

## 포트 분사 연료 인젝터의 분무 구조에 관한 연구

### An Study on the Spray Structure of Fuel Port Injectors

이창식\*, 이기형\*, 전문수\*\*, 손강호\*\*\*, 박종순\*\*

C. S. Lee, K. H. Lee, M. S. Chon, K. H. Sohn, J. S. Park

#### ABSTRACT

This study describes the spray structure of gasoline port injectors by using phase Doppler particle analyzer(PDPA) and particle motion analysis system(PMAS). The characteristics of fuel spray such as the spray penetration, spray angle and breakup processes were obtained by PMAS and the droplet size and mean velocity were measured by PDPA system. Pintle type and two-hole type injectors were used as gasoline port fuel injectors under various injection pressures. The effect of injection pressure on the droplet mean diameter and axial mean velocity of droplet were investigated under the various injection conditions. In addition, the comparison of breakup processes for the two types of injectors was also conducted. It is shown that pintle type injector has smaller droplet size than that of two-hole type injector.

주요기술용어 : Spray Structure(분무 구조), Port Fuel Injector(포트 분사식 인젝터),  
Spray Characteristics(분무 특성), Break Behavior(분열 거동)

#### 1. 서론

현재 대부분의 가솔린 기관에 적용하고 있는 흡기 포트 방식의 연료 분사 시스템은 공연비의 정밀 제어, 연료 소비율 및 유해 배출 가스를 동시에 저감시킬 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 이와 같은 흡기 포트 시스템의 경우, 연료의 분무 특성은 혼합기 형

성과 엔진 성능에 영향을 미치는 중요한 요소로 작용하며, 기관내의 연소 및 배출 특성에 직접적인 영향을 미치고 있다. 따라서 연료 분무 특성에 대한 다양한 이론적 해석이 시도되고 있으나, 연료 분무의 복잡한 물리적 특성으로 인하여 분무 구조에 대한 완전한 해석은 매우 어려운 실정이다. 그러므로 보다 정확한 실험을 통하여 분무 구조에 영향을 미치는 각종 인자들의 영향 및 이들 인자들의 상관 관계를 파악하고, 분무 특성 및 구조를 실험적으로 해석하여 분무 모델링의 방향을 제시하는 연구의 필요성이 절실히

\* 정희원, 한양대학교 기계공학부

\*\* 정희원, 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 한양대학교 기계기술연구소

요구된다<sup>(1)-(7)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 입자 운동 해석 장치(PMAS)와 PDPA 시스템을 이용하여 포트 분사식 연료 인젝터로부터 분사되는 연료의 분열 과정, 분무의 관통도 및 분무각 등의 거시적 분무 특성과 분무 입자의 직경, 속도 및 입경 분포 등과 같은 미시적 특성을 파악하고, 이들의 상관 관계를 분석함으로써 가솔린 인젝터의 분무 구조를 실험적으로 규명하는 것을 연구 목표로 한다.

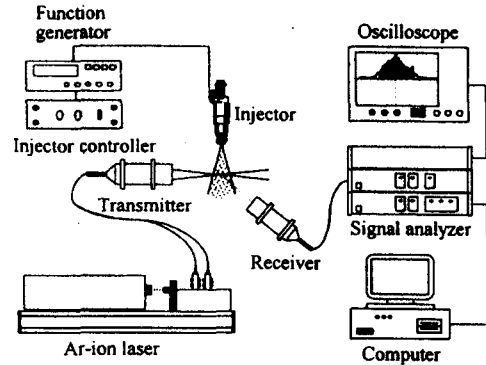


Fig. 1 Experimental apparatus of PDPA

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 분무 실험 장치

연료 분무의 속도, 입경 및 관통도 등과 같은 분무 특성을 측정하기 위하여 Fig.1과 같은 PDPA 시스템, 연료 인젝터 제어 장치 등으로 실험 장치를 구성하였다. 분무 실험용 광원으로는 수냉식 5W Ar-ion 레이저를 사용하였다. 광원으로부터 방사되는 빔은 Bragg cell을 통과하여 40MHz의 주파수 편이를 가지는 각각 2개의 편이빔(shifted beam)과 무편이빔(unshifted beam)으로 나누어지고, 이들 4개의 빔은 광케이블과 전송부(transmitter)를 통하여 측정점에 프린지를 형성한다. 이 때 연료 입자가 측정점을 통과하면 검출부(detector)에 산란광이 검출되고, 산란광의 도플러 주파수는 광변환 증폭기(photo-multiplier)에서 전기적 신호로 변환되어 신호 처리계를 통하여 입경, 속도 등과 같은 필요한 데이터를 실시간으로 제공한다<sup>(8)</sup>.

