

직분식 가솔린기관 인젝터의 연료 분무 특성

권상일* · 이창식**

Fuel Spray Characteristics of GDI Injector

Sang-il Kwon and Chang-sik Lee

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

Abstract

This paper is intended to analyze the macroscopic behavior and transient 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. Time-resolved droplet axial and radial velocity components and droplet diameter were measured at many probe positions in both axial and radial directions by a two-component phase Doppler particle analyzer (PDPA). 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

최근 지구 온난화가 가속화하고 있는 시점에서 자동차용 기관으로부터 배출되는 연소 가스 중의 오염 물질의 배출

은 심각한 공해 문제로 되고 있다. 이에 따라 최근 전세계적으로 강화되고 있는 배기 규제들을 대처하기 위한 노력들중의 하나가 연소와 배기에 직접적인 영향을 미치는 최적의 연료 분사 시스템의 개발이다.

직분식 가솔린 기관은 연료를 연소실 내에 직접 분사하므로 손실이 저하되고, 연료의 공급 지연이 생기지 않으며, 벽

* 한양대학교 기계공학과 대학원

** 한양대학교 기계공학부

면 젖음 현상이 감소되어, 포트 분사식에 비하여 정확한 연료의 공급제어가 가능하며 약 30%정도의 연료 소비율을 개선할 수 있으며, 실린더 내에서 연료가 기화할 때 생기는 연료의 기화 잠열에 의한 흡기의 냉각 효과가 커서 압축비를 높일 수 있으므로 열효율과 체적효율이 향상된다. 그러나 연료-공기의 혼합 시간이 매우 짧기 때문에 양호한 혼합기를 얻기 위해서는 연료의 미립화 성능을 향상시키고 연소실 내에 알맞은 혼합기 분포가 이루어지도록 하는 분무 제어 기술이 필요하다.

가솔린 인젝터의 분무 특성 및 분무 거동에 관한 연구로는 Zhao⁽¹⁾ 등의 직분식 및 포트 분사 인젝터의 분무 거동에 관한 연구를 비롯하여 Iwamoto⁽²⁾의 직분식 가솔린 기관 인젝터 성능과 엔진 성능 특성에 관한 연구, Lee^(3~5) 등의 고압 가솔린 인젝터에 관한 연구, Shelby⁽⁶⁾, Lawrence⁽⁷⁾의 분무 시간에 따른 직분식 가솔린 기관 인젝터의 분무 특성에 관한 연구 등이 여러 연구자들에 의하여 보고되고 있다. 그러나, 직분식 인젝터의 정밀 제어, 분무 액체 미립의 증발 과정, 최적 연소 상태를 얻을 수 있는 분무 액체의 미립화 특성, 혼합기 형성을 증진시킬 수 있는 분무 특성 인자 등이 연소 및 배출물 저감에 미치는 영향 등에 대하여는 아직도 해명되지 않은 부분이 많고, 기존의 연구들은 미시적 분무 특성인 평균 속도, 평균 입경의 해석에 있어서 공간적인 평균값만을 해석하여 분사 기간별 입경별 비정상 유동 특성에 관한 해석이 필요하며, 정확한 실험을 통하여 분무 구조에 영향을 미치는 각종 인자들의 정의 및 이들 인자들의 상관관계를 파악하고, 분무 특성 및 구조를 해석하여

분무 모델링의 방향을 제시하는 연구의 필요성이 절실히 요구되고 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 가시화 기법을 적용하여 직접 분사식 가솔린 기관에 적용되는 고압 인젝터의 분무 분열 과정, 분무 거동, 분무의 도달 거리 및 분무폭 등의 거시적 분무 형상을 실험적으로 규명하였다. 이와 아울러 인젝터로부터 분사되는 연료 분무의 평균 액적 지름, 평균 속도, 입경 분포 등의 미립화 특성을 분무 입경, 분사 시간, 분사 압력, 분위기 압력의 변화에 대하여 규명하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 연구에서 사용한 분무 가시화 실험장치와 연료 분무 액적의 입경과 속도를 측정하기 위한 PDPA 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었고 주위 기체의 압력과 온도가 분무에 미치는 영향을 해석하기 위하여 고압 분무실을 이용하였다.

