

Mie 산란 방법과 엔트로피 해석 방법을 이용한 혼합연료비에 따른 분무 균질도 특성에 관한 연구

이창희* · 이기형* · 이창식* · 배재일**
(2002년 7월 8일 접수, 2002년 11월 29일 심사완료)

A Study on the Macro-Scopic Spray Characteristic of Homogeneous Degree for the GDI Injector According to Mixture(Gasoline-Diesel) Ratio Using Mie-Scattering Method and the Entropy Analysis

Lee Chang-hee, Lee Ki-hyung, Lee Chang-sik and Bae Jae-il

Key Words: GDI(가솔린 직접 분사), Momentum Exchange(운동량 교환), Degree of Homogeneity(균일화 정도), HCCI(예혼합 압축착화), Mixture Ratio(연료 혼합비)

Abstract

In this study, his technique was applied to a GDI spray in order to investigate the mixture distribution. In addition, the homogeneity degree and diffusion effect according to ambient temperature in the high pressure chamber were analyzed by using an entropy analysis method. From this experiment, we could find that entropy analysis is very effective method for the analysis of mixture formation, and the entropy values increase with the progress of uniformity in diffusion process. we tried to provide the fundamental data for parameter which effects on the spray macroscopic characteristics with mixture ratio of diesel and gasoline. In addition, the mixture formation was analyzed by using entropy analysis. The entropy analysis is based on the concept of statistical entropy, and it identifies the degree of homogeneity in the fuel concentration. From the entropy analysis results we could find that the direct diffusion phenomena is a dominant factor in the formation of a homogeneous mixture at downstream of GDI spray especially in vaporizing conditions. As to increasing ambient temperature and increasing gasoline rate, the entropy intensity using the statistic thermodynamics method is increased because evaporation rate is higher gasoline than diesel.

1. 서론

자동차 배출 가스에 의한 환경 문제가 심각하게 대두됨에 따라 지구 온난화의 주원인인 CO2를 비롯한 NOx, Soot 등의 유해 물질의 배출 저

감은 매우 중요한 연구 과제가 되고 있다.

디젤엔진은 높은 열효율과 우수한 연비 성능 및 내구성 등의 장점을 가지고 있어서 차량 및 산업 분야에서 광범위하게 이용되고 있다. 이러한 디젤엔진은 열효율은 높으나 실린더 내에 분사된 연료 분무 주위에는 공간적으로 불균일한 공연비 분포가 발생되어 농후영역에서는 입자상 물질(Particulate Material : P.M.)이 생성되며, 이온 공연비 영역에서는 질소산화물(NOx)의 배출이 증가하는 현상이 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기존의 디젤엔진에 예혼합 연료 분사 시스템을 장착하여

† 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원
E-mail : leemech@ihanyang.ac.kr
TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550
* 한양대학교 기계공학부
** (주) 케피코

연소실 내에 균일 희박 예혼합기를 형성시킨 후 압축 착화시킴으로써 실린더 전체의 희박 연소에 의한 NOx 생성 억제와 예혼합 연소에 의한 입자상 물질의 저감을 동시에 이룰 수 있는 새로운 연소 기술인 균일 예혼합 압축착화(HCCI : homogeneous combustion charge ignition) 방식이 주목을 받고 있다.

이러한 HCCI엔진을 구현하기 위하여 포트 분사식 연료 공급 방식이 주로 사용되어 왔으나⁽¹⁾, 최근 포트 분사에 비하여 다음과 같은 많은 장점을 가지고 있는 직접 분사 방식의 적용이 증가되는 추세이다.⁽²⁾ 첫 번째 장점으로 흡기관내의 벽류 발생을 억제하여 응답 특성과 정밀한 공연비 제어를 가능하게 한다. 두 번째로는 연소실내 혼합기 분포의 성층화가 가능하여 과도 운전시의 안정되고 효율 좋은 연소를 얻을 수 있게 한다. 이 외에도 연료 성층화는 피스톤 클레비스 영역과 열 경계층 부근의 연료량을 감소시킬 수 있으므로 미연 탄화수소(UHC)와 CO의 발생을 동시에 줄일 수도 있다. 따라서 GDI용 인젝터를 이용하여 HCCI엔진 기술을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.^(3,4)

