

# 전자유압식 분사계에 의한 초고압 디젤분무의 입경분포에 관한 연구

## A Study on the Droplet Size Distribution of Ultra High Pressure Diesel Spray on Electronic Hydraulic Fuel Injection System

장세호 · 안수길

S. H. Jang and S. K. Ahn

**Key Words** : Electronic Hydraulic Fuel Injection System (전자유압식 연료분사계), Diesel Spray (디젤분무), Ultra High Pressure Injection (초고압분사), SMD( $D_{32}$ , Sauter 평균입경), Droplet Diameter (입경), Droplet Size Distribution (입경분포)

**Abstract** : In order to investigate the droplet size distribution and Sauter Mean Diameter in a ultra high pressure diesel spray, fuel was injected with ultra high pressure into the environments of high pressure and room temperature by an Electronic Hydraulic Fuel Injection System. Droplet size was measured with the immersion liquid sampling technique. The immersion liquid was used a mixture of water-methylcellulose solution and ethanol. The Sauter Mean Diameter decreased with increasing injection pressure, with a decrease environmental pressure (back preessure) and nozzle diameter. Increasing the injection pressure makes the fuel density distribution of the spray more homogeneous. An empirical correlation was developed among injection pressure, air density, nozzle diameter and the Sauter Mean Diameter of spray droplets.

### 기 호 설 명

- A : 액적의 횡단면적 [ $m^2$ ]
- $C_d$  : 마찰계수(0.5)
- D : 액적직경 [ $\mu m$ ]
- $d_n$  : 노즐직경 [mm]
- L : 노즐길이 [mm]
- $M_f$  : 입자질량 [kg]
- $P_i$  : 분사압력 [MPa]
- $P_b$  : 배압 [MPa]
- $V_i$  : 자유낙하속도 [m/s]
- g : 중력가속도 [ $m/s^2$ ]
- $\rho_a$  : 공기밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $\rho_f$  : 입자밀도 [ $kg/m^3$ ]
- $D_{32}$  : Sauter 평균입경  
(  $SMD = \Sigma (D_i^3 \Delta n_i) / \Sigma (D_i^2 \Delta n_i)$  )
- $\Delta n_i$  : 액적수
- $D_i$  : 액적직경 [ $\mu m$ ]

### 1. 서 론

디젤기관은 노즐에서 분사된 연료가 고온 고압의 연소실에서 미립화되고, 그 미립화된 액적이 증발하여 공기와 혼합과정을 거쳐 가장 착화가 용이한 혼합기영역에서 착화가 일어나면 화염은 분무 전체로 확산되어 연소를 완료한다. 따라서 연소실에 분사된 연료의 미립화 특성을 파악하는 것은 연소과정을 이해하는데 매우 중요하기 때문에 종래부터 분무의 분열과정<sup>1)</sup>, 분무의 입경분포<sup>2)</sup> 등에 관한 많은 연구가 행해져 왔다. 한편 최근에 디젤기관에서의 유해배출물에 대한 규제가 엄격해지면서 유해배출물 저감 대책중의 일환으로 기존의 보쉬식 분사계에서 얻어지는 분사압력보다 수 배 높은 초고압으로 연료를 분사시키는 방법에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 초고압으로 연료를 분사시켰을 때의 분무입경과 입경분포에 대한 연구는 많지 않다.

분무입경 측정법에는 액침법(immersion liquid method)<sup>2)</sup>과 레이저를 이용한 광학적 측정법<sup>3,4)</sup>이 있다. 광학적 측정법은 농후한 디젤분무와 같이 입