가솔린 분무의 발달과정은 새도그래프법을 이용하여 분무 형태, 분무 선단의 도달 거리, 분무 폭 등을 가시화하고, 여러 가지 분무실의 압력 및 온도 조건에 대하여 비교 검토하였다.

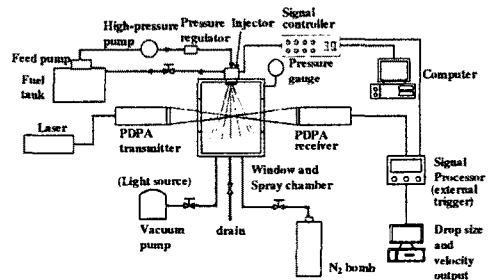


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

가시화된 가솔린 분무 거동을 분석하

기 위한 화상의 취득은 CCD 카메라로부터 얻어진 분무 화상을 이미지 그래픽을 통하여 컴퓨터에 저장하고, 이들 이미지 데이터로부터 분무 발달 과정과 분무 도달 거리, 분무 폭 등의 거시적 특성을 분석하였다.

연료 분무 액적의 입경과 속도의 측정에는 PDPA 시스템을 사용하였다. 실험에 사용한 인젝터는 노즐 출구 지름 1mm, 스월형 직분식 인젝터이며, 솔레노이드 코일의 인덕턴스는 120Hz 에서 2.44mH 이다. 실험에 적용한 연료는 밀도 680.3kg/m³ 이고, 점성 계수는 2.9×10⁻⁴Ns/m² 이다.

2.2 실험 방법 및 입경분포 해석방법

분무실 내의 압력 및 온도의 변화에 따른 분무 특성 및 미립화 특성을 알아 보기 위하여 연료의 분사 기간을 5msec 로 하여 분사 압력을 3, 5 및 7MPa 로 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 분무실 내의 기체의 압력은 0.1, 0.4, 0.8 및 1.0 MPa 의 4 단계로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 또한 분무의 입경 및 속도는 인젝터 노즐 팁 5mm 에서 5mm 간격으로 하류 방향 80mm 까지, 노즐 팁으로부터 각각의 축방향에서 반경 반향으로 2mm 간격으로 측정하였다. PDPA 시스템의 Counter&reset mode 를 선택하여 인젝터의 신호와 PDPA 시스템의 신호 처리계를 동기하여 분사신호가 나올 때마다 신호처리계의 측정시간이 0 으로 되면서 분사시간에 따른 속도와 입경을 측정하였다.

액적의 입경 빈도 분포를 비교하기 위하여 대수정규분포함수와 Nukiyama-Tanasawa 분포함수, 액적의 지름에 대한 체적 분포를 확인하기 위하여 Rosin-Rammler 분포함수를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 대수정규분포함

수는 다음과 같이 정의된다.

$$D_{count} = \exp\left\{-\frac{(\ln D - \ln D_{ng})^2}{2S_g^2}\right\} \quad (1)$$

여기에서 D_{ng} 은 액적군의 개수 분포를 기준으로 구한 기하학적 평균치이고 S_g 는 기하학적 표준편차이다.

대수 정규분포가 수학적인 분포함수임에 반해 Nukiyama-Tanasawa 분포함수와 Rosin-Rammler 분포함수는 경험적 분포함수이다. 2-유체 노즐로부터 형성되는 액적들의 입경 분포를 표시하는 Nukiyama-Tanasawa 분포함수의 일반식은 다음과 같다.

$$D_{count} = D^2 \exp(-bD^q) \quad (2)$$

여기에서 b 와 q 는 각각 분포 변수를 의미한다.

