

## 직분식 가솔린 기관 고압 인젝터의 연료 무화 특성

### Spray Characteristics of High-Pressure Injector in Direct-Injection Gasoline Engine

이창식\*, 최수천\*\*, 김민규\*\*\*  
Chang-sik Lee, Soo-chun Choi, Min-kyu Kim

#### ABSTRACT

An experimental study was carried out to investigate the global spray behavior and spray characteristics of high-pressure fuel injector in the direct-injection gasoline engine.

The atomization characteristics of fuel spray such as mean droplet size, mean velocity, and velocity distribution were measured by the phase Doppler particle analyzer. The spray tip penetration and spray width were investigated by the result of visualization experiment. The quantitative spray characteristics of injector spray were measured under various spray conditions and ambient pressures. The results of experiment show that the increase in ambient pressure have influence on the spray tip penetration and spray development processes. Also, the influence of injection pressure and measuring location on the mean velocity and droplet size distribution were discussed.

주요기술용어 : GDI Injector(GDI 인젝터), Spray penetration(분무 도달거리),  
Droplet mean diameter(액적 평균 지름), Droplet velocity(액적 속도)

#### 1. 서론

산업의 발달과 생활 수준의 향상은 자동차의 수요를 더욱 증가 시키게 되었고, 이에 따른 자동차용 기관에서 배출되는 유해 가스는 더욱 심각한 환경 및 공해 문제로 대두되고 있다.

직접 분사식 가솔린 엔진은 연소실 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 정확한 연료 공급 제어

가 가능하며, 이에 따라 고압축비 및 체적 효율의 증대와 더불어 연료 소비율의 개선 및 열손실 저감 등이 포트 분사식 가솔린 엔진에 비하여 성능 향상을 도모할 수 있는 장점을 가지고 있다.

그러나 연소실 내에서 연료-공기의 혼합 시간이 매우 짧기 때문에 적절한 혼합기를 얻고자 할 경우에는 연료에 대한 미립화 성능을 높이고, 연소실 내에서 적당한 위치에 최적 혼합기 분포가 이루어지도록 하여야 한다. 이와 같은 관점에 따른 가솔린 기관 인젝터의 분무 특성에 관한 연구로는 포트 분사 및 직분식 가솔린 인젝터의 분무

\* 정회원, 한양대학교 기계공학부

\*\* 정회원, 동서대학교 기계과

\*\*\* 한양대학교 기계공학과 대학원

특성 및 미립화에 관한 연구<sup>(1,2,3)</sup>를 비롯하여, Iwamoto<sup>(4)</sup>의 직분식 가솔린 엔진의 개발과 엔진 및 인젝터 성능에 관한 연구, Dodge<sup>(5)</sup>의 직분식 SI엔진의 연료 혼합비 형성 과정 분석에 관한 연구 등을 들 수 있다. 또한 인젝터의 분무 특성에 주안을 둔 연구로서는 중공 원추형 분무의 거동 및 유동장 분포 등에 관한 이론 해석과 실험에 관한 연구<sup>(6)</sup>, 고압 인젝터 분무 거동 및 분무 미립화 특성에 관한 연구<sup>(7,8)</sup> 등 여러 연구자들의 연구가 보고되고 있다.

그러나 직분식 가솔린 인젝터 분무의 정밀 제어, 분무 액적 증발 과정, 혼합기 형성의 인자 등이 연소 및 배출물 저감에 미치는 영향 등에 관해서는 아직도 미해명 부분이 많아서 직분식 인젝터 분무 성능을 향상시키기 위한 더욱 체계적인 연구가 요망되고 있다.

본 연구는 직접 분사식 가솔린 엔진에 사용하고 있는 압력 스윙형 인젝터의 연료 분무의 도달 거리와 미시적 특성인 연료 분무 액적의 입자 크기, 분무 액적의 평균 속도 분포 등에 영향을 미치는 연료 분사 압력, 연료 분무 조건을 분석하여, 직접 분사식 인젝터의 연료 분무 특성을 실험적으로 규명한 것이다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 1은 가솔린 고압 인젝터에서 분사되는 연료 분무의 평균 입경, 속도 등을 분석하기 위한 실험 장치의 계통도를 나타낸 것이다.

