

직접 분사식 가솔린 인젝터 분무의 입경 측정에 형광/산란광법의 적용

곽수민* · 류경훈* · 최동석** · 김덕줄***

Application of Fluorescence/Scattering Technique to the Measurement of Spray Droplet Size in GDI Injector

Soo-Min Kwak, Kyeong-Hun Ryu, Dong-Seok Choi, and Duck-Jool Kim

Key Words: GDI engine(가솔린 직접 분사식 엔진), LIF(레이저 유도 형광법), Mie scattering(미 산란), Droplet size(입경), PDA(위상 도플러 입자 분석기)

Abstract

To achieve the requirement for high fuel economy and low emissions, the research for GDI engines is recently very brisk in the whole world. This study was performed to measure distribution of average particle size in non-evaporating spray. The 2-D fluorescence/scattering images of fuel spray were captured simultaneously by visualization system composed of a laser sheet, a doubling prism, optical filters, and an ICCD camera. Using the ratio of the two light intensities, particle size distribution was obtained. The SMD measured by fluorescence/scattering technique was compared with it obtained by PDA. The experimental results show that the spray structure of GDI injector and temporal SMD distribution.

기호설명

- I_{flu} : 형광 강도
- I_{sca} : 산란광 강도
- C : 비례상수
- D : 액적 직경
- Q_{sac} : 산란효율
- t : 분사 후 시간 [ms]

1. 서 론

최근 세계적으로 에너지의 절약차원이나 CO₂에 의한 지구온난화 문제 등 환경개선에 대한 사회적 요구와 세계적으로 강화되는 ULEV(Ultra

Lean Emission Vehicle) 배기규제 때문에 가솔린 자동차용 엔진의 고연비화와 고출력화가 절실하게 요구되고 있는 추세이다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 기존의 PFI(Port Fuel Injection) 방식에서 연소실 내에 직접 분사하는 GDI(Gasoline Direct Injection) 방식으로 발전되고 있다. 따라서 직접분사 방식을 채택한 가솔린 엔진에서도 분무 특성이 중요하고, 이 분무특성은 엔진의 출력, 효율 및 배기가스 배출에 큰 영향을 미친다.

이러한 분무특성을 파악하기 위해서 신뢰성 있는 분무 확산과정의 가시화 및 평균입경 측정법의 개발은 중요하다.

최근에는 분무유동에 간섭을 주지 않는 광회절법, 영상처리기법, PDA법 같은 광학적 방법들이 분무의 입경측정에 널리 사용되고 있다.

이러한 광학적 방법 중 액적의 산란광 위상차로 입경을 측정하는 PDA기법이 입경측정 방법으로 가장 많이 쓰이고 있는데, 입경의 측정치가 광전자 증배관의 고전압에 따라 달라지고, 점 측정이므로 입경의 공간분포를 알 수 없는 문제점

* 부산대학교 대학원
 ** 회원, 부산대학교 기계기술연구소
 *** 회원, 부산대학교 기계공학부

이 있다. 이러한 단점들을 보완하기 위한 방법으로 시·공간적인 입경분포를 동시에 측정하여 분무 특성을 해석하는 형광/산란광 강도비법을 들 수 있다. 국내외에서 이 방법에 대한 연구가 진행중인데, 국외에서는 Yeh 등[1]의 방법은 정량화 과정에서의 많은 가정과 실험식에 의한 오차의 요인이 있을 수 있으며, 국내에서는 윤일한 등[2]의 방법은 형광 신호가 산란광 신호에 의해 간섭을 받을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 exciplex 형광을 취득하여 이 간섭의 영향을 최소화하였고, PDA 실험으로 그 타당성을 검증하였다.

이 기법은 레이저 시트광을 분무 중심 단면에 통과시킬 때, 형광물질을 혼합한 분무내의 액적으로부터 산란광과 형광을 동시에 촬영하여 얻어진 화상으로부터 전체 분무내 액적의 상대적 크기를 측정하는 방법이다. 이 방법을 사용하여 시간에 따른 GDI 인젝터의 분무 확산과정 가시화 및 상대적인 SMD(Suuter Mean Diameter) 분포를 측정하였다.

