

가솔린 인젝터의 연료 분무 미립화 특성에 미치는 분사 압력의 영향

이창식* · 최수천** · 김민규*** · 권상일***
(1999년 9월 3일 접수)

Effect of Injection Pressure on Atomization Characteristics of Fuel Spray in High-Pressure Gasoline Injector

Chang-sik Lee, Soo-chon Choi, Min-kyu Kim and Sang-il Kwon

Key Words : Fuel Atomization(연료 미립화), Spray Characteristics(분무 특성), Gasoline Injector(가솔린 인젝터), Mean Droplet Diameter(액적 평균 입경)

Abstract

This paper describes the macroscopic behavior and atomization characteristics of the high-pressure gasoline injector in direct-injection gasoline engine. The global spray behavior of fuel injector was visualized by shadowgraph technique. The atomization characteristics of gasoline spray such as mean diameter and mean velocity of droplet were measured by the phase Doppler particle analyzer system. In order to obtain the influence of fuel injection pressure, the macroscopic visualization and experiment of particle measurement on the fuel spray were investigated at 3,5 and 7 MPa of injection pressure under different surrounding pressure in the spray chamber. The results of this work show that the fuel injection pressure of gasoline injector in GDI engine has influence upon the mean droplet diameter, mean velocity of spray droplet, the spray tip penetration, and spray width under the elevated ambient pressure.

1. 서론

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

가솔린 포트 분사 방식의 인젝터에서는 연료를 흡기관 또는 흡기 밸브 포트에 분사하기 때문에 연료의 공급 지연, 냉간 시동 또는 과도 운전시에

발생하는 가솔린 분무가 벽면에 충돌하면서 생기는 벽면 젖음 및 액막 현상 때문에 연료-공기의 정확한 혼합비 제어가 곤란하여 미연탄화수소의 배출이 많아지는 문제점이 있다.

직접 분사식 가솔린 엔진의 경우에는 연소실 내에 연료를 직접 분사하므로 정확한 연료 공급 제어가 가능하며, 이에 따라 연료 소비율을 포트 분사식에 비하여 약 30% 정도까지 개선할 수 있으며, 또한 펌핑 손실, 고압축비화, 체적 효율의 증대 등을 도모할 수 있다.

그러나 연료-공기의 혼합 시간이 매우 짧기 때문에 양호한 혼합기를 형성시키기 위해서는 연료의 미립화 성능을 높이고 연소실 내의 알맞은 위치에 적절한 혼합기 분포가 이루어지도록 하는 분무기술의 개발이 필요하다. 이러한 관점에서 가솔린 기관의 분무 특성에 관한 연구는 Zhao 등의 포트분사 및 GDI 인젝터의 분무 및 미립화에 관한 연구⁽¹⁻³⁾를 비롯하여, Iwamoto⁽⁴⁾의 직분식 가솔린 엔진의 개발과 엔진 및 인젝터 성능에 관한 연구,

* 회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : cslee@email.hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0427 FAX : (02)2281-5286

** 동서울대학 기계과

*** 한양대학교 대학원 기계공학과

Dodge⁽⁵⁾의 직분식 SI 엔진의 연료 혼합비 형성 과정 분석에 관한 연구 등이 있다. 또한 인젝터의 분무 특성에 주안을 둔 연구로는 중공 원추형 분무의 분무 형태 및 항력계수, 유동장 분포 등에 관한 이론 해석과 실험에 관한 연구⁽⁶⁾, 고압 인젝터 분무 거동 및 분무 액체 미립화 특성에 관한 연구^(7,8) 등 여러 연구자들의 연구가 보고되고 있다.

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

이러한 관점에서 본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 기관에 적용되는 고압 가솔린 인젝터의 분무 분열 과정, 분무 거동, 분무의 도달 거리 및 분무 폭 등의 거시적 분무 형상을 가시화 기법을 적용하여 실험적으로 규명한다. 이와 아울러 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 평균 액적 지름, 분무 액적의 평균 속도, 입경 분포, 분무 속도 등을 분사 압력 변화와 여러 가지 분무 조건에 대한 미립화 분무 특성을 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

가솔린 고압 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 거시적인 거동을 분석하기 위한 가시화 실험 장치의 구성은 가솔린 인젝터의 분무 구조 실험에 적합한 실험 장치를 사용하였다⁽⁹⁾.