실험 장치는 가압한 연료를 공급할 수 있는 연료 분사 시스템과 연료 분무의 액적, 입경 및 속도를 구하기 위한 PDPA(phase Doppler particle analyzer) 시스템으로 구성하였다.

이 장치의 광원은 출력 1.5W인 Ar-ion 레이저를 사용하였으며 레이저 빔은 40MHz의 주파수 시프트를 가지며 각각 2개의 시프트 빔과 언시프트 빔으로 나누어진다. 이들 빔은 광케이블과 트랜스미터를 통하여 프린지를 형성하고,

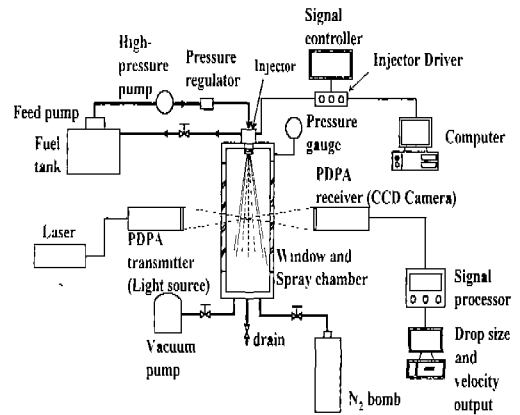


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

이 때 연료 분무 액적이 프린지 형성부를 통과할 때 검출부에 생기는 산란광과 이들 자료를 신호처리 시스템에 입력시켜 연료 액적의 평균 지름과 속도를 구한다.

### 2.2 실험 방법

직분식 엔진 인젝터의 분무 특성에 미치는 연료의 분사 압력 및 주위 기체의 압력의 변화의 영향을 알아보기 위하여 연료의 분사 압력과 분사 기간을 각각 3MPa, 5MPa, 7MPa와 1ms, 3ms, 5ms로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 스프레이 체임버 내의 가스 압력은 0.1MPa, 0.3MPa, 0.7MPa, 1.1MPa의 4가지 압력 조건으로 실험하였다.

그리고 분무의 평균 입경 및 평균 속도는 인젝터 노즐 팁으로부터 5mm 간격으로 하류 방향의 거리 80mm까지 노즐 중심 축선 상에서 측정하였다. 축 방향의 거리에 따른 반경 방향의 액적 분포 및 속도 등을 측정하여 반경 방향의 분무 액적의 분포 특성을 구하였다.

실험에 사용된 연료 분사 인젝터는 단공 노즐을 갖는 압력 분무 스윙형 분사기이고, 노즐의 지름은 0.6mm이다.

한편 실험에 사용한 가솔린의 밀도는 680.3 kg/m<sup>3</sup> 이고, 점성 계수는 2.9×10<sup>-4</sup> Ns/m<sup>2</sup>이다

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 인젝터의 연료 분사량

Fig. 2는 연료 인젝터에서 분사되는 연료 분사량을 분사 기간이 3ms 및 5ms일 경우 1~100회/초의 주기로 3000회 분사했을 때 연료 분사량의 평균치를 나타낸 것이다.

