

# 가시화 엔진을 이용한 직분식 디젤 엔진의 분무 연소 특성에 관한 연구

A study on the spray combustion characteristics of D.I. diesel engine  
using visualization engine system

정재우\*, 이기형\*\*, 최석우\*\*\*, 김병수\*\*\*\*  
J. W. Chung, K. H. Lee, S. W. Choi, B. S. Kim

## ABSTRACT

Recently, many researchers have been studied a D.I. diesel engine because of the exhaust gas restriction and fuel consumption performance. It is well known that the fuel injection characteristics are the key factors on the diesel combustion and exhaust emission. In this study, the fuel injection characteristics of 5-hole injector and the combustion characteristics are investigated with the amount of fuel by means of the visualization method and visualization D.I. diesel engine system. As the results of the experiments, the spray pattern of the fuel injection and the diffusion flame of a D.I. diesel engine are clarified. In addition, combustion phenomena with operation conditions such as engine speed and engine load are made clear.

주요기술용어: 5-hole injector (5공 인젝터), Diffusion combustion (확산 연소), Visualization(가시화), D.I. diesel engine (직접분사식 디젤 엔진)

### 1. 서론

1893년 R. Diesel에 의하여 개발된 디젤 엔진은 높은 연비 성능과 최고 50%를 초과하는 열 효율 및 내구성 등의 장점으로 인하여 산업 분야에서 광범위하게 이용되어 왔다.<sup>(1)</sup> 특히, 연료 경제성이 요구되는 버스와 화물자동차 및 트랙터 등과 같은 상용차 부분에 대한 디젤 엔진의 적용이 지속적으로 증가하고 있는 추세로서, 현재 국내·외의 등록 자동차 중 디젤차가 차지하는 비중이 대략 40%에 달하고 있는 실정이다. 그러나 디젤 엔진 연소의 기본인 분무 확산 화염은 질소산화물, 매연 입자, 미연 탄화수소 등과 같은 유해 배기가스의 생성이 기타

다른 동력원에 비하여 매우 많은 것으로 알려져 있으며, 디젤 자동차로부터 배출되는 대기 오염의 비중이 전체 오염의 69%를 차지하고 있으므로, 최근에 강화되고 있는 디젤 엔진의 배기 규제 강화와 연비 성능 향상에 대한 사회적 요구에 대응할 수 있는 디젤 엔진의 분무 및 연소 특성에 대한 연구가 필요한 실정이다. 또한 이러한 연구를 수행하기 위한 방법으로서는 단기통 가시화 엔진을 이용하여 실험 변수에 대한 연소실 내부 상황을 파악하는 가시화 기술이 급속히 구축되어 활용되고 있는 상황이다.<sup>(2)~(4)</sup>

본 연구에서는 단기통 가시화 디젤 엔진을 구축하여, 직접 분사식 디젤 인젝터의 분무량 변화등에 대한 분무가시화 및 연소 압력의 취득과 화염 가시화를 수행하였으며, 이를 통하여 디젤 엔진의 운전조건과 결부되어 직분식 디젤 인젝터에서 분사되는 연료의 분사상태와 연소상태와의 기본적인 상관관계에 대하여 고

\* 한양대학원  
\*\* 한양대학교 기계공학과  
\*\*\* 기술표준원  
\*\*\*\* 자동차 부품 연구원

찰을 수행하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

### 2.1 분무 가시화 시스템

직분식 디젤 엔진의 출력에 있어서 인젝터에서 분사되는 연료의 분사 및 분무 상태는 출력과 연소 및 배기 성능에 영향을 미치는 매우 중요한 인자로 알려져 있다.

