

# 형광/산란광 동시 측정에 의한 GDI 분무의 평균 입경 분포에 관한 연구

곽수민\* · 류경훈\* · 최동석\*\* · 김덕줄\*  
(2000년 11월 17일 접수, 2001년 3월 22일 심사완료)

## Average Droplet Size Distribution of a GDI Spray by Simultaneous Fluorescence/Scattering Image Technique

Soo-Min Kwak, Kyeong-Hun Ryu, Dong-Seck Choi and Duck-Jool Kim

**Key Words:** GDI Engine(가솔린 직접 분사식 엔진), Hollow Cone Spray(중공 원추형 분무), Exciplex(여기상태 복합물), Swirl Injector(와류형 인젝터), Mie Scattering(Mie 산란), SMD(자우터 평균 직경)

### Abstract

The objective of this study is to investigate the average droplet size distributions of a GDI spray by simultaneous fluorescence/scattering image technique. GDI engine is recently very popular because of high engine efficiency and low emissions. However, the injectors must have good spray characteristics because the fuel is directly injected into the cylinder. The fuel mixtures used in this study were 2% of fluorobenzene, 9% of DEMA(diethyl-methyl-amine) and 89% of hexane by volume. The system for obtaining 2-D fluorescence/scattering images of fuel spray was constituted of a laser sheet, a doubling prism, optical filters, and an ICCD camera. Using the ratio of the fluorescence to the scattering intensities, SMD distributions were obtained. SMD measured by the technique was compared with that obtained by PDA. It was found that average droplet size was bigger at spray center in the early stage of injection and at the outer periphery of the spray in the late stage of injection.

#### 기호설명

$I_{flu}$  : 형광 강도

$I_{sca}$  : 산란광 강도

$I_0$  : 레이저광 강도

$C$  : 비례상수

$D$  : 액적 직경

$Q_{sca}$  : 산란효율

$t$  : 분사 개시 후 시간 [ms]

$Z$  : 축방향 거리 [mm]

$R$  : 반경방향 거리 [mm]

$U$  : 축방향 속도 [m/s]

$V$  : 반경방향 속도 [m/s]

### 1. 서론

최근 고출력 및 저공해 기관의 요구로 실린더 내에 연료를 직접 분사시키는 GDI(Gasoline Direct Injection) 엔진의 개발이 국내외적으로 매우 활발하다. 이 방식은 기존의 PFI(Port Fuel Injecton) 방식과는 달리 연소실내로 직접 연료를 분사를 하기 때문에 엔진 출력, 효율, 배기가스 배출 등에 영향을 미치는 분무특성 중에서 특히 액적의 크기 분포가 중요하다.

\* 부산대학교 대학원

\*\* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

Email : djkim@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

이러한 분무 특성을 파악하기 위해 분무 성장 과정의 가시화 및 신뢰성 있는 평균 입경 측정법의 개발이 필요하다.

평균 입경을 측정한 연구로는 비증발 디젤 분무를 대상으로 형광, 산란광 강도비를 이용한 연구,<sup>(1-3)</sup> 레이저 유도 형광을 이용한 연구,<sup>(4)</sup> exciplex 형광법을 이용한 연구<sup>(5-9)</sup> 등이 있다. 그 중 exciplex 형광법을 이용한 연구는 첨가제를 달리하여 2행정 기관의 연료 분포,<sup>(7)</sup> 충돌분무의 거동,<sup>(8)</sup> 가솔린 와류형 고압 분무의 증발 거동<sup>(9)</sup> 등을 들 수 있다.

액적의 산란광 위상차로 입경을 측정하는 PDA 기법이 사용 및 보정이 간편하여 입경 크기 측정 방법으로 가장 많이 쓰이고 있다.<sup>(10)</sup> PDA의 측정 결과의 정확도는 레이저의 출력, 광전자 증배관(Photo-Multi tube, PMT)의 입력전압 그리고 입자가 구형인지 아닌지를 결정해 주는 기준값에 의해 달라지는 단점을 가지고 있으며, 1차원적인 측정방법이기 때문에 매번 측정위치를 이동시켜야 하는 불편함이 있다.

이러한 문제점들을 보완하기 위한 방법으로 공간, 시간 분해능이 뛰어난 레이저 시트광을 이용하여 분무 전체 입경의 상대적 대소를 산란광/형광을 동시 측정한 이미지로부터 구할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 엔진용 인젝터를 대상으로, 산란광이 형광에 미칠 수 있는 영향을 최소화시키기 위하여 레이저 시트광을 exciplex 형광을 발하는 분무에 조사하여 GDI 인젝터 분무의 성장 과정을 가시화하였고, PDA로 인젝터 팁으로부터 일정한 위치에서 액적의 평균 축방향 및 반경방향 속도를 측정하였다. 또한, 형광/산란광을 동시에 취득하여 얻어진 화상으로부터 상대적인 SMD 분포를 구하였다.

