

가솔린 직분식 엔진 인젝터의 연료 분무 미립화 특성

Atomization Characteristics of Fuel Spray in Fuel Injector in Gasoline Direct-Injection Engine

이 창식*, 이 기형*, 최 수천**, 권 상일***

C. S. Lee, K. H. Lee, S. C. Choi, S. I. Kwon

Abstract

This paper presents the spray atomization characteristics of the high-pressure gasoline injector for the direct-injection gasoline engine. The gasoline sprays of the injector were injected into a pressurized spray chamber with a optical access at various ambient pressures.

The atomization characteristics of fuel spray such as mean diameter, mean velocity of droplet were measured by the phase Doppler particle analyzer system. In order to investigate the effect of fuel injection pressure on the quantitative characteristics of spray, the global visualization and experiment of particle measurement in the fuel spray were investigated at 3, 5 and 7 MPa of injection pressure under different ambient pressure in the spray chamber.

Based on the results of this work, the fuel injection pressure of fuel injector in gasoline direct-injection engine have influence upon distribution of the mean velocity and droplet size of fuel spray. Also, the influence of injection pressure on the velocity distribution at various measuring location were investigated.

1. 서론

자동차용 기관으로부터 배출되는 유해가스는 최근 자동차의 수요 증가에 따라 더욱 심각한 환경 공해 문제로 되고 있다. 가솔린 기관의 연소 현상은 연료 분무의 미립화가 양호할수록 혼합기 형성이 촉진되어 연소 안정 및 연비 저감과 배출 가스 중의 유해성분 배출 저감에 기여할 수 있다.

직접 분사식 가솔린 엔진의 경우에는 연소실 내에 연료를 직접 분사하므로 정확한 연료 공급 제어가 가능하며, 이에 따라 펌프 손실, 고압축비화, 체적 효율의 증대와 더불어 연료 소비율을 포트 분사식 가솔린 엔진에 비하여 약 30% 정도까지 개선할 수 있다.

그러나 실린더 내에서 연료-공기의 혼합시간이 매우 짧기 때문에 양호한 혼합기를 형성시키기 위해서는 연료의 미립화 성능을 높이고 연소실 내에 알맞은 위치에 적절한 혼합기 분포가 이루어지도록 하는 분무기술의 개발이 필요하다. 이러한 관점에서 가솔린 기관의 분무 특성에 관한 연구는 Zhao 등

* : 한양대학교 기계공학부

** : 동서울대학 기계과

*** : 한양대학교 대학원

의 포트 분사 및 GDI 인젝터의 분무 및 미립화에 관한 연구 [1,2,3] 을 비롯하여, Dodge [4]의 직분식 SI 엔진의 연료 혼합비 형성 과정 분석에 관한 연구, Iwamoto [5]의 직분식 가솔린 엔진의 개발과 엔진 및 인젝터 성능에 관한 연구 등이 있다. 또한 인젝터의 분무 특성에 주안을 둔 연구로는 중공 원추형 분무의 분무 형태 및 유동장 분포 등에 관한 이론 해석과 실험에 관한 연구 [6], 고압 인젝터 분무 거동 및 분무 미립화 특성에 관한 연구 [7,8] 등 여러 연구자들의 연구가 보고되고 있다.

그러나 직분식 가솔린 인젝터의 정밀 제어, 분무의 액체 미립의 중발 과정, 최적 분무 미립화 특성, 혼합기 형성의 증진 인자 등이 연소 및 배출물 저감에 미치는 영향 등에 대하여는 아직도 미해명 부분이 많아서 직분식 인젝터의 분무 특성에 대해서는 미립화 향상을 위한 더욱 체계적인 연구가 요망되고 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 기관에 적용되는 고압 가솔린 인젝터의 연료 분사 압력을 변화시켰을 경우의 연료 분사량, 연료 분무의 평균 액적 지름, 분무 액적의 평균속도, 입경분포 등에 미치는 영향을 실험적으로 구하고, 연료 분무 평균 액적 지름, 축방향 및 반경 방향의 액적 속도 분포를 여러가지 분무 조건에 대하여 실험하여 연료의 미립화 특성을 규명하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

가솔린 고압 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 평균 입경, 속도 등을 분석하기 위한 실험 장치의 계통도를 Fig. 1에 나타내었다.