### 2.2 분무 거동 및 분열 가시화 장치

연료의 분무 거동 및 분열 과정, 분무의 관통도 및 분사각 등과 같은 거시적 분무 특성 등을 측정하기 위하여 분무 입자 해석 장치를 이용하였다. 실험 장치의 주요 구성품으로는 2중 스파크 방전 광원과 CCD 카메라, 4채널 시간 지연 제어 장치 및 실시간 화상 처리 장치 등으로 구성하였다.

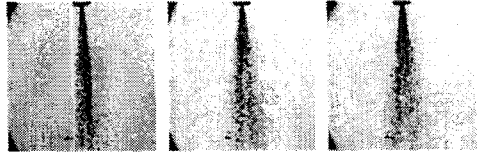
### 2.3 실험 방법

흡기 포트용 가솔린 연료 인젝터는 핀틀형과 2공형을 사용하여 실험하였으며, 분사 압력의 변화에 따른 분무 입자의 평균 입경 및 평균 속도 등과 같은 미시적 특성을 규명하기 위하여 분사 압력을 0.2~0.4MPa까지 50kPa 간격으로 변화시켰다. 측정 위치는 핀틀형의 경우 분사 노즐 팁에서 분무 중심축 하류 방향으로 120mm 지점까지 20mm 간격으로 측정하였고, 2공형의 경우는 180mm 지점까지 20mm 간격으로 측정하였다. 또한 측방향 거리 40mm인 점과 80mm인 점의 분무 중심축에 수직인 횡단면에서 입경 및 속도의 분포를 구하였다. 이 때, 인젝터의 분사 기간은 분사 노즐 팁에서 100mm 이후의 하류 방향에서도 안정된 분무 구조를 보이는 10ms로 유지시켰다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 핀틀형 인젝터의 분무 거동

Fig.2에 연료 분사 압력의 변화에 따른 핀틀형 인젝터의 분무 관통도 및 분무각의 변화를 측정하기 위하여 거시 분무 화상을 촬영하여 나타내었으며, 그 결과를 Fig.3에 도시하였다. 이 때 분사 기간은 10ms이고, 분사 시작 후 6ms에서 화상을 취득하였다.



(a)  $P_{inj}=0.2MPa$  (b)  $P_{inj}=0.3MPa$  (c)  $P_{inj}=0.4MPa$

Fig. 2 Spray structures of pintle-type injector

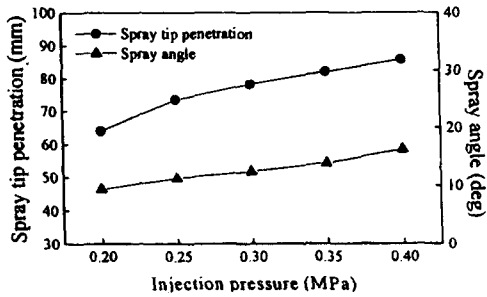


Fig. 3 Spray tip penetration and spray angle of pintle-type injector with various injection pressures

이 선도를 살펴보면, 핀틀형 인젝터의 경우 분사 압력이 증가할수록 분무 관통도와 분무각은 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다.

또한, 핀틀형 인젝터에서 분사되는 연료의 분열 과정을 살펴보고 분열 거리를 파악하기 위하여 노즐 팁으로부터 분무 중심축을 따라 하류로 내려가면서 미시 촬영을 실시하여 Fig.4에 나타내었다. 이 때 분사 압력은 0.3MPa이고 측정 영역의 크기는  $6.32(H)mm \times 4.71(V)mm$ 이다.

연료는 노즐 팁으로부터 액막의 상태로 분사되어 축방향 거리 약 12.5mm 까지 연료의 분열이 이루어지고 있으며, 노즐 팁에서 액체 연료가 분출할 때 연료 내부에 존재하는 압력 분포의 불균일 및 난류 성분에 의한 내부 작용력과 연료의 분사 속도와 외부 공기와의 상대 속도 차이에 의해 형성되는 전단 응력 등의 작용으로 인하여 분무 표면에서 불안정한 파형이 형성되고 있음을 알 수 있다.