본 연구에서는 대기압 하에서의 분무 가시화 실험을 수행함으로써 분사량의 변화에 따른 니들 변위와 분무 거시 특성을 관측하였으며, 본 실험에서 사용한 분무 가시화 시스템의 개략과 제원을 각각 Fig.1과 Table 1에 나타내었다. 실험시 스트로보스코프(stroboscope)를 광원으로 사용하여 인젝터로부터 분사되는 연료 입자에 광산란을 주었으며, 시간 경과에 따른 분무 특성 변화를 관측하기 위해서 광원부와 엔진 캠 축에 설치된 엔코더, 그리고 CCD 카메라를 동기 시켜 1회 분사 시 50 μsec의 시간

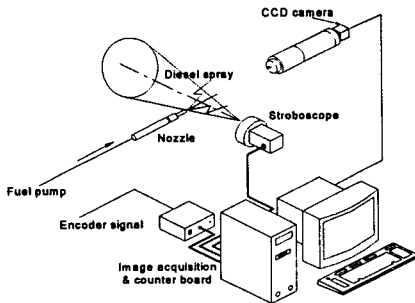


Fig. 1 Schematic diagram of spray visualization system

Table 1 Specification of the visualization system

Equipment	Specification	Model
CCD camera	1/2" CCD B/W	XC-7500 (SONY)
Stroboscope	15W 12000rpm	Nova-Strobe DB (MONARCH)
Frame grabber	640(H) × 480(V) 8bits	MeteorRGB (MATROX)

간격으로 분무 발달 과정을 촬영하였다.

실험 조건으로는 엔진 회전수 300, 400, 500, 600rpm에서 아이들링 상태와 전부하 상태를 선정하였다.

### 2.2 인젝터 및 연료 공급계

본 연구에서는 직접분사식 5공 노즐을 이용하였으며 본 실험에 사용된 노즐의 분무각을 포함한 실험 인젝터의 구체적인 제원을 Table 2에 나타내었다.

연료 펌프의 구동방식은 엔진의 동력을 이용하기 위하여 캠축과 타이밍 기어에 1:1의 풀리를 설치하여 타이밍벨트(timing belt)로 구동하였다.

Table 2 Specifications of the fuel injection system

Injection pump	In-line type(Doowon)
Nozzle type	D.I.(Doowon)
Number of holes	5, 66° spacing
Injection pressure	220 bar
Hole diameter,	∅ 0.26 mm
Needle lift	0.28 mm
Angle of fuel-jet axis (from horizontal)	22.5°

이러한 제원을 가진 인젝터는 실린더 헤드에 수직 방향으로 16° 경사지게 장착되었다.

다음의 Fig.2에는 디젤 노즐팁 내부의 상세도이며, 실험에 사용된 노즐은 상대적으로 큰 sac volume을 가지는 상용 인젝터이다<sup>(1)</sup>.

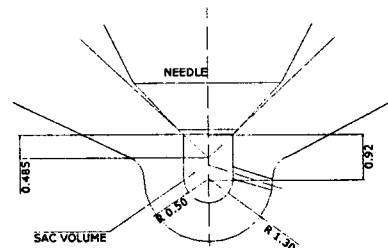


Fig. 2 Geometry of inner construction in Diesel nozzle tip

### 2.3 직분식 디젤 가시화 엔진 시스템

본 연구에서는 엔진 내부의 연소 및 화염 특성을 조사하기 위하여 광학적 접근이 가능한 직분식 디젤 단기통 가시화 엔진을 제작하였다. 본 실험에서 사용한 가시화 엔진 시스템의 구성은 크게 관측부, 신장 피스톤부, 실린더 헤드부, 구동 시스템부, 연료 공급부로 구성되어 있다. 본 연구에서 설계 제작한 가시화 엔진의 형상을 Fig.3에 나타내었다.