이 선도에서 연료 분사 기간이 5ms일때는 분사 횟수의 증가와 더불어 연료 분사량은 저하하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 분사 횟수가 많아질수록 분사 기간 중 유효 분사량을 갖는 유효한 통전시간이 분사 횟수가 작을 경우보다 안정적으로 유지하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

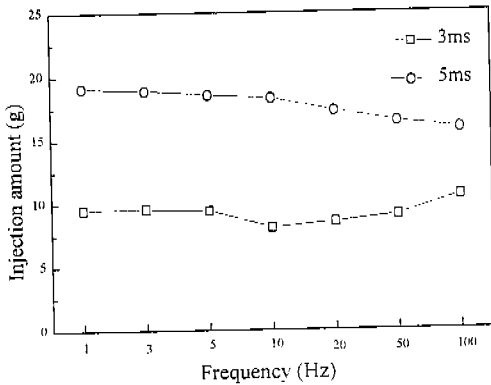


Fig. 2 Influence of Injection duration on injection amount of fuel

Fig. 3은 인젝터에서 분사되는 연료 분사량과 분사 압력을 연료 분사 기간의 변화에 대하여 비교한 것이다.

이 선도에서 연료 보는 바와 같이 분사량은 각 분사 압력 조건에서 500회 분사하였을 경우의 질량을 측정하여 나타낸 것으로서, 분사 기간이 길어질수록 연료 분사량은 증가하는 경향을 나타내었다.

분사 기간이 짧은 3ms의 경우에는 분사 압력이 3MPa에서 7MPa까지 변화하여도 연료 분사

량의 변화가 거의 없으나 분사 기간이 길어질수록 분사 압력의 영향으로 분사량이 증가하는 경향을 보였다.

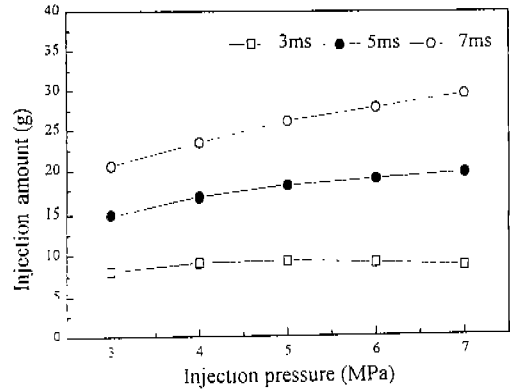


Fig. 3 Influence of injection pressure on injection amount of fuel

이러한 경향은 분사 기간이 3ms인 경우에는 분사 밸브가 열려있는 시간이 짧기 때문에 실제로 유효 리프트 기간 즉 유효 통전 기간이 매우 짧아져서 분사 압력의 영향이 크게 나타나지 않는 것으로 볼 수 있다. 이 선도에서 보는 바와 같이 인젝터의 연료 분사 기간이 일정할 경우 분사 압력의 증가는 인젝터로부터 분사되는 연료의 분사량을 현저하게 증가시키는 인자로 됨을 알 수 있다.

#### 3.2 분무의 도달 거리와 분무폭

Fig. 4는 연료 분사 압력을 5MPa로 일정하게 유지하고 스프레이 체임버의 주위 압력을 0.1MPa과 1.1MPa로 유지시킨 경우의 분무 도달 거리와 분무의 폭을 가시화하여 얻은 화상 이미지로부터 구하여 비교한 것이다

이들 선도의 비교에서 보는 바와 같이 분무선단의 도달 거리와 분무 폭은 체임버 내의 압력이 높아지면 현저하게 감소하는 경향을 나타내었다.

이러한 경향은 체임버 내의 압력은 분무 발달 과정에 영향을 미치는 중요한 인자가 되고 있음을 알 수 있다.

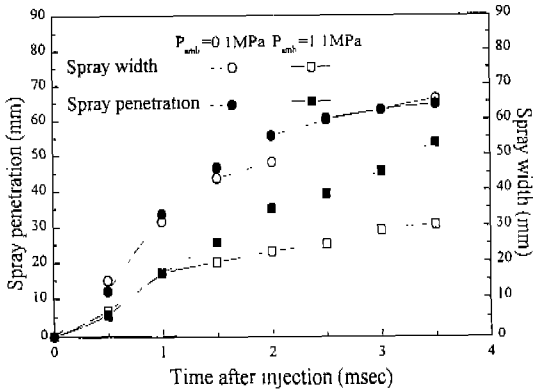


Fig. 4 Comparison of spray penetration and spray width at 5MPa of injection pressure

### 3.3 분무 액적의 지름 및 분무 속도

Fig. 5는 연료 분사 압력이 5MPa일 경우에 축방향 거리 40mm에서의 연료 분무 액적의 평균 지름 SMD와 축방향의 속도를 비교한 것이다.