## 2. 측정원리 및 장치

### 2.1 측정원리

형광의 경우, 형광물질을 용해시킨 분무 중심에 레이저 시트광을 조사하면 형광 분자의 농도는 액적의 체적에 비례하게 되어,<sup>(11)</sup> 형광강도  $I_{flu}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{flu} = C_1 \cdot I_0 \sum_i n_i \cdot D_i^3 \quad (1)$$

여기서,  $C_1$ 은 비례상수로서 형광의 흡광계수, 양자수율, 검출광학계 등에 의해 결정된다.  $I_0$ 는 입사된 레이저광의 강도를 나타내며,  $n$ 은 액적의 개수,  $D$ 는 액적의 직경을 나타낸다.

산란광의 경우, 산란광 강도  $I_{sca}$ 는 액적 지름이  $1\mu\text{m}$ 보다 작을 때에는 산란광 강도가 액적 직경의 6제곱에, 빛의 파장과 비슷한 경우에는 4제곱에, 그 이상인 경우에는 2제곱에 비례하게 된다.<sup>(1,12)</sup> 본 실험의 경우 GDI용 인젝터 분무의 SMD는  $1\mu\text{m}$  이상이므로 근사적으로 액적 지름의 제곱에 비례하게 된다. 따라서 산란광 강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{sca} = C_2 \cdot I_0 \sum_i Q_{sca,i} \cdot n_i \cdot D_i^2 \quad (2)$$

여기서,  $C_2$ 는 검출광학계 특성에 의해 결정되는 비례상수이며, 산란효율  $Q_{sca,i}$ 는 입자 파라미터  $\alpha$  ( $\alpha = \pi D/\lambda$ ,  $\lambda$ 는 파장), 산란광 검출 각도 등의 함수이다.

관심 영역내 액적군의 SMD( $D_{32}$ )는 위의 식 (1), (2)로부터 형광/산란광 강도비에 비례함을 알 수 있다.

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i \cdot D_i^3}{\sum_i n_i \cdot D_i^2} = C \cdot \frac{I_{flu}}{I_{sca}} \quad (3)$$

여기서,  $C = C_1/(C_2 \cdot Q_{sca})$ 이고, 이것은 PDA를 이용하여 구한 SMD와 형광/산란광을 동시 촬영한 분무화상에서 얻은  $I_{flu}/I_{sca}$ 로부터 구하였다. 구해진 값들 중에서 분무전체에 잘 부합하는 값을 선정하여 전 실험조건에 적용하였다.

### 2.2 측정장치

Fig. 1은 분무의 가시화 및 SMD를 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다.

실험장치는 크게 광학계, 분사계, 화상취득장치, 분무실 및 신호처리계로 구성되어 있다.

광학계는 광원과 각종 필터로 구성되며, 광원으로는 UV영역의 10Hz Nd:YAG 레이저의 4차 조화파인 266nm를 사용하였으며, 펄스 당 에너지는 60mJ이다. 구면렌즈와 원통형렌즈의 조합으로 길이 60mm, 두께 약 300 $\mu\text{m}$ 의 평면광을 만들었

다. 그리고 입사 레이저 강도 변화가 형광 및 산란광 강도에 영향을 미칠 수 있으므로, 레이저 출력변화를 포토다이오드를 사용하여 일정하게 유지하였다. 산란광이 형광에 미칠 수 있는 영향을 최소화하기 위하여 핵산을 연료로 하고 두 첨가제(플루오로벤젠, DEMA)에 의하여 발생하는 exciplex 형광을 사용하였다. 즉 산란광은 여기광원의 파장인 266nm이며, 형광은 400nm부근의 파장은 취하였다. 또한, 형광과 산란광 이미지를 동시에 획득하기 위해 이중프리즘을 사용하였다.

Fig. 2는 형광방출 특성인 상대강도와 형광 및 산란광을 취득하기 위해 사용된 광학필터의 투과율을 나타낸 것이다. 산란광 화상을 취득하기 위해 266nm에서 투과율이 약 12%, 반치폭이 10nm인 광학필터를, 형광 신호 취득을 위하여 400nm에서 투과율이 약 50%, 반치폭이 25nm인 광학필

터를 사용하였다.

화상의 취득은 ICCD 카메라를 사용하였으며, 분사계는 고압 스윙 인젝터, 연료탱크 및 가압용 질소탱크, 압력계, 압력조정기로 구성되어 있다.