분무의 발달과정은 새도그래프법을 이용하여 분무 형태, 분무 선단의 도달 거리, 분무 폭 등을 가시화하고, 이들을 여러가지 분무 조건에 대하여 비교 검토하였다. 가시화된 분무의 화상의 취득은 실시간 신호 제어 시스템으로부터 제어되며, 이때 CCD 카메라로부터 얻어진 화상은 이미지 그래버를 통하여 컴퓨터에 저장된다. 이와 같이 얻어진 이미지로부터 분무 발달 과정과 분무 도달 거리, 분무 폭 등의 거시적 특성을 분석하였다.

Fig. 1은 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 PDPA(phase Doppler particle analyzer)의 시스템의 구성과 그 제원을 도시한 것이다. 이 장치에서 광원은 Ar-ion 레이저(출력 : 1.5W)를 사용하였으며 레이저 빔은 40MHz의 주파수 시프트를 가지는 각각 2개 시프트 빔과 언시프트 빔으로

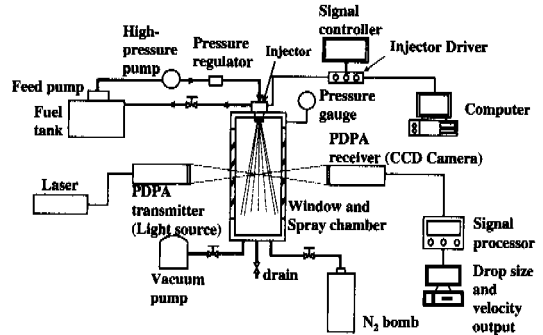


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

나누어진다. 이들 4개의 빔은 광케이블과 트랜스미터를 통하여 프린지를 형성하고, 이 때 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

분사 압력 및 주위 기체의 압력 변화에 따른 분무 특성 및 미립화 특성을 알아보기 위하여 연료의 분사 압력과 분사 기간을 각각 3, 5, 7MPa와 1, 3, 5msec의 3단계로 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다. 스프레이 챔버 내의 기체 압력은 0.1, 0.3, 0.7, 1.1MPa의 4단계로 변화시키면서 실험하였다. 또한 분무의 입경 및 속도는 인젝터 노즐 팁 5mm에서 5mm 간격으로 하류 방향 80mm까지 노즐 중심 축에서 측정하였다. 실험에 사용된 노즐은 단공 압력 분무 스웰형 인젝터를 사용하였고, 노즐 출구 지름은 0.6mm이고, 연료의 밀도는 680.3kg/m^3 이고, 점성 계수는 0.00029Ns/m^2 이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 인젝터의 분무 유량

Fig. 2는 인젝터로부터 분사되는 연료 유량을 연료 분사 시간 및 분사 압력에 대하여 비교한 것이다. 이 선도에서 연료 유량은 각 압력 조건에서 500회 분사하여 얻은 1회 분사량에 대한 평균 분사량을 도시한 것으로서, 분사 압력이 높을수록 분사량은 증가하며, 특히 분사 기간이 길어질수록 분사량은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

연료 분사량은 분사 기간이 짧은 경우에는 압력이 변화하여도 분사량의 변화가 거의 나타나지 않고 있으나 분사 기간이 길어질수록 압력 변화의 영향은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다. 이

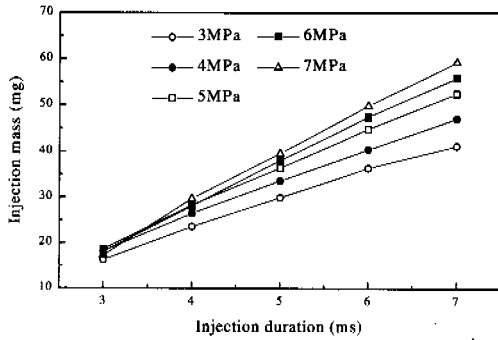


Fig. 2 Influence of injection pressure on injection quantity of fuel

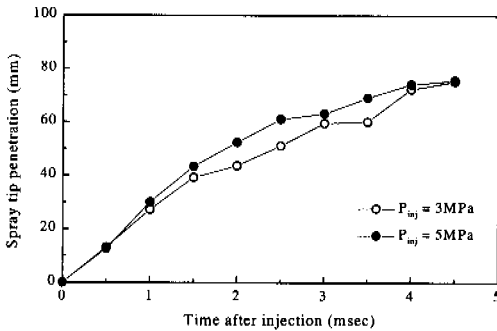


Fig. 3 Comparison of Spray tip penetration and Spray width ($P_{amb}=0.1MPa$)

