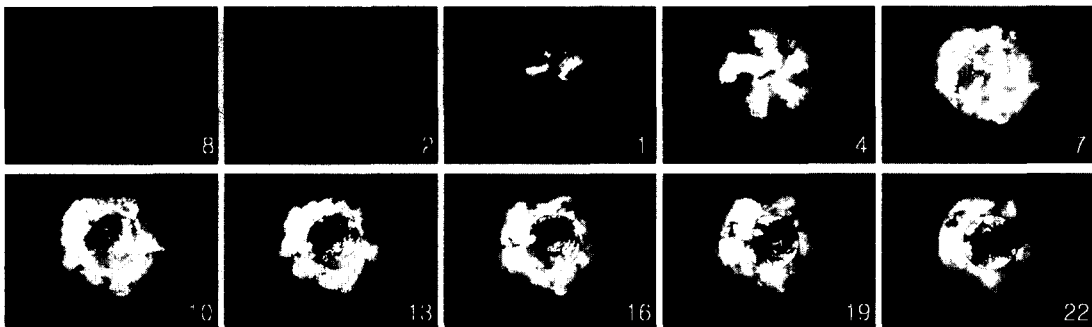


Fig. 14 High-speed images of in-cylinder combustion (crank angle with respect to TDC)
Test condition : 300 bar, main injection at 5 degree BTDC, pilot injection at 25 degree BTDC

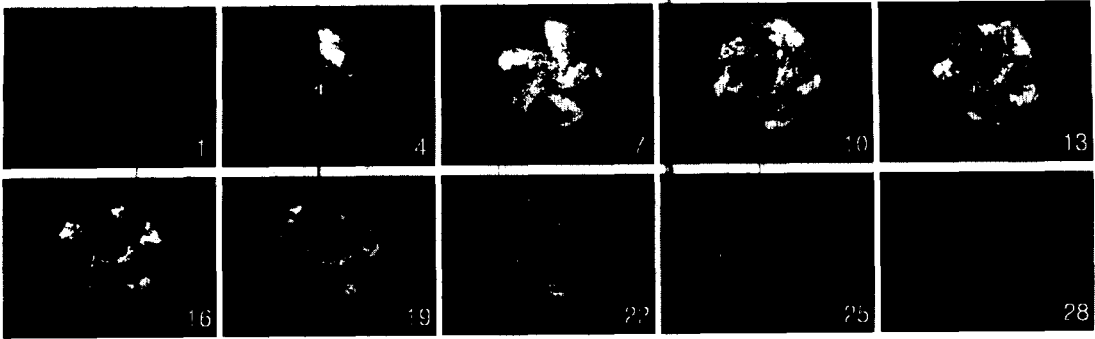


Fig. 15 High-speed images of in-cylinder combustion (crank angle with respect to TDC)
 Test condition : 300 bar, main injection at 5 degree BTDC, pilot injection at 45 degree BTDC

인할 수 있다. 따라서, 착화지연의 감소에는 큰 영향을 미치지 못하며, ATDC 7 °CA 경에 나타나는 급격한 화염의 출현을 정점으로 전자에 비해 비교적 낮은 휘도를 갖는 단축된 연소기간을 갖는다.

3.2.2 고압분사

고압으로 연료를 분사할 경우, 저압으로 분사하는 경우에 비하여 연료가 미립화가 잘되기 때문에 액적이 증발되는 시간과 주변의 공기와 혼합에 소요되는 시간이 단축된다. 분사압력이 1200 bar인 경우의 IMEP 및 배기배출물 분석결과를 Fig. 16에 나타낸다.

저압으로 연료를 분사할 경우와 마찬가지로 주 연료만 분사된 경우와 비교할 때, 파일럿 분사 시기의 진각 정도가 30 °CA 이내인 경우는 출력이 증가하고, 30 °CA 이상인 경우는 주 연료만 분사한 경우와 비슷한 수준을 나타낸다. 그러나 출력의 상승폭이 저압분사 경우에 비해 크지 않은데, 그 이유는 고압으로 연료를 분사할 경우 저압분사의 경우에 비해 분사기간이 길지 않고 착화지연기간이 단축되어 급속히 발생하는 예혼합연소가 지배적이 되므로 팽창일의 증가에 기여하지 못하기 때문으로 추정된다. 또한 고압분사의 경우 주분사만 적용하더라도 이미 파일럿분사를 실시한 경우에 근접하는 수준의 예혼합기가 조성될 수 있는 가능성은 높다.

NOx는 저압의 경우와 유사하게 파일럿 분사시기의 변화에 관계없이 주로 주연료 분사시기에 좌우되는 결과를 보였다. 즉, 고압으로 연료를 분사할 경우 착화지연에 미치는 파일럿분사의 영향이 뚜렷하지 않음을 알 수 있으며, 이는 압력 및 열방출을 선

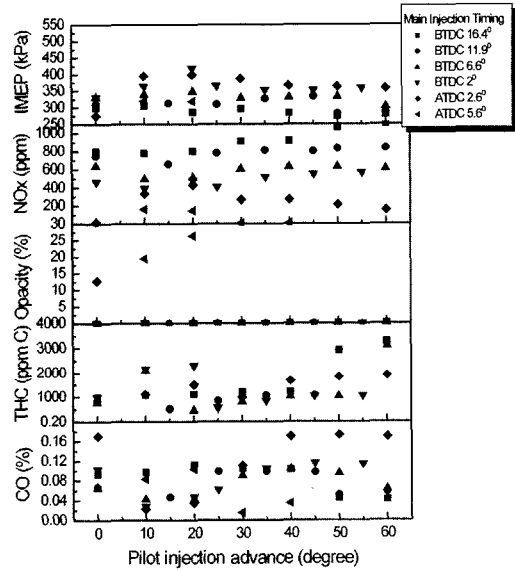


Fig. 16 Effect of pilot injection timing on engine performance and emissions at injection pressure of 300 bar