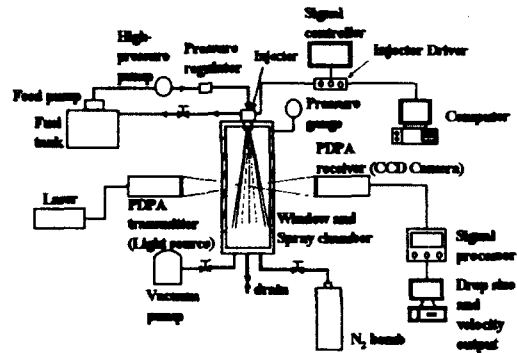


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

실험 장치는 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 PDPA(phase Doppler particle analyzer)의 시스템과 가압한 연료를 공급하여 분사하는 연료 분사 시스템으로 구성하였다. 연료 공급 및 고압 분사 시스템은 연료 탱크, 고압 펌프, 압력 조정기와 인젝터로 구성되며, 연료 고압 펌프는 0.75 kW AC 전동기로 구동하였다. 연료 분사량은 인젝터 드라이버의 제어에 의하여 이루어졌으며, 스프레이 챔버의 압력 조건은 N_2 가스를 봉입하여 제어하였다. 이 장치에서 광원은 Ar-ion 레이저(출력 : 1.5W)를 사용하였으며 레이저 빔은 40MHz의 주파수 시프트를 가지는 각각 2개 시프트 빔과 언시프트 빔으로 나누어진다. 이들 빔은 광케이블과 트랜스미터를 통하여 프린지를 형성하고, 이 때 연료 분무 액적이 프린지 형성부를 통과하면 검출부에 산란광이 검출되고, 이들 자료를 신호처리 시스템으로 입력하여 연료 액적의 평균 지름과 속도를 구한다.

2.2 실험 방법

연료의 분사 압력 및 주위 기체의 압력의 변화에 따른 분무 특성 및 미립화 특성을 알아보기 위하여 연료의 분사 압력과 분사 기간을 각각 3, 5, 7MPa 와 1, 3, 5msec 의 3 단계로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 스프레이 챔버 내의 압력이 분무 형상 및 분무 도달 거리 등에 미치는 영향을 실험하기 위하여 0.1, 0.3, 0.7, 1.1MPa 의 4 단계의 압력 조건으로 실험하였다.

또한 분무의 평균 입경 및 평균 속도는 인젝터 노즐 팁으로부터 5mm 간격으로 하류 방향 80mm 까지 노즐 중심 축선 상에서 측정하였다. 실험에 사용된 노즐은 단공 압력 분무 스월형 인젝터로서 지름은 0.6mm 이고, 연료의 밀도는 680.3kg/m^3 이고, 점성 계수는 $2.9 \times 10^{-4}\text{Ns/m}^2$ 이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연료 분사량

Fig. 2 는 인젝터로부터 분사되는 연료 분사량에 영향을 미치는 분사 압력의 영향을 연료 분사 기간에 대하여 비교한 것이다.

이 선도에서 연료 분사량은 각 압력 조건에서 500 회 분사하고, 그 질량을 측정하여 평균한 것으로서, 특히 분사 기간이 길어질수록 분사량은 증가하는 경향을 나타내었다. 연료 분사량은 분사 기간이 짧은 3ms 의 경우에는 압력을 3MPa 에서 7MPa 까지 변화시킨 경우에도 연료 분사량의 변화가 거의 나타나지 않고 있으나 분사 기간이 길어질수록 압력 변화의 영향은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

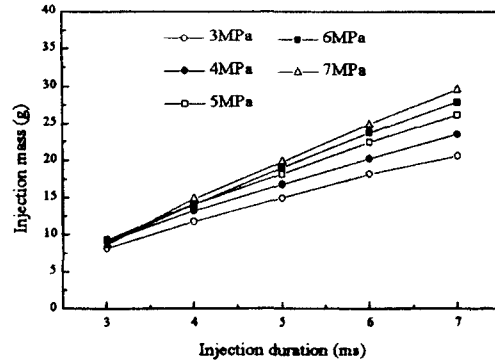


Fig. 2 Influence of injection duration on injection quantity of fuel

이러한 경향은 3ms 의 경우에는 분사 밸브가 열려있는 시간이 짧기 때문에 실제로 유효 통전 기간 또는 유효 리프트 기간이 매우 짧기 때문에 압력의 영향이 적게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이들 결과에서 보는 바와 같이 분사 기간이 일정할 경우 분사 압력이 증가함에 따라 인젝터로부터 분사되는 연료의 분사량은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2 연료 분무의 미립화 특성

Fig. 3 은 연료 분사 압력을 변화시킨 경우의 축방향의 거리 20mm 인 위치에서 분무 액적의 평균 입경을 측정하여 분사 압력에 대하여 비교한 것이다.