러한 경향은 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.

3.2 분무의 거시적 특성

가솔린 인젝터로부터 분사되는 연료의 외적 특성 즉 거시적 거동(macroscopic behavior)은 분무 관통도, 즉 분무 선단의 도달 거리(penetration)와 분무각 및 분무 폭으로 표시된다.

Fig. 3 은 분사 압력을 변화시킨 경우 분무의 도달 거리와 분사 후의 시간과의 관계를 나타낸 것이다. 분무 형태는 분사 후 시간의 경과와 분사 압력이 증가함에 따라 도달 거리가 증가하고 있으며 분무의 형태는 Fig. 4 와 같이 증공 원추형 분무를 나타내었다.

또한 분무의 발달과 더불어 분무 원추류 외측에 분무 흐름과 대항하는 와류가 형성하고 있음을 알 수 있다. 이 대항 상방향의 링 모양의 와류는 분사 시간이 경과와 더불어 증가하였으며, 이러한 유동은 주위류의 흡입 효과를 증진시켜 분무되는 연료 미립과 공기와의 접촉 및 혼합을 향상시키는

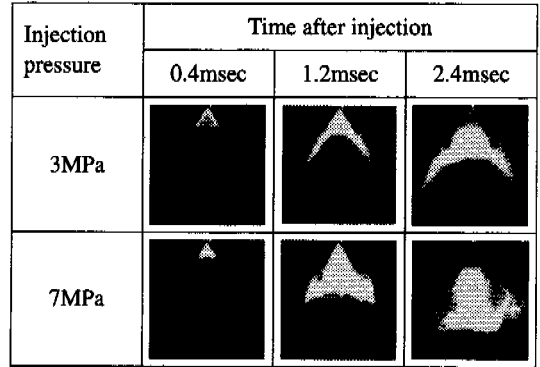


Fig. 4 Comparison of Spray development and upward counter vortex ($P_{amb}=0.1MPa$)

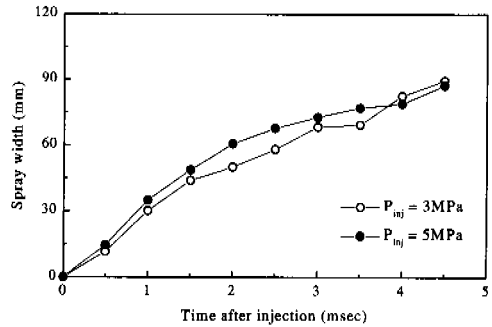


Fig. 5 Influence of fuel injection pressure on spray width ($P_{amb}=0.1MPa$)

역할을 하며, 이러한 분무의 상향 회전 운동을 개선하여 공기 및 연료 분무 입자의 혼합을 촉진시키는 효과를 가져온다. 이와 같은 분무류와 선회 와류 사이의 효과에 대하여는 여러 연구자들에 의해 보고된 바 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 이들 선도에서 분무 형상과 상향 와류 형태를 비교하여 보면 압력이 7MPa의 경우 와류는 더욱 활발해져서 3MPa의 경우보다 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

분무의 도달 거리는 연료 분사 압력과 주위 압력의 차에 따라 증가하며 또한 분사후의 시간의 경과에 따라 증가하는 경향을 갖는다.