Rosin-Rammler 분포함수는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$1 - v(D) = \exp\left\{-\left(\frac{D}{X}\right)^Q\right\} \quad (3)$$

여기서, $v(D)$ 는 입경 D 보다 작은 액적들의 누적 체적 분률이고 X 와 Q 는 입경 분포 변수이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 연료 분무의 가시화

연료 인젝터로부터 분사되는 연료의 거시적 분무 특성은 분무 관통도, 즉 분무 선단의 도달 거리와 분무각 및 분

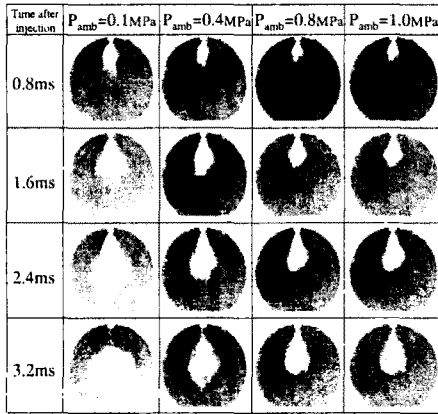


Fig. 2 Effect of ambient pressure on spray behavior ($P_{inj}=5MPa$, $T_{inj}=5ms$)

무 폭 등으로 표시된다.

Fig. 2 는 분사 압력 5MPa 로 분사했을 때 분위기 압력을 변화시키면서 가로와 세로가 각각 512 pixel × 480 pixel 의 공간 해상도를 갖는 CCD 카메라를 사용하여 가시화한 것이다. 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 분무가 주위 기체의 압력 변화에 따라 와류의 폭이 줄어들고 주위 기체의 항력 증가에 의해 분무 폭 및 분무 도달 거리가 줄어드는 경향을 나타내었다.

Fig. 3 과 Fig. 4 는 주위 압력 변화에 따른 분무 선단의 도달 거리와 분무 폭을 가시화 화상으로부터 구하여 비교한 선도이다. 선도에서 보는 바와 같이 분사 시간의 경과에 따라 분무 선단의 도달거리는 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 주위 기체의 압력 증가에 따라 분무 도달 거리 및 분무 폭은 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 분무 도달 거리의 감소보다는 분무 폭의 감소가 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 0.8MPa 이상에서는 감소폭이 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 분위기 압력이 높아지면 분무의 발달 과정에서 분무 선단 및 분무 원추의 진행을

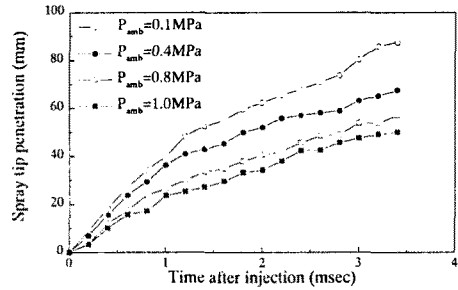


Fig. 3 Effect of ambient pressure on spray tip penetration at 5MPa of injection pressure

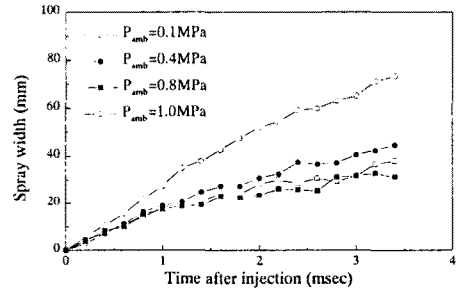


Fig. 4 Effect of ambient pressure on spray width at 5MPa of injection pressure

방해하는 배압이 증가하여 저항이 증가하기 때문이다. 이러한 실험 결과는 고압 인젝터의 분위기 온도 압력에 대한 Choi 등⁽⁸⁾ 의 연구 결과의 경향과 유사한 결과로 나타났다.

3.2 연료 분무의 미립화 특성

Fig. 5 는 분사 압력 5MPa, 7MPa 에서의 축방향 거리에 따른 평균 입경 및 평균 속도 분포를 비교한 선도이다. 분사 초기엔 축방향 평균 속도의 증가에 의해 평균 입경의 감소하는 경향을 나타내고 있으나 30mm 지점을 지나면서 분사 압력의 영향이 사라지고 분무 입자간의 충돌과 합착으로 인하여 평균 입경이 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 분사 압력의 상승은 액적의 평균 입경을 작게 하고 축 방향 평균

