

GDI 엔진 인젝터의 연료 분무 거동 및 액적 분포 특성

Spray Behaviors and Characteristics of Droplet Distribution in GDI injector

김민규*, 이창식**, 이기형**, 진다시양**
M. K. Kim, C. S. Lee, K. H. Lee, D. Jin

Abstract

This paper describes the macroscopic behavior and atomization characteristics of the high-pressure gasoline swirl 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 droplets were measured by the phase Doppler particle analyzer system. The macroscopic visualization and experiment of particle measurement on the fuel spray were investigated at 7 and 10 MPa of injection pressure under different spray cone angle.

The results of this work show that the geometry of injector was more dominant over the macroscopic characteristics of spray than the fuel injection pressure and injection duration. As for the atomization characteristics, the increase of injection pressure resulted in the decrease of fuel droplet diameter and the atomization characteristics differed as to the spray cone angle. The most droplets had under 25 μ m diameter and for the large droplets(upper 40 μ m) as the spray grew the atomization presses were very slow. Comparison results between the measured droplet distribution and the droplet distribution functions revealed that the measured droplet distribution is very closed to the Normal distribution function and Nukiyama-Tanasawa's function.

주요기술용어 : Atomization characteristics, Spray behavior, Gasoline Direct Injection, Droplet size distribution

1. 서론

직접 분사식 가솔린 엔진은 연소실 내에 연료를 직접 분사하므로 정확한 연료 공급 제어가 가능하며, 이에 따라 연료 소비율을 포트 분사식에 비하여 약 30% 정도까지 개선할 수 있다. 이 밖에도 펌핑 손실, 고압축비화, 체적 효율의 증대 등을 도모할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 연료-공기의 혼합 시간이 매우 짧기 때문에 양호한 혼합기를 형성시키기 위해서는 연료의 미립화 성능을 높이고 연소실에 적

절한 혼합기 분포가 이루어지도록 하는 분무 기술의 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, 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.

* 한양대학교 대학원

** 한양대학교 기계공학부

그러나 직분식 가솔린 인젝터의 정밀 제어, 분무의 액체 미립의 증발 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 많아 미립화 향상을 위한 더욱 체계적인 연구가 요망되고 있다.

본 연구에서는 직접 분사식 가솔린 기관에 적용되는 고압 가솔린 인젝터의 분무 분열 과정, 분무 거동, 분무의 도달 거리 및 분무폭 등의 거시적 분무 형상을 가시화 기법을 적용하여 실험적으로 구하였다. 이와 아울러 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 평균 액적 지름, 분무 액적의 평균 속도, 입경 분포, 분무 속도 등을 분사각과 분사 압력 변화에 대한 미립화 분무 특성을 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험 장치는 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 PDPA 시스템과 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.

실험 장치에서 광원은 Ar-ion 레이저(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 입경과 속도를 구한다.

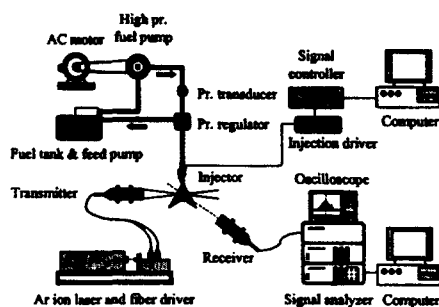


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Fig. 1 은 연료 분무 액적의 입경과 속도를 구하기 위한 실험 장치의 구성을 도시한 것이다

2.2 실험 방법

분사 압력 및 분사각의 변화에 따른 분무 및 미립화 특성을 알아보기 위하여 분사각이 53°와 73°인 두 인젝터에 대하여 분사 압력과 분사 기간을 각각 7, 10MPa와 1, 2msec의 2 단계로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

분무의 입경 및 속도는 인젝터 노즐 팁 10mm에서 10mm 간격으로 하류 방향 80mm까지 노즐 중심 축에서 측정하였다. 실험에 사용된 노즐은 단공 압력 분무 스월형 인젝터로서, 노즐 출구 지름은 1.0mm 이고, 연료의 밀도는 680.3kg/m³이며, 점성 계수는 0.00029Ns/m²이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 분무 거시적 특성