2. 측정 원리 및 실험 장치

2.1 측정 원리

레이저 시트광을 형광물질을 용해시킨 분무 중심에 조사시킬 때, 형광 분자의 농도는 체적에 비례하게 된다. 즉, 형광강도 I_{flu} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{flu} = C_1 \cdot I_0 \sum_i n_i \cdot D_i^3 \quad (1)$$

여기서, C_1 은 비례정수로서 형광의 흡광계수, 양자수율, 검출광학계 등에 의해 결정된 상수이다. I_0 는 입사된 레이저광의 강도를 나타내며, n 은 액적의 개수, D 는 액적 직경을 나타낸다.

이에 반해, 산란광 강도 I_{sca} 는 Lorenz-Mie 이론에 따라 액적 지름이 $1 \mu\text{m}$ 보다 큰 구형 액적의 경우, 근사적으로 액적 지름의 제곱에 비례하게 된다. 따라서 산란광강도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{sca} = C_2 \cdot I_0 \sum_i Q_{sca,i} \cdot n_i \cdot D_i^2 \quad (2)$$

여기서, C_2 는 앞에서와 마찬가지로 검출광학계 특성에 의해 결정되는 비례정수이며, $Q_{sca,i}$ 는 입자 파라미터 $\alpha = \pi D/\lambda$ (λ 는파장), 산란광 검출 각도의 함수이다.

Sauter 평균직경의 정의로부터 관심영역내의 SMD, D_{32} 는 (1), (2)식으로부터 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$D_{32} = \frac{\sum_i n_i \cdot D_i^3}{\sum_i n_i \cdot D_i^2} = C \cdot \frac{I_{flu}}{I_{sca}} \quad (3)$$

여기서, $C = C_1/(C_2 \cdot Q_{sca})$ 로 상수이며, 액적군의 D_{32} 는 형광/산란광 강도비에 비례한다는 것을 알 수 있다. 그리고 위의 C 값은 PDA를 이용하여 액적의 직경을 측정하여 SMD값을 구하고, 형광/산란광을 동시에 촬영한 분무화상에서부터 I_{flu}/I_{sca} 값을 구하여 C 값을 구할 수 있다. 이렇게 구한 값은 동일 광학조건에서 일정하게 적용할 수가 있다.

2.2 실험 방법

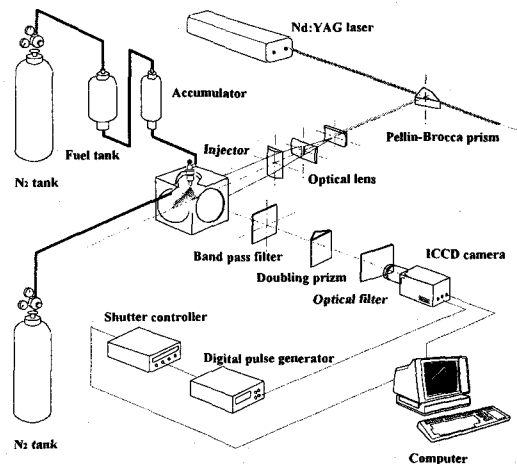


Fig. 1 Experimental setup

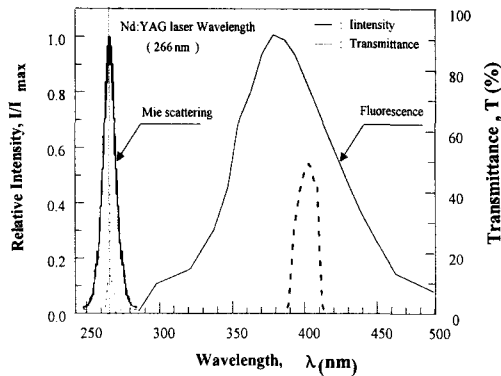


Fig. 2 Fluorescence spectra of the both technique and transmittance of the filters used

실험장치는 크게 광학계, 분사계, 화상취득장치, 분무실 및 신호처리계로 구성되어 있다.

