

## 디젤 인젝터의 분사율 측정 기술과 분공수 변화가 분사특성에 미치는 영향에 관한 연구

### A Study on the Measurement Technique for Injection Rate and the Effects of the Nozzle Hole Number on Injection Characteristics

이 기 형\*, 정 재 우\*\*, 이 창 식\*  
Lee, ki-hyung, Chung, jae-woo, Chang Sik Lee

#### ABSTRACT

Recently, many researches for the improvement of DI diesel engines have been performed to reduce the fuel consumption and exhaust emissions. Among the various factors effect on combustion and emission in DI diesel engines, one of the most important factors is the characteristics of the fuel spray. Accordingly, the investigation on the characteristics of spray is needed to analyze the diesel combustion exactly. In this study, the measurement technique for injection rate using the Zeuch method was developed. In addition, the effects of nozzle hole number on the spray and flame were investigated by visualization experiment.

주요기술용어 : Injection rate meter(분사율 장치), Diesel nozzle(디젤 노즐), Zeuch method(Zeuch 법), Injection rate(분사율), Fuel momentum(연료 운동량)

#### Nomenclature

$A_{hole}$  : area of the hole(m<sup>2</sup>)  
 $B_{fuel}$  : amount of fuel delivered(m<sup>3</sup>/stroke)  
 $D_{hole}$  : diameter of hole(m)  
 $K$  : bulk modulus of the fuel  
 $M$  : momentum of the fuel(kgm<sup>2</sup>/s)  
 $\dot{m}$  : fuel injection rate(kg/s)  
 $m_{cy}$  : amount of the fuel per a cycle(kg)  
 $n_h$  : number of the holes in a nozzle  
 $\Delta P$  : increase of the pressure(Pa)  
 $V$  : volume of the chamber(m<sup>3</sup>)  
 $V_o$  : initial velocity of spray(m/s)

$\Delta V$  : volume of injected fuel(m<sup>3</sup>)  
 $x$  : droplet size(m)  
 $\bar{x}_{32}$  : sauter mean diameter(m)  
 $\rho_f$  : density of the fuel(kg/m<sup>3</sup>)

#### 1. 서 론

최근 자동차용 내연기관에 의한 대기 오염의 심각성과 화석 연료의 점차적 고갈에 따라서 고효율 저배기의 자동차용 기관에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 목적을 달성하기 위한 최근의 주된 연구는 직분식 디젤 엔진의 연소 효율의 증진과 NOx 및 Soot 등의 저감에 관한 것들이다.<sup>1,2)</sup>

\* 회원, 한양대학교 기계공학과

\*\* 회원, 자동차부품연구원 동력시스템실

디젤 기관의 연소 특성과 배기 특성 등은 기본적으로 실린더 내에 분사되는 연료와 공기의 혼합에 지배되는데, 그 혼합과정은 분사특성, 공기 유동, 연소실 형상 등과 같은 3가지의 요소에 의해 지배된다. 그 중에서 연료 분사는 연료를 공급하는 역할뿐만 아니라 연료자체 혼합의 추진력, 즉 운동에너지 및 운동량을 가지고 있으므로 이는 연소에 있어서 매우 중요한 요인이 될 수 있다. 디젤 엔진의 실험에 있어서 분사율의 형태 및 실제 배압 상태에서의 연료 공급량은 연소 상태를 지배할 뿐 아니라, 연료와 공기의 혼합비를 결정한다는 점에서 매우 중요하다.

최근의 디젤 엔진용 노즐로서 파이로트(pilot) 분사를 적용하고자 하는 노력이 국외적으로는 많은 진전을 이루고 있다. 이러한 분사 방식은 분사를 두 단계로 나누어 초기에 미소의 연료를 분사함으로써 디젤 노크와 과다한 NOx의 생성을 방지하는 분사방법이다. 이와 같이 분사계를 통한 디젤 엔진의 성능 개선에 관한 연구가 활발히 수행되고 있으나, 분사계 설계의 가장 기본적인 요소라고 할 수 있는 분사율의 측정은 측정 장비가 가격이 비싸고, 측정방법이 복잡하여 측정이 원활히 수행되기가 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Zeuch법을 이용한 분사율 측정 원리를 확립하고, 이 원리를 이용한 분사율 장치를 제작하였다. 또한 제작된 분사율 장치와 가시화 엔진을 이용하여 분공수의 변화가 분사 및 화염에 미치는 영향을 분석하여 그 결과를 제공하였다.