분사 압력 및 분사 후 경과 시간에 대한 분무 거동을 가시화한 결과를 비교한 결과 동일 분사각을 갖는 경우 분사 압력에 따른 거시적인 분무 거동의 변화는 크지 않았다. 그러나 동일 분사 압력에서 다른 분사각을 갖는 인젝터 분무의 거시적인 변화가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 2, 3 은 분사 기간을 각각 1, 2msec로 하였을 때 서로 다른 분사각을 갖는 두 인젝터의 분사시간의 경과에 따른 분무 선단 도달거리와 분무폭을 가시화 이미지로부터 구하여 비교한 것이다.

분무 선단의 도달 거리는 분사 시간에 거의 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 분사각에 따라 그 차이가 크게 나타나는 것으로 계속되었다.

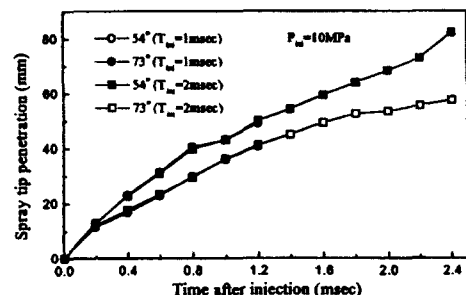


Fig. 2 Effect of spray angle on spray tip penetration

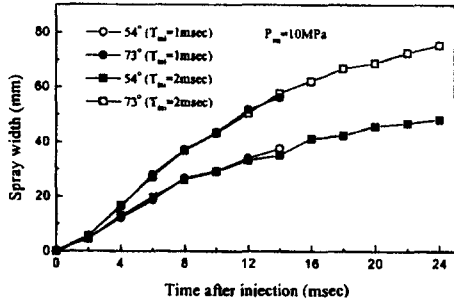


Fig. 3 Effect of spray angle on spray width

분무폭 또한 분사각에 따라 큰 차이를 보였으며 분사 초기에는 선형적으로 증가하나 분사 후기에는 그 성장이 둔화되는 것으로 나타났다. 이는 반경 방향으로 성장하려는 원심력 등이 역방향 와류의 형성으로 인해 보다 복잡한 유동 형태를 보이기 때문인 것으로 판단되며, 분사 시간에 관계없이 분무 선단의 도달 거리와 분무폭은 시간 경과에 따라 거의 일치하는 것으로 나타났다.

분사 압력의 영향을 살펴보면 분무 선단의 도달 거리의 경우 분사각이 54°에서는 분사 시간에 대하여 거의 선형적으로 증가하나 분사각이 73°인 경우에는 초기에는 선형적으로 증가하지만, 후기에는 그 증가 경향이 작아짐을 보이고 있다. 또한 분무폭은 그 경향이 반대로 나타나고 있다. 분사각이 비교적 작을 때는 초기의 분무 형태에 영향을 미치는 분사 압력이 분무 진행 방향에 크게 작용하고, 분사각이 비교적 커지면 그 영향이 분무 진행 방향보다는 분무의 반경 방향에 크게 미치기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 2~3의 선도를 통하여 분무 선단의 도달 거리와 분무폭은 분사 압력 보다는 분사각에 더 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 위의 결과로 판단할 때 분무의 거시적인 특성은 분사 압력, 분사 시간 등의 분무 요인 보다는 분사각 등을 결정짓는 인젝터의 내부 형상에 더 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 분무의 미립화 특성

Fig. 4는 54°의 분사각을 갖는 인젝터의 분무 중심축에서 분무 입자의 평균 입경 및 축방향 평균 속도 분포를 나타낸 선도이다. 분사 초기인 분무의 상류에서는 SMD와 축방향 평균 속도 모두 증가하는 경향을 보였다. 이때의 결과 값은 측정된 20,000개의 평균치로 하였고, 분사시간은 1 msec로 하였다.