본 연구에서는 GDI용 인젝터의 HCCI적용 가능성을 검토하기 위한 기초 연구로서, 고압 챔버 내에 분사되는 직접 분사식 혼합기 분무의 영상을 취득하는 시스템을 구축하였다.^(5,8) 그리고, 엔트로피 해석방법^(9,11)을 이용한 혼합기 형성과정의 해석 방법을 확립하였다. 이러한 해석 기술을 이용하여 두 연료(가솔린과 디젤)의 혼합비 변화에 따른 분무 특성을 파악함으로써 HCCI용 엔진의 인젝터 선정과 연료 공급 시스템 개발시에 필요한 기초 자료를 구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 통계 열역학적 개념을 이용한 엔트로피 해석 방법

N_i 를 계(system 또는 검사체적) 내에서 어떤 에너지 준위 ϵ_i 상태에 있는 입자의 개수라 하자. 그러면, $E = \sum N_i \epsilon_i$, $N = \sum N_i$ 가 될 것이다. 각 에너지 준위 ϵ_i 에 N_i 개의 입자가 있다면 이 계에서 구별되는 전체 N 개의 입자들간의 가능한 조합수 W (가중비)는

$$W = {}_N C_{N_1} \times {}_{(N-N_1)} C_{N_2} \times \dots \times {}_{N_M} C_{N_M} \quad (1)$$

$$= \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots N_M!} = \frac{N!}{\prod N_i!}$$

가 된다.

엔트로피는 Boltzmann의 통계역학적 개념에 따라서 W 의 자연대수로 나타내어지고, $N \gg 1$ 으로 가정할 때 스티링(Stirling)의 근사식을 적용하면,

$$\ln n! \approx n \ln n - n \quad (n \gg 1)$$

$$\ln W = \ln N! - \sum \ln N_i$$

$$= N \ln N - N - \sum N_i \ln N_i + \sum N_i \quad (2)$$

$$= N \ln N - \sum N_i \ln N_i$$

$$S = k \ln(W)$$

$$= k [N \cdot \ln(N) - \sum \{N_i \cdot \ln(N_i)\}] \quad (3)$$

가 된다. 여기서 k 는 Boltzmann 상수이다.

영상의 각 셀(M) 내의 입자개수 N_i 를 그 셀의 이미지 강도(image intensity) $I_{(i)}$ 에 선형적으로 비례한다고 가정하면 다음과 같이 된다.

$$S = \alpha \cdot \left\{ \sum_i I_{(i)} \right\} \cdot \ln \left\{ \alpha \cdot \sum_i I_{(i)} \right\}$$

$$- \sum_i \alpha \cdot I_{(i)} \cdot \ln \{ \alpha \cdot I_{(i)} \} \quad (4)$$

$$= \alpha \cdot \left\{ \sum_i I_{(i)} \right\} \cdot \ln \left\{ \sum_i I_{(i)} \right\}$$

$$- \alpha \cdot \sum_i I_{(i)} \cdot \ln \{ I_{(i)} \}$$

여기서, α 는 Boltzmann 상수와 입자개수와 이미지 강도(image intensity)와의 비례계수를 포함하는 상수이다.

$I_{(i)}$ 는 M 개로 분할된 셀 내의 입자개수에 대응되는 이미지 강도이고, 입자가 영상전체에 균일하게 분산된 상태를 생각할 경우 평균강도는,

$$\overline{I_{(i)}} = \frac{1}{M} \cdot \sum_i I_{(i)} = \frac{I_t}{M} \quad (5)$$

로 된다. 여기서, I_t 는 영상전체의 이미지 강도의 적분값이다. 이 균일한 분산 상태의 엔트로피는

아래와 같이 된다.

$$S_1 = \alpha \cdot I_t \cdot \ln(M) \quad (6)$$

한편, 영상 전체의 이미지 강도의 총합이 일정하고, 0과 255로 그 영상분포를 이산화 시킬 경우의 엔트로피 S_0 는 P 를 형광치 255가 차지하는 셀의 수로 두면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} S_0 &= \alpha \cdot [I_t \cdot \ln(I_t) - P \cdot I_{MAX} \cdot \ln(I_{MAX})] \\ &= \alpha \cdot [I_t \cdot \ln(I_t) - I_t \cdot \ln(I_{MAX})] \end{aligned} \quad (7)$$

S_1 과 S_0 를 사용하여 엔트로피가 최대가 될 때를 1로, 최소가 될 때를 0으로 되게 정규화된 S^* 를 정의하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S^* &= \frac{S - S_0}{S_1 - S_0} \\ &= \frac{I_t \cdot \ln(I_{MAX}) - \sum_{i=1}^M \{I_{(i)} \cdot \ln(I_{(i)})\}}{I_t \cdot \{\ln(M) - \ln(I_t) + \ln(I_{MAX})\}} \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 정규화된 엔트로피 값을 MATLAB으로 취득된 레이저 산란 영상으로부터 직접 구할 수 있게 프로그래밍하여 분무의 균일 혼합 정도 (homogeneity degree)와 확산현상을 해석할 수 있다.