## 2. 분사율 측정 장치 및 원리

### 2.1 분사율 측정 원리

본 연구에서 제작된 분사율 측정의 기본 개념은 Zeuch법<sup>3,4)</sup>이며, Zeuch법은 연료를 가득 채운 밀폐 용기내에 연료를 분사할 때 그 분사량에 비례하여 용기내 압력이 상승하는 것을 이용하여 분사율을 측정하는 방법이다. 이의 기본 원리를 Fig.1에 도식적으로 나타내었다. 즉, 체적 V의 용

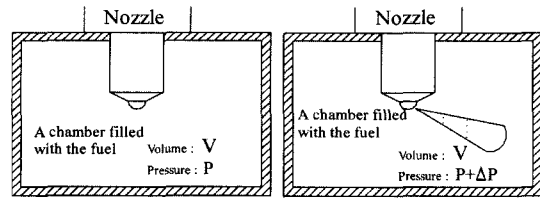


Fig. 1 Principle of Zeuch method

기내에 연료가 ΔV만큼 분사되었을 때, 액체의 압력 상승과 체적 탄성계수의 상호관계는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 연료 질량 분사율을  $dm/dt$ 라 하면, 연료 분사율은 다음의 식 (2)와 같다.

$$\Delta p = K \times \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho_f \times \frac{V}{K} \times \frac{dp}{dt} \quad (2)$$

### 2.2 분사율 장치

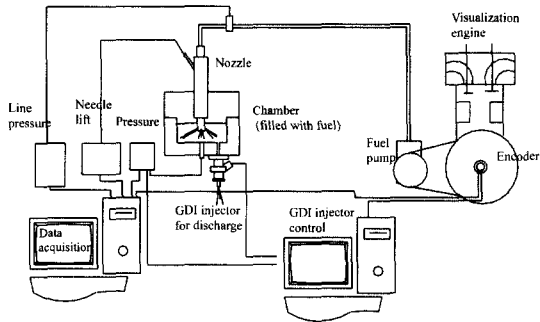
Fig. 2에는 제작된 분사율 장치의 개략도와 실험시 압력용기내의 압력 변화를 그림으로 보여주고 있다.

분사율 실험시 배출되는 연료는 일정시간동안 수집되어 한 사이클 동안 분사된 연료량을 계산하는데 사용되었다.

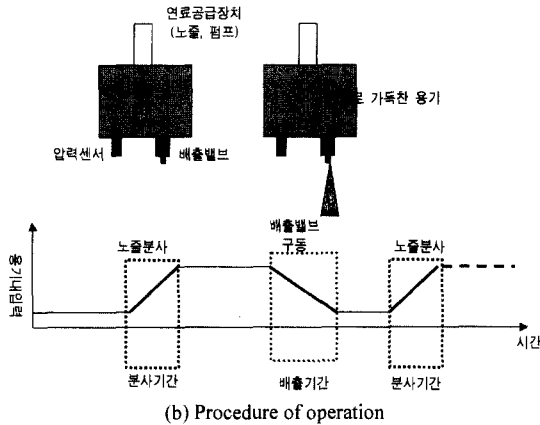
장치의 주요 구성은 연료공급시스템, 동기신호 발생장치, 센서류, 배출밸브, 데이터 취득 및 제어시스템, 그리고 연료로 채워져 있는 압력용기 등으로 이루어져 있다. 이러한 구성은 용기내로 투입된 연료를 적절한 시기에 배출하고, 일정한 용기 내 초기압력을 유지시킴으로써 반복적인 실험을 수행할 수 있도록 한다.

압력 용기의 체적은 실험 결과에 영향을 미치는 주요한 설계변수이며, 압력 용기의 체적 V는 압력 상승 Δp의 크기에 영향을 미치므로, 적절한 범위내에 있도록 하는 것이 필요하다.