이 선도에 표시된 바와 같이 연료의 분무 입경은 3MPa 의 경우 경우에는 반경 방향의 거리 14mm 까지 증가하여 최대치로 되었다가 감소하는 경향을 나타내었다. 14mm 이후의 위치에서는 입경이 작아지며 압력 변화에 따른 변화가 거의 없었다. 분사 압력이 7MPa 의 경우에도 입경의 반경 방향 분포는 3MPa 의 경우와 입경의 차이는 있으나 비슷한 변화의 경향을 나타내었다.

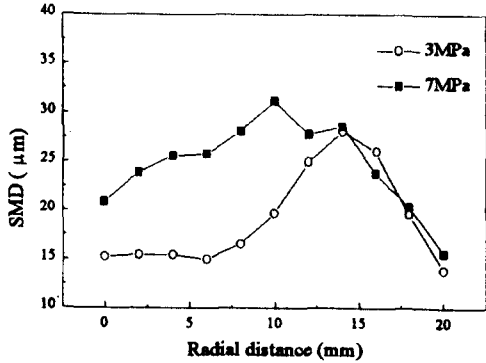


Fig. 3 Effect of injection pressure on mean droplet size

Fig. 4는 분사 압력을 3MPa 과 7MPa 로 분사한 경우의 축방향의 거리 20mm 일 경우 액적의 축방향 속도를 반경 방향의 거리에 대하여 비교한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 반경 방향의 거리 12mm 부근에서 최대 속도에 달하였다가 저하하는 경향을 가지며 그 이후의 영역에서 속도는 압력 변화의 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

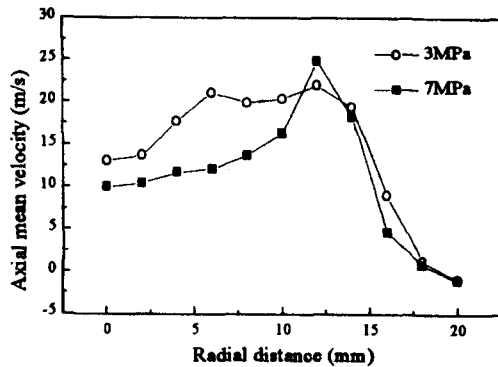


Fig. 4 Effect of injection pressure on axial velocity

Fig. 5는 분사 압력 3MPa 경우 축방향의 거리의 변화에 따른 액적의 평균 입경을 구하여 나타낸 선도이다.

이 선도에 나타낸 바와 같이 축방향의 거리가 20mm 인 경우에는 반경 방향 거리

12mm 부근에서 최대치를 보이다가 급격히 액적 지름이 저하하는 경향을 나타내었고, L=40mm 에서는 약 20mm 이후의 영역에서 입경이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

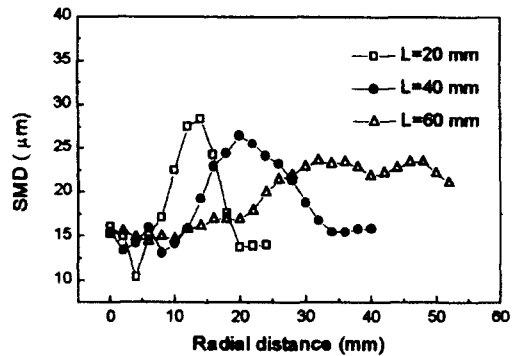


Fig. 5 Influence of axial distance on SMD at 3MPa of injection pressure

또한 축방향의 거리 60mm 에서는 입경의 변화가 L=20, 40mm 의 경우에 비교하여 매우 완만한 변화를 보이고 있는 것으로 보아 압력의 영향이 비교적 적음을 알 수 있다. 축방향의 거리 L 이 멀어질수록 최대 지름을 나타내는 위치가 바깥쪽에 존재하는 경향을 나타내고 있는데 이것은 분무 형태가 원추형 형태로 전개되고 있음을 나타내는 것이다.