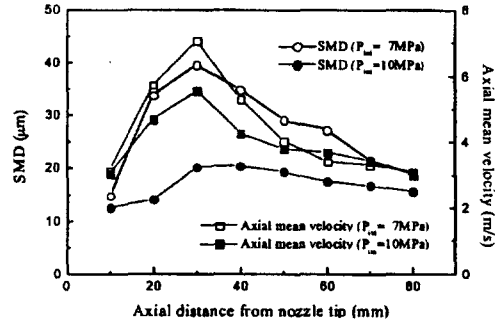


Fig. 4 Comparison of SMD and mean velocity with different injection pressure (Spray angle = 54°)

그러나 축 방향 거리 30mm 지점을 지나면서 직접적인 분사 압력의 영향이 적어져서 축 방향 평균 속도는 다시 감소하게 된다.

평균 입경의 경우 축 방향 평균 속도에 영향을 받아 축 방향 거리 L=10~30mm 지점에서 강한 유동으로 충돌과 합착 등의 현상에 의해 평균 입경이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 분사 압력의 상승은 액적의 평균 입경을 작게 하고 축 방향 평균속도를 상승시키는 것으로 나타났다. 분사 압력을 높이면 높은 분사 압력으로 인하여 노즐팁에서부터 미세하게 분열이 이루어진 액적이 주위 공기와의 마찰로 인하여 2차 미립화 현상이 나타나기 때문인 것으로 생각된다. 분무 액적들의 빠른 속도는 압력 강하를 일으키고, 이로 인한 주위 기체의 유입 효과로 인하여 분무 중심 축에서는 분무 입자들간의 충돌 및 합착이 일어나 30mm 지점까지 평균 입경은 증가하는 것으로 나타났다.

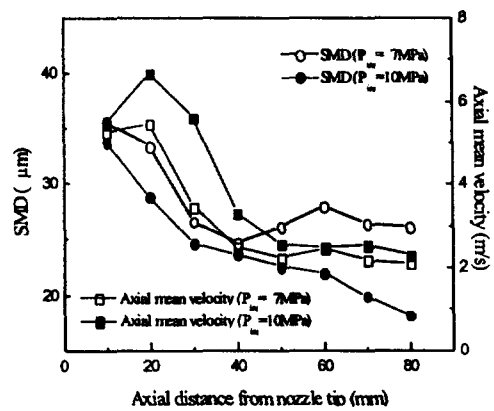
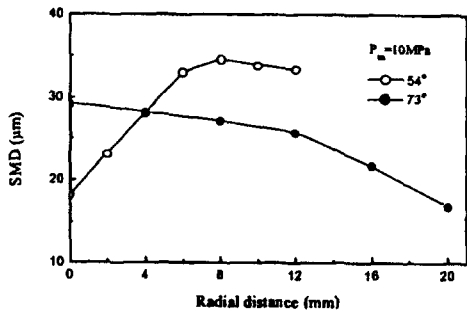


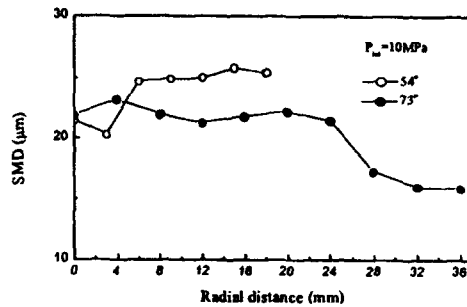
Fig. 5 Comparison of SMD and mean velocity with different injection pressure (Spray angle = 73°)

Fig. 5 은 73°의 분사각을 갖는 인젝터의 분무 중심 축에서 분무 입자의 평균 입경 및 축방향 평균 속도 분포를 나타낸 선도이다. 분사각이 73°인 인젝터는 분사각 54°에 비하여 축 방향 속도 성분은 작고 반경 방향 속도성분이 크기 때문에 분무 중심 축에서는 강한 유동에 의한 충돌 및 합착 현상이 거의 나타나지 않기 때문인 것으로 판단된다. 축 방향 평균 속도도 분사각 54°의 인젝터와는 달리 축 방향 거리 20mm 지점을 지나면서 급격히 떨어지는 것을 보이고 있다.