2.2 분무 가시화 실험 장치

Fig. 1은 본 연구에서 직접 분사 가솔린 분무의 엔트로피 해석을 위해 구축한 실험장치 구성을 나타낸 것이다. Fig. 1에 나타난 것처럼 운전 조건에 따른 분무를 모사하기 위하여 고압 챔버 내의 분위기 압력과 연료를 질소가스로 가압하여 실험하였고, 히터를 장착하여 온도를 변화시켰다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저(250mJ, 532nm)를 사용하였으며, 레이저로부터 유도된 빔은 원통 렌즈군을 통하여 2mm 두께의 쉬트(sheet)형태로 관측영역으로 조사된다. CCD 카메라의 노출 시간과 인젝터의 분무와 레이저 주사 시기는 타이밍 보드(PC-TIO-10)와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제어하였다.

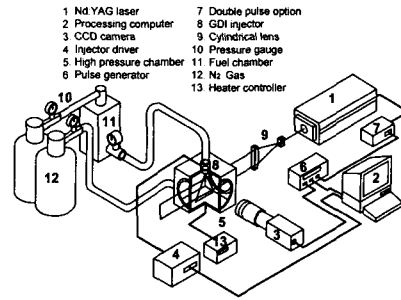


Fig. 1 Experimental apparatus

Table 1 Experimental condition

Ambient Temperature		293K, 353K
Ambient Pressure		0.1MPa
Spray	Injector	Swirl Type
	Fuel mixture (Diesel:Gasoline)	0:1, 1:4, 4:1, 1:0
	Fuel pressure	3, 5, 7MPa
	Injection period	2, 4ms

또한, 고해상도 CCD 카메라(1008*1018, Kodak, Megaplus ES 1.0)를 이용하여 취득된 영상은 PC에 있는 이미지 보드(frame grabber, metoerII/digital)에 의하여 디지털 이미지로 저장하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 디젤과 가솔린의 혼합비율에 따른 인젝터의 분무 거동 특성

Fig. 2는 분사 시작 후 3msec, 분사압력이 각각 3MPa, 5MPa, 7MPa일때의 디젤과 가솔린 혼합 비율에 따른 분무 거동 특성을 나타낸 그림이다.

먼저, 분무의 분열 현상을 설명하기 위하여 거시적으로 leading edge, cone region, trailing edge, 및 vortex cloud region의 네 영역으로 구분할 수 있다. Fig. 2에서 나타난 분열 현상은 분무 시작 후 1.5msec부터 인젝터 선단에서 콘 형태가 되면서 대칭적인 분무 구조로 발전되는데 이런 현상은 정상상태 분무가 이루어지면서 선회 효과(swirl effect)에 의하여 분무 가장자리의 윤곽이 뚜렷한 cone region이 생성되기 때문이다. 또한

