

# 커먼레일식 직분식 가시화 디젤엔진의 파일럿 분사 연소 및 Soot 분포 특성에 관한 연구

한용택\* · 이재용\*\* · 이기형\*\*\*

## A Study on the Combustion Characteristic and Soot Distribution of a Common Rail Type D.I.Diesel Visualized Engine with Pilot Injection

Yong-Taek Han, Jae-Yong Lee and Ki-Hyung Lee

### ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the effect of swirl, injection pressure and pilot injection on D.I.Diesel combustion by using a transparent engine system. The test engine is equipped with common rail injection system to obtain high pressure and to control injection timing and duration. In this study, the combustion analysis and steady flow test were conducted to estimate the heat release rate from in-cylinder pressure and pilot injection was investigated by using LII technique. As the results, high injection pressure was found to shorten ignition delay as well as enhance peak pressure and heat release rate was greatly affected by injection timing and pilot injection. In addition, the results showed that the period of soot formation corresponded to the diffusion flame.

Key Words : Common rail, Swirl, Injection pressure, Transparent engine, LII(Laser Induced Incandescence)

### 기 호 설 명

Comp. Ratio	Compression Ratio	SWP	Short wave pass filter
LIS	Laser Induced Scattering	w/o	without swirl
LII	Laser Induced Incandescence	w/s	with swirl
$I_{LII}$	Intensity of LII	I.P	Injection Pressure
D	Particle Diameter	I.T	Injection Time
N	Number Density		

### 1. 서 론

연비성능의 면에서 가솔린 엔진에 비하여 디젤 엔진은 고압축비화에 따른 열효율의 증가와 희박 연소가 용이하다는 장점이 있다. 그러나 가솔린 엔진의 경우 연료와 공기의 혼합이 연소실 밖에서부터 이미 이루어지므로, 고회전화 할수록 연

소실내 유동장의 발달과 난류강도의 상승으로 연소의 효율이 높아지는 반면, 디젤엔진은 연소실 내로 연료를 직접 분사한 후 압축 착화하여 연소시키는 원리를 이용하므로, 고속 회전시에는 연료와 공기의 혼합시간이 부족하여 혼합효율이 저감되는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인하여 유동장을 이용하여 연료공기의 혼합과 연소를 촉진시키기 위한 기술을 강구하고 있으며, 디젤 엔진의 고회전화를 가능하게 하는 방법으로 간접 분사식 디젤엔진이 탄생하게 되었으나, 간접 분

\* 한양대학교 기계공학과 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학과

† 연락처, rthan102@hanmail.net

사식 디젤 엔진은 부실의 존재로 인하여 연소실 형상이 복잡하게 되어 압력의 손실이 발생하며, 또한 연소실 표면적의 증가로 인한 냉각손실의 증가 및 연소실 표면의 국부적인 가열 등이 발생하는 단점을 가지고 있다. 이에 반하여 직분식 디젤 엔진의 경우 고압축비화가 가능하여 구조가 단순할 뿐만 아니라 효율이 증대되는 장점이 있으나, 연료와 공기의 혼합이 불균일한 경우에 디젤 연소는 NO<sub>x</sub>와 soot의 심각한 발생을 유발한다[1,2]. 이러한 문제점을 해결하기 위한 연구들은 공기와 연료의 혼합을 촉진하기 위하여 연소실 내에 파일럿(pilot)분사와 커먼레일을 사용한 고압분사 방식을 사용하여 NO<sub>x</sub>와 soot 발생을 동시에 저감시키는 연구 결과들을 보고하고 있다[4]. 이와 같이 커먼레일을 사용한 분사의 경우 분사압이 증가할수록 주변공기와의 운동량 교환이 증가하기 때문에 미립화 및 혼합에 큰 역할을 하는 것으로 알려져 있으나[4], 스웰과 분사율변화에 따른 연소특성 및 soot 분포특성에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 직분식 디젤엔진의 연소형태에 파일럿 분사 및 연료분사압이 미치는 영향을 커먼레일 분사장치를 장착한 가시화 엔진을 이용하여 분사초기의 연소실 내 압력데이터를 사용한 열 발생을 곡선을 통하여, 분사시기별로 평가해보았다. 또한 디젤 엔진의 soot 분포를 측정할 수 있는 있는 LII(Laser Induced Incandescence)기술을 확립하여 운전조건과 스웰변화에 따른 soot 형성과정과 분포특성을 파악하였다[5].