Fig. 6 은 노즐 팁으로부터 25mm 떨어진 지점에서의 SMD 분포를 도시한 것이다. 분무 중심부에서는 분사각 54°의 경우가 분사각 73°보다 SMD 가 작게 나타나고 반경 방향 4mm 이후 지점부터는 73°보다 큰 것으로 나타나고 있다. 분사각이 54°인 경우 비교적 분무 원추의 반경이 작고 주 분무류의 폭 또한 작다. 따라서 중심부에는 주 분무류에서 작은 운동량을 갖고 있는 비교적 지름이 작은 액적들이 밀려 중앙부로 유입되는 것으로 판단된다. 또한 반경 방향 4mm 지점 이후 부터는 주 분무류가 지나는 지점으로 큰 운동량을 갖고 있는 영역이므로 주분무류의 폭이 넓고 운동량도 고루 분포하는 분사각 73°에 비해 크게 나타나는 것으로 생각된다.



(a) Axial distance = 25mm

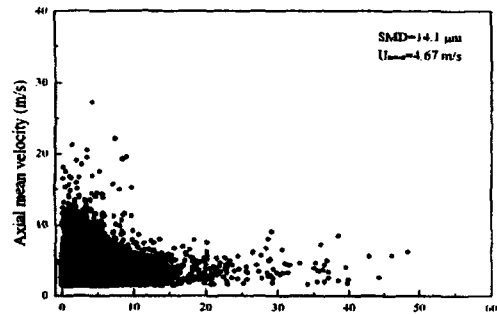


(b) Axial distance = 40mm

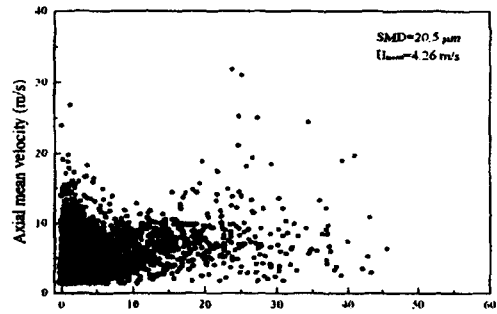
Fig. 6 Effect of the spray angle on the SMD

Fig. 7 의 축 방향 속도분포 또한 분사각 73°의 경우는 속도 분포가 비교적 고르게 분포하면서 외곽으로 진행할수록 점차 속도가 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 분사각 54°의 경우 주 분무류가 지나는 지점이라고 판단되는 6-8mm 지점에서 속도가 크게 나타나고 분사각 73°에 비하여 보다 복잡한 속도 분포를 보이고 있다.

Fig. 7 은 액적의 입경과 축 방향 속도와의 상관 관계를 축 방향 거리에 따라 각각 나타낸 것이다. 이 선도에 나타낸 바와 같이 대부분의 연료 액적이 25μm 이하의 입경을 가지고 0-20m/s 의 속도 범위에 걸쳐 분포하고 있는 것으로 측정되었다. 또한 축 방향 거리가 멀어질수록 측정된 액적 전체의 평균 축 방향 속도는 작아지는 경향을 나타내지만, 액적의 최대 속도는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 최대 속도를 갖는 액적은 입경이 매우 작은 액적들로 나타났는데 하류로 진행할수록 빠른 속도에 의해 증발이나 운동량이 작은 액적들과의 충돌 및 합착 등으로 운동량에 변화가 많이 발생하기 때문인 것으로 생각된다.



(a) Axial distance = 25mm



(b) Axial distance = 40mm

Fig. 7 Correlation between diameter and axial mean velocity (spray angle = 54°)

Fig. 8 은 축 방향 거리에 따른 SMD 분포와 연소 해석에 있어 중요한 인자인 DV90 값의 분포를 비교한 선도이다.