광학계는 광원으로 UV영역의 10Hz Nd:YAG 레이저의 4차 조화파인 266nm를 사용하였다. 그리고 입사 레이저 강도 변화가 형광 및 산란광 강도에 영향을 미칠 수 있으므로, 레이저 출력변화를 포토다이오드를 사용하여 일정하게 유지하였다. 또한, 형광과 산란광 이미지를 동시에 획득하기 위해 이중프리즘(doubling prism)을 사용하였으며, 산란광의 화상을 취득하기 위해 266nm에서 투과율이 약 12%, 반치폭이 10nm인 광학필터를 형광 신호 취득을 위하여 400nm에서 투과율이 약 50%, 반치폭이 25nm인 광학필터를 사용하였다.

Fig. 2는 형광방출 특성과 형광 및 산란광을 취득하기 위해 사용된 광학필터의 투과도를 나타낸 그림이다.

화상의 취득은 ICCD 카메라를 사용하였으며, 분사계는 고압 스윙 인젝터, 연료탱크 및 가압용 질소탱크, 압력계, 압력레귤레이터로 구성되어 있다.

Table 1 Experimental conditions

Ambient gas	Nitrogen (N ₂)
Injection pressure (MPa)	5.1
Injection quantity (mg)	15
Ambient pressures (MPa)	0.1

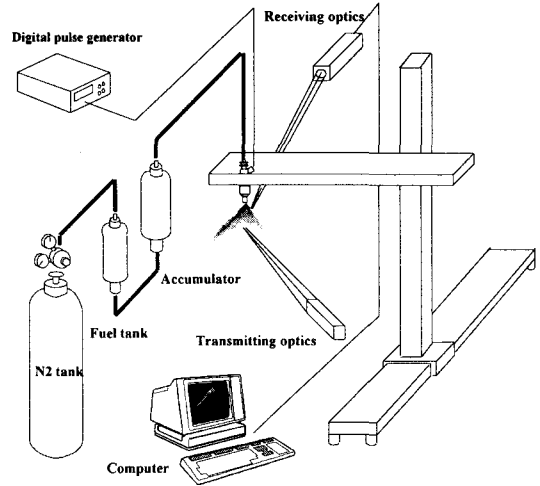


Fig. 3 Experimental setup of PDA

신호처리계는 광원인 레이저와 카메라를 동기시키기 위한 스위치회로, 화상 취득용 이미지 그래버, ICCD카메라 셔터제어기, 펄스발생기로 구성되어 있다.

이 실험에 사용된 연료는 헥산을 용매로 플루오로벤젠과 DEMA를 첨가제로 사용하였으며, Table 1에 실험조건을 나타내었다. 본 실험에 사용된 인젝터는 직접 분사식 가솔린엔진에 사용되는 와류형 고압 인젝터이며 분사각은 60°, 분사각은 5°이다.

Fig. 3은 PDA 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. PDA 장치는 크게 광원으로 사용되는 레이저와 광 화이버 등으로 이루어진 송광부, 수광부 그리고 신호처리부로 구성되어 있다. 레이저는 Ar-ion Laser가 사용되었으며, 레이저의 최대 출력은 5W이고, 실험시 사용 출력은 2W로 하였다. 그리고 측정시 사용된 광은 파장대가 514.5nm(Green beam), 488.0nm(blue beam)의 두 광을 사용하였다. 최적의 산란 신호를 얻기 위해 측정체적에서 측정각도를 30° 방향으로 수광부를 설치하여 산란 신호인 도플러 버스트(Doppler burst) 신호를 취득하였다. 측정 위치는 측방향으로 10mm, 반경방향으로 2mm로 하였다. 분사는 Table 1의 조건과 동일하며, 분사가 주기적으로 이루어지도록 분사주기는 100ms(10Hz)로 설정하였다. 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 한 측정점에서 3000개씩 2회 실험하여 6000개의 데이터를 획득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 레이저광이 분무 통과하면서 감쇠되는 경향을 나타내었다. 산란광의 경우 레이저광은 분무내를 진행하면서 분무축을 중심으로 약 10% 정도의 감쇠를 보이며, 동일한 실험 조건에서도 분무 이미지가 변하게 되는데 이를 보정하기 위해, 먼저 5회의 분무 이미지를 평균하였으며, 그리고 나서 인젝터를 180° 회전하여 취득한 5회의 분무 이미지를 다시 평균하여 광 감소의 영향을 최소화하였다.