접수일 : 1998년 4월 13일  
 장세호 : 부경대학교 실습선  
 안수길 : 부경대학교 제어기계공학과

자 수밀도가 높은 곳의 측정은 불가능하고, 분무중에서 분무의 외피와 같이 수밀도가 열은 부분의 입경측정만이 가능하다. 그리고 분사개시후 시간경과에 따른 측정은 가능하지만 측정이 국부적이고 입경측정범위가 제한적이라는 결점이 있다. 한편 액침법은 분사개시후 시간경과에 따른 측정은 불가능한 반면에 분무전체 액적들의 입경측정이 가능하고, 측정정도가 높으며, 측정방법도 간단하다는 장점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 액침법을 이용하여 전자유압식 분사계에 의해 연료를 종래의 분사압력인 20MPa부터 초고압인 160MPa까지의 압력으로 고압의 정용용기내에 분사시킬 때 분사압력, 정용용기내의 압력(배압) 및 노즐직경과 길이 변화(L/d<sub>n</sub>)에 따른 분무평균입경(D<sub>32</sub>)과 입경분포를 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 전자유압식 분사계

Fig.1은 전자유압식 분사장치에 의한 분사계를 나타낸다<sup>5)</sup>. 분사계는 Hydraulic Line(①,②,③)과

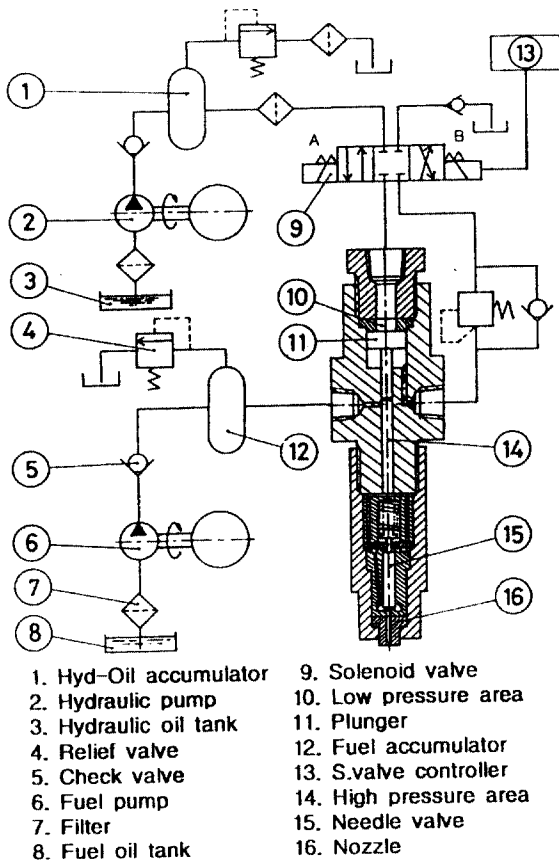


Fig. 1 Schematic diagram of electronic hydraulic

### fuel injection system

Fuel Line(④,⑤,⑥,⑦,⑧)으로 구분되어 있으며, 유압 펌프, 연료 펌프, 어큐무레이터, 릴리프 밸브, 체크 밸브, 솔레노이드 밸브, 그리고 노즐 등으로 구성되어 있다. 전자유압식 분사장치의 작동원리는 다음과 같다. 먼저 유압펌프로써 유압유를 압축시켜 어큐무레이터에 저장시킨 다음, Solenoid Valve Controller⑬에 의하여 4-Way 솔레노이드 밸브⑨의 “A” 측 솔레노이드 밸브를 ON시키면, 어큐무레이터에 소정의 압력으로 저장되어 있던 유압유에 의해 플런저⑪는 하강되고, 이때 플런저 하부에 유입되어 있는 연료가 플런저에 의해 압축되어, 압력은 급격히 상승하고, 개변압이상이 되면 노즐을 통하여 분사된다. 그리고 일정시간 경과 후 4-Way 솔레노이드 밸브의 “B” 측 솔레노이드 밸브가 ON되면 플런저 하부에 고압의 유압유가 유입되어 플런저를 상승시키게 된다.

#### 2.1.2 압력용기 및 포집액

Fig 2는 비증발 디젤분무의 입경과 입경분포 측정에 사용된 압력용기로서(직경 250mm, 높이 1000mm) 분사된 연료에 부여된 운동에너지가 완전히 감쇠되어 액적이 자유낙하로 떨어질 수 있도록 용기의 높이를 충분히 크게 하였고, 압력용기의 측면 하부에 포집용기를 쉽게 꺼집어 낼 수 있도록 창을 설치하였다.