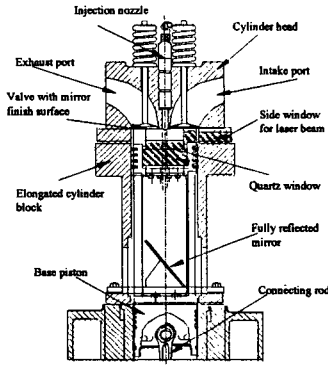


Fig. 3 Cross section of test engine

본 가시화 엔진을 이용한 연소 실험시 실린더 헤드는 약 100℃로 가열되었으며, 연소 성능을 향상시키기 위하여 예열기를 사용하여 흡기 밸브가 닫히는 시기에 공기 온도는 약 80℃가 되도록 하였다. 연료 공급은 기계식 연료 펌프를 엔진의 캠축에 연결하고 분사량은 400 rpm (캠축 회전수)에서 전부하 시 500 스트로크당 10.4cc [17.8mg/st, full load]로 설정하였다.

압력 측정을 위하여는 실린더 헤드에 피에조(piezo)식 압력 변환기(Kistler, 6125A)를 설치하였으며, 실험 인젝터에는 노즐 리프트 센서(Wolff, analog type)를 설치하여 니들의 변위를 측정하였다. 이에 연속에 광학관 센서로부터의 크랭크 각도도 동시에 취득하였다. 실험시 압력과 니들리프트 신호는 10사이클 이상을 평균하여 사용하였다.

또한 연소화염의 촬영은 흑백 고속 디지털 카메라(800s, Red lake)를 2000 fps의 촬영속도로 수행하였다. 실험 조건은 400, 500, 600rpm에서 아이들링 상태와 전부하 상태로 나누어

수행하였으며, 가시화 결과는 400rpm에 대하여만 제시하였다.

Fig. 4는 촬영 영역을 보여주고 있다. 빗금친 부분이 연소실이며, 촬영 영역에 해당한다. 연소실의 형상은 육조형으로서, 내부 홀의 지름은 52mm, 그리고 홀의 높이는 21mm였다. 그리고 그림 중의 관측창은 피스톤 내부의 홀부분에 장착되었다.

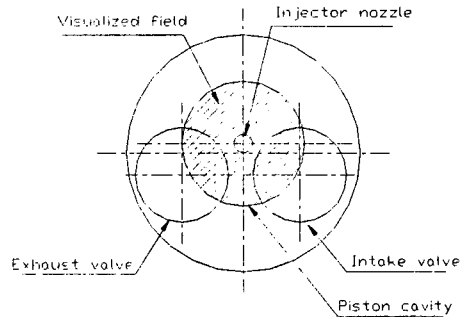


Fig. 4 The visualized field in the combustion chamber

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 대기압 하에서의 분무 특성

Fig. 5는 대기 중 분사 시 엔진 속도 300 rpm에서의 아이들링 상태와 전부하 상태에서의 노즐 니들 변위를 크랭크 각도에 대하여 나타낸 결과이다.

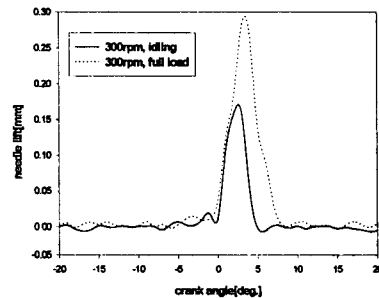


Fig. 5 Characteristics of needle lift under atmospheric condition

아이들링 상태에서의 분사 기간은 크랭크 각도로 약 5° (2.8ms)를 나타내었으며, 전부하 상태에서는 10° (5.6ms)로서 분사 기간은 약 2배

로 증가하였다. 이 결과로부터 디젤 엔진에서 연료량의 증가는 니들 변위와 분사 기간의 합수입을 확인할 수 있었다. 두 경우 니들의 열림시기는 아이들링시와 전부하시에 각각 0 °CA 와 BTDC 1 °CA였으며, 니들 최고위치(전부하 ATDC 2 °CA, 아이들링 ATDC 3 °CA)

에서 크랭크 각도의 차이는 1 °CA였으며, 이로부터 전부하시 니들의 열리는 속도보다 닫히는 속도가 느리다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 미소하기는 하나 전부하시가 아이들링에 비하여 약간 빨리 니들이 열리는 것을 확인할 수 있었다.