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 가시화 엔진

본 실험에서는 스웰유동 및 분사압력의 변화가 분무 및 연소형태에 미치는 영향을 직접관찰하기 위하여 광학적 접근이 가능한 단기통 가시화엔진을 사용하였다. Fig. 1에 시스템의 개략도를 나타내었으며, Table 1에 엔진의 주요사양을 정리하였다. 또한 관측영역이 되는 연소실은 직경 50mm의 bowl-in-piston을 설치하여 가시화 하였으며, 연소시 고온과 고압에 견디기 위하여 석영 유리로 관측창을 제작하였다. 또한 청결도를 유지하기 위하여 무윤활 방식을 사용하였으며 테프론링을 피스톤에 장착하여 기밀을 유지하였다. 엔진의 헤드는 기존의 상용 단기통 엔진헤드(대동)를 가공하여 커먼레일 형식 인젝터를 직립으로 장착하였고, 스웰유동에 변화를 주기 위하여 흡기포트 형상을 헬리컬 모양과 직립형 두가지 종류로 사용하였다.

Table 1 Specification of the engine

Bore×stroke	95×95	Swirl ratio	0, 2.1
Displacement volume	675cc	Comp. Ratio	19

### 2.2 연료분사장치

본 연구에서는 고압의 분사압력과 정밀한 분사시기 및 제어를 하기 위하여 전자제어 및 고압화가 가능한 커먼레일식 연료분사장치를 제작하여 사용하였다. 시스템의 구성은 고압의 송출압력을 얻기 위한 고압펌프부와 인젝터로 전류를 흘려 작동시키는 전용의 인젝터 드라이버(TDH-3200, TEMS), 그리고 분사시기 및 분사형태를 조절하기 위한 제어 PC 부로 이루어져 있다. 작동원리는 공압을 사용하는 두가지의 고압펌프(Haskel) 사용하여 커먼레일로 연료탱크에 저장된 연료를 고압으로 송출할 수 있도록 하였으며, 레일체적보다 훨씬 큰 보조탱크를 부착하여 연료분사에도 커먼레일 내부의 압력이 급격히 변화하지 않도록 하였다. 한편 레일내부의 압력은 고압펌프로 유입되는 공기의 양을 조절하여 250bar부터 최대 1500bar까지 조절할 수 있도록 하였으며 압력계지를 부착하여 레일 내부의 압력을 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다. 그리고 실험에 사용된 인젝터는 상용차량에 장착되는 보쉬(bosch)사의 제품으로 135°의 분사각도를 가지는 5공노즐을 사용하였다. 한편 본 실험에서는 분사시기 및 분사형태를 정밀하게 제어하기 위하여 8개의 채널을 가지고 있는 카운터보드(6602, National Instrument)와 그래픽 인터페이스를 갖추고 있는 전용의 언어(Labview, National Instrument)를 이용해 프로그램을 작성하여 사용하였다.

### 2.3 LII를 이용한 soot 측정법

레이저 슈트빔(입사파장: 532nm)에 의하여 조사된 soot 입자는 LIS 신호 즉, 탄성산란의 신호 이외에도 조사된 레이저 광의 레이저를 흡수하여 자신의 온도를 높이는데 이용한다.

LII 신호는 레이저 슈트에 의하여 가열된 soot 입자의 복사열이 모여져 얻어진다. LII 신호의 취득 시 자외선 광학 필터로서 SWP(Short Wave Pass)

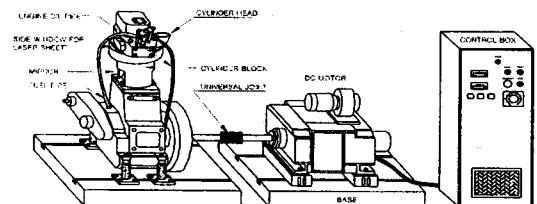


Fig. 1 Schematic of transparent engine

필터나 밴드패스 필터등을 사용하며, 이를 통하여 LII 이외의 광신호는 제거된다. LII 신호의 강도  $I_{LII}$  는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{LII} \propto D^3 N \quad (1)$$