Fig. 5는 분사 후 2ms에서 취득한 화상과 이를 평균한 화상을 나타내고 있다. 그림에서 밝은 영역일수록 광강도가 높은 영역으로 연료농도가 높은 영역을 나타낸다. 두 이미지가 모두 비슷한 거동을 보이며, 고압 스월 인젝터의 특징인 중공형(Hollow cone) 분무를 이루고 있다. Fig. 6은 축방향에 따라 PDA로 측정하여 얻은 SMD와 형광/산란광 강도비로부터 산출한 SMD를 비교하였다.

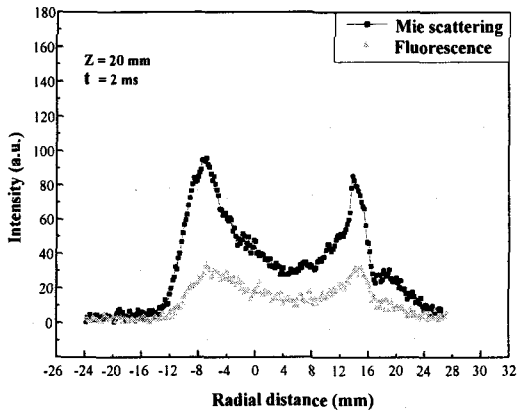


Fig. 4 The intensity dilution of laser beam



(a) Mie scattering image (b) Averaged image

Fig. 5 Spray images at t = 2ms

여기서 보정계수가 문제가 되는데 보정 위치는 SMD 분포가 상대적으로 균일한 분무 중심축으로 선정하고, 전체 관통 길이에 걸쳐 적용할 수 있는 보정계수를 2절에서 언급한 바와 같이 PDA를 이용하여 구한 결과와 비교하여 구하였을 때 대략적으로 보정계수를 29로 적용하였다.

축방향 하류 부분에서 차이가 발생하지만, PDA 결과치와 유사하게 나타났다. Fig. 7은 Z=30mm, 분사 후 3ms에서 반경방향으로 측정된 PDA 결과치와의 비교이다

반경방향에서는 축방향에서보다 더욱 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

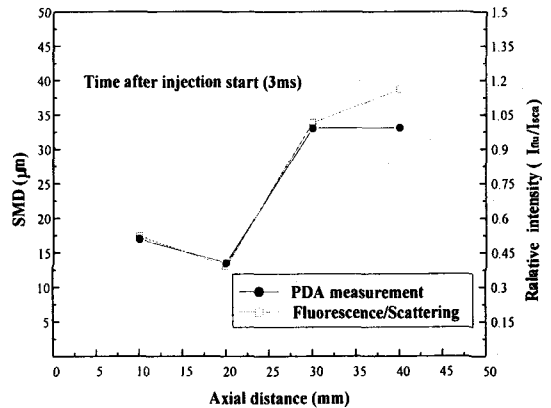


Fig. 6 SMD distributions along axial distance compared with PDA results

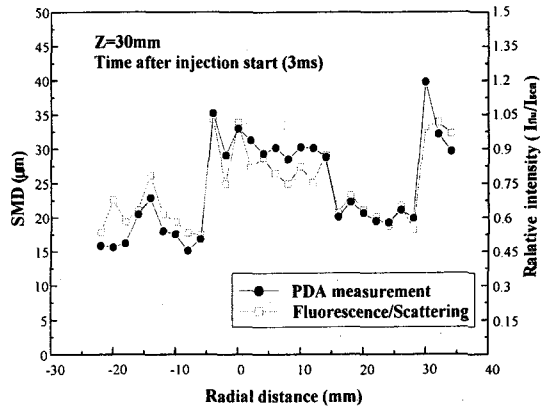
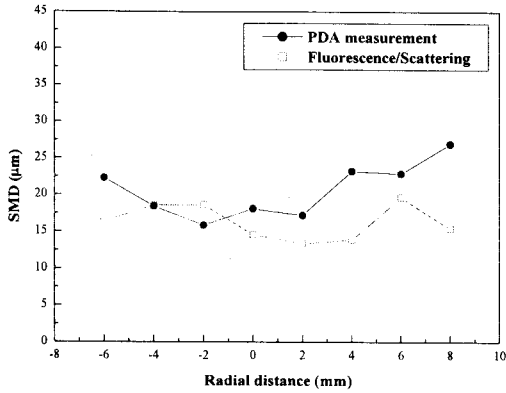
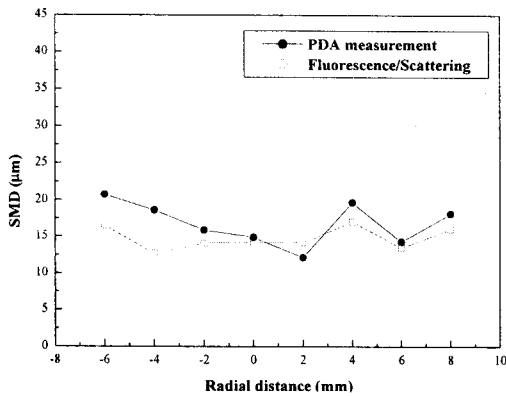