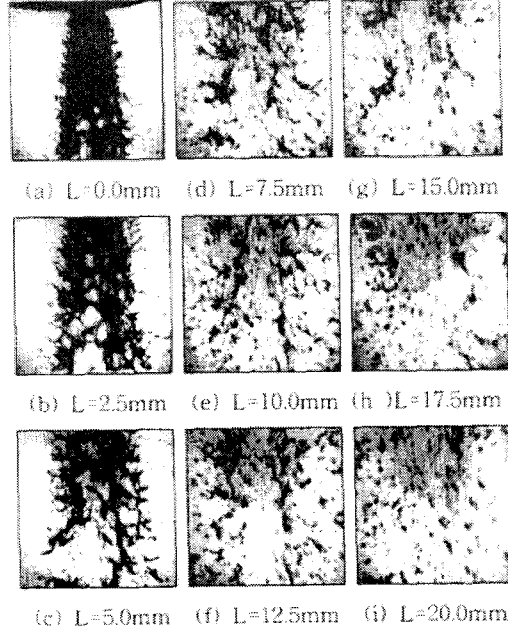


Fig. 4 Breakup processes of the spray from the pintle type injector

또한 축방향 거리 2.5mm인 점에서는 천공(perforation)이 발생하여 5mm 지점에서 그물 모양의 형태로 전개되어 축방향 거리 7.5mm 이후에는 작은 띠 또는 끈 모양 분열 조각 및 작은 입자로 깨어지고 있음을 알 수 있다. 분열에 의한 작은 액적의 형성은 12.5mm 이후에는 거의 일정한 모양의 미립 액적으로 분무되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 현상으로 보아 분열이 이루어지는 길이는  $L=12.5mm$ 임을 알 수 있다.

Fig.5와 Fig.6은 각각 분사 압력의 변화에 따른 분무 액적의 평균 입경 및 평균 속도를 축방향 거리의 변화에 따라 나타낸 선도이다. 이들 선도에서 보는 바와 같이 연료 분무 액적의 평균 입경의 경우 분사 압력이 0.3MPa 이상에서는 거의 영향을 받지 않고 일정한 것으로 나타났다. 또한 축방향의 거리 변화에 큰 영향을 받지 않고 어느 정도 일정하게 나타나고 있는데 이는 천공에 의한 액막 분열의 특징으로 천공이 발생하는 위치가 노즐의 기하학적 형태에 따라 정해지므로 축방향 거리와는

무관하게 입경 분포가 나타나고 있음을 보여주는 것이다. 축방향 평균 속도의 경우는 연료의 분사 압력의 증가와 더불어 커지고 있는 것으로 나타났으며, 축방향 거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 나타내고 있었다.

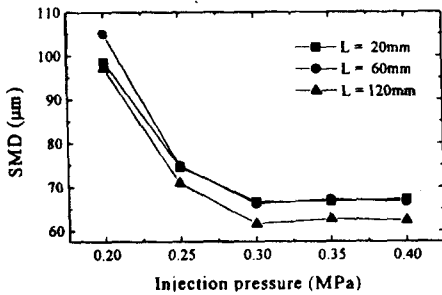


Fig. 5 Effect of axial distance on the SMD

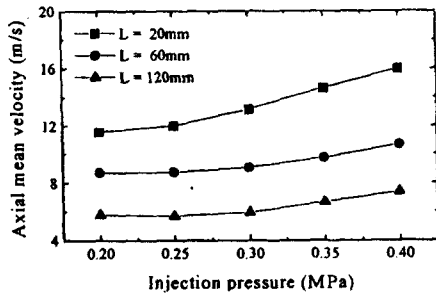


Fig. 6 Effect of axial distance on the axial mean velocity

Fig.7과 Fig.8에는 각각 연료의 분사 압력이 0.3MPa일 때 L=40, 80mm 위치에서 반경 방향의 거리 변화에 따른 입경 및 속도의 변화를 나타내었다. 이 선도에 나타낸 바와 같이 분무의 중심축에서 평균 입경이 가장 작게 나타나고 있으며, 반경 방향으로 진행할수록 연료 분무의 평균 입경은 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 축방향의 거리가 40mm에서 80mm로 증가한 경우에도 입경의 크기는 다소 감소하였지만 분포 경향은 거의 유사한 것으로 나타났다.