도를 통해서도 확인할 수 있다. Opacity는 주분사가 TDC 이후에 이루어지고, 특히 파일럿분사와의 간격이 좁은 경우에만 높은 수치를 보일 뿐, 고압으로 연료를 분사한 경우에는 매우 낮은 수준을 나타낸다. 다만, 파일럿분사간격이 약 40 °CA 이상 넓고 분사시기가 TDC 이후로 지각된 경우의 Opacity 저하는 오히려 불완전연소에 따른 결과로 여겨지며, 이는 THC 및 CO의 증가로써 설명될 수 있다. 고압분사의 경우 저압분사에 비해 파일럿분사의 영향이 크지는 않지만, 분사간격이 약 30 °CA 미만인 경우 THC, CO의 배출수준이 낮아지는 점은 정량적으로

3중분사가 HSDI 디젤엔진의 성능과 배기에 미치는 영향

유사하다. 그러나, 전반적으로 연료가 고압으로 파 일릿분사된 경우 저압에 비해 THC가 증가하였는데, 이는 과도하게 조성된 희박혼합기가 연소실 내에서 연소되지 않고 그대로 배출되기 때문인 것으로 판단된다. CO는 주연료만 분사된 경우와 비슷한 수준으로 배출되었다.

연료의 분사압력을 1200 bar로 하고, 주연료 분사시기를 BTDC 6.6 °CA로 고정하였을 때, 파 일릿 분사시기에 따른 연소실 압력과 열방출률의 변화를 Fig. 17에 나타낸다. 파 일릿 분사시기가 주분사시기와 10 °CA나 20 °CA정도로 가까운 경우를 제외하고는, 주분사 외에 파 일릿분사에 의한 낮은 열방출은 관찰되지 않는다. 따라서 주분사 연료에 의한 열방출률의 최대값 및 연소압력은 비슷한 수준을 보이며, NOx의 배출량이 줄지 않은 것도 이러한 원인에 따르는 것으로 생각할 수 있다.

파 일릿 분사시기를 BTDC 26 °CA로 고정하고, 주 연료 분사시기를 변화시키면서 실린더 내 압력 변화와 열방출률 변화를 관찰한 결과를 Fig. 18에 나타낸다. 저압으로 연료를 분사하였을 경우와 유사하게, 고압의 경우에도 파 일릿 분사를 적용할 경우 그렇지 않은 경우에 비해 착화지연은 전반적으로 단축되며, 단축되는 기간은 최대 약 5 °CA이다. 이는 분사압력 300 bar인 경우의 약 2.6 °CA에 비해 향상된 결과이며, 고압분사에서 파 일릿분사의 영향이 전반적으로 뚜렷하지는 않지만, 효과를 보이는 특정조건에서의 정량적인 영향은 비교적 크다는 사실을 확인할 수 있다.

Fig. 19는 연료 분사 압력이 1200 bar인 경우 파

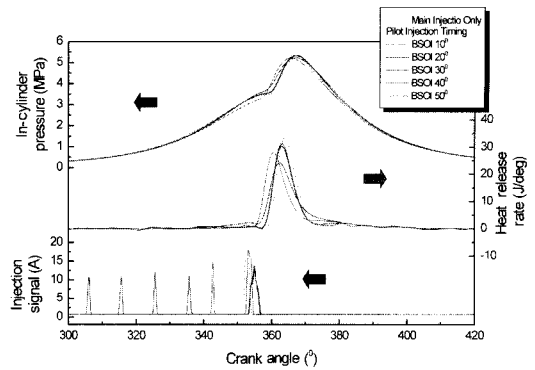


Fig. 17 Effect of pilot injection timing on combustion characteristics

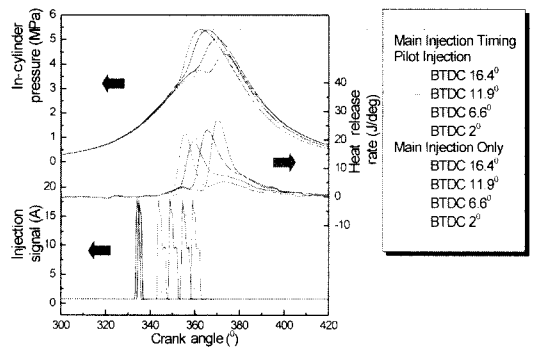


Fig. 18 Effect of pilot injection on combustion characteristic curve at injection pressure of 1200 bar

일릿분사된 조건에서의 화염사진을 나타낸다. 주연료만 분사된 경우와 달리, 예혼합에 의한 청염이 나타나기 이전에 파 일릿분사된 연료의 착화에 의한 휘염이 국부적으로 나타나고 있다. Fig. 14, 15에서 볼 수 있었던 저압분사에 의한 화염과는 달리, 고압

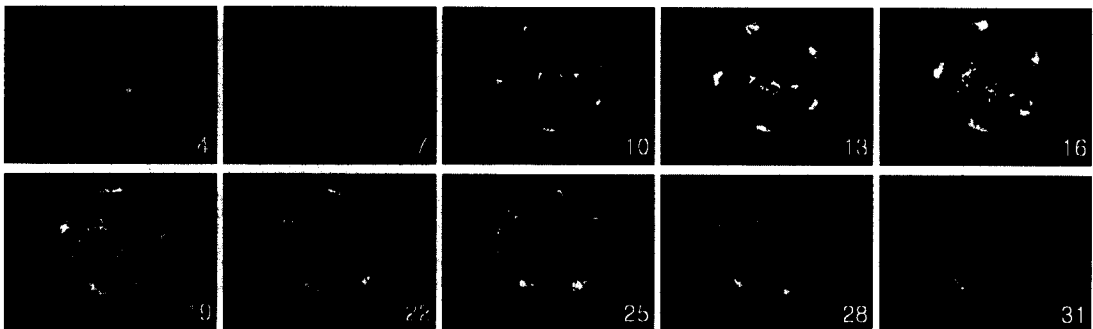


Fig. 19 High-speed images of in-cylinder combustion (crank angle with respect to TDC)
Test condition : 1200 bar, main injection at 5 degree BTDC, pilot injection at 25 degree BTDC

분사된 경우 착화지연의 단축은 물론 예혼합수준이 크게 향상되어 착화 및 연소가 진행되는 위치는 분무의 공간적 분포에 좌우되던 저압분사시와는 확연히 다른 양상을 보인다. 또한 높은 휘도를 갖는 휘염에 비해 예혼합에 의한 초기 청염의 비중이 크게 늘어난 점은 높은 수준의 질소산화물 생성을 암시하기도 하지만, soot의 생성이 크게 저감될 수 있음을 확인할 수 있는 부분이다.