Fig. 7 SMD distributions along radial distance compared with PDA results



(a) $Z = 10\text{mm}$, $t = 1.0\text{ms}$

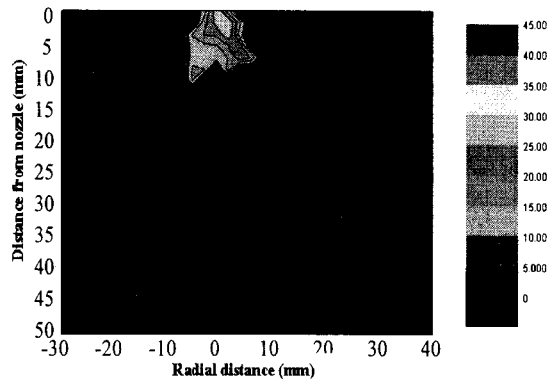


(b) $Z = 10\text{mm}$, $t = 2.0\text{ms}$

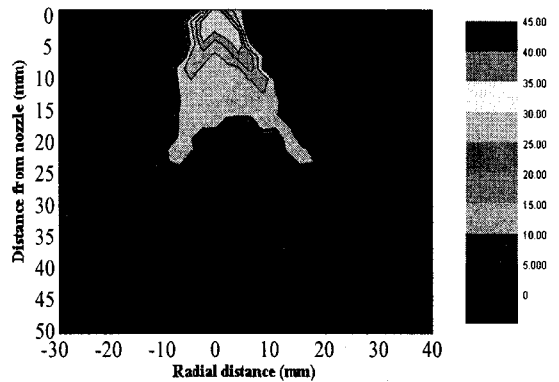
Fig. 8 SMD distributions along injection time compared with PDA results

Fig. 8은 $Z=10\text{mm}$ 에서 시간에 따른 보정계수 적용결과를 나타내고 있다. Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 동일한 보정계수를 적용하였을 때, 약 10% 정도의 오차를 가지는 것을 볼 수 있다.

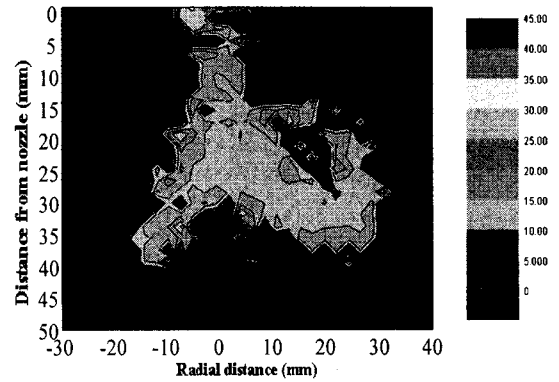
Fig. 9는 형광/산란광 이미지로부터 취득한 SMD를 시간에 따라 나타내었다. 분사 기간 중 전체적인 SMD 값은 인젝터 tip 부근에서 큰 값을 가지는데 이는 연료가 분사시 액적 상태로 분사되기 때문이다. 분사 직후, 액적 분열로 인해 감소하는 경향을 보이다가 분사가 종료된 후 주위 공기와의 와류 현상에 의해 액적들이 서로 재결합하는 경향을 보이고 있다. 축방향 분무의 SMD는 초기 코어 부분이 분열하면서 감소하다가 하류 부분에서 비산하는 액적과 합착하여 증가