신호처리계는 광원인 레이저와 카메라를 동기시키기 위한 스위치회로, 화상 취득용 이미지 그래버, ICCD카메라 서터제어기 및 펄스발생기로 구성되어 있다.

Table 1과 2에는 본 실험의 조건과 사용한 연료 성분의 특성을 나타낸 것이다.

본 실험에 사용된 인젝터는 직접 분사식 가솔린 엔진에 사용되는 와류형 고압 인젝터이며, 분무각은 60°, 분사각은 5°이다. 분무실은 산소에 의한 소광 현상을 없애기 위해 대기압의 질소로 채워져 있다. 분사기간은 2ms이다.

PDA 실험 장치는 광원으로 사용되는 레이저와 광 화이버 등으로 이루어진 송광부, 수광부, 신호 처리부로 구성되어 있다. 레이저는 Ar-ion Laser가 사용되었고, 측정 시에는 공간 분해능 및 데이터율을 증가시키기 위하여 가우시안 모드로 하였다. 레이저의 최대 출력은 5W이고, 실험시 사용 출력은 2W로 하였다. 그리고 측정시 사용된 광은 파장대가 514.5nm, 488.0nm의 두 광을 사용하

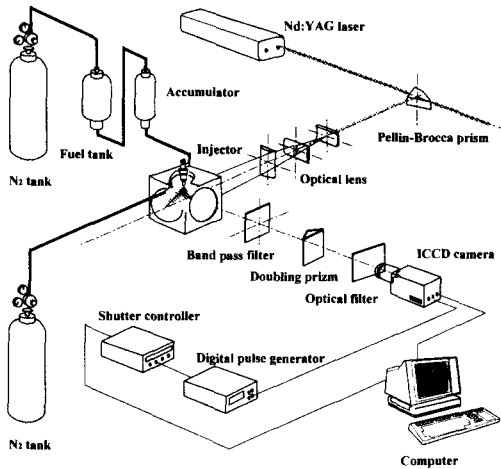


Fig. 1 Experimental setup

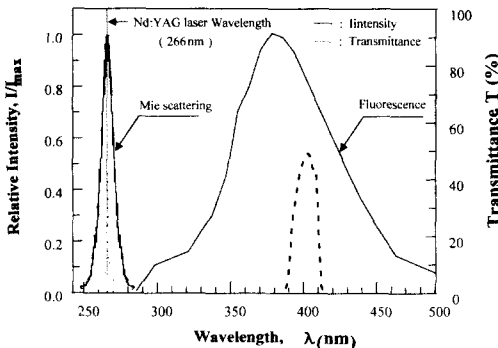


Fig. 2 Fluorescence spectra and transmittance of used filters

Table 1 Experimental conditions

Ambient gas	Nitrogen (N <sub>2</sub> )
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection quantity (mg)	15
Ambient pressure (MPa)	0.1

Table 2 Physical properties of fuel and dopants

	Hexane	Fluorobenzene	DEMA
Molecular formula	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> F	C <sub>5</sub> H <sub>13</sub> N
Molecular weight	86.18	96.1	87.16
Density (kg/m <sup>3</sup> )	663	1024	720
Boiling point (K)	342	357.9	337
Mixture fraction (% by volume)	89	2	9

\* Gasoline (C<sub>n</sub>H<sub>1.87n</sub>) : T<sub>boil</sub> = 300~500 K,

Density = 720~780 kg/m<sup>3</sup>

었다. 최적의 산란 신호를 얻기 위해 측정체적에서 측정각도를 30° 방향으로 수광부를 설치하여 산란 신호인 도플러 버스트 신호를 취득하였다. 측정 위치는 축방향 10mm, 반경방향 2mm 간격으로 하였다. 분사는 Table 1의 실험조건으로 하였고, 분사주기는 10Hz로 설정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 산란광 및 형광강도의 보정

기존의 입경 측정 기법을 보완하기 위해 형광과 산란광에 의해 동시 취득한 이미지의 강도비를 가지고 SMD를 구하고자 한다. 분사 및 분위기 압력은 각각 5.1MPa과 0.1MPa로 일정하게 유지하였다.