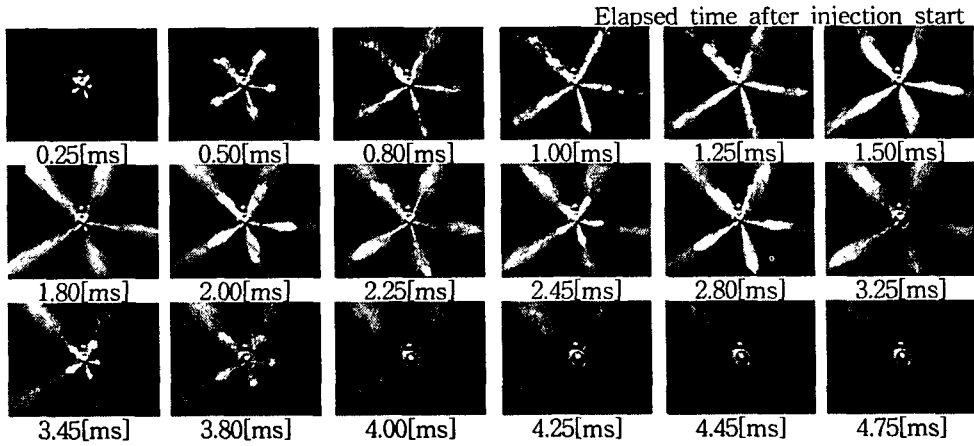


Fig. 6 The macroscopic spray pattern for idling condition

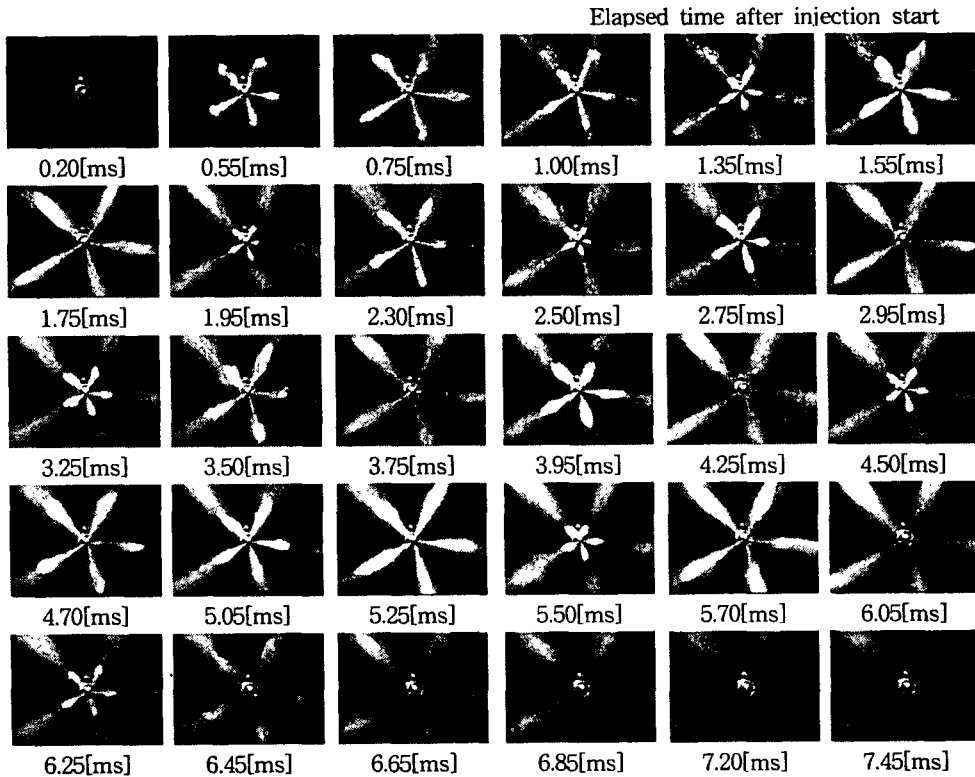


Fig. 7 The macroscopic spray pattern for full load condition

Fig.6은 엔진 회전수 300 rpm에 대한 아이들링 상태에서의 거시 분무 발달 과정을 나타내고 있으며, Fig.7은 전부하 상태에서의 분무 패턴을 나타내고 있다. 아이들링 상태에서의 분무 발달 과정은 규칙적으로 발달하면서 두 번의 증감을 거친 다음 분사 후 약 2.8 ms 이후에서 종료하는 경향을 나타내고 있으며, 이 경향은 Fig. 5의 아이들링 상태에서의 니들 변위 측정 결과와도 유사한 경향을 나타내고 있다.

위의 결과에서 전부하 상태의 경우 초기 분무 발달 과정은 아이들링 상태에서와 같이 규칙적인 성장을 거치면서 이후 수차례 증감을 반복한 후 약 5.7 ms에 종료함으로써 아이들링 시에 비하여 약 2배 정도 분사 기간이 길게 나타났다. 위의 결과에서 분사초기 sac volume내의 연료가 분사되는 기간을 포함하는 1ms 까지의 평균 분사 속도는 분사량에 관계 없이 대략 50m/s로 일정하게 나타났다.

### 3.2 직분식 디젤 엔진의 연소 압력 및 화염 전파 특성

다음은 분사량의 증가에 따른 연소 특성의 변화를 파악하기 위하여 엔진 속도 400rpm에서 아이들링 상태와 전부하 상태에서의 연소 압력 및 열발생율을 측정하여 그 결과를 Fig. 9와 Fig.10에 나타내었다.