한편, 미립화된 연료입자에 작용하는 중력과 부력 및 마찰력은 식(1)과 같은 관계가 있다.

$$M_f \cdot g = \frac{\rho_a A V_f^2 C_d}{2} + M_f \left( \frac{\rho_a}{\rho_f} \right) \cdot g \quad (1)$$

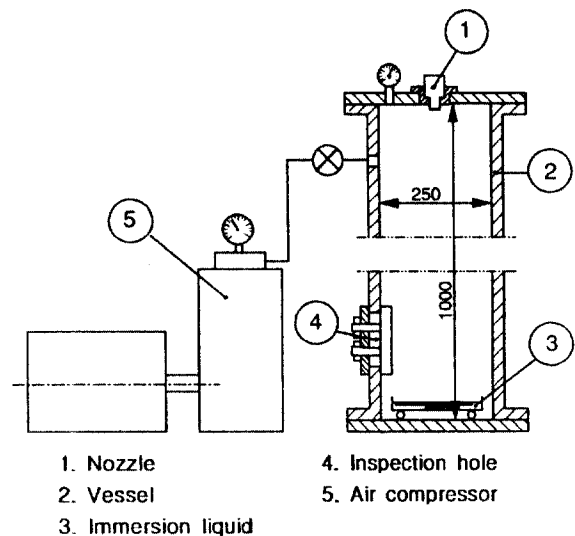


Fig. 2 Pressure chamber with injection nozzle

그러므로 미립화된 연료입자의 자유낙하속도( $V_t$ )는 다음과 같이 된다.

$$V_t = \left[ \frac{2M_f g (\rho_f - \rho_a)}{AC_d \rho_f \rho_a} \right]^{1/2} \quad (2)$$

그런데, 연료입자가 직경  $D(\mu\text{m})$ 인 球라고 가정하면, 자유낙하속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_t = \left[ \frac{4gD(\rho_f - \rho_a)}{3\rho_a C_d} \right]^{1/2} \quad (3)$$

따라서 연료액적의 직경이  $10\mu\text{m}$  또는  $1\mu\text{m}$  정도라면 1m 낙하하는데 소요되는 시간은 각각 약 11 sec와 33 sec가 된다. 그러므로 분사완료후, 적어도 액적의 자유낙하시간이 경과한 후에 용기를 개방하여야 한다. 실험에 사용한 연료는 C-중유 50%와 경유 50%를 혼합한 혼합유를 사용하였으며, 포집액은 중유의 분무입경측정에 적당하다고 알려진 10%의 메칠셀룰로이즈(Methylcellulose) 수용액과 에탄올을 1:5로 혼합한 포집액을 사용하였다<sup>2)</sup>. Table 1은 실험에 사용한 연료와 포집액의 물리적 성질을 나타낸다.

Table 1 Physical properties of test oil and immersion liquid ( T=293 K )

	Test oil	Immersion Liquid
Density (kg/m <sup>3</sup> )	867	855
Surface tension (N/m)	$30 \times 10^{-3}$	$24 \times 10^{-3}$
Kinematic viscosity (m <sup>2</sup> /s)	$13.96 \times 10^{-6}$	$4.33 \times 10^{-6}$

### 2.2 실험 방법

압축공기가 충전된 용기에 전자유압식 분사계로 연료를 1회 분사시키면 연료는 작은 액적으로 미립화되어 용기 하부에 설치되어 있는 포집액에 채집된다. 분사후 3분이 경과하면 용기내의 압축공기를 천천히 방출시키고, 용기의 창을 열어 포집용기 (slide glass)를 꺼내어 액적들을 광학현미경으로 50, 100, 200배로 확대하여 촬영하였다. 포집액에 담겨져 있는 액적들 중에는 포집액에 잠긴 액적이 있는 반면에 떠 있는 액적들도 있다. 따라서 큰 액적에 현미경의 초점을 맞추면 아주 작은 액적들은