Fig. 6은 분사 압력이 5MPa 일 경우의 연료 분무 액적의 평균 입경을 축방향의 거리에 대하여 도시한 것이다. 축방향의 거리 20mm 일 때의 평균 입경 SMD는 반경 방향의 거리의 증가와 더불어 입경이 증가하다가 반경 방향의 거리 15mm 에서 최대치를 나타내었다. 그 이후에는 급격히 감소하였다. L=40mm 에서는 반경 방향으로 18mm 인 지점에 이를 때까지 액적 지름은 증가하고, 그 이후에서는 반경 방향으로 40mm 까지 감소하는 경향을 보였다. 한편 축방향의 거리

60mm 인 경우에는 반경 방향으로 20mm 부근까지 서서히 증가하고 그 이후에는 입경의 변화가 거의 나타나지 않는 것으로 보아 분사 압력의 영향이 거의 미치지 않고 있음을 알 수 있다.

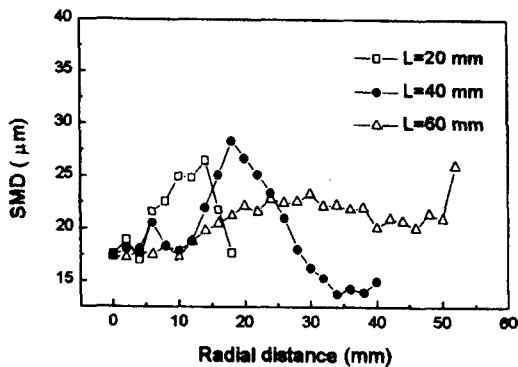


Fig. 6 Influence of axial distance on SMD at 5MPa of injection pressure

한편 연료의 분사 압력을 7MPa 로 분사한 경우에는 Fig. 7 에 나타낸 것과 같이 축방향의 거리 20mm 일 때 반경 방향의 거리가 증가함에 따라 입경이 크게 증가하여 10mm 지점에서 최대로 되고 그 이후에는 급격히 감소하였다. 축방향의 거리 40mm 인 경우에는 3MPa, 5MPa 의 경우보다 최대 지름의 위치가 내측으로 존재하는 것으로 나타났다.

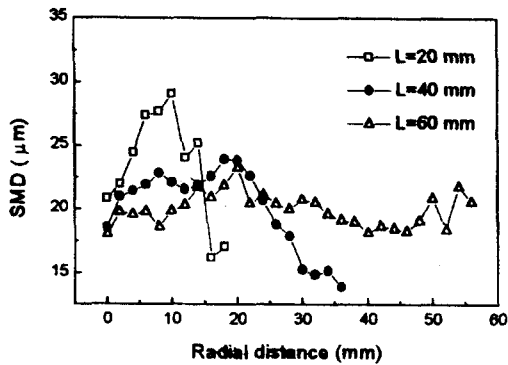


Fig. 7 Influence of axial distance on SMD at 7MPa of injection pressure

이러한 경향은 분사 압력이 증가하면 축방향의 속도가 증가하여 분무류의 실제 중공 환상 유동 중심부는 중심쪽으로 근접하게 됨을 의미한다.

Fig. 8 은 분사 압력 7MPa 일 경우 분무 중심 축방향의 거리에 따른 축방향 속도 반경 방향의 속도 분포를 나타낸 것이다.

이 선도에 나타난 바와 같이 축방향의 속도는 앞의 Fig. 7 에 표시된 SMD 의 분포의 경향과 유사한 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 최대 입경이 나타나는 위치에서 축방향의 속도 또한 최대로 되어 액적이 합착 및 속도의 영향을 크게 받아 입경은 커지는 것으로 볼 수 있다.