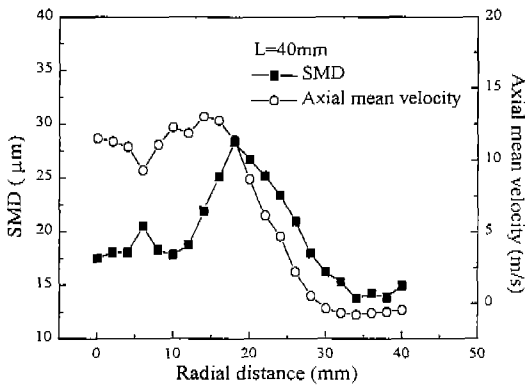


Fig. 5 Comparison of SMD and axial velocity at 5MPa of injection pressure

이 선도에서 보는 바와 같이 축방향의 속도는 반경 방향의 거리 15mm인 곳에서 최대가 되며 SMD의 변화는 반경 방향의 거리가 20mm인 위치에서 최대가 되었다가 급격히 감소하는 경향을 보였다.

이러한 경향은 반경 방향의 거리 20mm부근이 증공 원추의 분무 중심이 되어 속도가 빠르고, 또한 선회의 영향과 상향 와류가 형성되어 주위 공

기가 흡인되고, 중심 속도 증가에 따른 액적의 합착이 일어나서 액적 지름이 증가하는 것으로 볼 수 있다<sup>(3)</sup>.

Fig. 6은 분사 압력이 5MPa일 경우 축방향의 거리 20mm, 40mm일 경우의 액적 평균 입경 SMD의 분포를 반경 방향의 거리에 대하여 비교한 것이다.

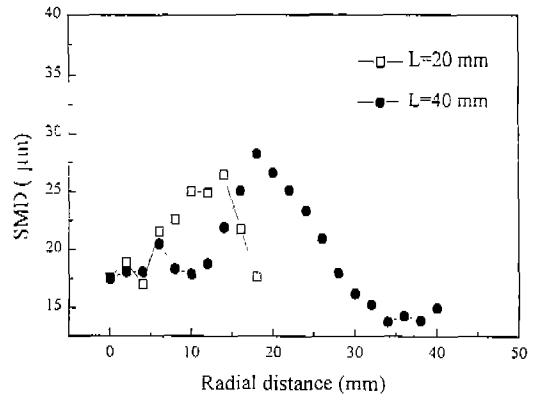


Fig. 6 Influence of axial distance on mean droplet size at 5MPa of injection pressure

이 선도에서 보는 바와 같이 축방향의 거리 20mm인 경우에는 반경 방향 거리 15mm부근에서 액적의 평균 지름 SMD는 최대가 되나 축방향 거리 40mm인 경우에는 반경 방향 거리 20mm부근에서 SMD가 최대가 되었다가 급격히 저하하는 경향을 나타내었다.

이러한 경향은 분무 형태가 원추 증공형으로 전개되고 있기 때문에 축방향의 거리가 증가함에 따라 분무 형태도 원추형으로 발달되어 최대 입경 위치도 축방향의 거리에 따라 바깥쪽으로 이동하는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 7은 연료 분사 압력 5MPa일 경우 반경 방향의 분무 속도와 SMD와의 관계를 나타낸 것이다. 반경 방향의 속도 분포를 살펴보면 반경 방향의 거리의 변화에 따라 다소 변동하고 있으며, 측정된 전체 범위에서 역방향의 속도를 나타내고 있다. 이러한 속도 분포는 연료 분무의 중심축을 향하여 주위 공기가 흡인되고 있음을 의미한다.