Fig. 3은 이중 프리즘을 사용하여 분사 개시 후 0.75, 1.5, 2.5ms에서 형광 및 산란광에 의해 취득한 이미지들이다. Fig. 3의 (a), (b), (c) 각각에서 좌측은 산란광 이미지를, 우측은 형광 이미지를 나타내고 있다. 두 경우 모두 입사되는 방향

은 우측에서 좌측이다. 두 개의 이미지에서 와류형 고압 분무 특성이라고 할 수 있는 중공형 분무를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이미지에서 밝은 부분은 광강도가 강한 곳으로 연료농도가 진함을 의미한다. 산란광은 (a), (b), (c) 모두 우측이 다소 세고, 형광의 경우는 노즐팁 근방에서 우측부분의 강도가 상대적으로 약간 강하게 나타나고 있다. 이것은 노즐의 축중심이 우측으로 약 5도 기울어져 있어 분사량이 다소 우측으로 몰려 약간 쉐 형광을 나타내고 있기 때문이다.

산란광 이미지는 분무 액적에 의한 입사광의 굴절과 반사, 회절에 의해 발생하는 산란광에 의해 취득되며, 이것은 그 분무 거동을 알 수 있는 것으로 액상분무의 거동을 연구하는데 있어 많이 사용되고 있다. 이때, 취득한 화상은 분무 전체에 걸쳐 넓게 퍼져 있으나, 형광에 의해 취득한 화상은 액막과 코어 부분만이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이것은 형광신호의 강도가 형광분자의 농도, 즉 체적에 비례하는 반면, 산란광 강도는 액적의 지름, 산란각도, 액적의 굴절률, 편광 등의 영향을 받기 때문이다. 또한, 산란광의 강도는 측정각과 액적의 지름에 크게 의존하나, 액적의 지름과 선형적인 관계를 가지고 있지 않기 때문에 액적의 크기 분포를 파악하는 데는 한계가 있다.<sup>(13)</sup>

Fig. 4는 인젝터 팁에서 하방으로 20mm, 분사 개시 후 2ms에서 반복 실험으로 구한 산란광 강도의 최대값 및 최소값의 범위를 나타낸 것이다. 동일한 실험 조건에서도 각 이미지의 강도가 변하는 것을 알 수 있다.

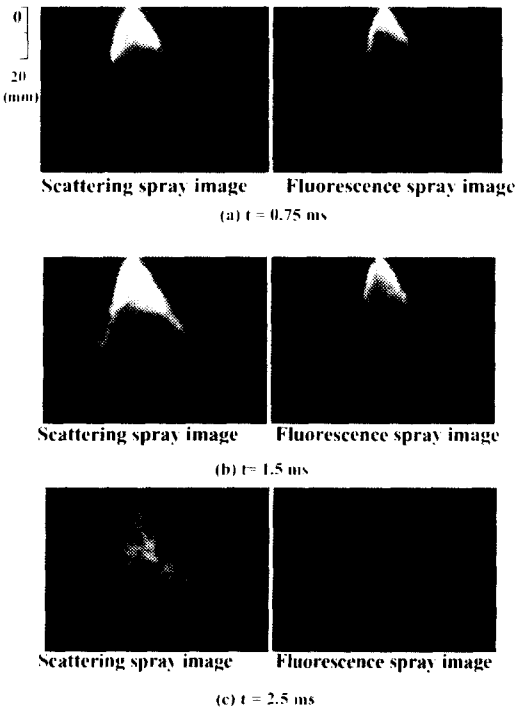


Fig. 3 Comparison of scattering and fluorescence images

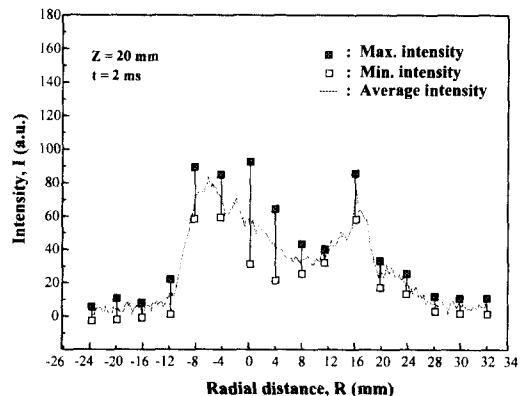


Fig. 4 Average and variation of scattering intensity

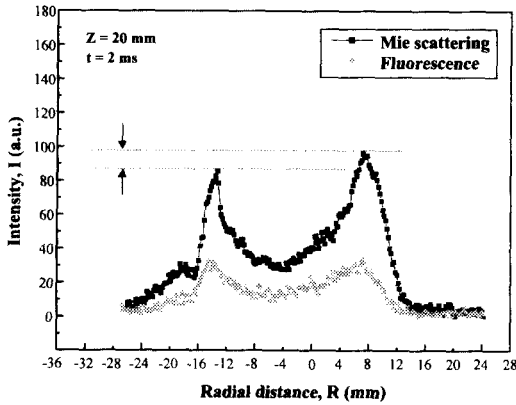


Fig. 5 The intensity dilution of laser light sheet

Fig. 5는 인젝터 팁에서 하류로 20mm, 분사 개시 후 2ms에서 산란광 및 형광이 분무를 통과하면서 감쇠되는 경향을 나타내고 있다. 형광의 경우, 광감쇠의 영향이 거의 나타나지 않았으나, 산란광의 경우는 형광과는 달리 분무내를 통과하면서 광이 조사되는 축의 분무에 비하여 그 반대측에서는 약 10% 정도의 감쇠를 보였다.

