

## 직접 분사식 디젤 기관 인젝터의 연료 분무 특성

### Spray Characteristics of Fuel Injector in DI Diesel Engine

이 창 식\*, 김 민 규\*\*, 전 원 식\*\*\*, 진 다 시 양\*  
Chang Sik Lee, Min Kyu Kim, Won Sik Chun, Daxiang Jin

#### ABSTRACT

This paper presents the atomization characteristics of single hole injector in the direct injection type diesel engine. The spray characteristics of fuel injector such as the droplet size and velocity were measured by phase Doppler particle analyzer. In this paper, the atomization characteristics of fuel spray are investigated for the experimental analysis of the measuring data by the results of mean diameter and mean velocity of droplet. The effect of fuel injection pressure on the droplet size shows that the higher injection pressure results in the decrease of mean droplet diameter in the fuel spray. The minimum size of fuel spray droplet appears on the location of 40mm axial distance from nozzle exit of diesel injector. Based on the experimental results, the correlation between the droplet diameter and mean velocity of the diesel spray due to the change of axial and radial distance from the nozzle tip were investigated.

주요기술용어 : Atomization characteristics(미립화 특성), Direct injection diesel injector(직접 분사식 디젤 인젝터), Mean droplet size(평균 액적 지름), Droplet velocity(액적 속도)

#### 1. 서 론

디젤 기관의 연소 현상은 압축 착화에 의하여 이루어지므로 연료 분무 거동 및 미립화 특성은 연소 개선에 매우 중요한 인자가 되고 있다. 그러므로 연료 분무 미립화 특성을 향상시키는 것은 연소 성능의 향상 및 유해 배출가스 저감에 매우 효과적인 방법이 되고 있다. 그러므로 지금까지 연료 분무 측정 및 기화특성에 관하여는

많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔다.

디젤 기관 인젝터로부터 분출되는 분무 구조 및 액적 분포에 관한 연구로는 분무의 내부구조의 PIV 계측에 관한 Cao<sup>1)</sup>의 연구, 디젤 분무의 도달 거리와 분무각에 미치는 분사차압 및 분위기 밀도의 영향에 관한 미시적 특성 등의 연구<sup>2-4)</sup>를 비롯하여 Quoc 등의 직접 분사식 디젤 분무의 미립화 및 액적 입경 분포에 관한 연구,<sup>5)</sup> Naber 등의 주위 기체의 밀도 및 증발이 디젤 분무에 미치는 영향에 관한 연구<sup>6)</sup> 등이 보고되고 있다. 이 밖에도 입자 영상기법을 이용한 분무 구조에 관한 연구,<sup>7)</sup> PDA 및 레이저

\* 회원, 한양대학교 기계공학부

\*\* 한양대학교 대학원

\*\*\* 회원, 인덕공업고등학교

유속 시스템을 이용한 분무 연구<sup>8)</sup> 등에 관한 연구가 보고 되었다.

그러나 디젤 기관의 분무 특성은 연소 생성물 중의 매연 발생과 질소 산화물(NO<sub>x</sub>) 생성에 가장 중요한 인자의 하나가 되기 때문에 분무 액적의 공간 분포 및 분무의 증발과 혼합 특성의 개선을 위한 더욱 많은 기초 연구를 필요로 하고 있다.

따라서 본 연구는 직접 분사식 디젤 기관에 적용되는 단공 노즐의 연료 분무의 액적 입경 분포, 분무의 속도 분포 등의 분무 미립화에 대한 미시적 특성을 실험적으로 구한 것이다. 또한 디젤 분사 노즐의 연료 분무 특성에 미치는 축 방향 및 반경 방향의 거리의 영향, 연료 분사 압력이 연료 분무의 액적 지름, 분무의 축 방향 및 반경 방향의 속도 분포 등의 영향을 실험적으로 규명하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 직접 분사식 디젤 기관 단공 노즐 인젝터로부터 분사되는 연료 분무 및 미립화 특성을 분석하기 위한 실험 장치의 구성을 나타낸 것이다. 주요 실험 장치는 디젤 인젝터의 분무 형성 실험 장치와 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 PDPA(phase Doppler particle analyzer) 시스템으로 구성하였다.

Table 1은 실험에 사용한 노즐 및 PDPA시스템의 주요 재원을 나타낸 것이다.

한편 연료 분사 장치는 DC전동기를 이용하여 분사 펌프를 구동하고, 분사 압력과 회전 속도를 변화시킬 수 있도록 구성하였다. 실험에 사용한 노즐은 단공형 노즐로서 정격 분사 압력은 25MPa이다.