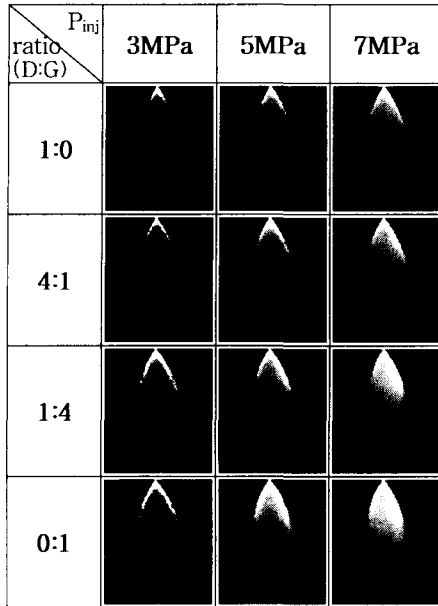


Fig. 2 Spray characteristic of mixture ratio for Diesel and Gasoline

하류로 내려갈수록 연료 액막의 표면 장력에 의하여 안쪽으로 수축되는 모습을 보이고 있다. 또한, cone region 끝단에서 지상구조(branch like structure)가 형성되는데 이것은 인젝터 출구에서 주위 공기와 분무 경계에서 발생하는 helmholtz's 불안정성이 하류로 진행되면서 성장한 와(vortex)에 의하여 주위 공기는 분무 주류 방향으로 유입되고 액적들은 분무의 외측으로 모이면서 발생된다. 분사 압력이 증가함에 따라 주위 공기와 분무 경계에서 발생하는 helmholtz's 불안정성이 증가함에 의해 와(vortex)가 커지는 현상을 볼 수 있으며 공기와의 경계면에서 역 방향 와류가 형성되어 성장하는 것을 관찰할 수 있다. 또한, 혼합기 비율 즉 가솔린의 혼합비가 증가함에 따라 역방향 와류가 증가하고 분무 형태가 원추형에서 종모양으로 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 이유는 액적의 밀도가 큰 디젤의 경우 액적 운동량이 밀도가 작은 가솔린보다 크기 때문이라 사료된다.

3.2 엔트로피 해석을 이용한 분무 균질도 특성 파악

3.2.1 인젝터의 수직 방향의 분무 균일도 특성

Fig. 3과 Fig. 4는 Fig. 1과 Table 1에서 보인 바와 같은 실험 장치 및 실험 조건을 이용하여 연료 혼합 비율과 온도 변화에 따른 분무 균일도를 나타내었다. Fig. 2에서 보여진 결과를 토대로 광원이 분무군을 관통할 때의 좌우 분부의 이미지 강도는 결과에서도 보여졌듯이 좌우 강도의 차이가 없음을 확인하였다.

Fig. 3은 인젝터 분사 압력을 3MPa로 고정하였고, 온도가 각각 298K와 353K일 때의 분무 균일화 정도를 나타낸 것이다. 가솔린의 혼합 비율이 증가할수록 분무의 선두 질량 부분에서 엔트로피 값이 증가하였다. 그 이유는 Fig. 3의 그림에서 볼 수 있듯이 디젤의 경우 연료의 밀도가 크기 때문에 밀도가 작은 가솔린의 경우보다 확산 정도가 작기 때문이며, 가솔린 함유량이 증가함에 따라 분무 선두 질량 부분에서 엔트로피가 증가함을 알 수 있었다. 그러나 주변 분위 온도 353K의 경우 분무 선두 액적들의 증발로 인하여 질량 부분에서의 엔트로피가 증가함을 알 수 있다. 따라서, 분위기 온도가 높고 가솔린 함유량이 증가할수록 분무 액적의 확산 즉 엔트로피가 증가함을 알 수 있었다. 즉 팁 부분의 cone region 영역에서 가장 불 균일한 혼합을 나타내고 낮은 엔트로피 값을 보이다가 cone region 끝단에 와(vortex)의 형성과 더불어 균일한 혼합 상태를 나타내는 높은 엔트로피 값이 반경 방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 인젝터 분사 압력을 7MPa로 고정하였고, 온도 조건은 Fig. 5와 같다. Fig. 5와 마찬가지로 가솔린 비율이 증가하고 온도가 높은 경우 분무 액적의 확산성이 증가함을 알 수 있었다. Fig. 3과 Fig. 4의 경우를 비교하여 보면, 분사 압력이 큰 경우 엔트로피 값이 전반적으로 증가됨을 확인하였다. 온도가 293K인 경우, Fig. 3에서는 가솔린 비율이 증가함에 따라 선두 질량 부분에서 엔트로피 값이 매우 작은 것을 확인하였지만, Fig. 4에서는 엔트로피 값이 증가하는 것을 알 수 있었다.

따라서 대기 온도 하에서의 하류 방향의 급격한 엔트로피가 증가는 확산현상에 기인하기보다는 분무에 의하여 유도된 공기와의 운동량 교환에 의하여 이루어진 것으로 판단되며, 353K에서 분사된 연료의 엔트로피 증가는 확산현상에 기인

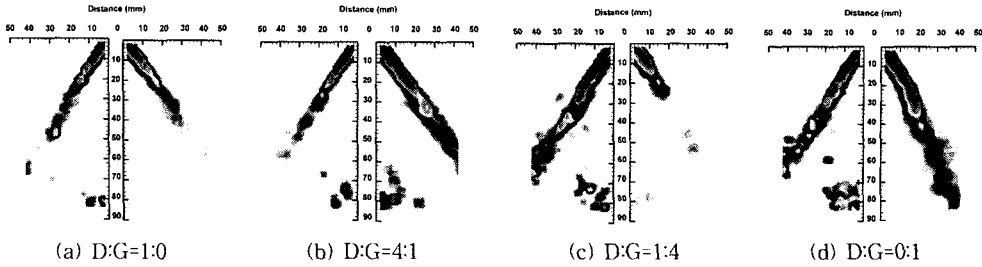


Fig. 3 Spray homogeneous degree on the mixture ratio of diesel and gasoline using the entropy analysis method at the time(3700 μ s) after injection start (Pinj = 3MPa, left : ambient temperature = 298K, right : ambient temperature = 353K)