축방향 속도 분포의 경우, 분무의 중심축에서 가장 빠르고, 반경 방향의 거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 외부의 공기

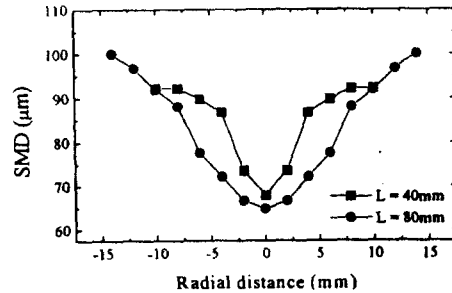


Fig. 7 Effect of axial distance on the Sauter mean diameter

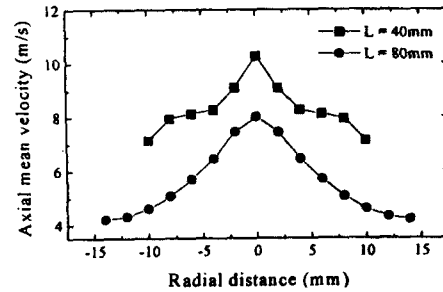


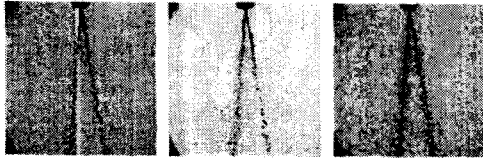
Fig. 8 Effect of axial distance on axial mean velocity

가 분무 중심으로 유입되어 분무 입자의 운동량을 증가시켜 중심축의 입자 속도가 외곽의 액적 속도보다 크게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이와 같이 외부 공기가 분무 중심축으로 유입되기 때문에 분무 중심축의 작은 액적이 비교적 큰 속도를 유지하면서 하류까지 도달할 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 핀돌형 인젝터의 경우, 이와 같은 속도의 영향으로 중심축에서의 입경은 하류에서도 균일하게 유지되는 것으로 판단된다.

### 3.2 2공형 인젝터의 분무 거동

Fig.9는 Fig.2에 나타낸 핀돌형 인젝터의 경우와 같은 실험 조건으로 2공형 인젝터의 분사 압력 변화에 따른 분무 관통도와 분무각의 변화를 측정하기 위하여 거시 촬영한 결과이며, 분무의 관통도 및 분무각의 측정 결과를 Fig.10에 나타내었다. 2공형 인젝터의 경우에도 분사 압력이 증가할수록 분무 관통

도는 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으나 분무각은 분사 압력에 관계없이 약 3~4°로 일정한 것으로 나타났다.



(a)  $P_{inj}=0.2MPa$  (b)  $P_{inj}=0.3MPa$  (c)  $P_{inj}=0.4MPa$

Fig. 9 Spray structures of two-hole type injector

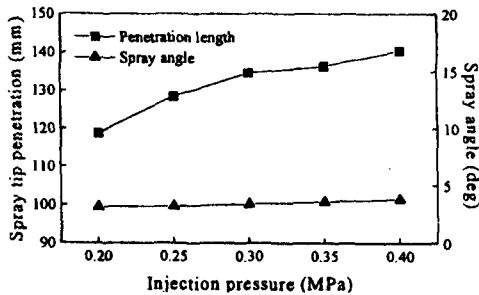


Fig. 10 Spray tip penetration and angle of two-hole type injector with various injection pressures

Fig.11에는 2공형 인젝터의 분열 과정 및 분열 길이를 알아보기 위하여 핀홀형 인젝터의 경우와 같은 실험 조건으로 연료의 분열 과정을 노즐 팁으로부터 분무 중심축을 따라서 관찰한 것이다. 이 때 측정 영역의 크기는 3.5(H)mm×2.5(V)mm이다.

2공형 인젝터의 연료 분사 노즐 사이의 각은 17°를 이루며 노즐 팁으로부터 축방향 거리 3mm인 점에서 두 액주로 구분된다. 7mm이하의 하류에서는 액주 분열 기구에서 나타나는 비대칭 형태의 파동이 형성되고, 이 파동이 증가하여 18mm에서는 액주가 끊어지고 있으며, 20mm이하에서는 거의 모두 액적으로 분열되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상으로 보아 2공형 인젝터의 경우 분무를 형성하기 위한 분열 영역의 길이는 약 20mm임을 알 수 있다.