이 장치에서 광원은 Ar-ion레이저(출력 : 1.5 W)를 사용하였으며 레이저 빔은 40MHz의 주파수 시프트를 가지는 각각 2개 시프트 빔과 언시프트 빔으로 나누어진다. 이들 4개의 빔은

Table 1 Specifications of test nozzle and particle analyzing system

Nozzle	Injection pressure(MPa)	25	
	Diameter(mm)	0.7	
	Number of hole	1	
PDPA system	Transmitter	Wave length(nm)	514.5
			488.0
		Focal length(mm)	500
	Receiver	Beam diameter(mm)	1.4
		Front lens focus length(mm)	300
		Focus length(mm)	250
Laser source	Collecting angle(deg)	30	
	Laser Output (W)	Ar-ion 1.5	

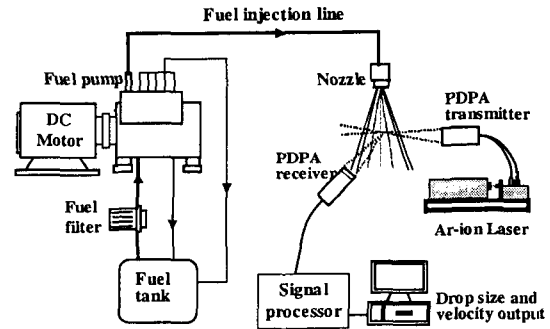


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

광케이블과 트랜스미터를 통하여 프린지를 형성하고, 이때 연료 분무 액적이 프린지 형성부를 통과하면 검출부에 산란광이 검출되고, 측정되는 신호의 주파수가 신호처리 시스템으로 입력된다. 이렇게 하여 신호처리 시스템을 거쳐서 분석된 데이터는 연료 액적의 지름과 속도로 변환된다.

### 2.2 실험 방법

연료의 분무 특성과 미립화 특성을 알아보기 위하여 디젤 인젝터 분사 펌프 실험 장치를 이용하여 연료의 분사 압력을 18MPa, 25MPa의

두 가지 분사 압력 조건에 대하여 실험을 수행하였다.

분무 액적의 입경, 축 방향 및 반경 방향 속도는 인젝터의 노즐 팁으로부터 축 방향의 거리(L) 10mm 지점에서 140mm까지 10mm 간격으로 측정하였고, L=30, 50mm 지점에서는 반경 방향으로 2mm 간격으로 측정하였다. 또한 축 방향 거리 L=80mm 지점에서는 반경 방향으로 3mm 간격으로 액적의 입경과 속도를 측정하였다.

실험에 사용된 직접 분사식 디젤 인젝터는 단공형 노즐을 갖는 인젝터이며, 노즐 지름은 0.7mm이고 초당 분사 횟수는 3회로 하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 1과 Table 1에 표시된 실험 장치를 사용하여 디젤 분무 액적의 평균 입경, 평균속도, 입경분포 등의 미시적 특성을 실험적으로 구하고, 액적 지름과 평균속도와의 관계를 구한 결과를 정리하면 다음과 같다.

#### 3.1 연료 분무의 미립화 특성

Fig. 2는 분사 압력  $P_{inj}=25MPa$ 일 때 노즐 중심에서 축 방향의 거리에 따른 액적의 지름과 축 방향 평균 속도를 도시한 것이다. 액적의 지름  $D_{32}$ 는 높은 분사 압력으로 인하여 노즐 출구에서 급격히 분열하여 노즐 출구로부터 축방향 거리 40mm 지점에서 가장 낮은 값을 나타

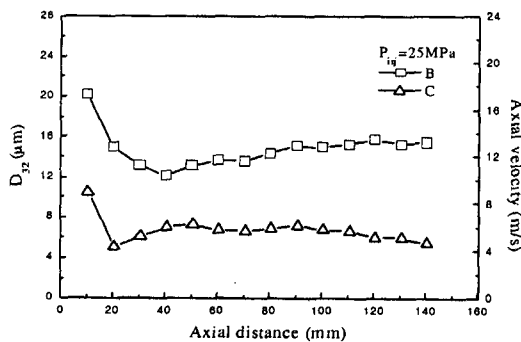


Fig. 2 Effect of axial distance on the Sauter mean diameter and axial mean velocity

내며 그 이후는 분무 액적의 유입에 의한 합착 효과로 다소 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

축 방향 평균 속도는 축 방향의 거리 20mm 지점에서 가장 낮은 값을 가지고 그 이후에는 약간 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 액적 지름  $D_{32}$ 의 변화 경향과도 거의 같은 경향을 나타내는 결과이다.