Fig. 5 는 분사 압력을 변화시킨 경우 분무 폭을 분사 시간에 대하여 비교한 선도이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 분사 압력이 5MPa인 경우 분무 폭이 3MPa의 경우보다 증가하며 시간 경과에 따라 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

연료 분무의 거시적 특성에 영향을 미치는 주위 압력의 영향을 비교하기 위하여 주위 압력을 0.1MPa에서 1.1MPa까지 변화시킨 경우의 분무 도달 거리와 분무 폭을 Fig. 6 과 Fig. 7 에 각각 나타내었다. 이들 선도에서 나타난 바와 같이 분무

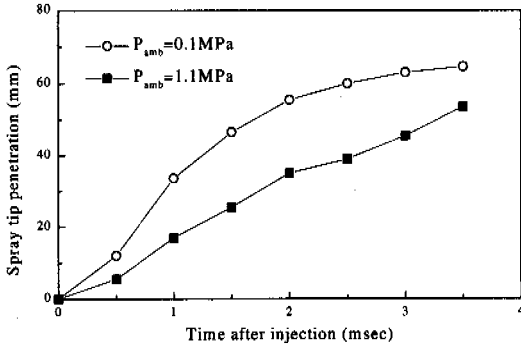


Fig. 6 Influence of ambient pressure on spray tip penetration at 5MPa of injection pressure

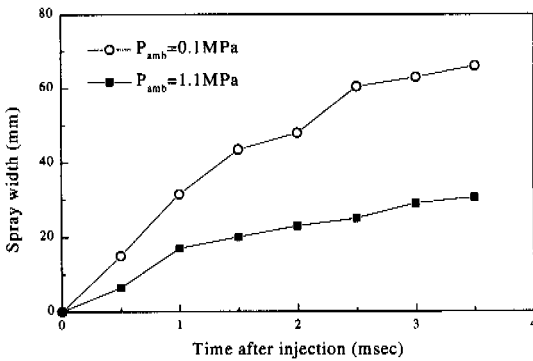


Fig. 7 Influence of ambient pressure on spray width at 5MPa of injection pressure

도달 거리 및 분무의 폭은 주위 압력이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 주위 압력의 증가에 따른 주위 공기의 저항과 항력에 의하여 분무 도달 거리와 분무 폭의 감소에 영향을 미치는 것으로 볼 수 있다. 분무 폭의 경우는 분무 선단 도달 거리의 경우보다 주위 압력의 영향을 더욱 크게 받는 것으로 나타났다.

3.3 분사 연료의 미립화 특성

Fig. 8은 축 방향의 거리 20mm에서 반경 방향의 거리와 SMD와의 관계를 분사 압력에 대하여 비교한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 반경 방향 거리 10mm 부근까지는 분무 액적의 평균 입경은 연료의 분사 압력이 증가와 더불어 증가하는 경향을 보이다가 10mm 이상이 되면 압력의 영향이 증가함에 따라 SMD가 작아지는 경향을 나타내었다. 이와 같이 입경이 $r = 8\sim 15mm$ 부근에서 증가하여 최대치로 되는 것은 이 위치가 분무류의 중심부에 상당하는 위치이기 때문에 속도가 크고 액적 사이의 합착 효과가 크게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

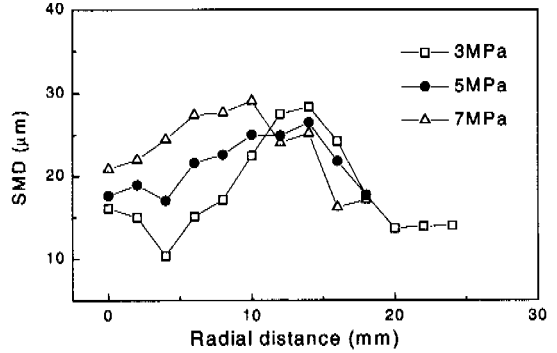


Fig. 8 Influence of injection pressure on SMD at axial distance $L=20mm$ ($P_{amb}=0.1MPa$)

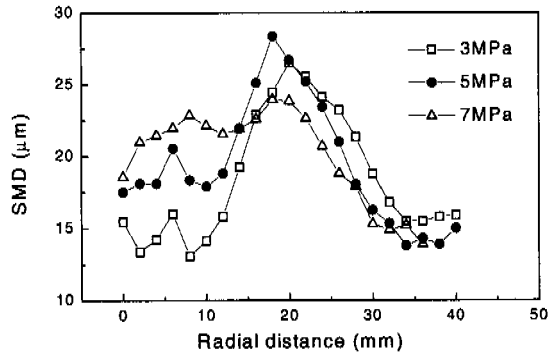


Fig. 9 Influence of injection pressure on SMD at axial distance $L=40mm$ ($P_{amb}=0.1MPa$)