실험 결과 연료 분사량이 많은 경우 연소실내의 최고 압력이 증가되는 결과를 나타내었으며, BTDC10 °CA근방에서부터 나타나는 두 경우의 압력의 차이는, Fig.8에서 보는 바와 같이 연소실험시 분사시기가 약 BTDC 2 °~ 0 °CA 사이인 점을 고려할 때, 분무 및 연소와는 다른 인자에 의한 압축압력의 상승에 기인한 것으로 생각된다. Fig.10의 결과에서 최고 열발생율이 나타나는 지점의 크랭크각은 각각 ATDC 8 °, 9 °CA로서, 이 결과로부터 전부하시 압축압력의 상승 및 농후한 연료량에 기인하여 짧은 착화지연기간을 가지는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 급속 연소시의 급격한 열발생율의 상승 이후, 제어연소기간동안 열발생율의 상승이 없으며, 연료량이 적은 아이들링

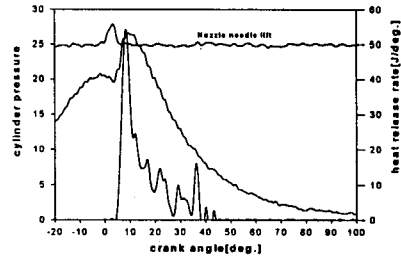


Fig.8 Needle lift, pressure and heat release rate at 400rpm(idling)

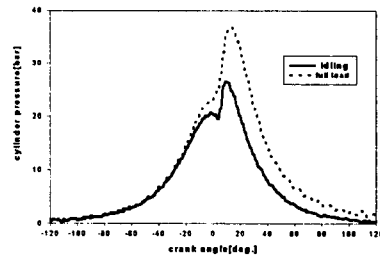


Fig. 9 Effect of the fuel amount on cylinder pressure at 400rpm

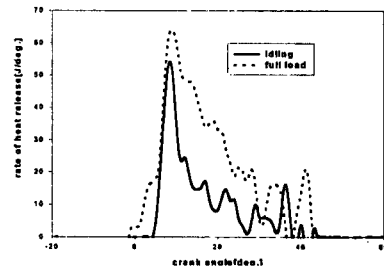


Fig. 10 Effect of the fuel amount on the rate of heat release at 400rpm

에서는 열발생율이 더욱 적게 나타나고 있는 것을 볼 수 있었다. 이는 최고 열발생율 이후의 연소기간 동안의 화염이 상대적으로 활동적이지 못하고 연소 온도가 상대적으로 낮음을 의미하는 것으로 볼 수 있으며<sup>(4)</sup>, 이로부터 초기 화염의 경우와 전부하의 화염이 상대적으로 높은 온도를 가지는 것으로 생각된다.