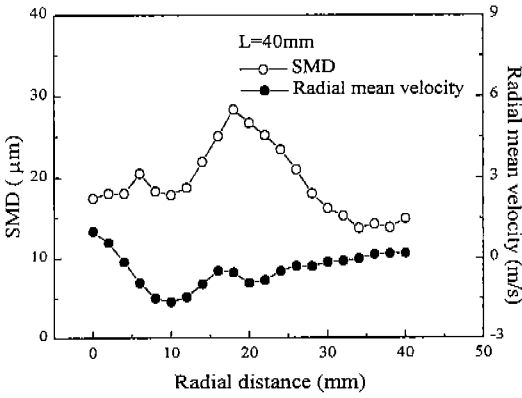


Fig. 7 Comparison of SMD and radial velocity of spray droplet at 5MPa of injection pressure

Fig. 8은 연료 분사 압력을 변화시킨 경우의 축방향의 거리 40mm인 위치에서 분무 액적의 평균 입경을 측정하여 분사 압력에 대하여 비교한 것이다.

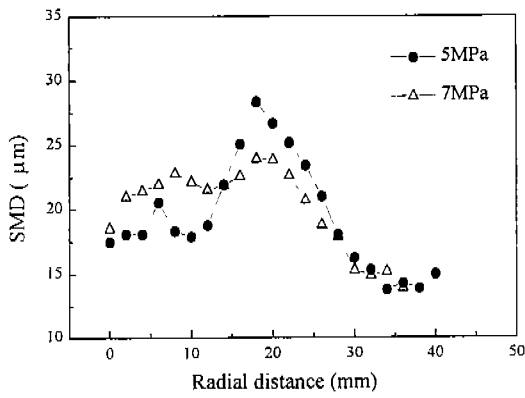


Fig. 8 Effect of injection pressure on mean droplet size at 40mm of axial distance

이 선도에 표시된 바와 같이 연료의 분무 입경은 5MPa인 경우에는 반경 방향의 증가에 따라서 증가하며 반경 방향의 거리 20mm에서 최대치로 되었다가 감소하는 경향을 나타내었다. 분사 압력이 7MPa일때는 분무 액적의 입경이 반경 방향 22mm에서 최대치를 가지며 그 분포는 3MPa의 경우와 입경의 차이는 있으나 비슷한 변화의 경향을 나타내었다

Fig. 9는 분사 압력이 5MPa과 7MPa이고 축

방향의 거리 40mm일 때 액적의 축방향 속도를 반경 방향의 거리에 대하여 비교한 것이다.

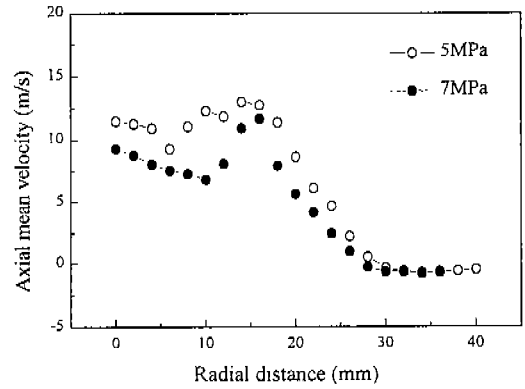


Fig. 9 Effect of injection pressure on axial velocity

이 선도에서 보는 바와 같이  $P_{inj}=5MPa$ 인 경우에는 반경 방향의 거리가 15mm부근에서 최대 속도에 달하였다가 저하하는 경향을 가지며 반경 방향의 거리 30mm 이후의 영역에서 속도는 0에 가까우며 분무는 더 이상 진행하지 않음을 나타내고 있다.

Fig. 10은 분사 압력이 5MPa, 7MPa인 경우 반경 방향의 평균 속도를 비교한 것이다.