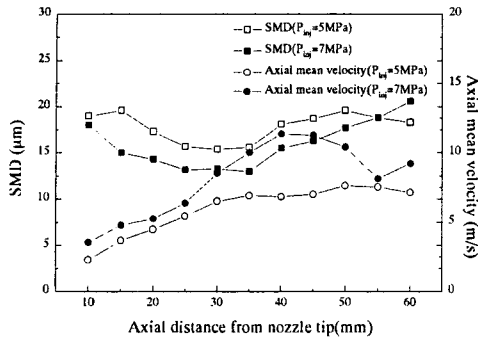


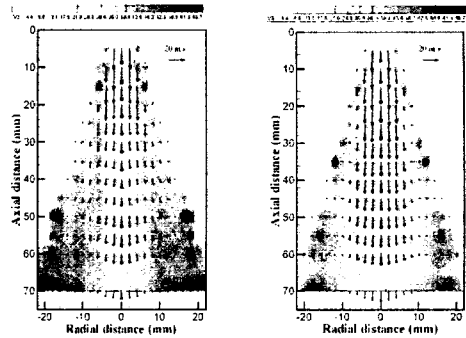
Fig. 5 Comparison of SMD and mean velocity with different injection pressure

속도를 상승시키는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 분사 압력에 따른 속도 분포와 SMD 분포를 나타낸 선도이다. 분무 상류에서는 높은 분사 압력으로 인한 큰 운동량을 유지하며 하류로 흐르고 있고 하류로 진행할수록 분무 외각에서는 와류로 인하여 운동량이 소멸되지만 분무 중심축에서는 초기 지연기간 동안의 운동량이 큰 액적들의 영향으로 비교적 큰 속도 분포를 보이고 있다. 또한 SMD 분포는 축방향 거리 50mm 지점까지는 감소하나 그 이후의 영역에서는 다소 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 하류 지역의 운동량이 적은 액적들의 합착에 의한 결과로 보여진다. 분사 압력의 증가는 운동량의 증가로 인하여 속도의 증가와 SMD를 감소시키는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 축방향 거리에서의 분사 시간에 따른 축방향 입경분포를 나타낸 선도이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 60mm까지는 입경이 감소하고 있으나 80mm에서는 입경이 증가함을 보이고 있다.

Fig. 8은 분사 압력 5MPa에서의 입경별 속도 분포를 나타낸 선도이다.



(a) $P_{inj} = 3MPa$

(b) $P_{inj} = 5MPa$

Fig. 6 Effect of injection pressure on the distribution of mean velocity and SMD

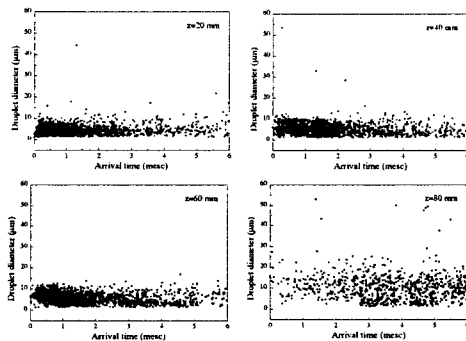


Fig. 7 The droplet diameter according to arrival time at the axial distance

선도에서 공기의 유동이라 가정할 수 있는 5 μm이하의 액적들은 분무 외각보다는 분무 중심축에서 높은 속도를 보이며 와류의 유동에 의해 반경방향 속도가 중심축으로 향하고 있음을 알 수 있다. 액적이 가장 많이 분포하는 20 μm까지의 액적들의 속도는 상류에서는 액적의 분포가 높은 외각의 속도가 중심축보다 높고 상류로 진행할수록 중심축의 속도가 높음을 나타내었다. 이는 중공원추형 분무의 유동 중심인 외각의 액적들이 상류에서는 높은 운동량을 유지하다 2차 미립화의 영향으로 속도가 감소하는 것으로 생각된다. 또한 비교