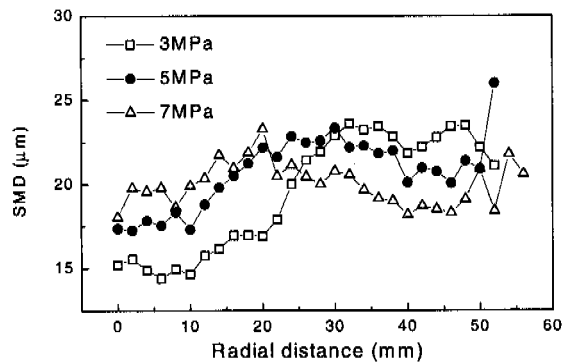


Fig. 10 Influence of injection pressure on SMD at axial distance $L=60mm$ ($P_{amb}=0.1MPa$)

Fig. 9는 축 방향의 거리 $L=40mm$ 의 경우로서 액적의 평균 SMD는 $r = 20mm$ 를 경계로 반경 방향의 거리가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며, 변화의 경향은 $r > 20mm$ 에서 압력이 증가함에 따라 SMD는 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 10은 축 방향 거리 $L=60mm$ 일 경우의 SMD 변화를 도기한 것으로서 축 방향의 거리 60mm 이상에서는 연료 분무 액적의 평균 입경

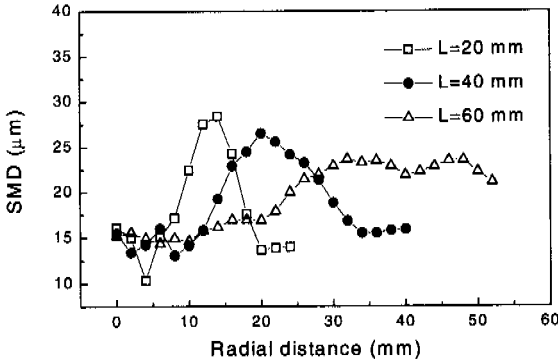


Fig. 11 Influence of injection pressure on SMD at axial distance $L=60\text{mm}$ ($P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

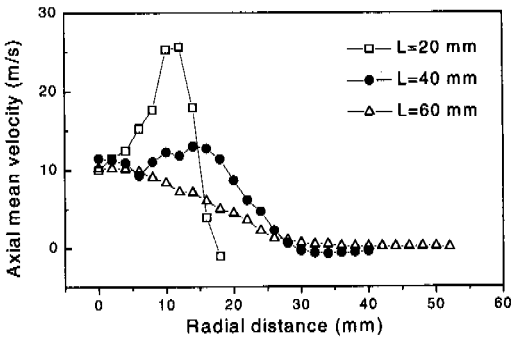


Fig. 12 Influence of axial distance on SMD at 3MPa of injection pressure ($P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

SMD는 15 ~ 22.5 μm 의 범위에서 앞의 경우보다 완만한 변화의 감소 경향을 나타내었다.

Fig. 11은 $P_{inj}=5\text{MPa}$ 일 때 축 방향의 거리 L 의 변화에 따른 액적의 평균 입경 SMD의 영향을 나타낸 선도이다. 이 선도에 나타낸 바와 같이 축 방향의 거리가 $L=20\text{mm}$ 인 경우에는 반경 방향 거리 10mm 부근에서 최대치를 보이다가 급격히 입경이 저하하는 경향을 나타내었고, $L=40\text{mm}$ 에서는 약 20mm 이후의 영역에서 입경이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 $L=60\text{mm}$ 에서는 입경의 변화가 $L=20, 40\text{mm}$ 의 경우에 비교하여 매우 완만한 변화를 보이고 있는 것으로 보아 압력의 영향이 적음을 알 수 있다.