만약 압력용기의 체적이 분사되는 연료량에 비하여 너무 크게 되는 경우, 용기내 압력 상승이 작아져 정확한 압력신호의 취득에 불리하다. 한편으로 너무 작은 체적은 과도한 용기내 압력 상승과 함께 연료의 체적 탄성계수 K의 값의 급격



(a) Schematic of injection rate measurement system



(b) Procedure of operation

Fig. 2 Schematics of injection rate measurement system

한 변화를 초래할 수 있다.

### 2.3 Zeuch법에 의한 분사율의 측정 방법

Fig. 3에는 본 장치를 사용하여 분사율을 측정하는 과정을 나타내었다.

본 실험에서 사용한 분사율을 구하는 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{dm}{dt} = \rho_f \times \frac{V}{K} \times \frac{dp}{dt} \approx const. \times \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

분사율 실험시 일정 시간동안 연료량을 측정하여 한 사이클 당의 분사된 연료량을 측정하며, 용기내의 측정압력과 1회분사당 연료량을 이용하여 식 (3)의 상수값(const.)을 계산한다. 분사기간동안의 식 (3)의 적분은 한 사이클 당 분사된 연료량과 같아야 한다. 여기서 분사기간동안 연료의체적 탄성계수를 상수라 가정하면, 이의 관

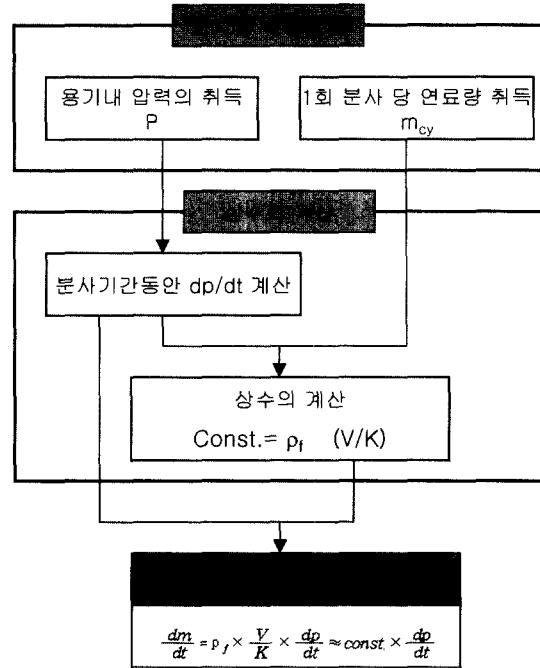


Fig. 3 Flow diagram of a experiment

계를 다음의 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$m_{cy} \approx const. \int_{ie}^{is} \left( \frac{dp}{dt} \right) dt \quad (4)$$

위의 식으로부터 상수로 표현되는 연료 밀도와 체적 탄성의 곱을 계산하여 구할 수 있다.

$$const. = \frac{m_{cy}}{\int_{ie}^{is} \left( \frac{dp}{dt} \right) dt} \quad (5)$$

이렇게 얻어진 상수를 이용하여 아래의 식 (6)을 이용하여 연료의 순간 분사율을 계산할 수 있다.

$$\dot{m} = const. \times \frac{dp}{dt} \quad (6)$$

Fig. 4는 실제 실험시의 각종 신호의 한 예를 보여주고 있다. 그래프상에 나타나기 직전의 연료 분사로 인하여 압력 용기내의 압력이 상승되어 있으나(0~50°구간), 배출 밸브의 작동 시작 신호(discharge signal)로 인하여 일정압력까지 하강하여 압력 용기내의 압력이 표준상태로 돌아온 후(50~270°구간) 다시 니들 밸브의 상승과

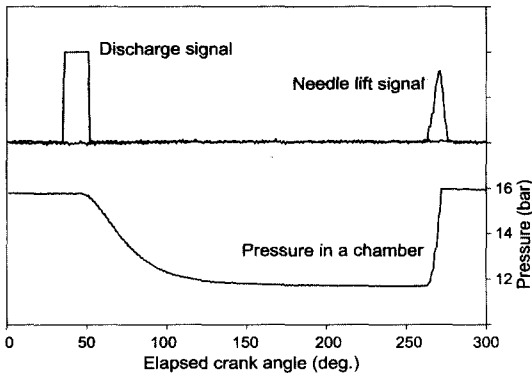


Fig. 4 Example of signals from injection meter

함께 분사가 이루어지고, 용기내의 압력이 급상승하는 현상을 나타내고 있다.