입사된 레이저 쉬트빔은 soot 입자를 가열하는데 주로 사용되며, 주위 가스로의 전달이나 복사열은 무시할 수 있을 정도로 작다고 볼 수 있다. 따라서 입사된 레이저 쉬트빔에 의한 부가 에너지는 soot 입자의 증발에너지와 평형을 이룬 직후 기화온도까지 급격히 증가하게 된다. soot 온도 상승의 시간 스케일은 레이저의 온도와 형태에 영향을 받으며, 이것은 Nd:Yag 레이저가 발생시키는 8-10ns 정도의 레이저 펄스의 상승시간과 유사하다. 레이저 펄스의 강도와 기간에 따라 soot 입자는 부분적으로 또는 완전하게 기화되지만, 기화직전에 큰 열방출이 일어난다. 이렇게 온도가 상승된 soot 입자로부터의 복사열의 스펙트럼은 좀 더 짧은 파장대로 전이되며, 그 최고 강도는 자외선 파장에서 soot 온도인 2300K에서의 복사열 강도에 비하여 상대적으로  $10^3$ 배까지 증가된다. Fig. 2는 본 실험에서 적용한 LII의 실험 장치의 개략도이다.

### 2.4 실험방법

포트 형상에 따른 스웰 유동의 생성을 확인하기 위하여 정상유동 실험을 수행하였다. 정상유동 실험장치와 스웰비 및 흡입유량 계수의 정의는 이미 다른 논문[6]에서 보고된 바가 있으므로 생략하였다. LII 계측기술을 사용하여 soot를 가시화하기 위하여 full mirror와 450SWP(short wave pass filter)를 이용하여 LII 신호를 취득하였다. 분사시기는 BTDC 6°와 10° 및 14°의 세 경우로 하였으며 촬영시기는 ATDC 4°와 8° 및 12°로 선정하였다. 본 실험에서는 LII 신호를 취득하기 위하여 ICCD 카메라를 사용하였으며 ICCD 카메라의 노출시간은 40ns로 선정하였다. Fig. 3은 LII 실험을 위하여 설치한 관측창을 나타낸 그림이다. 그림에서도 알 수 있듯이 레이저가 도입될 수 있는 관측창에 2개의 quartz를 장착하여 연소시에도 레이저가 투과될 수 있도록 시스템을 구성하였다.

연료의 분사량은 헤드의 종류 및 분사압의 변화에도 공연비를 44로 일정하게 유지할 수 있도록 분사시간을 조절하였고 엔진 회전수는 정출력 방식의 DC 모터를 사용하여 400rpm으로 고정하였다. 그리고 연소시에는 헤드의 온도를 가열판을 사용하여 80°로 유지하였으며, 헤드 상단면에 피에조식 압력센서(6052A, Kistler)를 장착하여 캠 축에 부착된 엔코더 신호와 연동하여 연소실

압력을 PC와 A/D 보드(PCI-6035, NI) 및 전용언어(Labview)를 사용하여 취득하였다. 본 연구에서 사용한 실험조건들은 Table 2와 같다.

Table 2 Experimental conditions

Rail pressure	500. 700. 1000 bar
Fuel quantity	14.5mg(w/o)swirl 13.4mg(w/swirl)
Injection timing	BTDC 6° , BTDC 10° , BTDC 14°
Air fuel ratio	44