3.3 후분사(After-Injection)

일반적으로, 후분사(After-Injection)기법은 연소실 내부의 연소가스 온도를 상승시키고, 부가적인 연소를 통해 디젤엔진에서의 입자상 물질을 저감하는데 효과적인 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

Fig. 20은 분사압력이 300 bar일 때, 열방출 및 연소압력에 미치는 후분사의 영향을 나타낸다. 주연료 분사시기는 BTDC 10°CA로 일정하며, 후분사가 적용된 경우는 ATDC 10°CA에서 추가적인 분사를 실시하였다. 후분사를 적용한 경우, 주분사만 했을 때 보다 주분사시기에 분사되는 연료량이 적기 때문에, 연소실 내부의 압력 및 열방출률의 최대값이 모두 상대적으로 낮아진다.

열방출률의 변화를 보다 구체적으로 살펴보면, 연료가 주분사만 된 경우는 예혼합연소에 의한 급격한 열방출이 나타나고, 이어서 확산연소에 의한 낮은 구배를 볼 수 있다. 반면, 후분사가 된 경우에는 열방출률이 거의 끝나가는 시기에 후분사에 의한 새로운 낮은 언덕 모양의 열방출이 일어나는 것을 볼 수 있다. 따라서 후분사가 적용된 경우에는 주연료의 분사 이후에 후분사된 추가적인 연료로 인한 후연소를 통해 smoke가 저감될 수 있다.

Fig. 21은 후분사가 IMEP 및 배기배출물에 미치는 영향을 주분사의 경우와 비교하여 나타낸 결과로서, 연료의 분사압력이 300 bar일 때 주연료의 분사시기의 변화에 따른 분석결과들을 도시하였다.

후분사는 주분사를 기준으로 매 시기보다 20°CA 만큼 지각된 시기에 실시되었다. Fig. 20의 압력 및 열방출선도에서 예상할 수 있었듯이, 소량의 후분사가 팽창일에 미치는 영향은 극히 적기 때문에, 후분사를 적용한 경우 IMEP는 저하된다. 반면 후분사

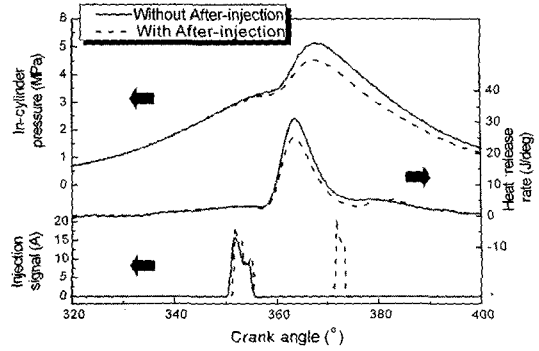


Fig. 20 Effect of after-injection on combustion characteristics

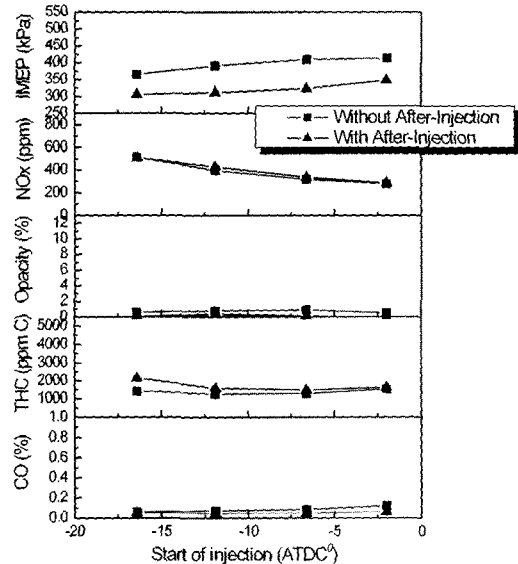


Fig. 21 Effect of after-injection on engine performance and emissions

를 적용하더라도 착화지연에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, NOx의 배출에는 거의 변화가 없었다. Opacity는 적은 비율이기는 하지만 감소되었음을 확인할 수 있었으나, 무부하조건에서 실시된 본 연구에서는 정량적으로 뚜렷한 저감효과를 얻을 수 없었다. THC는 주분사만 적용한 경우에 비해 다소 높거나 유사한 수준이며, 반대로 CO는 낮거나 같은 배출수준을 나타내지만, 그 차이는 미미하다.

3.3.1 저압 분사

후분사 역시 앞서 살펴보았던 과일릿분사의 경우와 마찬가지로 분사압력에 따른 연소특성의 변화가

있을 것이라 예상되므로, 이를 보다 상세하게 파악할 필요가 있다.