### 3. 분사 특성의 고찰 및 가시화 결과

#### 3.1 분공수에 따른 분사 특성

제작된 분사율 측정 장치를 이용하여 분공수의 변화시의 분사율을 측정하고, 분사율 실험 결과와 실험식등을 이용하여 분사 특성, 특히 분사각, 분공당 운동량 및 SMD 등을 구하였다.

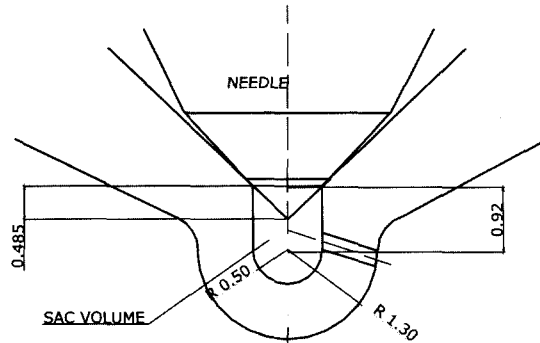
실험에 사용된 분사 노즐은 5공과 6공의 다공 노즐로서 분사시 배압은 약 12bar였다. Fig. 5에 실험에 사용된 노즐의 개략도를 나타내었다.

노즐 변화, 특히 분공수 변화에 대한 연소 특성을 고찰하기 위하여는 노즐의 분사 특성을 파악하여야 하므로, 분사율 측정 결과 및 분사시의 연료 관압 그리고 노즐의 제원을 이용하여 분무각과 각 분공당의 운동량을 측정하였다. 분사시 5공 노즐의 관압력은 155bar 그리고 6공 노즐은 약 190bar 정도로서 6공 노즐의 경우가 좀더 높은 관압력을 가지고 있었다.

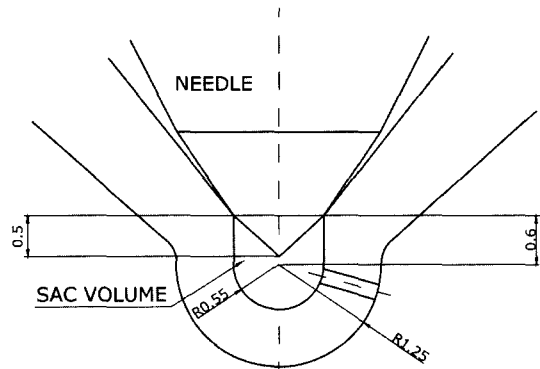
식 (7)은 측정된 분사율과 노즐의 제원을 이용하여 연료의 운동량을 구하는 식이다.<sup>5)</sup> 본 실험에 사용된 다공 노즐의 경우 분공 하나당의 분사율은 다음의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \rho_f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{hole}^2 \cdot V_o^2 \quad (7)$$

$$= \rho_f \cdot A_{hole} \cdot V_o^2$$



(a) 5 hole nozzle(hole dia.=0.28mm)



(b) 6 hole nozzle(hole dia.=0.3mm)

Fig. 5 Detail configuration of test nozzles

$$\dot{m}_h = \frac{\dot{m}}{n_h} = \rho_f \cdot A_{hole} \cdot V_o \quad (8)$$

위의 두 식에 노즐의 제원 및 분사율 측정 결과를 대입하여 분공에서 분출되는 연료의 유속을 구할 수 있으며, 다음과 같은 식 (9)로 표현된다.

$$V_o = \frac{\dot{m}}{n_h \cdot \rho_f \cdot A_{hole}} \quad (9)$$

위의 식 (9)를 다시 식 (7)에 대입하면 각 분공당의 운동량을 구할 수 있으며, 다음의 식 (10)과 같이 표현된다.