이런 강도의 변화와 광감쇠의 문제점을 보정하기 위하여 5회의 실험결과를 평균하였고, 또한, 광감쇠의 영향을 최소화시키기 위하여 인젝터를 180° 회전하여 취득한 5회의 결과를 다시 평균한 전체 10회의 결과를 데이터 처리하였다.

### 3.2 보정계수의 선정

Fig. 6은 특정시간대의 분무를 대상으로 산란광과 형광에 의해 취득한 화상으로부터 강도를 각각 구하여 산란광 강도에 대한 형광강도의 비로 나타낸 것이다. 분사 초기에는 팁 부근에서 가장 큰 강도비가 나타나며, 분사 개시 후 시간이 지남에 따라 축방향으로 강도비가 약해지다가 분사 종료 후인 2.5ms의 하류부분에서 다시 강해지는 것을 볼 수 있다. 반경 방향의 강도비는 분사 개시 후 1.5ms의 분무 상류부분에서는 점차로 증가하며, 분사 종료 후에는 하류부분에서 약간 감소하였다가 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 7은 분사 개시 후 3ms에서 분무가 상대적으로 안정된 분무 중심축에서 분무의 액적 크기를 PDA로 측정한 결과와 광강도비로 구한 결과를 비교한 것이다. 축방향  $z=30\text{mm}$ 에서 10Hz로 연료를 분사시켜 3000개의 액적이 얻어지고 난 후,

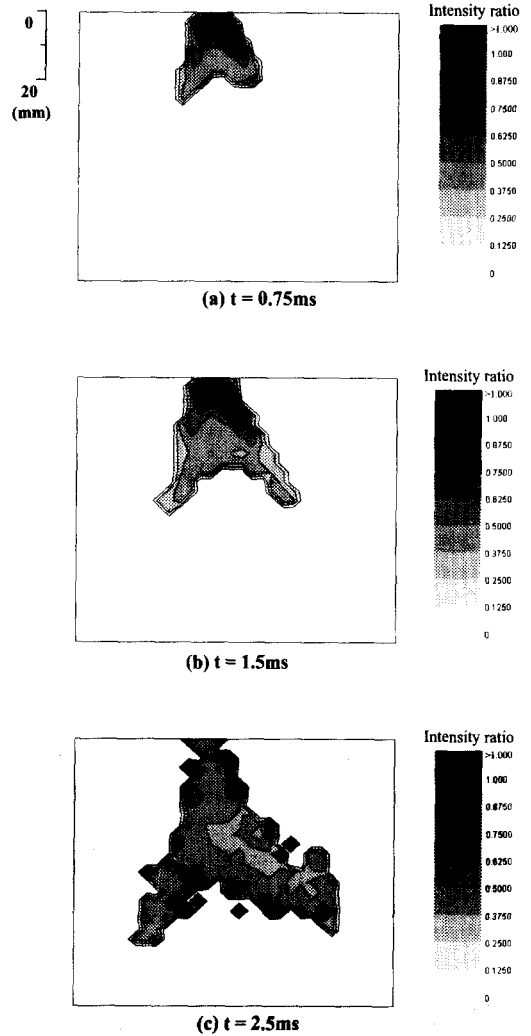


Fig. 6 Contours of Fluorescence/scattering intensity distribution

사이클 당 분사개시 후 3ms( $\pm 0.5\text{ms}$ )에서 이들의 평균값(SMD)을 구하였다. 이와 같은 실험을 5회 반복하여 PDA로 부터의 SMD를 구하였다. 그 후 화상에서의 형광/산란광 강도비와 대응시켜 보정계수를 구하였다. 이때, 전체 관통 길이에 걸쳐 적용할 수 있는 보정계수는 29로 선정하였다. 형광/산란광의 강도비로서 구한 SMD가 PDA로 측정된 결과와 전체적으로 잘 일치하나, 분무하류에서는 약간 크다. 이것은 보정계수 결정과정에서 전체적으로 잘 일치하는 값으로 선정할 때 발생하는 결과적인 오차이다.