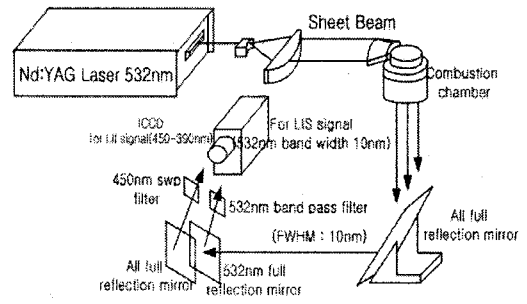


Fig. 2 Schematic diagram of LII system

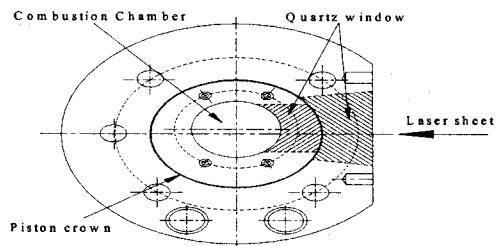
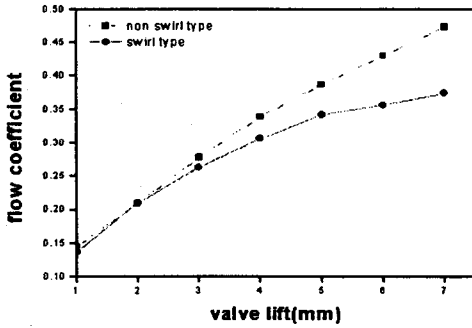


Fig. 3 Shape of the optical window

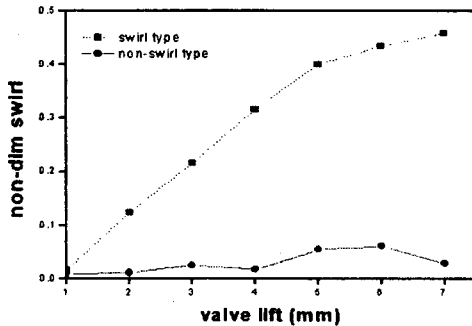
## 3. 실험결과

### 3.1 흡기포트 형상에 따른 정상유동 특성

헬리컬 포트 형상과 직립형 포트형상에 대한 스웰 및 흡입유량 특성을 측정하여 Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. 이 그림으로부터 공기포트 형상이 휘어진 헬리컬 형상의 경우 유량계수는 밸브리프트가 늘어날수록 직립형 흡기포트를 장착한 경우보다 조금씩 줄어드는 반면 무차원 스웰비는 모든 밸브리프트 영역에서 우수한 특성을 나타내는 사실을 알 수 있었다. 즉 헬리컬형 흡기포트를 가진 경우는 직립형 흡기포트에 비하여 우수한 스웰 유동 특성을 가지고 있음을 확인하였다.



(a) flow coefficient



(b) swirl ratio

Fig. 4 Results of steady state flow experiment

### 3.2 분사조건 및 스웰비에 따른 연소특성

최근 디젤 엔진의 효율향상을 위하여 주목을 받고 있는 파일럿 분사의 연소특성을 분석하기 위하여 파일럿 분사와 메인분사의 분사시기, 분사량, 스웰유동, 분사압력[7]에 대하여 실험을 수행하였다.

#### 3.2.1 분사시기의 영향

먼저 분사시기에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 분사압력을 1000bar로 고정시키고 파일럿 분사시기를 BTDC 6°와 10° 및 14°의 세 경우로 변화시켰을 때의 열발생율을 측정하여 그 결과를 Fig. 5에 비교하였다. 이 때의 메인 분사시기는 TDC로 고정하였다.

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 BTDC 10° 분사시기에서 가장 활발히 연소가 진행되고 있음을 알 수 있다. 이 보다 분사시기를 전후로 4°씩 변화시킨 BTDC 6°와 14°의 경우 확산 연소기간과 예혼합 연소기간이 길어지는 형태를 보이고

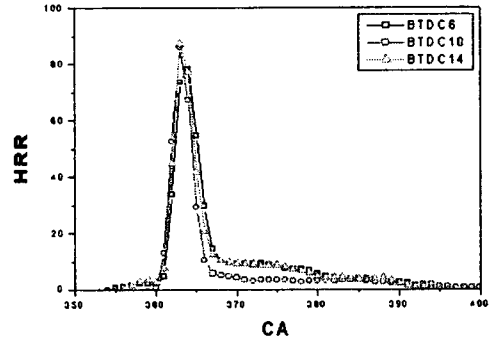


Fig. 5 Comparison of heat release rate (I.P=1000bar, 10:90)