다음은 엔진의 회전속도 변화에 따른 연소특성을 비교하기 위하여 엔진 회전속도 400 rpm과 600 rpm의 두 경우에 대하여 전부하 상태에서의 연소 압력을 측정된 결과를 Fig. 11에

비교하였다. 실험 결과 엔진 속도의 증가에 따른 유동장 강화로 인하여 최고 압력은 약 2 bar 정도 상승하였으며, 최고 압력 발생 시기는 회전수에 무관하게 비슷함을 보여주고 있다.

이 결과로부터 본 가시화 엔진의 저속 영역에서는 회전수에 따른 분사 시기 조정은 불필요하다는 사실을 알 수 있었으며, 디젤 엔진의 연소특성에 대한 회전수의 영향은 연료 분사량에 비하여 적음을 알 수 있었다.

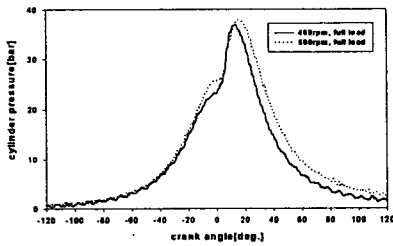


Fig. 11 Effect of the engine speed on cylinder pressure

다음으로 고속 화상 취득 장치를 이용하여 400rpm에서의 분사량 변화에 따른 분무 확산

연소 과정을 촬영한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 5공 노즐로부터 연소실내로 직접 분사된 각 분무 위치에서 확산 화염이 생성되고 있는 모습을 보여주고 있다. 그림에서 전부하의 경우 좀더 빨리 밝은 화염이 형성되고 있는 것을 보여 주고 있으며, 이는 전술하였듯이 전부하의 경우 착화지연이 짧음을 단적으로 보여주는 것이라 할 수 있다. 또한 화염의 밝기는 연소 온도에 따른 가열된 soot입자의 온도 및 농도를 대변하며<sup>(3)</sup> 따라서, 전부하시의 초기화염의 밝기를 고려할 때 전술하였듯이 압축압력의 상승 뿐만 아니라 그 연료량이 상대적으로 많음을 알 수 있다. 두 경우 모두 ATDC 8.2 °CA 이후 부터는 그 밝기가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 최대 열발생율이 ATDC 9 °CA 근처였던 결과와 유사한 결과를 보여주는 것이라 할 수 있다.

또한 ATDC 8.2 °CA 근방까지의 초기 연소부분의 비교로부터 전부하시 착화 위치 및 화염 발달 위치는 아이들링시에 비하여 노즐팁 부근인 것을 알 수 있는데, ATDC 5 °CA이내는 두