Fig. 3은 축 방향 거리에 따른 노즐 중심축선 상에서의  $D_{32}$ , 질량분률 50%를 나타내는  $D_{0.5}$  값과 체적분률 90%를 나타내는  $D_{0.9}$  값을 비교한 선도이다. 노즐 출구로부터 가까운 분무 상류에서는 이들 세가지 입경  $D_{32}$ ,  $D_{0.5}$ ,  $D_{0.9}$ 에 관한 특성값이 모두 큰 값을 나타내었다. 이는 분무 출구 부근에서는 미립화가 초기 단계이고, 이때에는 정지 공기와 분무류 사이의 초기 마찰에 의하여 액적 치수가 큰 것이 많이 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

축방향 거리 40mm 이후의 영역에서는  $D_{32}$  및  $D_{0.5}$ 가 큰 변화 없이 거의 일정한 값을 나타내었다. 한편, 축방향 거리 60mm 이후에서  $D_{0.9}$  값은 다소 변동하고 있으나 큰 변화를 보이지 않는 것으로 보아 60mm 지점부터는 분무 주류의 영향이 적어지고 있다. 이러한 경향은 축방향 거리 50mm 이후에서는 연료 분무의 미립화가 충분히 진행된 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

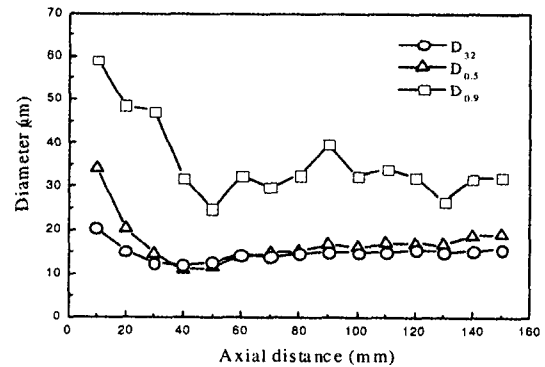


Fig. 3 Effect of the axial distance on the  $D_{32}$ ,  $D_{0.5}$  and  $D_{0.9}$

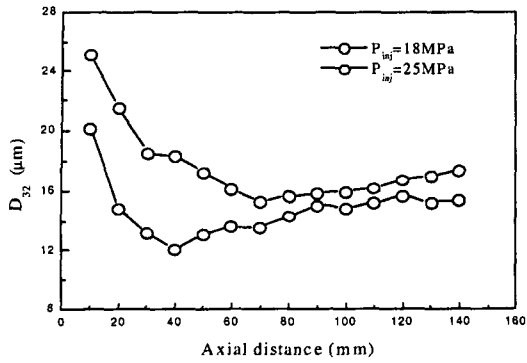


Fig. 4 Effect of injection pressure on the droplet size

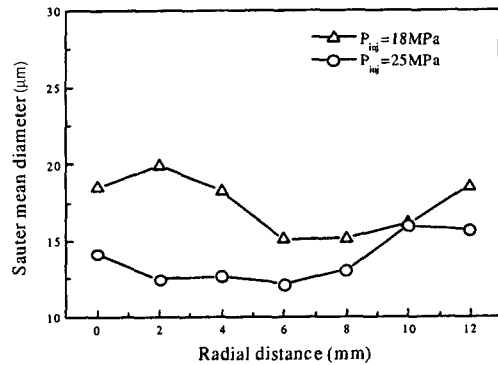
Fig. 4는 분사 압력에 따른 평균 입경  $D_{32}$ 의 값을 축 방향 거리에 대하여 나타낸 선도이고, Fig. 5는 축 방향 거리 30, 50, 80mm 지점에서 반경 방향의 거리에 따른  $D_{32}$  분포를 나타낸 것이다.

이 들 선도에서 볼 때,  $L=20\text{mm}\sim 50\text{mm}$  지점에서 압력에 의한  $D_{32}$ 의 차이가 가장 크게 나타나는 것으로 보아 이 지점에서 가장 활발하게 연료 미립화가 일어나는 것으로 추정할 수 있다.