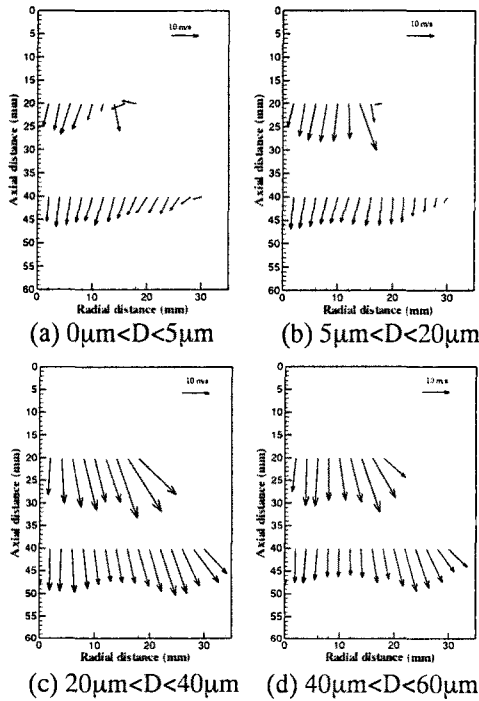


Fig. 8 The distribution of mean velocity for different droplet size ($P_{inj} = 5\text{MPa}$)

적 액적의 크기가 큰 $20\ \mu\text{m}$ 이상의 액적들은 미립화가 거의 이루어지지 않고 그 운동량을 하류까지 유지하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 분사 압력 5MPa 에서의 분사 시간에 따른 액적들의 속도 분포를 나타낸 것이다. 분사 초기에는 분무 지연 기간 동안에 분사된 액적들의 영향으로 전체적으로 높은 속도를 나타내고 있고 특히 중심축에서 높은 운동량을 가지는 액적들이 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 전체 분무 기간동안에 중심축에 있는 액적들의 속도 감소폭은 적은 것으로 나타났다.

3.3 연료 분무 액적의 입경 분포

Fig. 10은 실험 결과로부터 얻어진 액적들의 입경 빈도 분포와 체적 분률에

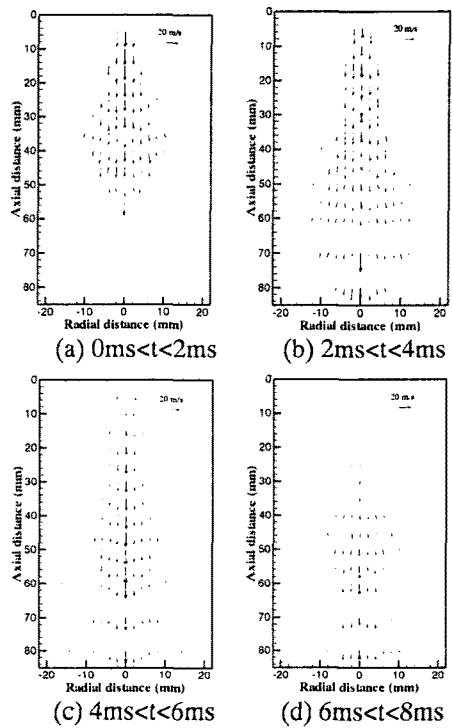
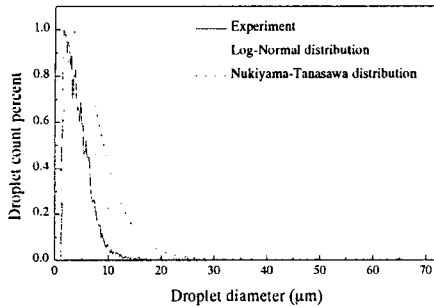


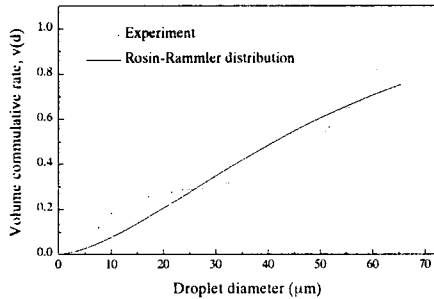
Fig. 9 The distribution of droplet velocity according to injection time

따른 분포함수를 비교한 선도이다.