Fig. 22는 분사압력 300 bar인 경우, 후분사 시기가 IMEP 및 배기특성에 미치는 영향을 주분사시기 및 후분사시기에 따라 나타낸 결과이다. 후분사시기가 주분사시기와 10 °CA 정도로 가까운 경우를 제외한 나머지의 경우는 주 연료만 분사한 경우에 비해 낮은 출력을 보였다. 두 분사시기간의 간격이 가까운 경우에 출력이 증가하는 이유는 착화가 일어난 직후에 추가로 분사된 연료가 화염과 직접 접촉하여 바로 확산연소를 일으키므로 팽창일의 효율성을 증가시키기 때문으로 볼 수 있다. 그러나, 이렇게 두 분사시기간의 간격이 좁을수록 출력이 증가하는 장점이 있는 반면, 후분사된 연료가 확산연소 단계로 급속히 이행함에 따라 smoke가 증가하게 되는 단점도 있다. 다시 말해, 이는 앞서 기술한 바와 같이, 화염이 존재하는 영역에 추가적인 연료의 분사로 인하여 연료와 화염이 직접적인 접촉을 하게 되는데, 이 때 미처 미립화 되지 못한 연료가 soot와 만나면서 soot 입자의 크기를 확대시키고, 이것이

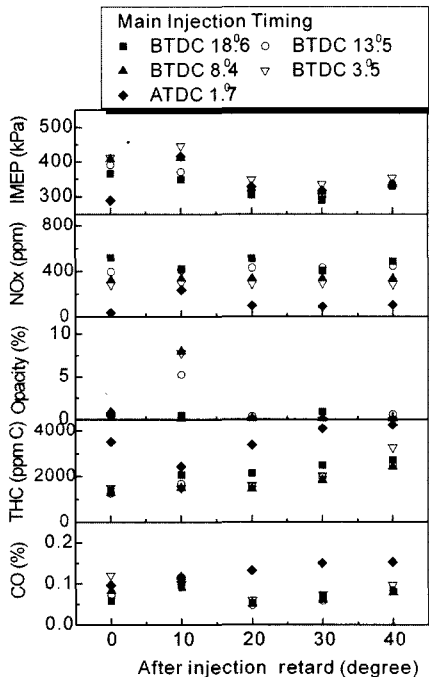


Fig. 22 Effect of after-injection on engine performance and emissions at injection pressure of 300 bar

smoke의 배출을 증가시키는 원인이 된다. NOx는 후분사시기의 변화과 관계없이 주분사만 실시한 경우와 비슷한 수준을 유지하였다. CO는 주분사시기가 TDC 이후로 지각된 경우를 제외한 나머지의 조건에서 다소 감소하였으나, THC의 경우 주분사와 후분사간의 간격이 클수록 증가하는 경향을 보인다. 이러한 원인은 조기에 조성된 지나치게 희박한 혼합기가 원인이 되었던 파일럿분사의 경우와는 다소 다르게, 분사간격이 클수록 즉, 팽창과정 후반부에 분사될수록 주분사에 의한 화염과 결합된 재연소효과를 기대하기 어렵고, 또한 연소가스의 온도가 저하됨에 따라 THC의 충분한 산화가 어려워지기 때문으로 추정된다.

Fig. 23에 주 연료의 분사시기를 BTDC 8.4°CA로 고정하였을 때, 후분사시기의 변화에 따른 압력과 열방출률 선도를 나타낸다. 여기서 점선으로 나타낸 부분은 주연료만 분사된 경우이다. 분사간격이 40 °CA인 경우라도 후분사에 의한 열방출은 명확하게 나타나고 있지만, 이로 인한 압력상승 효과는 거의 관찰되지 않는다.

Fig. 24는 주연료 분사시기보다 각각 20 °CA 일정하게 지각된 시기에 후분사 되도록 하고, 주연료의 분사시기를 변화시키면서 연소실 압력 및 열방출률의 변화를 나타낸 결과이다. 각각의 경우에 대하여 주분사만 적용하는 경우보다 주 분사시기에 분사되는 연료량이 적기 때문에 연소실 압력 및 열방출률의 최대값은 모두 상대적으로 낮지만 비슷한 양상을 유지하고 있으며, 후분사에 의한 열방출은

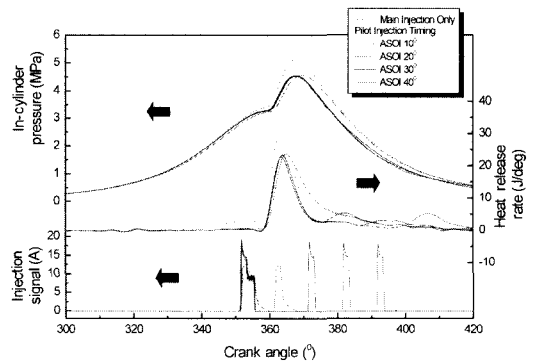


Fig. 23 Effect of after-injection timing on combustion characteristics at injection pressure of 300 bar

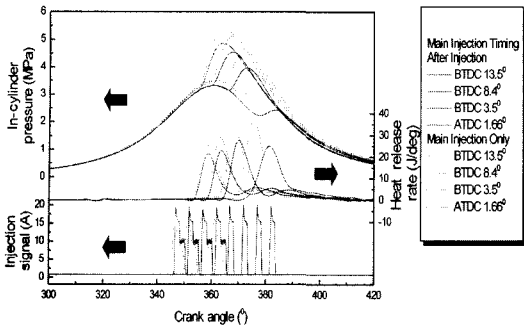


Fig. 24 Effect of after-injection on combustion characteristics at injection pressure of 300 bar

모든 경우에 대하여 관찰된다. 후분사는 연소실 압력상승에 큰 영향을 미치지 못하기 때문에, 파일럿 분사의 경우와 마찬가지로 주분사시기에 의해 연소 특성은 좌우된다. 특히 주분사시기가 TDC 이후의 조건인 ATDC 1.65°CA인 경우에는 나머지 조건들에 비해 착화지연기간이 상대적으로 길어졌으며, 이로 인한 급격한 열방출에도 불구하고 압력상승에

대한 기여는 적다.

Fig. 25와 Fig. 26은 분사압력이 300 bar로 저압인 경우에 후분사의 적용이 연소에 미치는 영향을 파악하기 위한 연소 영상들로서, 각각 ATDC 5°CA와 ATDC 35°CA의 시기에 후분사가 적용된 경우를 나타낸다. 두 조건은 Fig. 22에서 검토한 결과들 중에서, 후분사에 의해 오히려 smoke가 증가한 조건과, 저감이 이루어진 조건을 각각 대변한다.