Fig.12와 Fig.13은 각각 분무 중심축 방향에서 분무의 평균 입경과 속도 변화를 나타

낸 선도이다. 이 때 선도에 나타난 축방향 속도 성분은 노즐 중심축 방향의 속도 성분을 가리킨다. 평균 입경의 경우, 노즐 출구로부터 축방향 20mm지점까지 평균 입경의 변화는 급격한 감소를 보이나, 그 이후에는 서서히 증가하다가 40mm 이후에는 비교적 균일한 분포를 나타내고 있다.

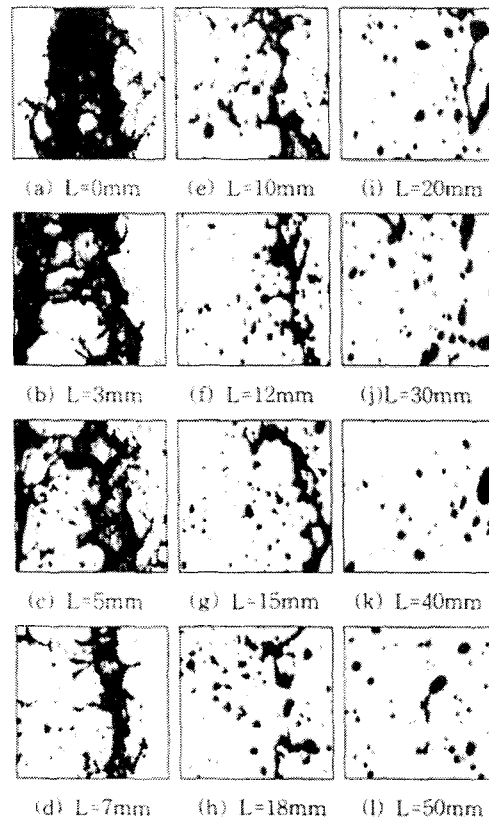


Fig. 11 Breakup processes of the spray from the two-hole type injector

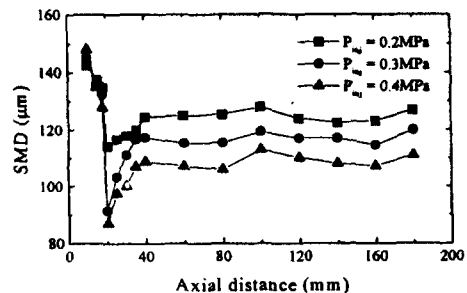


Fig. 12 Effect of injection pressure on the Sauter mean diameter

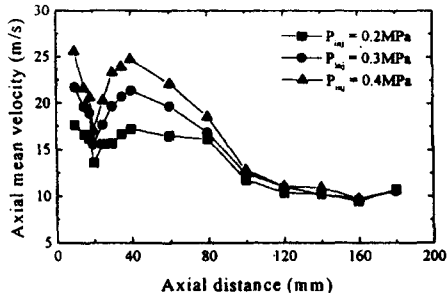


Fig. 13 Effect of injection pressure on the axial mean velocity

노즐 팁으로부터 축방향 거리 20mm인 점에서 액적 지름이 가장 작으며, 축방향 거리가 멀어질수록 액적간의 합착으로 인하여 다시 평균 입경은 증가하다가 40mm 이후부터는 거의 일정한 분포를 나타낸다. 축방향 평균 속도의 경우 노즐 출구 이후에 급격히 감소하여 20mm지점에서 최소값을 나타낸 후, 하류 40mm까지 증가하고 있으며, 하류 120mm 이후에는 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 또한 이 인젝터의 분열 길이인 축방향 거리 20mm 이후에서 분무의 평균 입경은 분사 압력이 증가함에 따라 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있으나 평균 속도의 경우는 하류 90mm 지점까지는 증가하다가 그 이후에서는 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다.

한편 Fig.14와 Fig.15에는 분무 축방향 40, 80mm에서 반경 방향의 변화에 따른 분무의 평균 입경과 평균 속도의 변화를 나타내었다.