입경 빈도 분포에서는 대수정규분포가 실험치에 보다 가까운 것으로 나타났고 D_{peak} 값은 실험치와 분포함수가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 실험 결과를 이용한 체적 분률 분포와 Rosin-Rammler 분포함수와의 비교에서는 실험치가 입경이 비교적 작은 $0\sim 20\ \mu\text{m}$ 에서는 높게 나타나고, $25\sim 55\ \mu\text{m}$ 의 영역에서는 작게 그 이후의 영역에서는 높게 나타나고 있다. 이는 대부분의 액적들이 $0\sim 20\ \mu\text{m}$ 의 영역에 속해 있으므로 이 영역에서 체적 분률의 증가가 급격하게 일어나고 액적들이 거의 측정되지 않는 $25\sim 55\ \mu\text{m}$ 의 영역에서는 체적 분률의 증가가 거의 일어나지 않는 것으로 사료된다. 또한 입경이 $45\ \mu\text{m}$ 이상



(a) frequency distribution



(b) cummulative rate distribution

Fig. 10 Comparison of distribution functions and measured dropler distributions ($L=20\text{mm}$, $P_{inj}=5\text{MPa}$)

의 영역에서 급격한 체적 분률의 증가가 나타나는데 이는 액적의 체적은 입경의 세제곱에 비례하기 때문에 소수의 액적들이지만 증가폭이 큰 것으로 판단된다. 체적 분률 선도를 통해 체적의 상당 부분은 미립화의 속도가 느린 소수의 입경이 큰 액적들이 차지 하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

직접 분사식 가솔린 기관에 적용되는 고압 연료 인젝터로부터 분사되는 분무 거동 및 분무 미립화 특성에 미치는 분무실의 압력 조건 및 분사 조건의 영향을 분무 가시화와 분무측정 시스템을 이용하여 실험적으로 구한 결과로부터

얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 분무의 도달 거리 및 분무의 폭은 주위 가스 압력 조건의 영향을 크게 받으며, 주위 압력의 증가는 분무 선단의 도달 거리와 분무 폭을 저하시키는 주된 요인으로 작용함이 확인되었다.

(2) 연료 분사 압력의 증가는 분사 속도의 증가로 인하여 액적의 평균 입경을 저하시키는 요인으로 작용하였다.

(3) 액적의 속도를 입경별로 측정 한 결과 $5\ \mu\text{m}$ 이하의 공기의 속도는 와류의 영향으로 중심축을 향하고 그 크기는 중심축에서 최고값을 보였다. 또한 크기가 $40\ \mu\text{m}$ 이상인 액적들은 유동중심인 분무 외각에서 최고 속도를 보였고 하류로 진행하여도 그 운동량을 유지하는 것으로 나타났다.

(4) Rosin-Rammler 분포함수와 실험 결과를 이용한 체적 분률 분포를 비교한 결과 실험치가 $0\sim 20\ \mu\text{m}$ 의 영역에서는 높게 $25\sim 55\ \mu\text{m}$ 의 영역에서는 작게 그 이후의 영역에서는 높게 나타났다.

참고문헌

- (1) 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 Engine", SAE Paper 970627
- (2) Iwamoto, Y., Noma, K., Nakayama, O., Yamauchi, T. and Ando, H., 1997, "Development of Gasoline Direct Injection Engine", SAE Paper 970541
- (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) Lee, C. S., Lee, K. H., Chon, M. S., Kim, Y. H., 1999, "A Study on the Spray Structure of Gasoline Fuel Injector", IPC-

10, Melbourne, Australia

- (5) Lee, C. S., Chon, M. S., Kim, M. K., Choi, S. C., 1999, "Effect of Injection Pressure on Spray Characteristics of High-Pressure Gasoline Injector", ILASS-Asia 99 4th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems
- (6) Shelby, M. H., VanDerWege, B. A, and Hochgreb, S., 1998, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines", SAE Paper 980160
- (7) Laurenxe W. Evers., 1994, "Characterization of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector", SAE Paper 940188
- (8) Choi Dong-seok et al, 1999, "Effects of Ambient Temperature and Pressure on Vaporizing Spray", ILASS-Asia 99 4th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, pp. 131-136