Fig. 8은 반경방향으로 선정된 보정계수를 적용

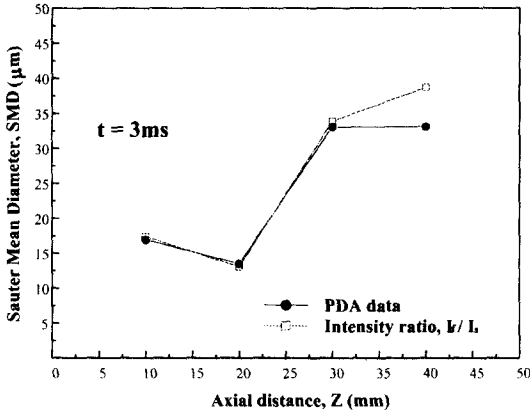


Fig. 7 SMD distributions along axial distance compared with PDA results

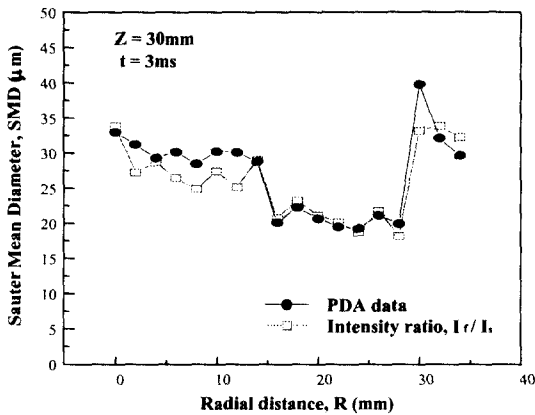


Fig. 8 SMD distributions along radial distance compared with PDA results

하였을 때의 SMD를 나타낸 것이다. 측정위치는 인젝터 팁으로부터 30mm이다. 축방향은 물론, 반경방향의 경우도 PDA 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

### 3.3 평균 입경 분포

Fig. 9는 분무 유동영역에서 10Hz로 간헐 분사하여 측정된 값을 평균한 축방향 속도를 반경방향에 대하여 나타낸 것이다. 평균 축방향 속도는 반경방향으로 증가하다가 최대값을 가진 후 감소하였다. 이것은 와류형 고압 인젝터에서 형성되는 중공형 분무의 구조상의 특징으로 사료된다. 또한, 하류로 갈수록 최대 축방향 속도는 작아진다. 이것은 분무가 하류로 이동함에 따라 분무주

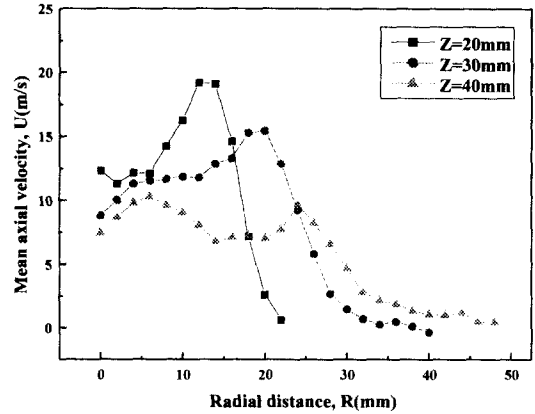


Fig. 9 Mean axial velocity distribution

류의 와류 운동량 감소와 주위 공기의 저항 및 유입에 의한 것으로 사료된다. 특히, Z=40mm에서는 분무 중심축 근방에서 최대치가 다시 나타나고 있다. 이것은 분무 중심에서 와류의 영향이 거의 없어지고, 동일 단면내에서 큰 액적들이 상대적으로 큰 관성력을 가져 하류까지 이동하기 때문이다.

Fig. 10은 인젝터 팁으로부터 20, 30, 40mm 위치에서 SMD의 분포를 시간에 따라 각각 나타낸 것이다. Z=20mm인 경우, 분사 개시 후 1.5ms에서 중앙 부분이 비어 있다. 이것은 와류형 고압 인젝터의 특징인 중공형 분무를 나타내기 때문이다. 그리고 시간이 경과함에 따라 와류의 영향으로 반경방향으로 다소 큰 SMD가 존재하였다. 또한, Z=40mm의 경우, 분사 종료 후 2.5ms에서 중심축에서의 SMD가 커지는데, 이것은 Fig. 9에서 보듯이 고압에서 대기압 분위기 중으로 연료가 분사되면 분무 하류에서 액적의 속도는 주위 공기의 저항으로 급격히 감소하여 결국은 하류 부분에서 액적끼리의 합체가 생기는 것으로 사료된다.