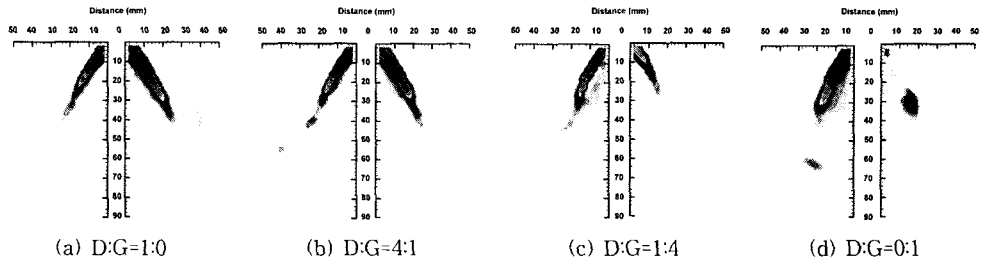


Fig. 4 Spray homogeneous degree on the mixture ratio of diesel and gasoline using the entropy analysis method at the time(3700 μ s) after injection start (Pinj = 7MPa, left : ambient temperature = 298K, right : ambient temperature = 353K)

Dist. Time	10mm	20mm	30mm	40mm
1.6ms				
2.4ms				

Fig. 5 Spray characteristic of radial direction on gasoline fuel

한 것으로 판단된다. 즉, 분사압력과 연료 혼합 비율 및 온도가 증가할수록 확산성이 우수하다고 생각된다.

3.2.1 인젝터의 반경 방향의 분무 균일도 특성

Fig. 5는 분사 시간은 2msec로 고정하였으며, Mie-scattering 방법을 이용하여 분사 시작 후 1.6ms와 2.4ms일 때의 인젝터 팁 끝단에서 떨어진 거리에 따른 분무 거동을 나타낸 결과이다.

인젝터 팁 끝단에서 40mm에서의 분무 특성은

Fig. 5에서 본 바와 같이 연료 액적의 선두 질량 영역은 연료 액적의 불균일한 혼합상태를 나타내고 있다. 팁 끝단에서 떨어진 거리가 증가할수록 공기역학적 혼합이 촉진되어 균일한 혼합상태를 보이고 있다고 생각된다. 2.4ms의 경우는 분무가 종료된 상태의 분무 특성을 나타내고 있으며, 거리에 상관없이 거의 균일한 액적 분포를 나타내고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 5의 분무 특성을 엔트로피 해석 방법을 이용하여 분무의 균일도(확산성)를 나타낸 결과이다. Fig. 6은 인젝터 팁 끝단에서 멀어질수록 전반적으로 엔트로피 값이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 40mm의 경우는 불균일한 분포를 나타내고 있다. Fig. 7은 전반적으로 공기와의 운동량 교환에 의해 균일한 혼합을 나타내고 있다고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 레이저 Mie-scattering 방법을 이용한 엔트로피 해석을 통해 GDI용 인젝터의 분

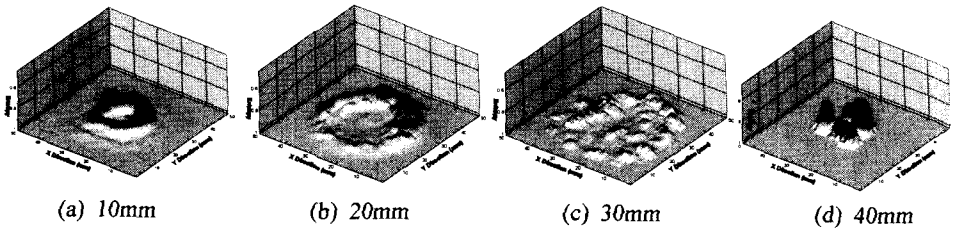


Fig. 6 Entropy analysis results of radial direction at the time(1600 μ s) after injection start according to distance from injector tip end