초점이 맞지 않아 관찰이 잘 되지 않고, 반면에 작은 액적에 초점을 맞추면 큰 액적들의 크기가 과소평가된다. 이와같이 포집액을 사용한 입경측정에서 초점을 한 곳에 고정시키면 측정상의 오차 때문에 실제의 평균입경(SMD,  $D_{32}$ )보다 과대평가되거나 또는 과소평가될 수 있다. 그러므로 본 실험에서는 한 측정위치에서 먼저 현미경의 배율을 고정시키고 액적들의 크기에 따라 현미경의 초점을 달리 하여 수 회 촬영을 행하였다. 촬영위치는 포집용기(직경 240mm)의 반경방향으로 30mm 간격씩 9 Point로 하였다. 그리고 실험조건은 분사량을 84mg으로 일정히 하고, 분사압력을 20, 50, 110, 160MPa, 배압을 1, 1.5, 2.0MPa, 노즐직경을 0.25, 0.5, 1.0mm, 노즐의  $L/d_n$ 을 1, 4, 7, 9로 각각 변화시켜 실험을 하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 분사압력 20MPa로 대기압하에서 연료를 분사시키고, 직경이 1.5, 4.5, 10, 20  $\mu\text{m}$ 인 액적들을 2분 간격으로 현미경 촬영하여 시간경과에 따른 직경변화를 나타낸 것이다. Fig.3에 의하면 30분이 경과하여도 입경이 변화하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 시료의 경우 분사 후 용기를 개방하고 현미경 촬영을 하여도 증발에 의한 입경의 변화는 거의 없을 것으로 생각된다. Fig.4는 분사압력변화에 따른 분무 전체 평균입경( $D_{32}$ )의 변화와 분사된 연료가 평균입경( $D_{32}$ )의 크기로 형성된 균일 액적군이라고 가정했을 때의 연료액적들의 전표면적을 나타낸 것이다. 평균입경은 분사압력이

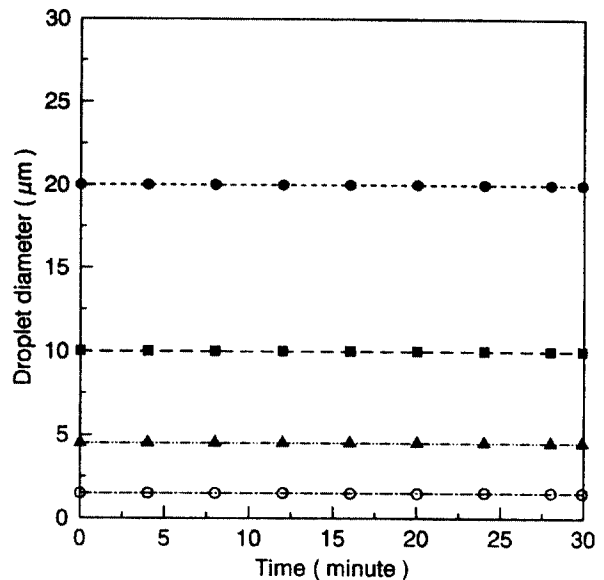


Fig. 3 Variance of droplet diameters according to time

증가할수록 감소하고, 특히 초고압 분사의 경우에는 평균입경( $D_{32}$ )이  $10\mu\text{m}$ 이하로 매우 작아짐을 알 수 있다. 이는 분사압력이 높을수록 연료의 분출속도가 빨라져 주위공기와의 상대속도가 증가할 뿐 아니라 노즐내에서의 난류강도가 증가하고, 노즐에서 분출되면서 급격한 압력강하로 분무내에 캐비테이션이 발생하여 연료의 미립화를 더욱 촉진시킨것으로 생각된다. 그리고 분사압력이 높아질수록 평균입경이 작아지는 반면에 분무 액적들의 전표면적은 직경 감소율에 반비례적으로 증가하고