Fig. 25를 살펴보면 주 분사된 연료에 의해 착화가 일어난 후, 후분사에 의해 추가된 연료로 인해 주 연료만 분사된 경우에 비해 휘염의 강도가 훨씬 높아지고, 이러한 경우에 smoke의 증가를 예상할 수 있다. 이는 재연소에 의한 저감을 목적으로 후분사된 연료가 주분사에 의한 확산화염과 직접 접촉하면서, 오히려 주분사시기의 분사량만 증가시킨 결과로 나타났다. 파일럿분사가 적용된 경우와 마찬가지로 화염의 공간적인 분포는 주분사된 연료분무에 좌우되며, 화염의 위치가 대략적으로 연료분무

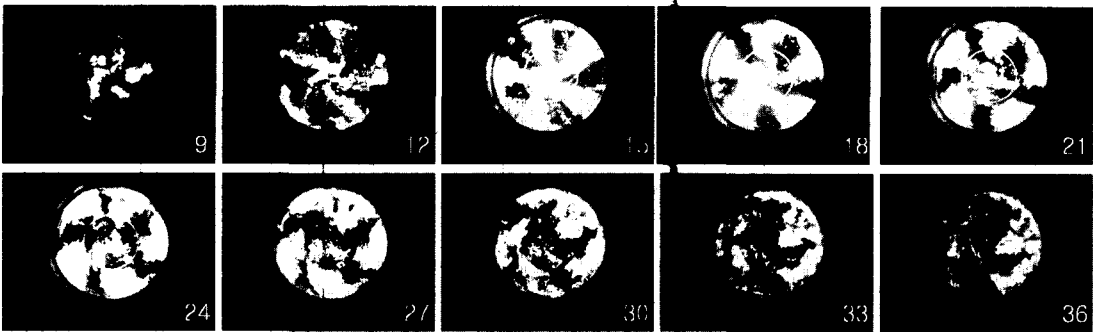


Fig. 25 High-speed images of in-cylinder combustion (crank angle with respect to TDC)
Test condition : 300 bar, main injection at 5 degree BTDC, after-injection at 5 degree ATDC

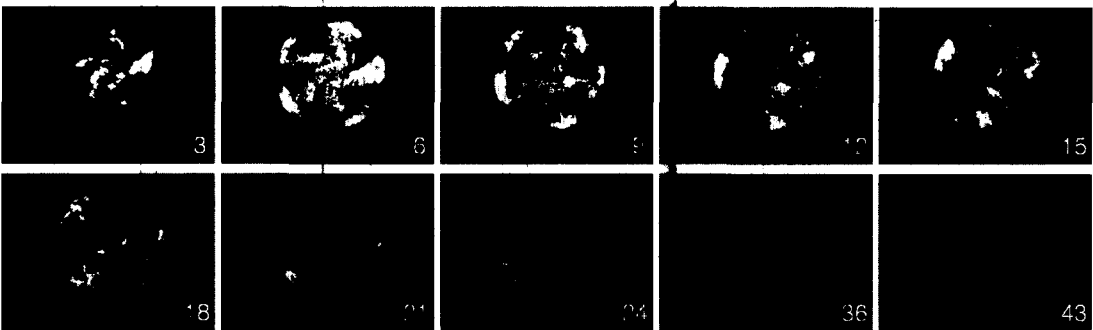


Fig. 26 High-speed images of in-cylinder combustion (crank angle with respect to TDC)
Test condition : 300 bar, main injection at 5 degree BTDC, after-injection at 35 degree ATDC

와 일치하므로 후분사된 분무 또한 관찰할 수 있다. 그리고, 전반적인 연소 지속시간 또한 증가하였음을 알 수 있다. 이에 반해 Fig. 26의 사진들을 살펴보면 주분사된 연료의 연소가 거의 끝나갈 무렵 추가적으로 분사된 연료에 의해 후연소가 일어나는 현상을 관찰할 수 있다. 이 때의 후분사에 의한 화염은 Fig. 25의 경우와는 달리, 강한 휘염의 발생없이 연소실 내의 soot를 재연소할 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

3.2.2 고압 분사

일반적으로 후분사를 이용하면 연소 말기에 부가적인 연소를 통해 입자상 물질을 저감할 수 있다. 그러나 1200 bar와 같은 고압분사조건에서는 특히, 본 연구의 실험영역인 무부하, 저속(800 rpm) 조건에서는 파일럿분사를 적용하더라도 smoke의 증가가 나타나지 않기 때문에 후분사의 장점을 확인하기는 어렵다. 그러나 본 연구에서는 실험 인자의 하나로서 고압분사조건을 택하였을 때, 후분사가 출력과 배기특성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

Fig. 27은 분사압력 1200 bar에서 주연료 분사시기의 변화가 IMEP 및 배기배출물에 미치는 영향을 나타낸 결과로서, 각각의 조건에 대해서 파일럿분사시기를 주분사시기로부터 10°CA에서 40°CA까지 10°CA의 간격으로 지각시켰을 때의 변화를 보여주고 있다.

후분사가 출력에 미치는 영향은 파일럿분사의 영향에 비해 비교적 미미한 편이며, 본 연구의 결과에서도 그러한 경향을 확인할 수 있다. 그러나 적절한 분사간격의 조율에 따라서는 출력의 변화를 유발하기도 한다. 주연료 분사 이후 후분사 시기까지의 기간이 너무 길 경우, 후분사된 연료의 연소가 일어 기여하지 못하기 때문에 주연료만 분사한 경우에 비해 출력은 다소 낮아진다. 그러나, 일반적인 경향과는 달리 주연료의 분사시기가 ATDC 1.7°CA와 같이 지각된 경우, 후분사를 적용하면 주연료만 분사한 경우보다 출력이 높게 나타난다. 이러한 원인은 후분사를 적용한 경우, 부가적인 연소에 의하여 실린더 내 연소가스의 온도가 상승하여 주연료만 분사된 경우에는 분사시기가 너무 늦어 불완전 연소가 발생하던 조건에서도 후분사를 통한 연소촉진