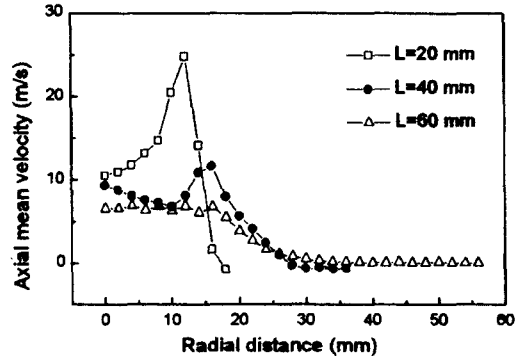


Fig. 8 Influence of axial distance on axial velocity at 7MPa of injection pressure

Fig. 9 는 연료의 분사 압력이 7MPa 일 때의 축방향의 거리에 따른 반경 방향의 평균 속도를 나타낸 것이다. 이 선도에서 축방향의 거리 20mm 일 때 반경 방향의 속도는 반경 방향의 거리 12mm 부근에서 최대로 되었다가 급격히 저하하는 경향을 나타내고 있다. 축방향의 거리 40mm 이하에서는 속도 변화가 완만하여 큰 차이가 나타나지 않았다. 이러한 경향은 분무 하류로 갈수록 분무각은

확산되고, 분무 속도 또한 감소되어 반경 방향의 속도 분포는 거의 나타나지 않는 것으로 볼 수 있다.

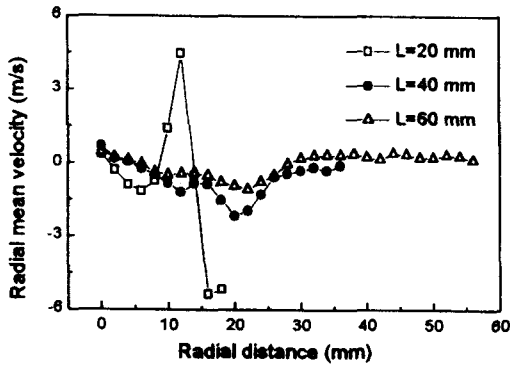


Fig. 9 Influence of axial distance on radial velocity at 7MPa of injection pressure

한편 Fig. 10 은 축방향의 거리 20mm 일 때의 축방향 속도와 반경 방향의 속도 분포를 비교한 것이다.

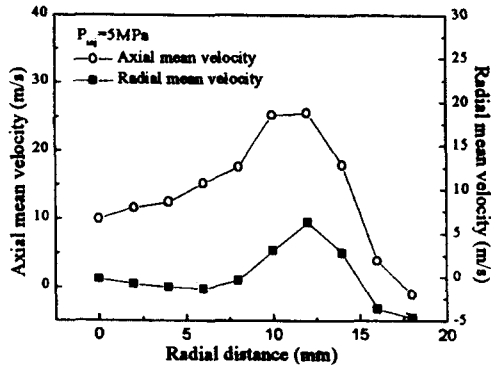


Fig. 10 Comparison of axial velocity and radial velocity

축방향의 평균 속도와 반경 방향의 평균 속도는 반경 방향의 거리 12mm 부근에서 최대로 되었으며 두 속도 공히 동일한 반경 방향의 위치 부근에서 최대로 되는 경향을 나타내었다.

4. 결론

직접분사식 가솔린 기관 인젝터의 연료 분사량 및 분무 액적의 평균 지름, 평균 속도 및 축방향, 반경 방향의 거리에 따른 분무 미립화 특성을 여러 가지 분사 및 분무 조건에 대하여 실험한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 직분식 인젝터의 연료 분사량은 분사 기간이 짧은 경우에는 분사 압력이 영향을 거의 받지 않으나 연료 분사 기간이 길어지면 분사량은 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 연료 분무의 평균 액적 지름은 분무 액적의 평균 속도가 최대로 되는 지점 부근에서 최대로 되며, 이 지점을 지나면 연료 분무 미립의 축방향의 속도와 액적의 평균 입경은 현저하게 저하하며 압력의 영향을 거의 받지 않는다.
3. 가솔린 인젝터의 연료 분사 압력이 증가할수록 최대 액적 지름이 나타나는 반경 방향의 위치가 분무 중심축에서 가까워지며, 이 위치에서 축방향의 속도는 최대로 된다. 따라서 이 점은 중공 원추형 분무류의 유동 중심이 되며, 연료 액적의 합착이 많아져서 입경은 더욱 증가하는 경향을 갖는다.

참고 문헌

1. Zhao, F. Q., Lai, M. C., and Harrington, D. L., 1995, " The Spray Characteristics of Automotive Port Fuel Injection-A Critical Review ", SAE Paper 950506.

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