있다. 즉 평균입경이 1/2로 작아지면 전표면적은 2배로 커지게 되고, 따라서 연료의 증발속도와 발생 증기량은 2배로 증가하게 된다. 그러므로 초고압으로 연료를 분사하면 연료의 평균입경은 작아지는 반면에 증발속도는 빨라진다. 따라서 연소속도도 빨라지리라 여겨진다. Fig. 5는 분사압력 160MPa 일 때 배압을 1, 1.5, 2MPa로 변화시켰을 때의 평균입경의 변화를 나타낸다. 분사압력이 일정할 경우, 배압이 낮을수록 분무의 평균입경이 작아지고 있다. 이는 배압이 낮을수록 분위기 밀도가 작기 때

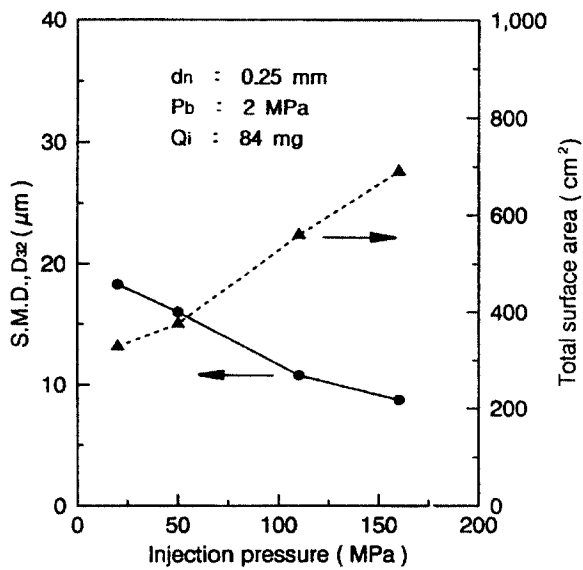


Fig. 4 Effect of injection pressure on Sauter mean diameter and total surface area