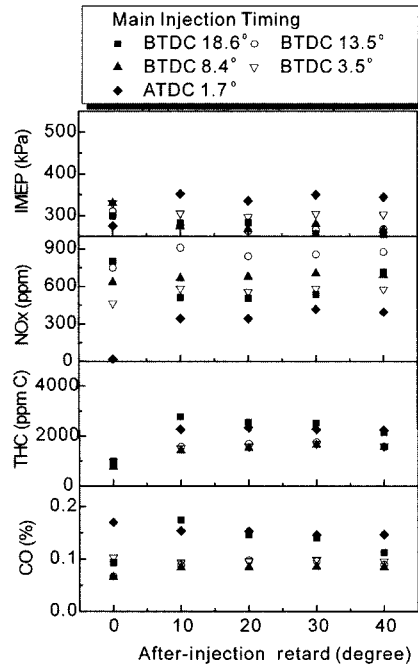


Fig. 27 Effect of after-injection on performance and emissions at injection pressure of 1200 bar

효과를 일으키기 때문으로 판단된다. 이는 NOx 배출의 변화를 통해서도 알 수 있다. 즉, 주분사시기가 ATDC 1.7°CA일 때는 NOx의 배출이 거의 없지만, 후분사를 적용한 경우에는 비교적 높은 증가추세를 보인다. 후분사를 적용할 경우, CO와 THC는 주분사만 적용하는 경우에 비해 TDC 이후의 주분사조건(ATDC 1.7°CA)을 제외하고는 증가하는 경향을 보이나, 분사간격에 따른 경향의 변화는 거의 관찰되지 않는다.

Fig. 28은 주연료의 분사시기를 BTDC 8.4°CA로 고정하였을 때 후분사시기의 변화에 따른 압력과 열방출률 선도를 나타낸 결과이다. 분사압력이 저압인 경우와 마찬가지로 상대적으로 적은 분사량으로 인해 연소압력과 열방출률의 최대값이 주분사만 이루어진 경우에 비해 낮고, 착화 지연 기간은 각각의 경우 거의 동일하게 나타났다. 저압으로 연료를 분사한 경우와 다른 점은 주분사시기를 기준으로 하여 10°CA에서 40°CA까지 10°CA의 간격으로 후분사가 되었음에도 불구하고, 후분사에 의한 열방출률의 변화가 나타나지 않는다는 점이다. 파일럿 분사에서와 유사하게, 고압으로 연료를 분사할

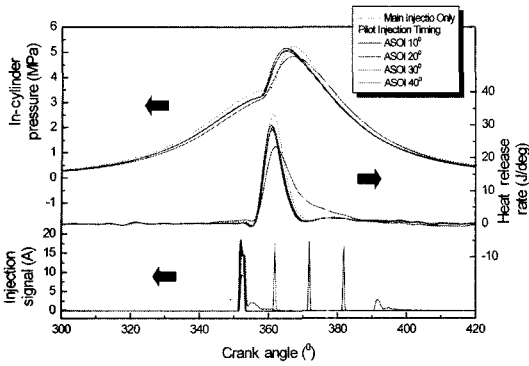


Fig. 28 Effect of after-injection timing on combustion characteristic curve at injection pressure of 1200 bar

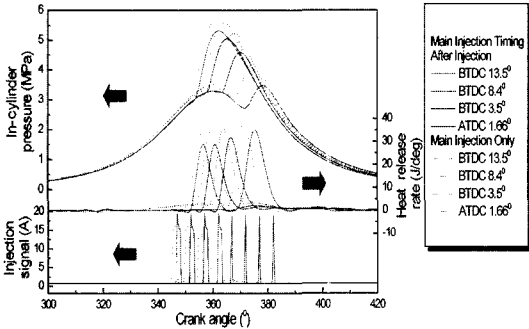


Fig. 29 Effect of after injection on combustion characteristic curve at injection pressure of 1200 bar

경우 지나치게 희박한 혼합기의 형성으로 후분사된 연료가 저압으로 분사된 경우만큼 원활히 연소되지 못하고 배기가스로 배출되는 것으로 판단된다. THC의 배출이 주분사만 된 경우에 비해 증가하는 것은 이러한 추론을 뒷받침하는 증거라 할 수 있다.

반면 CO의 배출은 거의 변화가 없었다.

Fig. 29는 주분사 및 주분사와 후분사가 동시에 적용된 경우에 대하여 연소압력과 열방출률의 변화를 나타낸 결과로서, 모든 경우에 대하여 후분사는 주연료 분사시기보다 20 °CA 만큼 지각되었다. 결과를 살펴보면 모든 경우에 대해서 후분사에 의한 열방출률 및 압력의 변화가 거의 관찰되지 않는다. 따라서 후분사 역시 파일릿 분사와 유사하게 출력 성능은 주분사에 의해 좌우되며, 결과적으로 출력 성능 보다는 배기 측면에 영향을 미치는 분사기법임을 확인할 수 있다.

Fig. 30은 분사압력 1200 bar에서 주분사는 BTDC 5 °CA, 후분사는 ATDC 5 °CA에 실시된 경우의 화염사진들을 나타낸다. 저압으로 연료를 분사한 경우와는 달리 후분사된 연료분무를 거의 확인할 수 없었고, 주 연료만 분사된 경우와 거의 동일한 화염이 나타났다. 그러나 후분사로 인해 주 분사되는 연료량이 적기 때문에 전체적인 화염의 강도는 주 연료만 분사된 경우에 비해 낮게 나타나고 화염의 지속시간도 짧은 것을 볼 수 있다.

3.4 3중분사(Triple Injection)

파일릿분사와 후분사의 동시적용, 즉 3중분사가 연소 및 배기특성에 미치는 영향을 파악하기 위해, 앞서 검토한 결과들을 토대로 각각의 조건들 중에서 적절한 분사시기를 선택하여 실험을 수행하였다. 3중분사의 경우에도 주분사 또는 파일릿, 후분사를 결합한 경우와 분사되는 연료의 총량은 동일하다.