Fig. 11은 반경방향으로의 거리에 따른 반경방향의 평균속도분포를 나타낸 것이다. 반경방향 속도 중 양의 값은 분무의 중심에서 외곽으로, 음의 값은 분무의 중심을 향하여 액적들이 이동하는 것을 의미한다. 따라서, 반경 방향 속도가 0인 값은 축방향 속도만 존재하는 경우이다. 반경방향으로의 평균속도는 분무 외곽으로 향하다가 반경방향 거리 약 10mm 이상에서 다시 분무 중심으로 향하는 경향을 보인다. 이것은 발생된 와

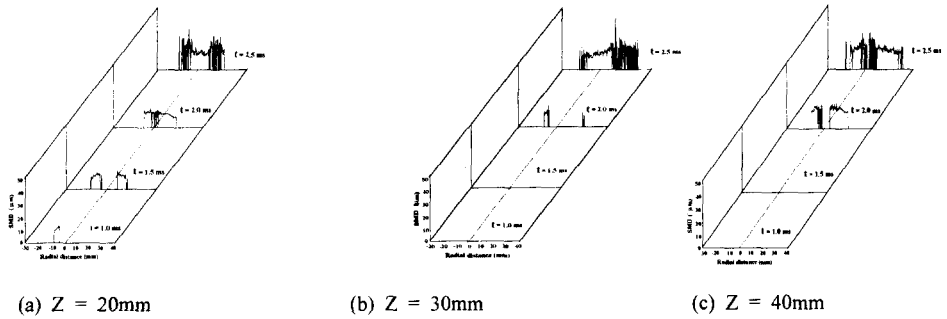


Fig. 10 SMD distribution with temporal change along the axial direction

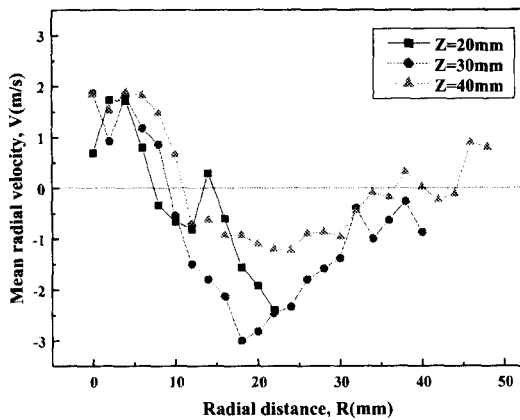
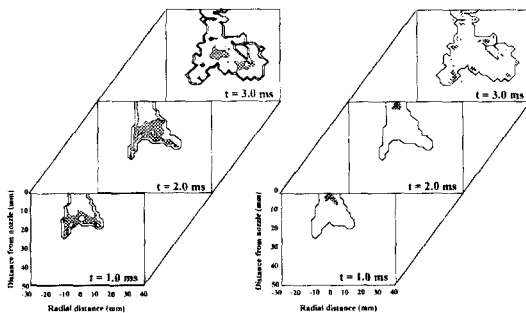


Fig. 11 Mean radial velocity distribution



(a)  $D_{32} < 10\mu\text{m}$  (b)  $D_{32} > 30\mu\text{m}$

Fig. 12 SMD distribution with temporal change

류에 의한 액적들의 불규칙한 움직임과 분무주류와 주위 공기와의 속도차에 의해 주위 공기가 분무 축으로 유입이 이루어지기 때문이다. 또한, 분무 하류로 갈수록 반경방향의 속도가 작아지는 경향은 분무 하류로 갈수록 와류의 영향이 감소

하기 때문에 사료된다.

Fig. 12는 형광/산란광 이미지로부터 취득한 SMD 분포를 시간에 따라 크기별로 나타낸 것이다. 그림에서 회색 부분은  $10\mu\text{m}$ 보다 작은 액적들이((a)의 경우),  $30\mu\text{m}$ 보다 큰 액적들이((b)의 경우) 존재하는 곳이다. (a)의 경우,  $10\mu\text{m}$  이하의 작은 액적들이 분사 직후에는 분무의 선단 외곽에 분포하다가 시간이 지남에 따라 분무의 중심부로 이동하여 퍼져있다. 이것은 분사 초기에는 분무의 강한 운동량에 의하여 작은 액적들이 분무 선단에서 존재하나 시간이 경과하여 분사종료 후에는 분무의 운동량 감소로 인하여 분무의 선단까지 이동하지 못하고 분무 중심부에 존재하기 때문이다. 한편, (b)의 경우,  $30\mu\text{m}$  이상의 큰 액적들은 분사 초기에는 인젝터의 팁 근방에 나타나다가 분사가 종료된 후 분무 외곽쪽으로 흩어져 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 질량과 운동량이 큰 액적이 와류의 영향으로 분무 외곽으로 이동하고 그 위치에서 유입 공기의 영향으로 더 이상 외곽으로 이동하지 못하고 액적간의 합체 현상에 의해 분무 외곽에서 큰 SMD 분포를 보인다고 사료된다.