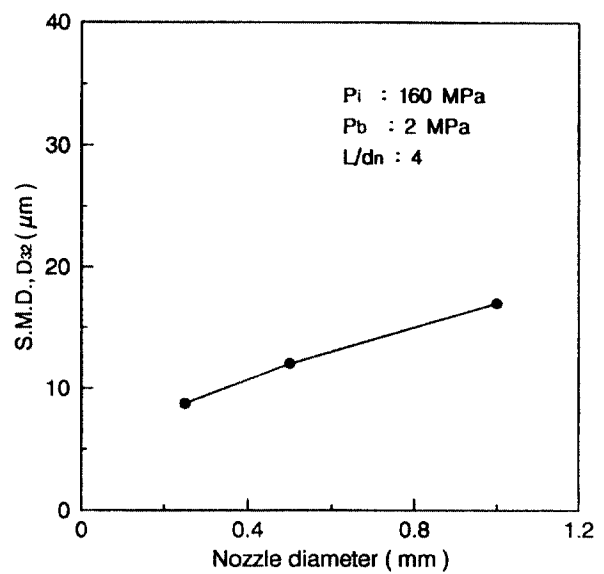


Fig. 6 Effect of nozzle diameter on Sauter mean diameter

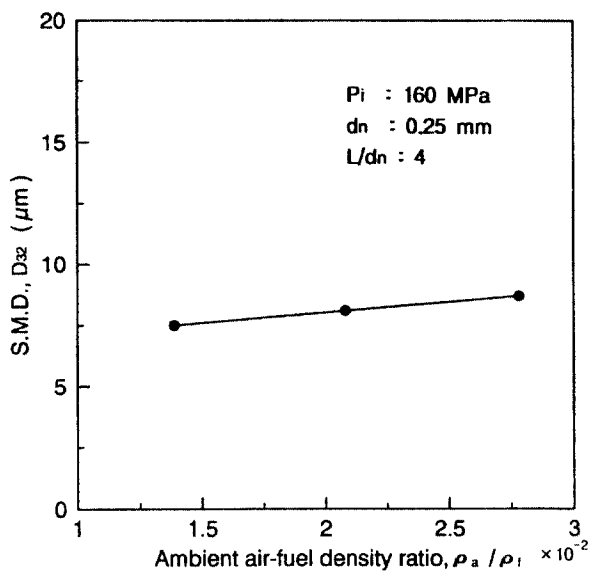


Fig. 5 Effect of ambient air-fuel density ratio on Sauter mean diameter

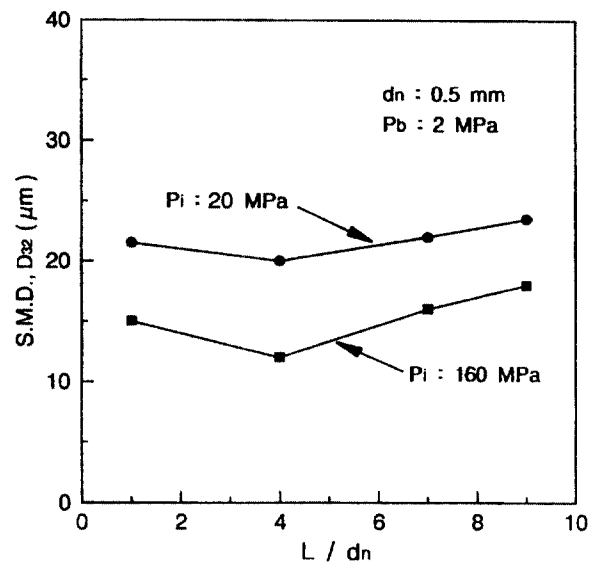


Fig. 7 Effect of  $L/d_n$  on sauter mean diameter

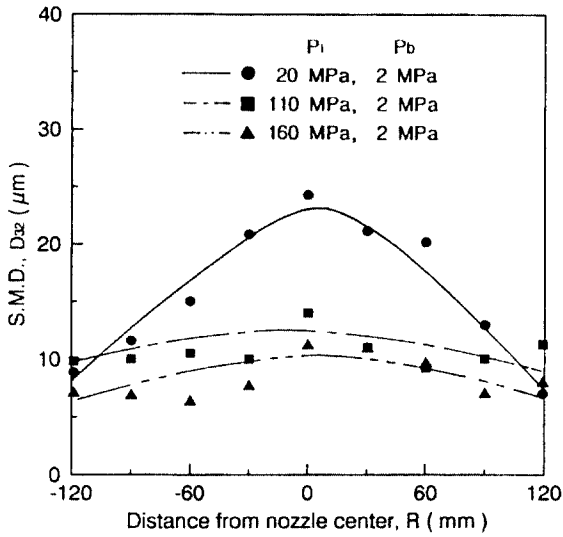


Fig. 8 Local Sauter mean diameter at various sampling positions

문에 노즐에서 분사된 분무의 분무선단속도가 빠르고, 분무와 주위공기와의 상대속도도 더 커지게 되어 공기역학적 상호작용에 의하여 미립화가 더욱 촉진되었기 때문으로 생각한다.

Fig. 6은 분사압력 160MPa, 배압 2MPa일 때 노즐직경 변화에 따른 평균입경의 변화를 나타낸 것으로 노즐직경이 작을수록 평균입경도 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 배압 2MPa, 노즐직경 0.5mm로 일정히 하고, 분사압력을 각각 160MPa, 20MPa로 변화시켰을 때, 노즐의 형상비(L/d<sub>n</sub>) 변화에 따른 평균입경의 변화를 각각 나타낸다. M.Arai 등<sup>1)</sup>은 분사압력 15~30MPa 범위에서, 노즐의 L/d<sub>n</sub>이 4일 때 분열길이가 최소가 되고, 분무각은 최대가 되며, 평균입경도 가장 작게 된다고 보고하고 있다. 본 실험에 의하면 저압뿐만 아니라 초고압 분사에서