$$M = \frac{\dot{m}^2}{n_h^2 \cdot \rho_f \cdot A_{hole}} \quad (10)$$

위의 식을 이용하여 분사율 실험 결과로부터 노즐의 각 분공당 운동량을 구한 결과는 Fig. 6과

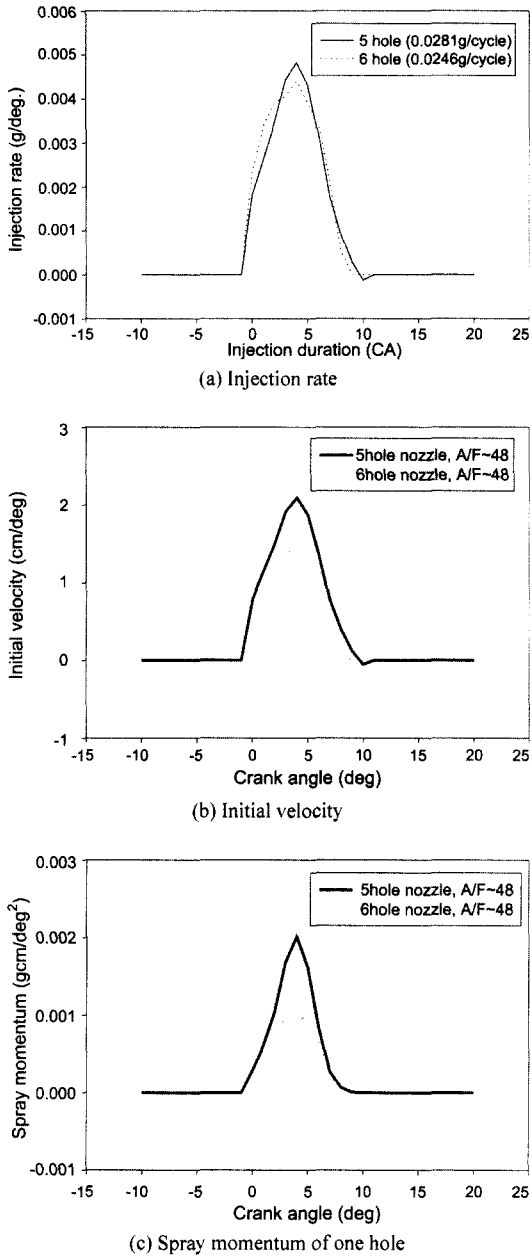


Fig. 6 comparison of 5 hole and 6 hole nozzle

같다.

이 두 노즐의 분사율 측정 결과는 Fig. 6의 (a)에서와 같이 5공 노즐이 6공 노즐보다 분사율의 증가가 급격히 발생됨을 알 수 있으나, 그 차이는 크지 않다. 그러나 Fig. 6의 (b)와 (c)에 나타난 분

공당 분사연료의 초기 속도와 운동량 비교 결과는 5공 노즐이 6공 노즐보다 분공당 속도와 운동량이 증가함을 보이고 있다. 분공수가 증가됨에 따라 각 분공당의 초기 분사속도와 질량유량이 저감되므로 분사되는 연료의 운동량을 저감시키는 경향이 있음을 알 수 있었다.

다음의 Fig. 7은 엔진 회전수 600rpm, 100strok 당 7cc의 연료 공급 조건에서 5공 및 6공 노즐의 대기 중 분사 가시화 결과를 나타내고 있다.

Fig. 7에서의 가시화 결과로부터 1ms까지의 평균 속도는 6공 노즐의 경우가 약 27m/s로 5공 노즐보다 약 3.5m/s 정도 뒤지는 것으로 나타났다. 대기압 상태의 가시화 결과를 이용하여 Fig. 6의 (b)와 (c)에 나타난 분사유속 및 운동량을 직접적으로 비교할 수는 없으나, 같은 연료량의 분사조건에서 5공 노즐의 경우가 6공 노즐보다 우수한 관통력을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

연료 공기의 거시적 혼합에 영향을 미치는 분무각을 Levich의 이론<sup>6)</sup>에 근거한 다음 식 (11)을 이용하여 구하였다.

$$\theta = 0.05 \left( \frac{D_{hole}^2 \rho_f \Delta P}{\mu_f^2} \right)^{1/4} \quad (11)$$

위의 실험식을 통하여 분무각을 구한 결과 6공 노즐의 경우는  $\theta = 24.19^\circ$ . 그리고 5공 노즐의 경우는  $\theta = 22.79^\circ$ 로서, 6공 노즐이 5공 노즐보다 분무각이 조금 더 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그러나 6공노즐이 분공수의 증가로 인하여 전체 분무의 공간 활용률은 더욱 증대되는 결과를 보이고 있다.