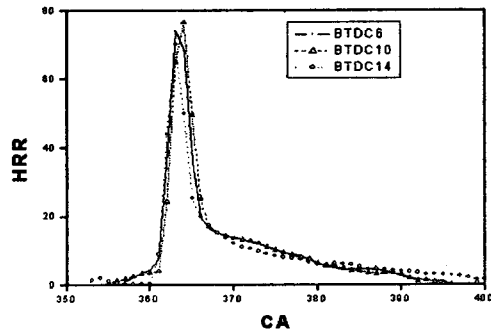


Fig. 6 Comparison of heat release rate (I.P=500bar, 10:90)

있다. 이러한 현상은 파일럿 분사된 소량의 연료가 착화하여 연소실내의 온도와 압력이 파일럿 분사시기에 따라서 달라지기 때문에 발생된다고 여겨진다. 이러한 결과로부터 파일럿 분사후 메인분사까지는 적절한 시간을 확보하는 것이 디젤 엔진에 유리하다는 사실을 알 수 있다. 다음은 동일한 분사조건에 대하여 분사압력을 500bar로 고정하였을 경우 열발생율을 측정하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

이 결과는 분사압력이 1000bar인 경우와는 다소 상이한 양상을 보이고 있다. 최대 열발생율은 BTDC 10°인 경우가 가장 크게 나타나지만, 예혼합 연소기간은 BTDC 14°의 경우가 가장 짧게 나타나고 있다. 이는 분사압력이 낮을 경우 파일럿 분사된 연료의 연소가 충분히 발달하지 않으므로 파일럿 분사를 일찍 시켜서 파일럿 분사된 연료의 착화에 의한 연소실내 온도상승이 미립화 연료와 공기의 혼합을 원활히 이루어지도록 하기 때문으로 판단된다.

### 3.2.2 분사량의 영향

파일럿 분사와 메인 분사의 분사량 비율에 따른 연소특성을 파악하기 위하여 세가지 분사량 비율로 나눈경우와 single 분사의 경우에 대하여 실험을 수행하여 얻는 열발생을 비교결과를 Fig. 7에 나타내었다.

분사량비가 10:90인 경우에서 다른 분사량비율에 비하여 예혼합 열발생율이 가장 증가하고 있으며, 확산연소구간이 길어짐을 알 수가 있다. 이는 파일럿 분사량이 증가되면 동일 공연비 조건에서 메인분사시기의 절대적 혼합기량이 줄어들 뿐만 아니라 파일럿 분사의 연소가 증가하여 메인 분사의 착화지연이 감소하게 되므로 이러한 현상이 일어나게 된다고 여겨진다. 또한 single 분사시는 많은 연료가 한번에 분사되므로 기화하기까지 시간이 증가되므로 열발생율이 일어나는 시기가 파일럿 분사를 하는 경우 보다 늦어지는 특징을 보이고 있다.

### 3.2.3 스월의 영향

Fig.8은 파일럿 분사와 메인 분사의 분사량비율이 10:90인 경우에 대하여 스월유동의 유무에 따른 열발생을 형태를 비교한 그림이다.

스월 유동이 존재 할 경우 예혼합 연소구간의 최대 열발생율이 높아질 뿐만 아니라 후연기간도 작아짐을 알 수 있다. 이로 미루어 보아 파일럿

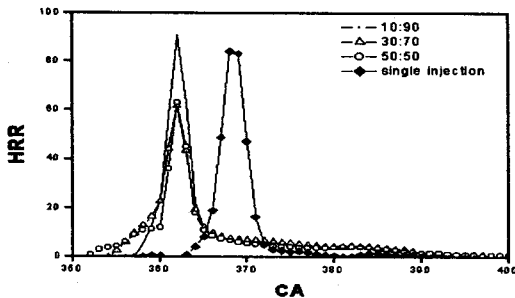


Fig. 7 Comparison of heat release rate with pilot injection(I.T=BTDC10, I.P=1000bar)

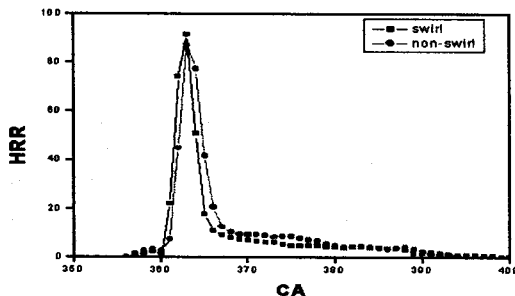


Fig. 8 Comparison of heat release rate with swirl flow(I.T=BTDC6, I.P=1000bar)