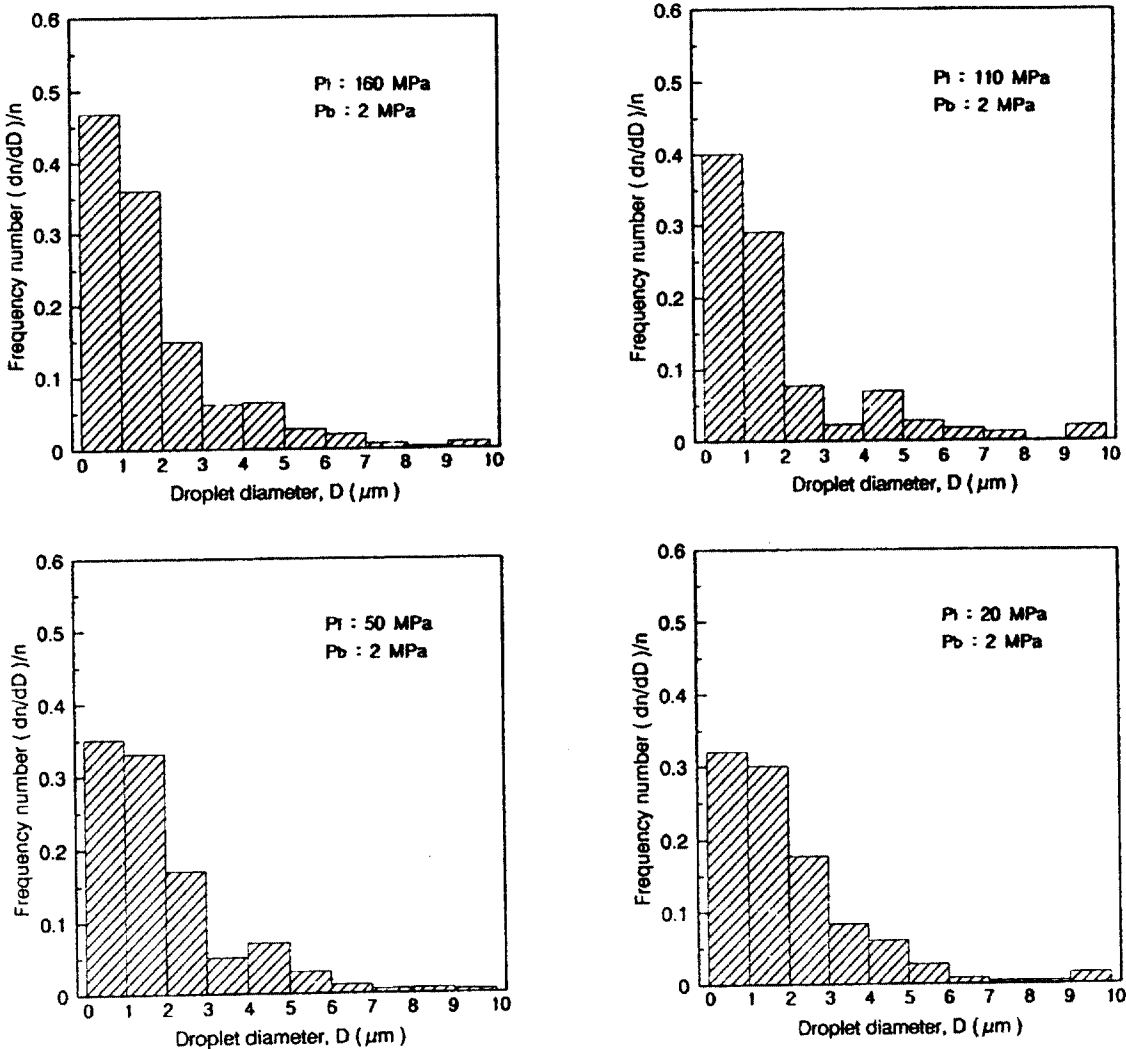


Fig. 9 Effect of injection pressure on droplet size distribution

도 마찬가지로 노즐의  $L/d_n$ 가 4일 때 평균입경이 가장 작게 됨을 확인하였다. 이상과 같은 실험들을 통하여 디젤분무의 평균입경( $D_{32}$ )의 실험식을 유도하면 다음과 같다.

$$D_{32} = B \cdot (P_i)^{-0.36} \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f}\right)^{0.212} \cdot (d_n)^{0.48} \quad (4)$$

여기서 B는 실험상수로서 본 실험 조건 범위내에서는 B=224 이다.