Fig. 12는 축 방향 거리 20, 40, 60mm 지점에서 축 방향의 속도를 반경 방향 거리에 대하여 도시한 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 축 방향의 분무 액적의 속도는 반경 방향의 거리가 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있으며 $L=60\text{mm}$ 인 경우에는 분무 속도의 영향이 매우 적어서 반경 방향의 거리 25mm 이상에서는 거의 0으로 나타났다.

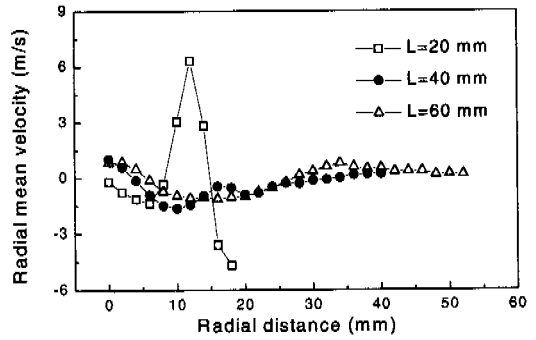


Fig. 13 Effect of axial distance from the nozzle tip on axial mean velocity ($P_{inj}=5\text{MPa}$, $P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

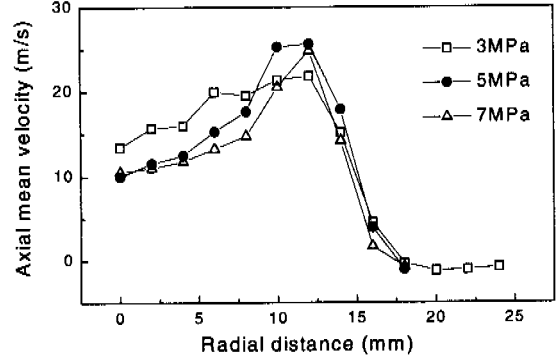


Fig. 14 Effect of axial distance from the nozzle tip on radial mean velocity ($P_{inj}=5\text{MPa}$, $P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

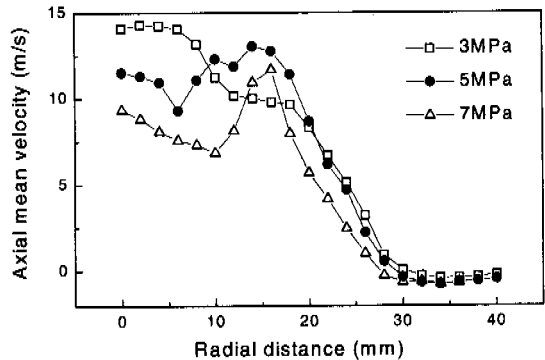


Fig. 15 Influence of injection pressure on axial mean velocity at axial distance $L=20\text{mm}$ ($P_{amb}=0.1\text{MPa}$)

Fig. 13은 $P_{inj}=5\text{MPa}$ 일 경우 축 방향의 거리 20, 40, 60mm인 지점에서 반경 방향의 속도를 도시한 것이다.

이 선도에서 축 방향의 거리 $L=20\text{mm}$ 인 경우에는 반경 방향의 거리 $r=12.5\text{mm}$ 부근에서 가장 크고, 40, 60mm의 경우에는 반경 방향의 거리 변화에 따른 반경 방향의 속도는 $L=20\text{mm}$ 의 경우에 비하여 매우 작은 것으로 나타났다.

Fig. 14는 축 방향의 거리가 $L=20\text{mm}$ 인 경우의

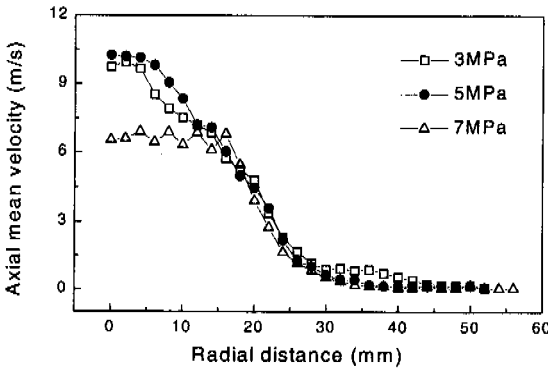


Fig. 16 Influence of injection pressure on Axial mean velocity at axial distance $L=60\text{mm}$ ($P_{\text{amb}}=0.1\text{MPa}$)