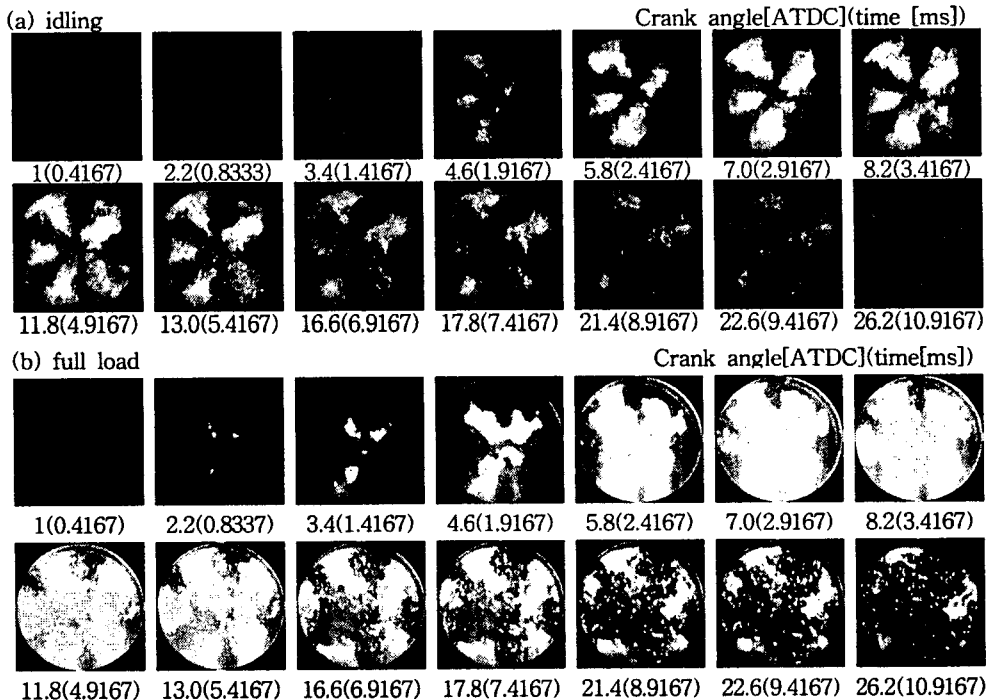


Fig. 12 Effect of the fuel amount on flame propagation at 400rpm

경우 모두 분사시기라는 점을 감안할 때, 전부하시에는 노즐로부터 분사된 가연 혼합기 부분이 상대적으로 노즐과 가까이 존재하는 빠른 시기에 착화가 이루어졌기 때문인 것으로 생각되며, 그 이후 노즐 부위의 연료의 가열온도와 거리가 전부하시에 훨씬 더 착화에 유리한 이유인 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

연료량의 변화에 따른 분무 가시화와 화염가시화 및 연소 특성해석을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 분사량의 증가는 주로 분사 기간 및 노즐 니들의 변위의 함수로 나타났다.
- (2) 분사량이 많은 경우 동일한 크랭크 각도에서의 확산 화염 발생 면적이 크게 나타났으며, 상대적으로 높은 압력과 열발생을 및 밝은 화염의 결과를 가져왔다. 그러나 동일한 분사 시작시에서 분사량의 변화에 따라 최고온도의 화염은 거의 같은 시기에 나타났으며, 이는 열발생을 결과 및 화염 가시화의 결과로부터 확인 할 수 있었다.
- (3) 엔진의 회전수에 관계없이 최고 연소 압력의 발생은 거의 같은 시기에 나타났으며, 이로 부터 본 실험에서와 같은 저속 영역에서 엔진 회전수 증가에 따른 분사 시기의 조정은 불필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구의 실험 범위에서 연료가 농후하며, 상대적으로 빠른 착화시기를 가졌던 전부하

시의 화염 발생 지점은 상대적으로 노즐과 가까웠으며, 그로 인하여 주된 연소화염의 발달 또한 노즐과 가까운 지점에서 발달되었다.

#### 후 기

본 논문은 학술진흥재단 기계공학 연구과제(1998-018-E00123)의 연구비에 의해 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고 문헌

1. 조진호, "내연기관공학 -고성능기관을 중심으로-", 학연사, pp. 488, 1993
2. Ikuo Yamaguchi, Toshio Nakahira, Masanori Komori and Shinji Kobayashi, " An Image Analysis of High Speed Combustion Photographs for D.I. Diesel Engine with High Pressure Fuel Injection", SAE paper, No.901577, 1990
3. Christoph Espey, John E.Dec, "Diesel Engine combustion Studies in a newly Designed Optical-Access Engine Using High-Speed Visualization and 2-D Laser Imaging", SAE paper, No.930971, 1993
4. Long Zhang, Toshitaka Minami, Toshitaki Takatsuki, and Katsuhiko Yokota, "An Analysis of the Combustion of a DI Diesel Engine by Photograph Processing", SAE paper, No.930594, 1993