Fig. 8은 분사압력변화에 따른 노즐 중심축에서 반경방향으로의 국소 평균입경( $D_{32}$ )의 변화를 나타낸다. 분사압력에 관계없이 전반적으로 노즐 중심부에서 평균입경이 다소 크게 나타나고 노즐 중심에서 반경방향으로 멀어질수록 평균입경이 작아진다. 그리고 20MPa의 낮은 분사압력으로 분사시켰을 때에는 노즐 중심부에서 평균입경이 크게 나타나는 반면에 분사압력이 110, 160MPa일 때는 전체적으로 평균입경이 비슷하게 나타남을 알 수 있다. 이는 분사압력이 높아짐에 따라 분무선단속도 뿐만 아니라 분무반경방향으로의 운동에너지도 함께 증대되기 때문에 분무확산이 활발히 일어나고 분무의 미립화가 촉진되어 전체적으로 분무입경의 크기가 균일하게 된다고 판단된다. 초고압(160MPa) 분사일 때의 평균입경은 8~10 $\mu$ m 범위이다.

Fig. 9는 배압을 2MPa로 일정히 하고, 분사압력을 160, 110, 50, 20MPa로 했을 때, 액적직경(D)과 입수확률밀도( $dn/dD$ )/n의 관계를 나타낸 것이다. 분사압력이 160MPa인 경우, 2 $\mu$ m이하의 액적들이 전체의 약 80%를 차지하고 있는 반면, 분사압력이 20MPa인 경우에는 2 $\mu$ m이하의 액적들이 차지하는 비율이 작고 큰 액적들이 차지하는 비율이 점차적으로 높아지고 있다. 따라서, 초고압으로 연료를 분사시키면 미립화가 탁월하여 대부분의 액적들이 1~2 $\mu$ m의 매우 작은 액적들로 구성되어 마치 안개와 같은 상태로 되고, 액적분포는 매우 균일한 분포를 나타낸다. Probert<sup>6)</sup>에 의하면 균일도가 낮은 분무는 최초의 연소율은 높으나 다 타버리는 데에는 시간이 걸리는 반면에 균일도가 높은 분무는 최초의 연소율은 낮으나 연소의 종료가 빠르다. 따라서 연소기간을 단축시키려면 균일도가

높은 분무가 바람직하다. 그러므로 초고압 분사에 의한 높은 균일도는 연소기간 단축에도 기여하리라 판단된다.

#### 4. 결 론

전자유압식 연료분사계를 이용하여 종래의 분사압력 영역에서부터 초고압 분사압력까지의 넓은 범위에서 분사조건에 따른 분무의 평균입경과 입경분포를 액침법으로 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 디젤분무의 평균입경( $D_{32}$ )은 분사압력이 높을수록, 배압이 낮을수록, 노즐직경이 작을수록 작아 졌으며, 노즐의  $L/d_n$ 가 4일 때 가장 작았다.
- 2) 초고압으로 연료를 분사시키면 분무반경방향으로의 미립화가 촉진되어 반경방향으로의 거리에 관계없이 전체적으로 분무액적의 크기가 매우 균일하게 되었다.
- 3) 본 실험 범위내에서 분무 평균입경( $D_{32}$ )의 실험식을 제시하였다.

#### 참고문헌

1. M. Arai et al. "Disintegrating Process and Spray Characterization of Fuel Jet Injected by a Diesel Nozzle", SAE paper 840275
2. H. Hiroyasu and T. Kadota, "Fuel Droplet Size Distribution in Diesel Combustion Chamber", SAE Paper 740715
3. 田端道彦, "蒸發過程にあるディーゼル噴霧の平均粒径", 日本機械學會論文集, 56卷 521号, pp. 206~213, 1990
4. 新井雅隆, "レーザー回折を應用した粒徑解析装置の特性と噴霧の粒度分布測定", 日本機械學會論文集, 50卷 449号, pp. 98~106, 1984
5. 장세호, 김준효, 안수길, "전자유압식 분사계에 의한 초고압 디젤분무의 거동에 관한 연구", 한국자동차공학회논문집, 제4권, 제2호, pp. 137~146, 1996
6. Probert, R. P., Phil. Mag., 37 (1946), 94