(a) $t = 0.5\text{ms}$



(b) $t = 1.5\text{ms}$



(c) $t = 3.0\text{ms}$

Fig. 9 SMD distribution with temporal change

는 경향을 보인다. 반경방향 분무의 SMD는 분무 외곽으로 갈수록 증가하다 감소하고 다시 증가하는 경향을 보이는데, 이는 SMD가 분무 중심에서의 큰 액적들이 분열을 진행하여 감소하다가 다시 스웰 유동의 영향으로 액적들이 합착하여 증

가하게 된다. 마찬가지로 시간에 따른 SMD는 인젝터 팁 부근이 가장 크며 하류로 갈수록 분무주류의 이동이동에 따른 액적들의 충돌로 인한 분열과 함께 공기의 저항 및 유입에 의한 미립화 효과에 의하여 그 크기가 작아지며, 분사 종료 후에도 중심 부근에서는 작은 액적들이 관찰된다. 그러나 분무 하류 부분에서는 분무 반경방향으로 진행함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다

4. 결론

형광과 산란광에 의하여 동시에 획득한 신호의 강도비로서 액적 크기를 측정하는 기법을 유도하고, 그 측정 결과의 타당성을 검토하기 위하여 PDA로 측정한 결과치와 비교하였다. 이 기법을 이용하여 GDI용 와류형 고압 인젝터의 시·공간적인 입경분포를 동시에 측정하여 분무 특성을 해석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 이중 프리즘과 필터를 사용하여 형광/산란광 강도비에 의해 SMD를 측정하는 방법을 이용 시 · 공간적인 SMD 분포를 얻을 수 있었고, PDA 결과와 비교함으로써 이 기법의 타당성을 검토하였다.
- (2) PDA로 측정된 SMD 값을 이용하여, 보정계수를 구하고 이를 형광/산란광을 동시에 측정된 이미지에 도입하여 분무 전 영역에 걸친 SMD 값을 구할 수 있었다.
- (3) 동일한 보정계수를 측방향, 반경방향, 시간에 따른 분무 이미지 처리에 적용하였을 때, 약 10% 정도의 오차를 가지는 것을 볼 수 있다.
- (4) 분사 기간 중 전체적인 SMD 값은 인젝터 팁 부근에서 큰 값을 가지며, 분사 직후 액적 분열로 인해 감소하는 경향을 보이다가 분사가 종료된 후 주위 공기와의 와류 현상에 의해 액적들이 서로 재결합하는 경향을 보이고 있다.

참고문헌

- (1) Yeh. C., Kosaka, H. and Kamimoto, T., 1993,

"Fluorescence/Scattering Image Technique for Particle Sizing in Unsteady Diesel Spray", JSME Trans. Part B, Vol. 59, No. 568, pp. 308-313.

(2) 윤일한, 이형승, 민경덕, 2000, "평면 이미지 기법을 이용한 분무 입경 분포 측정", 한국자동차공학회2000년도 춘계학술대회, pp.150-155.

(3) Hidenori Kosaka, Takao Suzuki, and Takeyuki Kamimoto, 1995, "Numerical Simulation of Turbulent Dispersion of Fuel Droplets in an Unsteady Spray via Discrete Vortex Method", SAE Paper 952433, pp.197-205.

(4) Yuji Ikeda, Shigeo Hosokawa, Fukashi Sekihara, and Tsuyoshi Nakajima, 1997, "Cycle-Resolved PDA Measurement of Size-Classified Spray Structure of Air-Assist Injector", SAE Paper 970631, pp.1-10.

(5) Yuji Ikeda, Tsuyoshi Nakajima, 1997, "Size classified Droplet Dynamics and its Slip Velocity Variation of Air-Assist Injector Spray", SAE Paper 970632, pp.1-9.

(6) Jiro Senda and Tomoyuki Kanda, Masaaki Kobayashi, Hajime Fujimoto, 1997, "Quantitative Analysis of Fuel Vapor Concentration in Diesel Spray by Exciplex Fluorescence Method", SAE Paper 970796, pp.283-295.

(7) S. C. Li, K. Gebert, 1998, "Spray Characterization of High Pressure Gasoline Fuel Injectors with Swirl and Non-Swirl Nozzles", SAE Paper 981935, pp.1-16.