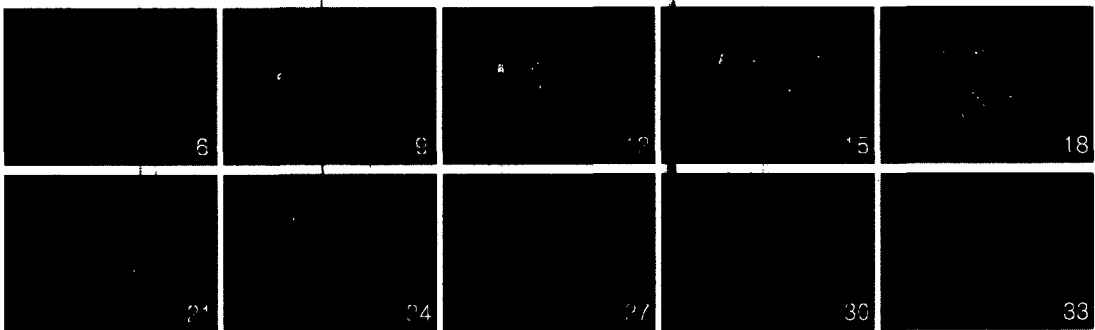


Fig. 30 High-speed images of combustion (crank angle with respect to TDC)
Test condition : 1200 bar, main injection at 5 degree BTDC , after-injection at 5 degree ATDC

Fig. 31은 주 연료만 분사된 경우와 3중분사가 적용된 경우의 실린더 내부 압력 및 열방출률의 변화, 그리고 Fig. 32는 IMEP 및 배기특성의 변화를 나타낸다. 주 연료 분사시기는 두 조건 모두 BTDC 5° CA로 동일하고, 3중분사가 적용된 경우의 파일럿 분사시기는 BTDC 35° CA, 후분사시기는 ATDC 15° CA로, 그 간격은 각각 BSOI 30° CA, ASOI 20° CA이다. Fig. 31에서 볼 수 있듯이 3중분사가 적용된 경우에는 주분사만 실시된 경우에 비하여, 착화 지연의 감소를 통해 TDC 이후에서 지각된 열방출에 따른 연소압력의 손실을 보상하고 있다. 이는 분사압력에 관계없이 나타나고 있으며, 특히 300 bar의 분사압력인 경우라도 3중분사를 통해 1200 bar의 분사압력의 주분사를 적용하는 경우에 상당하는 최고연

소압력을 갖는다. 다만 분사압력 1200 bar에서 3중분사를 적용하는 경우는 300 bar의 경우에 비해 후분사에 의한 열방출이 뚜렷하게 관찰되지 않는데, 이는 주분사시의 높은 분사율 및 빠른 가연혼합기 조성환경에 따라 연소지속시간이 감소함에 따라 주연소 화염과의 접촉가능성이 낮아져, 추가분사된 연료가 충분히 연소되지 못하기 때문으로 추정된다.

Fig. 32는 엔진의 출력 및 배기 (NOx, Opacity)에 미치는 3중분사의 영향을 주분사의 경우를 기준으로 나타내고 있다. 검은 색의 닫힌 점은 주 연료만 분사된 경우를, 그리고 사각형과 원형의 점은 각각 NOx와 opacity를 나타낸다. 본 연구의 실험영역인

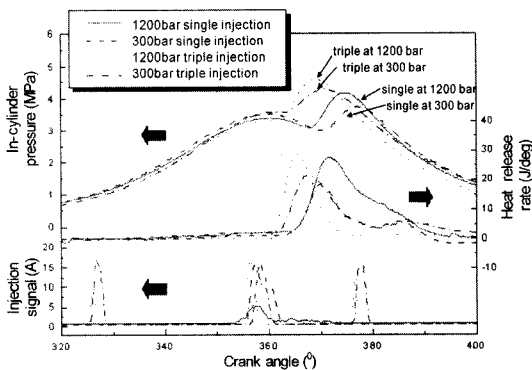


Fig. 31 Effect of triple injection on combustion characteristics; main injection at 5 degree BTDC, pilot-injection at 35 degree BTDC, after-injection at 15 degree ATDC

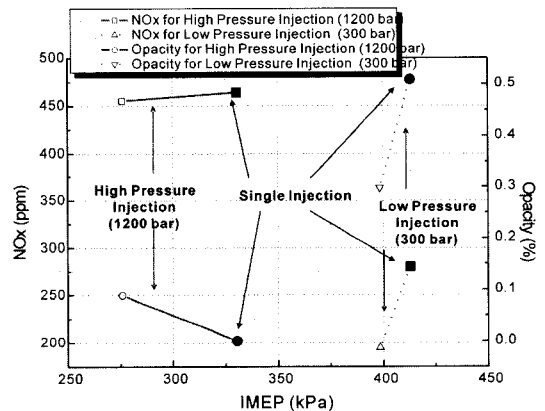


Fig. 32 Effect of triple injection on performance and emissions; main injection at 5 degree BTDC, pilot-injection at 35 degree BTDC, after-injection at 15 degree ATDC

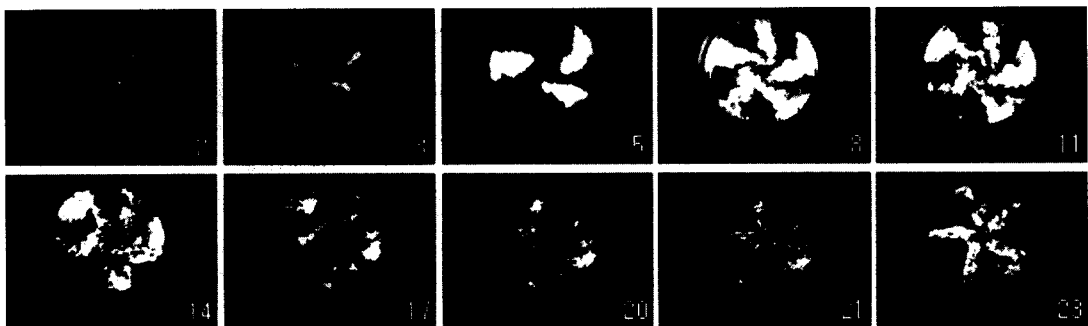


Fig. 33 High-speed images of combustion (crank angle with respect to TDC)
Test condition: 300 bar, main injection at 5 degree BTDC, pilot injection at 35 degree BTDC and after-injection at 15 degree ATDC

무부하 운전상태에서 고압분사조건의 경우, NOx의 배출수준이 주연료만 분사한 경우와 거의 동일한 수준을 유지하는 반면, opacity는 다소 증가하는 결과를 볼 수 있다. 그러나 저압분사 조건에서는 IMEP의 저하없이 상당한 수준의 NOx 및 opacity 저감을 이룰 수 있었다. IMEP의 감소는 3~4%에 불과한 반면, NOx는 30%, opacity는 40% 저감됨을 확인할 수 있다.