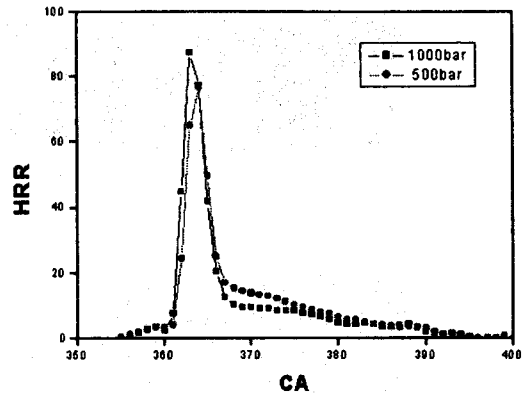


Fig. 9 Comparison of heat release rate with rail pressure(I.T=BTDC10)

분사시 스월유동으로 인하여 공기와의 혼합이 증진되어 연소가 촉진되는 것을 알 수가 있었다.

### 3.2.4 분사압력의 영향

연소특성에 미치는 분사압력의 영향을 파악하기 위하여 분사량 비율을 10:90으로 고정한 상태에서 두 경우의 분사압력에 대한 열발생을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

분사압력에 따라서 예혼합 연소구간의 최대열발생율이 현저히 변화되는 것을 이 그림에서 알 수가 있었다. 이러한 현상은 분사압력이 높아질수록 연료의 미립화가 촉진되므로 예혼합 연소구간의 최대 열발생율이 증가하는 형태를 보이고 있다고 여겨진다.

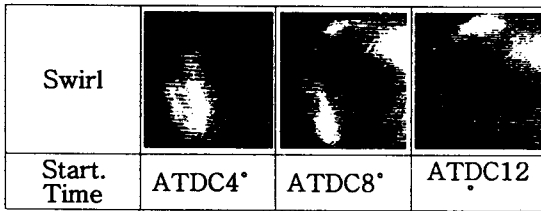
## 3.3 운전조건에 따른 연소실내의 soot 분포 특성

본 실험의 LII 사진의 결과들은 스월의 영향을 고려하여 나타낸 분사시기, 분사량, 분사압력에 대하여 촬영한 사진의 결과이다.

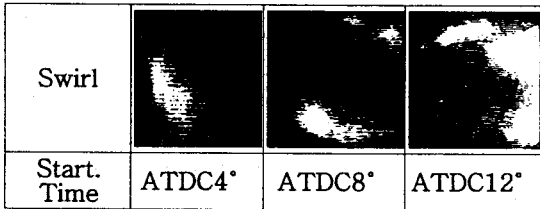
### 3.3.1 분사시기에 따른 soot의 형성특성

다음은 분사시기에 따른 soot 분포특성을 측정하였고, Fig. 10(a, b, c) 또한 기존의 동일한 가시화엔진에서 고찰한 single 분사일 경우, 분사시기에 따른 soot 분포 특성사진을[8]을 Fig. 10(d, e, f)에 나타내었다.

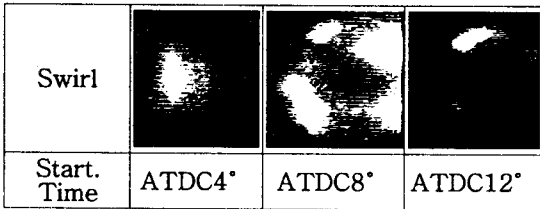
그림에서 알 수 있듯이 분사압력 1000bar 인 경우 BTDC 10°에 분사 하였을때 LII 신호가 비교적 약하게 나타나고 있으나 파일럿 분사시 분사시기에 따른 LII 강도는 비교적 유사한 것으로 보인다. 이러한 현상은 분사시기에 따른 열발생을 측정된 결과와 일치하고 있다. 그러나 기존의 동일한 가시화 엔진에서 단일분사에 따른 LII 측정결과에서는 분사시기가 BTDC 12°인 경우에