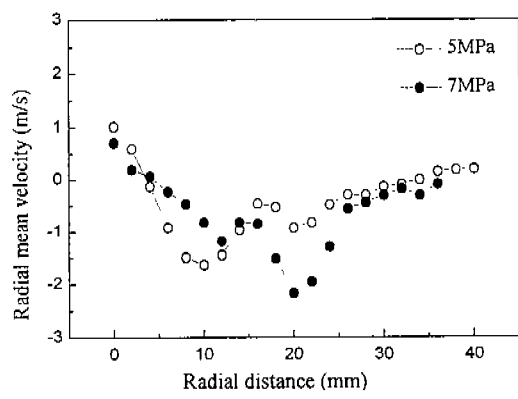


Fig. 10 Influence of axial distance on SMD at 40mm of axial distance

이 선도에 나타낸 바와 같이 축방향의 거리가 40mm인 경우에는 반경 방향 속도가 변동하다가 반경 방향의 거리가 20mm에서 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 분사 압력이 5MPa 및

7MPa일때 속도 변화는 유사한 경향을 보이고 있다.

#### 4. 결 론

직접분사식 가솔린 기관의 인젝터에서 분사되는 연료 분사량 및 분무 액적의 분무 도달 거리와 분무 폭을 가시화 결과로부터 구하고, 액적의 평균 지름, 평균 속도 및 축방향, 반경 방향의 거리에 따른 분무 미립화 특성을 여러 가지 분사 및 분무 조건에 대하여 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 가솔린 엔진에서 직분식 인젝터의 연료 분사량은 분사 기간이 짧은 경우 분사 압력은 거의 영향을 받지 않고 일정하나, 연료 분사 기간이 길어지면 분사 압력의 증가와 더불어 분사량은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 연료 분무 액적에서 최대 평균 액적의 지름이 발생하는 위치는 축방향의 거리 즉 노즐 출구로부터 하류쪽으로 갈수록 중심에서 멀어지며, 연료 분무의 평균 액적 지름은 분무 액적의 평균 속도가 최대로 되는 지점 부근에서 최대로 된다. 이 점을 지나면 연료 분무 미립의 축방향의 속도와 액적의 평균 입경은 현저하게 저하하며 압력의 영향을 거의 받지 않는다.
3. 연료 분사의 압력이 높아지면 최대의 액적 지름이 나타나는 반경 방향의 위치는 분무 중심축에 가까워지며, 이 위치에서 축방향의 속도는 최대가 된다.

#### 참 고 문 헌

1. F. Q. Zhao, Lai, M. C. Lai, and D. L. Harrington, "The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection - A Critical Review" , SAE Paper 950506, 1995.
2. F. Q. Zhao, M. C. Lai, and D. L. Harrington, "A Review of Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignited Direct-Injection Gasoline Engines" , SAE Paper 970627, 1997.
3. C. S. Lee, K. H. Lee, M. S. Chon, Y. H. Kim, J. S. Park, and N. H. Cho, "A Study on the Spray Structure of High Pressure Gasoline Injection", The 3th Conference of ILASS-Asia, pp.37~42, 1998.
4. L. G. Dodge, "Fuel Preparation requirements for direct-injection spark ignition Engine", SAE Technical paper No. 962015., 1996.
5. Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamaguchi, and H. Ando, "Development of Gasoline direct. Injection Engine", SAE paper 970514., 1997.
6. C. F. Lee, and F. V. Bracco, "Initial comparisons of Computed and Measured Hollow-cone Sprays in an Engine", SAE Technical paper, 940398, 1994.
7. F. Q. Zhao, J. H. Yoo, Y. Liu, and M. C. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines", SAE Paper 961925, 1996.
8. N. Mattavi. James, Charles, A. Amann, "Combustion modeling in Reciprocating Engines", Plenum press, P. 377, 1980.
9. W. A. Sowa, "Interpreting mean Drop diameters using Distribution Moments", Atomization and sprays, Vol 2, pp. 1-15., 1992.
10. A. H. Lefebvre, "Atomization and Sprays", Hemisphere publishing Corporation, P. 280, 1986.