속도 분포를 나타낸 것으로서 반경 방향의 거리 $r = 12.5\text{mm}$ 에서 속도가 가장 크며 $r = 12.5\text{mm}$ 이상의 위치에서는 압력의 영향이 거의 나타나지 않았다. $r=12.5\text{mm}$ 의 경우 축 방향의 속도가 급격히 증가하고 있는데 이것은 이 부근이 원추 증공형 분무류의 중심에 해당되는 것으로 볼 수 있다.

Fig. 15 는 $L=40\text{mm}$ 일 경우 반경 방향 거리에 따른 축 방향의 속도를 나타낸 것이다. 이 선도에서 반경 방향의 거리 $r = 15\text{mm}$ 이하에서는 속도의 차이가 뚜렷이 나타나고 있으나 $r = 15\sim 30\text{mm}$ 에서는 속도가 급격히 저하하였다. 반경 방향의 거리 $r = 30\text{mm}$ 이후에는 분무의 가장 자리를 벗어나 속도는 0 에 접근하는 것으로 볼 수 있다. 또한 Fig. 16 과 같이 축 방향의 거리 $L=60\text{mm}$ 일 때에는 반경 방향의 거리 15mm 이상에서 압력의 영향이 나타나지 않았다.

분사 압력이 낮을 때에는 분무 중심 근방에서 축 방향의 속도가 크고, 분사 압력이 증가하여 상용 압력인 $P_{\text{inj}}=5\text{MPa}$ 일 경우 원추 분무 주류 부근에서 속도가 가장 큰 것으로 나타나는데 이것은 본 실험에 적용한 인젝터 특성이 5MPa 에서 최적 분사 특성을 나타내기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

가솔린 엔진의 고압 직분식 인젝터의 거시적 분무 발달 과정을 가시화 기법을 적용하여 분무 거동을 분석하고, 분무 액적의 평균 지름, 평균 속도 및 축 방향, 반경 방향의 거리에 따른 분무 특성을 여러가지 분사 압력 조건에 대하여 실험한 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 인젝터의 연료 분사량은 분사 기간이 짧은 때에는 연료 분사량에 미치는 분사 압력의 영향은 거의 나타나지 않는다. 분사 기간이 길어지면 연

료 분사량은 현저하게 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) 가솔린 인젝터 분무의 가시화 결과 분무 형태 및 분무 발달 과정은 증공 원추형 분무류를 형성하며, 분무 외측에 발생하는 대향형 환상 와류의 발달은 분사 압력이 높을수록 활발하게 형성되는 것으로 확인하였다.

(3) 인젝터의 분무 선단 도달 거리 및 분무 폭은 주위 압력의 영향을 크게 받으며 주위 압력의 영향은 분무의 도달 거리보다 분무폭의 발달 과정에 더욱 현저하게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

(4) 분무 액적의 지름 및 속도 분포는 분부 하류로 갈수록 저하하며 반경 방향의 거리 20mm 이상에서는 분사 압력의 영향이 현저하게 감소되는 경향을 보이고 있음이 확인되었다.

후 기

이 논문은 청정생산기술사업 “균일 예혼합 압축 착화 디젤 엔진의 최적 연소 기술 개발”의 예혼합기 형성 연구의 일환으로 연구되었으며 연구를 지원해주신 관계 제위께 감사드립니다.

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) Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamaguchi, T., and Ando, H., 1997, “Development of Gasoline direct. Injection Engine,” SAE paper 970514.
- (5) Dodge, L. G., 1996, “Fuel Preparation requirements for direct-injection spark ignition Engine,” SAE paper No. 962015.
- (6) Lee, C. F., and Bracco, F. V., 1994, “Initial comparisons of Computed and Measured Hollow-cone Sprays in an Engine,” SAE 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) Lee, C. S., Lee, K. H., Chon, M. S., and Kim, Y. H., 1999, “A Study on Spray Structure of Gasoline Fuel Injector,” *IPC-10 Proceedings*, No. 99049, pp. 309~310.