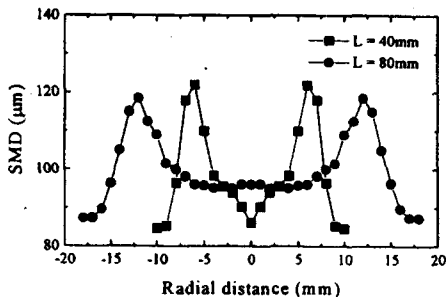


Fig. 14 Effect of axial distance on the Sauter mean diameter

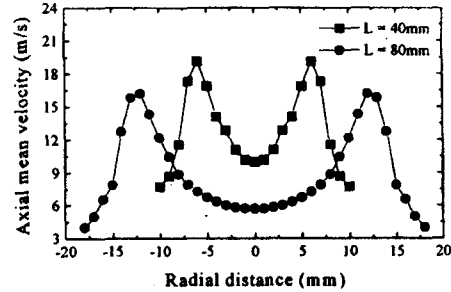


Fig. 15 Effect of axial distance on axial mean velocity

축방향 거리가 각각 40, 80mm인 경우에는 두 액주의 중심축에 해당하는 6, 12mm인 위치에서 가장 큰 평균 입경을 나타내고, 속도도 가장 빠른 것으로 나타났다. 이는 중심축에 위치한 큰 액적이 빠른 속도로 흐르므로 액주 중심축의 운동량이 다른 부분의 운동량보다 큰 것을 의미한다. 따라서 분무 도달 거리가 핀틀형보다 개선될 수 있으며, 2공형의 경우가 핀틀형에 비해 분사 목표 지점에 정확히 연료를 분사할 수 있는 특성을 가지는 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결론

포트 분사식 인젝터의 분무 구조에 관한 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 핀틀형 인젝터의 경우, 분사 압력이 증가할수록 분무 관통도와 분무각은 증가하는 것으로 나타났다. 또한 분사 압력이 0.3MPa 일 때 연료는 액막의 상태로 분사되어 액막 표면에서 불안정한 파형이 형성되며, 축방향 거리 3mm지점에서 천공이 발생하면서 분열 과정이 진전되어 12.5mm 이후에 액적이 생성되고 있는 것으로 나타났다.
2. 핀틀형 인젝터에서 분사되는 연료 액적의 축방향 속도는 분무의 하류로 내려갈수록 감소하고, 분사 압력이 증가할수록 커지는 것으로 나타났다. 또한 입경 분포는 축방향

의 거리에 무관하고, 0.3MPa 이상의 분사 압력에서는 축방향 거리와 압력에 무관하게 일정한 입경 분포를 나타내었다.

3. 2공형 인젝터의 관통도는 분사 압력이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였고, 분무각은 거의 일정하였다. 또한 분사 압력이 0.3MPa일 경우 하류 3mm에서부터 두 액주로 구분되고, 7mm이하의 하류에서 형성된 비대칭 형태의 불안정한 파동으로 인하여 18mm에서 액주가 끊어지며, 20mm 이하에서는 액적으로 분열된다.
4. 2공형 인젝터의 경우, 축방향 거리 20mm 지점(분열 길이)에서 입경과 속도가 가장 작았으며, 하류로 갈수록 속도는 감소하는 경향을 가지나 액적의 평균 입경은 큰 변화 없이 거의 일정하였다. 또한 두 액주 중심축에서 입경과 속도가 가장 크게 나타났다.

#### 참고 문헌

1. F.Q. Zhao, M.C. Lai and D.L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection - A Critical Review", SAE Paper Series No.950506, 1995.
2. M.C. Lai, F.Q. Zhao, A.A. Amer and T.H. Chue, "An Experimental and Analytical Investigation of the Spray Structure from Automotive Port Injectors", SAE Paper Series No.941873, 1994.
3. P.J. O'Rourke and A.A. Amsden, "The Tab Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup", SAE Paper Series No.872089, 1987.
4. T.W. Kuo, "Multidimensional Port and Cylinder Gas Flow, Fuel Spray and Combustion Calculations for Port Fuel Injection Engine", SAE Paper Series No.920515, 1992.
5. 이 상용, 액체의 미립화, 대우학술총서, pp.45~108, 1996.
6. A.H. Lefebvre, Atomization and Spray, Hemisphere Publishing Corp., pp.27~78, 1989
7. W. D. Bachalo and M.J. Houser, "Phase/Doppler Spray Analyzer for Simultaneous Measurements of Droplet Size and Velocity Distribution", Optical Engineering, Vol.23, No.5, pp.583~590, 1984
8. 이 창식, 이 기형, 전 문수, 김 영호, "가솔린 분무의 유동 특성에 관한 연구", 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, Vol.2, pp.79~84, 1997