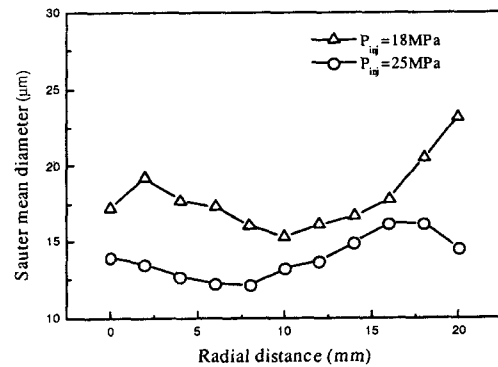
Fig. 4에서 살펴 본 바와 같이 축방향의 거리 60mm ( $P_{inj}=18\text{MPa}$ ), 40mm ( $P_{inj}=25\text{MPa}$ ) 이후에서는  $D_{32}$ 의 차이가 거의 일정하게 나타내고 있는 것으로 보아, 이 지점부터는 분사 압력에 의한 영향이 거의 미치지 않는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 6은 연료 분무의 축방향 거리 30, 50, 80mm인 경우의  $D_{32}$  분포를 나타낸 것이다. 이 들 선도에서 보는 바와 같이  $L=30, 50\text{mm}$ 의 경우 중심부에서 분무 액적 지름  $D_{32}$ 의 분사 압력 압력의 영향이 크게 나타나고 있으며 반경 방향의 거리 6~10mm 부근에서 비교적 액적 지름이 작아지고 있는 것으로 나타났다. 또한 이 들 선도에서 분사 압력이 높아질수록 분무 액적의 지름은 작아지고 있음을 알 수 있다.

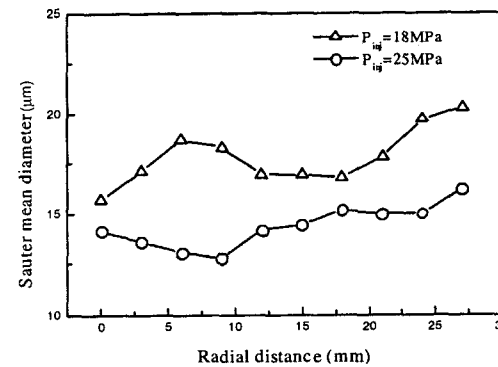
Fig. 6은 반경 방향의 거리에 따른 분무액적의 지름  $D_{32}$ 의 값을 나타낸 것이다. 축 방향 거리 30, 50mm 지점에서 반경 방향으로 나아가면서 액적의 평균입경이 작아지다가 6, 8mm



(a) Axial distance 30mm



(b) Axial distance 50mm



(c) Axial distance 80mm

Fig. 5 Effect of injection pressure on the droplet size

지점에서 최저값을 가지고, 그 이후 영역에서는  $D_{32}$ 가 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 반경 방향의 거리가 증가함에 따라 분무주류의 작용에 의하여 액적 상호간의 합착이 생기고 이에 따라 액적 지름은 약간 증가하다가 주유동을 벗어난 지점에 달하면 액적 입자수는 적

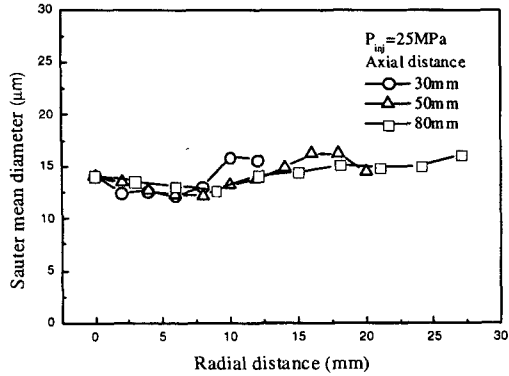


Fig. 6 Effect of radial distance on the Sauter mean diameter

어지고 입경은 증가하는 경향을 나타낸다. 축 방향거리 80mm 지점에서는 이러한 입경 변화의 경향이 적어지고 반경 방향 전체에서 대체로 일정한 크기의 지름을 보이고 있다. 이와 같은 경향은 분무 액적의 주류의 영향이 거의 미치지 않는 영역이기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 7은 반경 방향의 거리에 따른 축방향의 속도 분포를 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 분무는 중심축에서 비교적 높은 속도를 가지고 반경 방향으로 진행하면서 속도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 분무류가 하류로 진행할수록 더욱 현저하게 나타나고 있다.