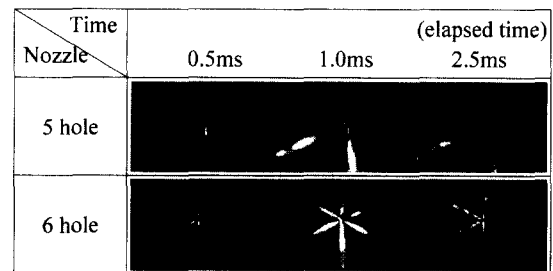


Fig. 7 Visualization of spray pattern in atmosphere(600rpm)

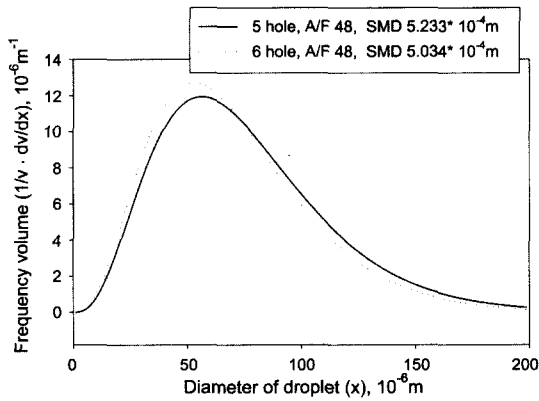


Fig. 8 Droplet size distribution

Hiroyasu가 제안한 연료 입경 분포에 관한 실험식 (6)과 노즐의 제원 및 분사율 측정 결과 등을 이용하여 5공과 6공 노즐에 대하여 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었으며, 계산식을 식 (12)와 식 (13)에 나타내었다. 그림에서 횡축은 입경을 나타내며, 종축은 전체 연료 체적에 대한 특정 입경 체적의 비를 나타낸다.

$$\frac{dv}{v} = 13.5 \left( \frac{x}{x_{32}} \right)^3 \exp[-3.0(x/x_{32})] \cdot d(x/x_{32}) \quad (12)$$

$$\bar{x}_{32} = A(\Delta P)^{-0.135} (\rho_a)^{0.121} (B_{fuel})^{0.131} \quad (13)$$

단,  $A=2.33 \times 10^{-3}$  (for the hole nozzle)

위의 결과로부터 6공 노즐의 경우가 5공 노즐보다 작은 SMD가 차지하는 비율이 높음을 알 수 있으나, 그 차이는 크지 않았다.

따라서 본 연구에서 사용한 동일 분사량 및 분사율에서의 분공 개수의 증가는 분공당 운동량의 저감 및 분출 유속의 저감을 초래되는 반면 분무각의 증대와 분공수에 의한 연료의 공간 이용율을 확대할 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 분공수에 따른 분무 화염 특성 비교

분사 특성이 화염에 미치는 영향을 조사하기 위하여 화염가시화 실험을 수행하였다. 가시화 결과에 나타낸 각도는 자발 화염이 관측된 후부터의 경과각도이다.

실험시 엔진의 회전속도는 400rpm, 공연비는 48이었으며, 분사시기는 26°BTDC, 8°BTDC의 두 가지로 조정하였다. 분사시기가 비교적 빠른 Fig. 9의 경우에는 분사시의 낮은 연소실 압력과 온도로 인하여 분사 후 화염이 관측될 때까지의 시간이 길어지고 있다. 이것은 두 노즐의 분사 운동량의 차이로 인하여 5공 노즐의 경우는 연소실 벽면 쪽에 상대적으로 많은 화염이 존재하는 반면 운동량이 적은 6공 노즐의 경우는 연소실의 중앙 부분에도 화염이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

분사시기가 늦은 경우의 두 노즐에 대한 확산 화염의 발달과정을 가시화하여 Fig.10에 비교하였다. 주변 온도와 압력의 영향으로 분사 후 8° 경과한 TDC 부근에서 화염이 관측되기 시작하여 TDC 후 2.4° 경과시에는 확산연소가 발생되고 있