Fig. 33은 저압분사조건에 해당하는 분사압력 300 bar에서 3중분사를 적용한 경우의 연소영상이다.

ATDC 2 °CA부터 파일럿분사에 따른 미소한 예비화염이 관찰되다가, ATDC 5 °CA를 시작으로 ATDC 8 °CA에 이르면 주연료분부 전체에 걸쳐 화염이 형성된다. 파일럿분사를 적용함에 따라 주분사만 적용한 Fig. 5의 결과에 비해 다소 긴 연소기간을 갖게 되지만, 이 때문에 ATDC 21 °CA부터 관찰되는 후분사 연료는 긴 착화지연을 갖지 않고도 재연소에 참여할 수 있게 된다.

4. 결론

커먼레일 시스템을 장착한 단기통 디젤엔진을 이용하여 저속 (800 rpm), 무부하 조건에서 3중 분사 가연소 및 배기특성에 미치는 영향을 파악하였으며, 다양한 분사인자에 대하여 연구한 결과는 다음과 같다.

- 1) 분사압력이 저압에서 고압으로 갈수록 착화 지연기간이 단축되고 THC의 배출량은 감소하나 NOx의 배출량이 증가하고 도시평균유효압력이 낮아지는 단점이 있다.
- 2) 파일럿분사를 할 경우에는 하지 않았을 경우에 비해 착화지연기간이 단축되고, 주 분사와의 간격이 20 °CA 정도로 가까운 조건에서는 출력이 증가하지만, smoke의 배출이 늘어나는 단점이 있다.
- 3) 파일럿분사를 적용할 경우, 저압분사의 경우가 고압분사의 경우보다 파일럿분사에 의한 출력 상승효과가 크게 나타났다.
- 4) 파일럿 분사시기와 주분사 시기간의 간격이 너무 길 경우 파일럿분사의 효과를 기대할 수 없었다.

- 5) 저압분사조건에서는 후분사를 통해 주 연료만 분사된 경우에 비해 smoke의 저감이 가능하다.
- 6) 고압분사조건일수록 후분사에 의해 완전히 연소되지 못하고 희박한 혼합기 상태로 배기로 배출되는 혼합기량이 증가하였으며, 이는 THC의 증가로 나타났다.
- 8) 연료가 고압으로 후분사 될 때는 후분사의 효과가 거의 나타나지 않았다.
- 9) 3중분사를 통해 IMEP의 감소는 3~4%에 불과한 반면, NOx는 최대 30%, opacity는 40% 저감되었으며, 고압보다는 저압분사의 경우에 뚜렷한 효과가 나타났다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실(NRL) 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- 1) M. Lapuerta, O. Armas, J. J. Hernandez, "Effect of the Injection Parameters of a Common Rail Injection System on Diesel Combustion Through Thermodynamic Diagnosis," SAE 1999-01-0194, 1999.
- 2) T. Kato, T. Koyama, K. Sasaki, K. Mori, K. Mori, "Common Rail Fuel Injection System for Improvement of Engine Performance on Heavy Duty Diesel Engine," SAE 980806, 1998.
- 3) T. Tsurushima, L. Zhang, Y. Ishii, "A Study of Unburnt Hydrocarbon Emission in Small DI Diesel Engines," SAE 1999-01-0512, 1999.
- 4) L. Zhang, "A Study of Pilot Injection in a DI Diesel Engine," SAE 1999-01-3493, 1999.
- 5) M. Durnholz, H. Endres, P. Frisse, "Preinjection - A Measure to Optimize the Emission Behavior of DI-Diesel Engine," SAE 940674, 1994.
- 6) T. Minami, K. Takeuchi, N. Shimazaki, "Reduction of Diesel Engine NOx Using Pilot Injection," SAE 950611, 1995.
- 7) N. Uchida, K. Shimokawa, Y. Kudo, M. Shimoda, "Combustion Optimization by Means

- of Common Rail Injection System for Heavy-Duty Diesel Engine,” SAE 982679, 1998.
- 8) Y. Yamaki, K. Mori, H. Kamikubo, S. Kohketsu, K. Mori, T. Kato, “Application of Common Rail Fuel Injection System to a Heavy Duty Diesel Engine,” SAE 942294, 1994.
 - 9) Y. H. Yun, K. M. Chun, “Parametric Study for Reducing NO and Soot Emissions in a DI Diesel Engine by Using Engine Cycle Simulation,” Transactions of KSAE, Vol.10, No.5, p.35, 2002.
 - 10) J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw Hill, 1988.
 - 11) M. Schmid, A. Leipertz, C. Fettes, “Influence of Nozzle Hole Geometry, Rail Pressure and Pre-injection on Injection, Vaporisation and Combustion in a Single-Cylinder Transparent Passenger Car Common Rail Engine,” SAE 2002-01-2665, 2002.
 - 12) B. Block, H. Westphal, W. Oppermann, W. Hentschel, H. Henning, I. Kutschera, “Optical Detection of the Combustion Produced by the Pre-Injected Fuel in a DI Diesel Engine,” SAE 2002-01-2667, 2002.
 - 13) R. Stone, Introduction to Internal Combustion Engines, 2nd Edition, Macmillan, 1992.
 - 14) S. K. Chen, “Simultaneous Reduction of NO_x and Particulate Emissions by Using Multiple Injections in a Small Diesel Engine,” SAE 2000-01-3084.