Fig. 8은 축방향 거리 50mm인 지점에서 반경

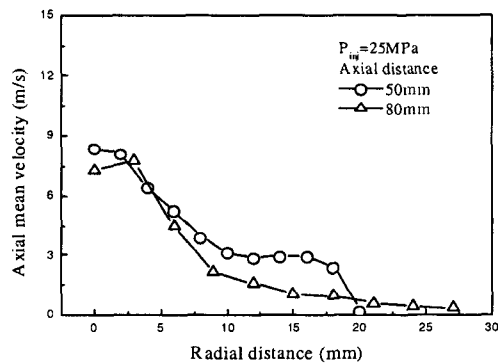


Fig. 7 Effect of radial distance of axial mean velocity

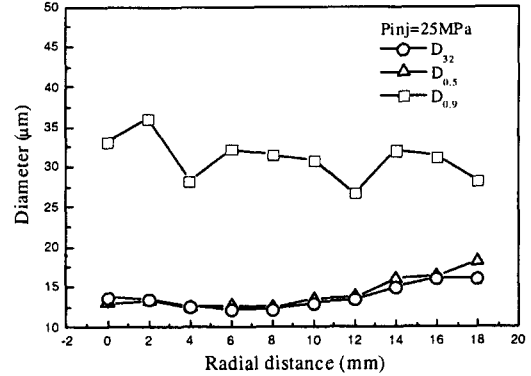


Fig. 8 Effect of radial distance on the diameter

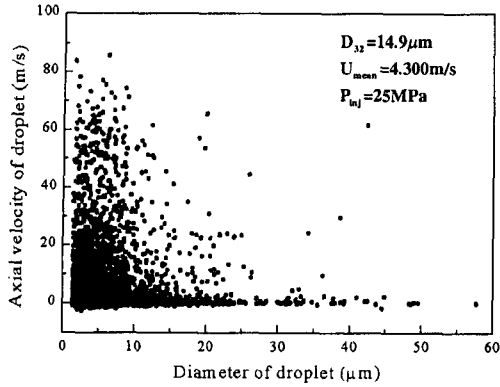
방향 거리에 따른  $D_{32}$ ,  $D_{0.5}$ ,  $D_{0.9}$  값을 비교한 선도이다. 이 선도에서 보는 바와 같이  $D_{0.9}$  값은 중심부에서 비교적 크게 나타나고 있다. 보아 분무류의 외곽으로 진행할수록 미립화가 발달하는 것으로 판단할 수 있다. 그러나  $D_{32}$ 와  $D_{0.5}$  값은 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 분무 중심축에서 분무 바깥쪽으로 진행하면서 미세한 액적들은 증발 효과에 의해 기화되고 일정 크기 이상의 액적들만이 분무류 바깥쪽에 분포하기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 연료 분무 액적의 입경과 평균 속도와의 관계

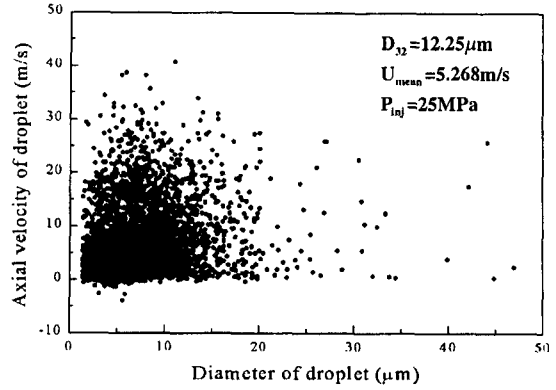
Fig. 9는 분무 액적의 직경과 축 방향 속도와의 상관 관계를 축 방향 거리에 대하여 나타낸 것이다. 이 분포에서 보는 바와 같이 대부분의 연료 액적이  $20\mu\text{m}$  이하의 직경을 가지고 전체 속도 범위에 걸쳐 분포하고 있는 것으로 측정되었다.

또한 Fig. 7의 결과에서 보여주는 바와 같이 축 방향 거리가 멀어질수록 축 방향 속도도 작아지며, 축 방향의 거리 20~50mm 지점에서 액적 지름이 작은 값을 가지는 것으로 보아 이 지점에서 가장 활발한 미립화가 진행되고 있음을 알 수 있다.