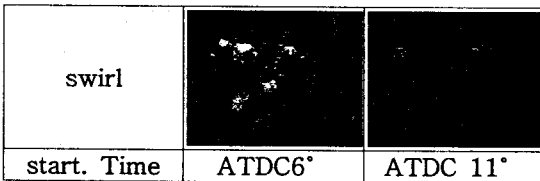
(a) 1000bar w/swirl-BTDC6°



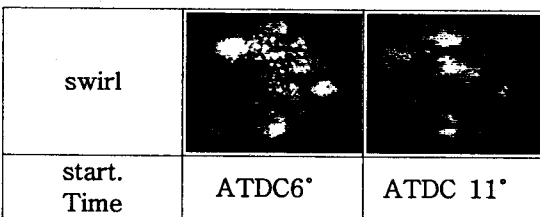
(b) 1000bar w/swirl-BTDC10°



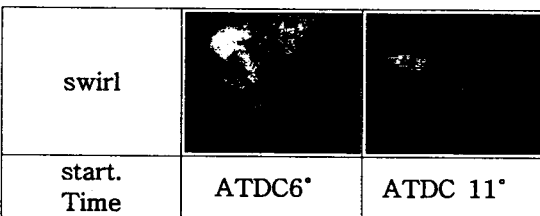
(c) 1000bar w/swirl-BTDC14°



(d) swirl-BTDC8° -single injection



(e) swirl-BTDC12° -singleinjection



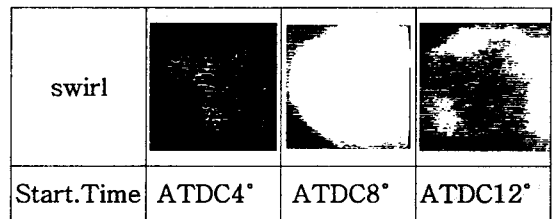
(f) swirl-BTDC15° -single injection

Fig. 10 Comparison of Soot formation with injection timing BTDC6°, 10°, 14°, ratio of pilot&main injection 30:70 and single injection

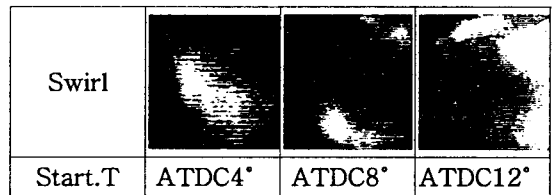
LII 의 신호가 가장 강하게 나타나는데 이런 현상은 촬영시기의 열발생율이 이 분사시기에 가장 높기 때문인 것으로 즉, 다른 분사조건에 비하여 연소가 가장 활발하며, 특히 촬영시기는 확산연소기간 중이므로 soot의 발생이 가장 크다고 보고 된 바가 있다. 따라서 과일릿 분사와 단일 분사시에 분사시기에 따른 soot의 분포특성은 서로 상이하다는 것을 알 수 있다.

### 3.3.2 pilot 분사량에 따른 soot의 형성특성

과일릿 분사시 soot의 형태와 분포특성을 알아 보기 위하여 분사량과 분사시기에 따라서 연소에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