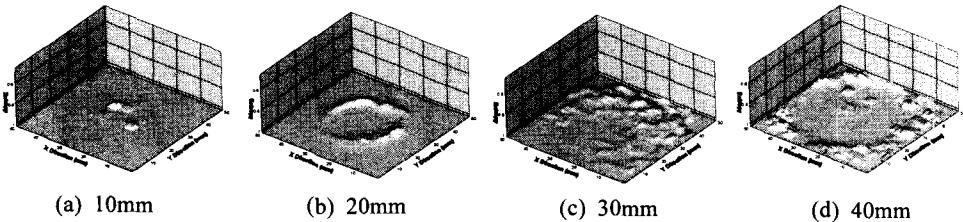


Fig. 7 Entropy analysis results of radial direction at the time(2400 μ s) after injection start according to distance from injector tip end

무 특성 및 분무 균일화 정도를 파악하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 디젤과 가솔린의 혼합 비율에 따른 인젝터의 분무 특성 측정 결과, 분사 압력이 증가함에 따라 분무 하류로 내려갈수록 연료 액막의 표면 장력에 의하여 안쪽으로 수축하는 현상을 볼 수 있었으며, 가솔린 비율이 증가함에 따라 역방향의 와류가 증가하고 원추형에서 종 모양으로 변하는 것을 관찰할 수 있었다.

(2) 인젝터의 수직방향의 분무 균일도 특성파악 결과, 대기 온도 하에서의 하류 방향에서 발생한 급격한 엔트로피 증가는 분무에 유도된 공기와의 운동량 교환에 의하여 이루어진 것으로 판단되며, 353K 온도에서는 분사된 연료의 확산에 기인한 것으로 판단된다.

(3) 인젝터의 반경방향의 분무 균일도 특성파악 결과, 분무가 진행 중인 경우는 팁 끝단에서 멀어질수록 엔트로피 값이 증가하였으며, 분무가 끝난 경우는 거의 전반적으로 균일한 혼합기를 이루고 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한양대학교 교내 연구비에 의해 수행된 연구결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- (1) Koji Hiraya, Kazuya Hasegawa, Tomonori Urushihara, Akihiro Iiyama and Teruyuki Itoh, "A Study on Gasoline Fueled Compression Ignition Engine," SAE Paper, No. 2002-01-0416.
- (2) Magnus Sjoberg, Lars-Olof Edling, Torbjorn Eliassen, Lars Magnusson and Hans-Erik Angstrom, "GDI HCCI: Effects of Injection Timing and Air Swirl on Fuel Stratification, Combustion and Emissions Formation," SAE Paper, No. 2002-01-0106.
- (3) Shigeo Yamamoto, Takahiro Satou and Motoki Ikuta, "Feasibility Study of Two-stage Hybrid Combustion in Gasoline Direct Injection Engines," SAE Paper, No. 2002-01-0113.
- (4) Craig D. Marriott and Rolf D. Reitz, "Experimental Investigation of Direct Injection-Gasoline for Premixed Compression

- Ignited Combustion Phasing Control," SAE Paper, No. 2002-01-0418.
- (5) Michael. Shelby, Brad A. 1998, VamDerWege and Someone Hochgreb, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," SAE980160.
- (6) Fu-Quan Zhao, Ming-Chia Lai, "A Review Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engines," SAE970627
- (7) Zhao, F.-Q., Yoo, J.-H., and Lai, M.-C., 1996, " Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE Technical paper, No. 961925.
- (8) Toyosei Yamauchi, and Tomoyuki Wakisaka, 1996, "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-Pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct-Injection SI Engine," SAE Technical paper, No. 962016.
- (9) Masahisa Yamakawa, Seiji Isshiki, Takuo Yoshizaki and Keiya Nishida, 2001, " Measurement of Ambient Air Motion of D.I. Gasoline Spray by LIF-PIV," *COMODIA*, pp. 499~504.
- (10) Ryo Yuyama, Takemi Chikahisa, Kazushige Kikuta and Yukio Hishinuma, 2001, " Entropy Analysis of ControlMicroscopic Diffusion Phenomena in Diesel Sprays," *COMODIA*, pp. 542~550.
- (11) Lee, C.H., Lee, K.H., Ryu, J.D., Jung, H.Y. and Lee, C.S., 2002, "An Experimental Study on the Spray Behavior and Mixture Formation in the Early Injection Timing of GDI Injectors Using the Entropy Analysis," *ilass-American 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, pp. 52~58.