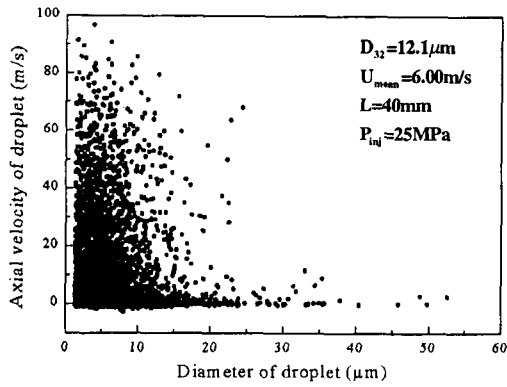
Fig. 10은 연료 분무 액적의 입경과 축 방향 속도와의 상관 관계를 축 방향 거리 50mm인 지



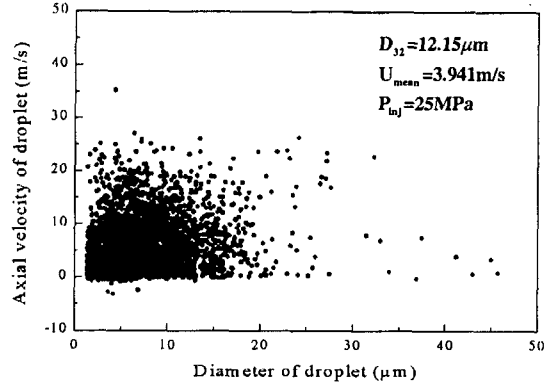
(a) Axial distance 20mm



(a) Radial distance 6mm



(b) Axial distance 40mm



(b) Radial distance 8mm

Fig. 9 Correlation between diameter of droplet and axial mean velocity

Fig. 10 Correlation between diameter of droplet and axial mean velocity

점에서 반경 방향에 대하여 나타낸 선도이다. 이 선도에서 반경 방향 거리 4~6mm 지점에서 최대의 속도 분포 값을 갖는 것으로 보아 주 분무류가 이 지점을 지나는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 Fig. 5~7에 나타난 것과 같이 분무의 중심부에서 비교적 활발히 미립화가 일어나고 분무의 바깥쪽으로 갈수록 분무 속도는 감소하고 액적의 평균 지름은 증가하는 것이 확인되었다.

#### 4. 결론

직접 분사실식 디젤 기관에 적용되는 단공 연료 인젝터의 분무 특성 및 미립화 특성을 실험적으로 구한 결과로부터 얻은 결론은 다음과

같다.

1) 직분식 기관의 단공 노즐의 연료 분무의 액적 지름은 축 방향의 거리 40mm 부근에서 최소가 되고, 그 이후에는 다소 증가하는 경향을 갖는다. 또한 입경의 축 방향의 거리에 따른 변화는 축방향 속도 변화의 경향과 거의 일치하는 경향을 나타내었다.

2) 축 방향의 평균 속도는 분무의 축 방향 거리가 증가함에 따라 감소하며, 연료 분무 액적의  $D_{32}$ 와  $D_{0.5}$ 는 거의 동일한 축 방향의 분포 특성을 갖는다.

3) 연료 분사 압력의 증가는 분무 액적 평균 입경을 감소시키는 요인으로 작용함이 확인되었다. 연료 분무 액적의 평균 입경은  $20\mu\text{m}$  이하이며 반경 방향의 거리 4~6mm 지점에서 최

대 속도를 갖는다.

## 후 기

이 연구는 BK21 핵심 사업과 2000년 한양대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다. 연구를 지원하여 주신 관계 제위에 대하여 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- 1) Z. M. Cao, K. Nishino, S. Mizuno and K. Torii, "PIV Measurement of Internal Structure of Diesel Fuel Spray", The Eighth Symposium on Atomization, pp.65-67, 1999.
- 2) K. Aizawa, T. Suzuki and R. Oshima, "Effect of Ambient Gas Density for Diesel Spray", The Eighth Symposium on Atomization, pp. 191-196, 1999.
- 3) F. Payri, J. M. Desantes and J. Arregle, "Characterization of D. I. Diesel Sprays in High Density", SAE 970625, 1997.
- 4) M. C. Lai, T. C. T. Wang, X. Xie and J. S. Han, "Microscopic Characterization of Diesel Sprays at VCO Nozzle Exit", SAE 982542, 1998.
- 5) H. X. Quoc and M. Brun, "Study on Atomization and Fuel Drop Size Distribution in Direct Injection Diesel Spray", SAE 940191, 1994.
- 6) J. D. Naber and D. L. Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays", SAE 960034, 1996.
- 7) N. Ishikawa and K. Niimura, "Analysis of Diesel Spray Structure Using Magnified Photography and PIV", SAE 960770, 1996.
- 8) F. Q. Zhao, J. H. Yoo, Y. Liu and M. C. Lai, "PDA and LDV Measurements of Large Angle Hollow Cone Spray Proposed for Hot-Premixed Combustion Type Diesel Engine", SAE 960772, 1996.