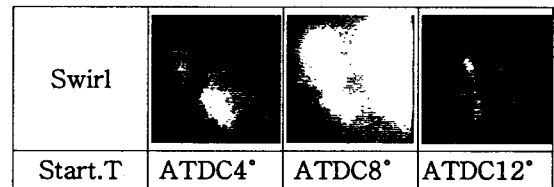


(a) I.T=BTDC 6° , ratio of pilot & main injection=10 : 90

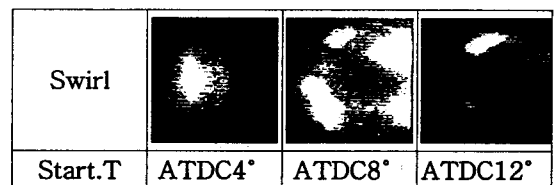


(b) I.T=BTDC 6° , ratio of pilot &main injection=30 : 70

Fig. 11 Comparison of soot formation with injection quantity



(a) BTDC 12° -500bar w/swirl



(b) BTDC 12° -1000bar w/swirl

Fig. 12 Comparison of soot formation with injection pressure

파일럿 분사와 메인 분사의 분사량 비율에 따른 soot 분포특성을 측정하여 Fig. 11에 비교하였다. 분사압은 1000bar 일 때의 촬영사진 결과이다. 이 결과 그림으로부터 분사량 비가 30:70의 경우가 10:90의 경우보다 soot에 의한 LII 신호가 소량으로 검출되고 있음을 알 수가 있다. 이는 분사량 10:90일 경우보다 30:70의 분사량일때 soot의 형성이 작아짐을 의미하는 결과이다. 이러한 현상은 Fig. 7에서 나타난 바와 같이 확산연소구간이 단축되므로 연료가 충분히 혼합되어서 soot의 생성이 억제되었기 때문이라고 판단된다.

### 3.3.3 분사압력에 따른 soot의 시간별 형성 특성

Fig. 12는 분사압에 따른 soot의 형성과정을 시간별로 나타내었다. 분사압이 높을 경우 soot의 발생분포 및 강도가 감소함을 알 수가 있다. 이러한 현상은 연료의 미립화가 촉진되어 연소의 혼합상태가 개선되기 때문으로 판단된다.

또한 ATDC 12°의 경우에는 연료의 미립화로 인해서 압력이 낮은 경우보다 연소가 활발하게 이루어지므로 상대적으로 soot의 발생분포 및 강도가 높게 나온 것으로 판단되나 이러한 문제는 차후 신중하게 검토되어야 할 문제라 판단된다.

## 4. 결론

위와 같은 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 커먼레일식 인젝터를 장착한 가시화 엔진에 흡기포트 형상을 변경한 헤드를 장착하여 각각의 분사시기, 분사압력, 스웰유동 변화에 따라서 soot 측정 및 연소해석을 할 수가 있었다.
- 2) 파일럿 분사압력이 증가할수록 최대 열발생율이 증가하고 착화시기가 빨라지는 경향을 보였다. 또한 분사시기에 따른 soot 분포형성과정은 파일럿 분사와 단일분사와는 다르다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 파일럿 분사의 경우 파일럿 분사가 많은 경우에 연료와 공기의 혼합이 용이하므로 soot의 형성이 작아지는 현상을 관찰할 수 있었다.
- 4) 파일럿 분사량에 따라서 연소가 잘 이루어지는 지점에서 soot가 소량으로 생성되었고, 분사압력을 높일수록 soot는 줄어드는 경향을 보였다.

## 참고문헌

- [1] Barale, R., Bullri, M., Cornetti, G. and Wachter, W. F., "Preliminary Investigation on

Genotoxic Potential of Diesel Exhaust," *SAE*, Paper No. 920397.

[2] Magdi and Khair, K., "Diesel Particulate on Analysis for Effective Exhaust Aftertreatment," *SAE*, Paper No. 932954.

[3] Bakenhus, M. and Reitz, R. D., "Two-Color Combustion Visualization of Single and Split Injections in a Single-Cylinder, Heavy-Duty D.I.Diesel Engine Using An Endoscope-based Imaging System," *SAE*, 1999, Paper No. 1999-01-1112.

[4] Nehmer, D. A. and Reitz, R. D., "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and Nox Emissions," *SAE*, 1994, Paper No. 940668.

[5] Smallwood, G. J., Snelling, D. R., Niell, W. S., Liu, F., Bachalo, W. D. and Gülder, L., "Laser-Induced Incandescence Measurements of Particulate Matter Emissions in the Exhaust of a Diesel Engine," *SAE*, 1998, Paper No. 982680.

[6] Kawashima, J., Ogawa, H. and Tsuru, Y., "Research on a Variable Swirl Intake Port for 4-Valve, High-Speed Di Diesel Engines," *SAE*, 1998, Paper No. 982680.

[7] Kim, S. J., Jeong, J. W., Lee, K. H. and Sunwoo, M. H., "A Study on the Spray Combustion Characteristics in a Cylinder of a D.I.Diesel Engine with the Electronically Controlled Injector," *KSAE*, 2000, pp. 50-56.

[8] Jeong, J. W., Lee, K. H. and Lee, C. S., "A Study on the Effects of Swirl Flow of the D.I.Diesel Engine Generated by SCV on the Combustion Characteristics," *KSAE*, 2002, pp 31-39.