	(Elapsed C.A. from first visual flame)		
	0°	2.67°	5.3°
6 hole			
5 hole			
	6.0°	8.4°	10.8°
6 hole			
5 hole			

Fig. 9 Comparison of flame between two nozzles (IT=26°BTDC, A/F=48)

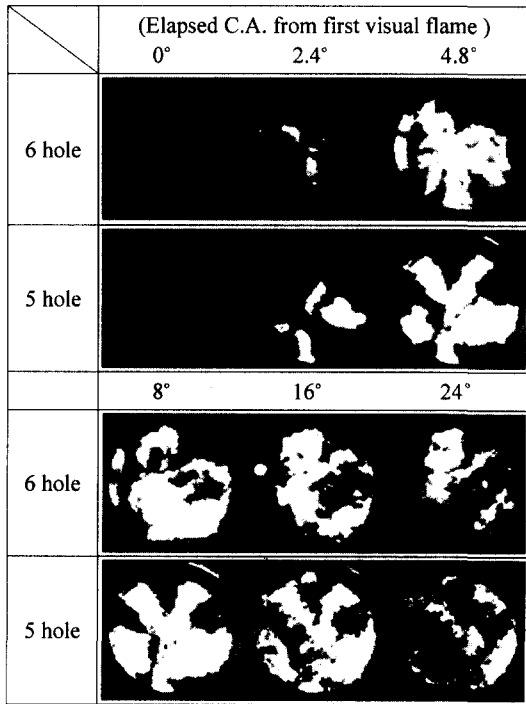


Fig. 10 Comparison of flame between two nozzles (IT= 8°BTDC, A/F=48)

있음을 알 수 있다. 5공 노즐의 경우 강한 운동량을 가진 5방향의 분무 주변에서 연소가 진행되고 있으나, 6공 노즐의 경우 분무들간의 경계가 소멸되어 연소실 전체에서 연소가 일어남을 알 수 있다. 이로부터 6공 노즐의 경우가 분사각이 크고, 분무간의 간격 축소에 따라 공간이용률이 크다는 사실을 재확인하였다.

#### 4. 결론

분사율 측정 장치를 제작하여 2종류의 직분식 디젤 인젝터에 적용시켜 본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) Zeuch법에 기초한 분사율 장치를 제작하였으며, 제작된 분사율 장치를 이용하여 5공 및 6공 노즐의 분사율을 측정할 수 있었다.

2) 제작된 분사율 장치를 이용한 실험을 통하

여, 본 연구에 사용된 노즐 분공수의 증가는 각 분공당의 운동량을 저감시키는 효과와 연료의 공간 이용률의 증가 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

3) 가시화 실험 결과 6공 노즐의 경우는 연소실의 중앙 부분에 화염이 존재하는 특성을 관측하였으며, 5공 노즐보다 넓은 화염면적을 가지는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 목적 기초 연구 사업 (R01-2000-00303)과 고등인력 양성사업(BK 21)의 지원에 의하여 수행된 연구 결과의 일부로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) J. R. Needham, M. P. May, D. M. Doyle, S. A. Faulkner, H. Ishiwata, "Injection Timing and Rate Control - A Solution for Low Emissions," SAE 900854, 1990.
- 2) M. Konno, T. C. Chikahisa, T. Murayama, "An Investigation on the Simultaneous Reduction of Particulate and NOx by Controlling both the Turbulence and the Mixture Formulation in DI Diesel Engine," SAE 932797, 1993.
- 3) 高村 昭生, 太田 尚, 福島 晋, "ディーゼルノズル用の容積形噴射率計の試作," 自動車技術會論文集, Vol.23, No.3, pp.60-70, 1992.
- 4) 福島 晋, 高村 昭生, "ディーゼル機關の高精度燃料噴射率計の試作," 自動車技術會學術講演會前別集882, pp.289-292, 1988.
- 5) S. Yoshikawa, K. Nishida, M. Arai, H. Hiroyasu, "Visualization of Fuel-Air Mixing Process in a Small D.I. Diesel Engine using the Liquid Injection Technique," SAE 880296, 1998.
- 6) J. N. Mattavi, C. A. Amann, "Combustion Modeling in Reciprocating Engines," PLENUM PRESS, pp.369-401, 1980.