두 인자 모두 분무가 하류 방향으로 진행할수록 SMD 값은 전반적으로 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 DV90 값은 거의 변화가 없는 것을 보이고 있다. 비교적 작은 입경의 액적들은 하류로 진행할수록 빠른 속도로 인한 주위 공기와의 마찰 등으로 미립화가 가속되거나 증발이 발생되지만 입경이 큰 액적들은 분무가 하류로 진행하여도 미립화의 진행이 상당히 느린 것으로 판단할 수 있다. 이러한 경향은 액적의 입경과 축 방향 속도와의 상관관계 선도에도 잘 나타나 있다.

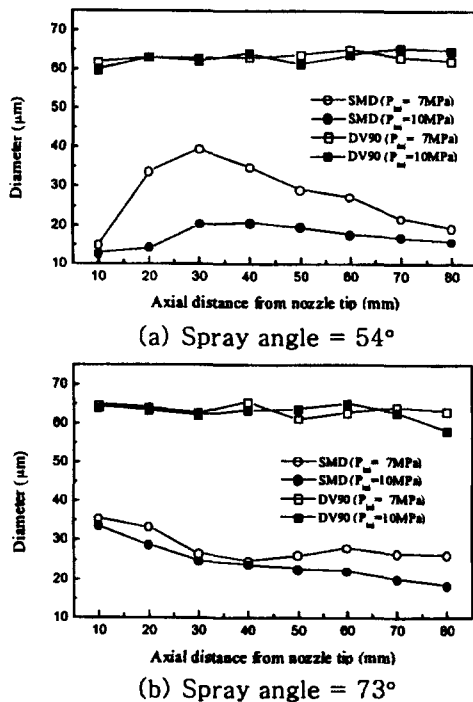


Fig. 8 SMD and DV90 distribution according to the axial distance

3.3 분무 액적의 입경 분포

Fig. 9는 분무 액적의 입경에 대한 액적의 입경 빈도 분포와 정규분포, Nukiyama-Tanasawa 분포를 축 방향 거리에 따라 비교한 선도이다. 먼저 입경 빈도 분포를 비교하게 되면 정규 분포는 식의 특성상 Nukiyama-Tanasawa 분포보다 D_{peak} 의 값이 크며, D_{peak} 이후에 매우 급격히 감소하고 있다. 실험 결과를 이용한 선도를 보면 정규 분포, Nukiyama-Tanasawa 분포 보다는 D_{peak} 값이 작게 나타났으며,

Nukiyama-Tanasawa 분포에 보다 근접하고 있다.

Fig.10은 실험 결과를 이용한 체적 분포 분포 선도를 Rosin-Rammler 분포함수와 비교한 것으로서 실험치 입경이 비교적 작은 영역인 0~25μm의 범위에서는 체적 분포 분포가 크게 나타나고, 30~55μm의 범위에는 작게, 그 이후의 영역에서는 크게 나타나고 있다.

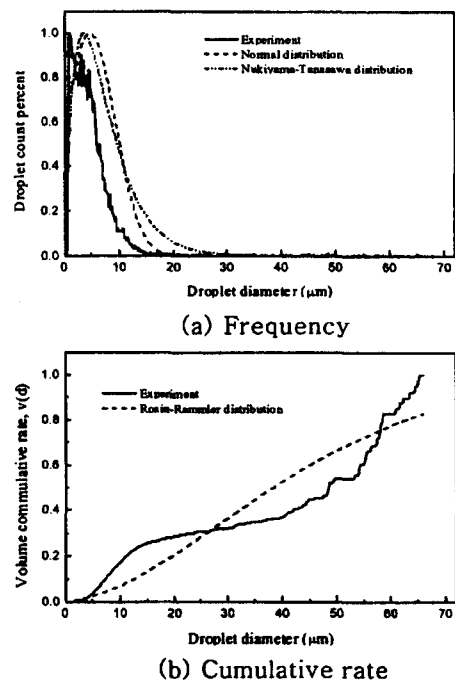


Fig. 9 Comparison of distribution functions and measured droplet distribution at L=20mm ($P_{inj} = 10MPa$, Spray angle = 54°)

입경 빈도 분포 선도에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 액적들은 대부분 0~10μm의 영역에 존재하기 때문에 이 영역에서는 체적 분포의 증가가 매우 급격하고, 25~55μm의 영역에서는 체적 분포의 증가가 거의 없게 나타나고 있다.