#### 4. 결론

형광과 산란광을 동시에 획득하여 형광/산란광 강도비로서 액적 크기를 측정하는 방법을 도입하여 GDI용 와류형 고압 인젝터의 시·공간적인 입경분포를 동시에 측정된 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 이중 프리즘과 필터를 사용하여 형광/산란광 강도비에 의해 SMD를 측정하는 방법을 이용

하여 시·공간적인 SMD 분포를 얻을 수 있었고, PDA 결과와 비교함으로써 이 기법의 타당성을 검토하였다.

(2) 평균 축방향 속도는 반경방향에 따라 증가하다가 최대값을 가진 후 감소하는 경향을 보였고, 최대값을 갖는 반경방향 위치는 분무외곽으로 이동하였다.

(3) 평균 반경방향 속도는 분무 외곽으로 향하다가 특정 반경방향 거리 이상에서 다시 분무 중심으로 향하는 경향을 보였다.

(4) 10 $\mu$ m 이하의 작은 액적군은 분사 개시 후 시간이 경과함에 따라 분무 중심으로 향하였고, 30 $\mu$ m 이상의 큰 액적군은 분무 외곽에 존재하였다.

(5) 분사 초기에는 인젝터 팁 부근에서 큰 SMD 분포를 보였지만 분사 개시 후 시간이 경과함에 따라 축방향 하류와 반경방향 외곽에서 큰 SMD 분포를 나타내었다.

## 참고문헌

- (1) Yeh, C., Kosaka, H., and Kamimoto, T., 1993, "Fluorescence/Scattering Image Technique for Particle Sizing in Unsteady Diesel Spray," *JSME Trans. Part B*, Vol. 59, No. 568, pp. 308~313.
- (2) Zelina, J., Rodrigue, J. A., and Sankar, S., 1998, "Fuel Injection Characterization Using Laser Diagnostics at Atmospheric and Elevated Pressures," AIAA-98-0148.
- (3) Gal, P. L., Farrugia, N., and Greenhalgh, D. A., 1998, "Development of Laser Sheet Dropsizing for Spray Characterization," *Optical Methods and Data Processing in Heat and Fluid Flow*, pp. 113~120.
- (4) Eckbreth, A. C., 1996, *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*, 2nd Ed., Gordon and Breach Publishers.
- (5) Melton, L. A., 1983, "Spectrally Separated Fluorescence Emissions for Diesel Fuel Droplets and vapor," *Applied Optics*, Vol. 22, No. 14, pp. 2224~2226.
- (6) Melton, L. A., 1993, "Exciplex-Based Vapor/Liquid Visualization Systems Appropriate for Automotive Gasolines," *Applied Spectroscopy*, Vol. 47, No. 6, pp. 782~786.
- (7) Ghandhi, J. B., Felton, P. G., Gajdeczko, B. F., and Brocco, F. V., 1994, "Investigation of the Fuel Distribution in a Two-Stroke Engine with an Air-Assisted Injector," *SAE Paper*, No. 940394.
- (8) Senda, J., Kanda, T., Kobayashi, M., and Fujimoto, H., 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method," *SAE Paper*, No. 970796.
- (9) Dong-Seok Choi, Soon-Chul Hwang, Duck-Jool Kim, 2000, "Development Behavior of Vaporizing Sprays from a High-Pressure Swirl Injector Using Exciplex Fluorescence Method," *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 10, pp. 1143~1150.
- (10) Bachalo, W. D., and Houser, M. J., 1984, "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Drop Size and Velocity Distributions," *Optical Engineerig*, Vol. 23, No. 5.
- (11) Felton, P.G., Bracco, F. V., and Bardsley, M. E. A., 1993, "On the Quantitative Application of Exciplex Fluorescence to Engine Sprays," *SAE Paper*, No. 930870.
- (12) 박상언, 김호영, 강보선, 민경덕, 2000, "액적 발생기와 평면 이미지 기법을 이용한 가솔린 분무 입경분포 측정," 한국액체미립화학회 2000년도 학술강연회논문집, pp. 184~189.
- (13) T. Igushi, V. G. DeDonell, and G. S. Samuelsen, 1993, "An Imaging System for Characterization of Liquid Volume Distributions in Sprays," ILASS-America 93 Conference, pp. 142~146.