액적의 체적은 입경의 3승에 비례하기 때문에 입경이 큰 영역에서는 소수의 액적으로도 그 체적 분포의 상승은 매우 커서 선도에서 보는 바와 같이 계단 형태를 보이게 된다. 체적 분포 분포 선도를 통해 체적의 상당 부분은 미립화가 매우 느린 소수의 입경이 큰 액적들이 차지하고 있음을 알 수 있다.

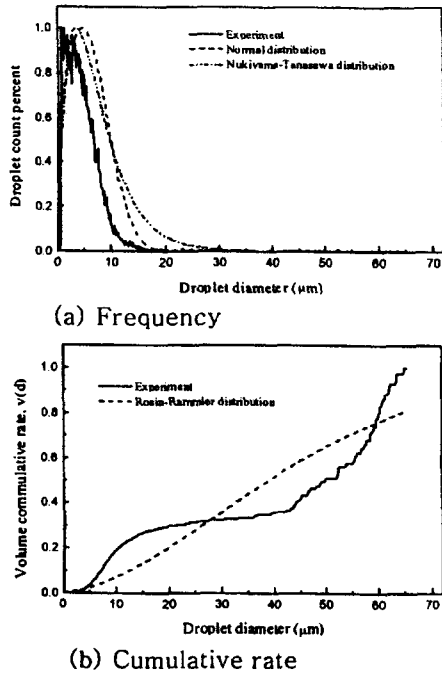


Fig.10 Comparison of distribution functions and measured droplet distribution at L=40mm ($P_{inj} = 10MPa$, Spray angle = 54°)

4. 결론

직접 분사식 엔진의 고압 선회 노즐 인젝터로부터 분사되는 연료의 거시적 분무 발달 과정을 가시화 기법을 적용하여 분무 거동을 분석하고, 분무 미립화 특성을 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고압 가솔린 인젝터의 분무 선단의 도달거리, 분무폭 등의 거시적인 특성은 인젝터의 분사각에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

2) 연료의 분사 압력이 상승함에 따라 분무 액적의 평균 지름(SMD)은 감소하였으며, 분무 액적의 축 방향 평균 속도는 분사 후 축 방향 거리 30mm 까지는 급격히 증가하다가 그 이후에는 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러나 DV90 값은 거의 변화가 없었다.

3) 액체 연료의 미립화 특성은 분사각에 따라 다른 형태를 나타내며, 분사각 54° 가 73° 보다 분무 중심부에는 보다 작은 입경을 분포를 보였으며 주 분무류에서는 보다 큰 입경 분포를 보였다.

4) 분무 입자는 평균 지름 $25\mu m$ 이하의 입경을 가지고 0~20m/s의 속도 범위에 걸쳐 분포되

었다. $40\mu m$ 이상의 입경의 경우에는 분무가 진행하여도 미립화가 거의 일어나지 않는 것으로 나타났다.

5) 분무의 입경 분포는 정규분포, Nukiyama-Tanasawa 분포 보다는 D_{peak} 값이 작은 것으로 나타났으며, 미립화가 진행될수록 두 분포함수에 보다 근접한 분포를 갖는 것으로 나타났다.

실험치의 체적 분포 분포와 Rosin-Rammler 분포함수를 비교한 결과 입경이 0~20 μm 영역에서는 Rosin-Rammler 분포함수보다 크게 나타나고, 25~55 μm 의 범위에서는 작게, 그 이상의 입경 영역에서는 큰 것으로 나타났다.

후 기

이 연구는 BK21의 연구지원에 의하여 이루어진 것으로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

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 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.