

## 엔트로피 해석과 PIV를 이용한 직접 분사식 가솔린의 분무 특성에 관한 연구

우영완<sup>†</sup> · 이창희<sup>\*</sup> · 이기형<sup>\*\*</sup> · 이창식<sup>\*\*</sup>  
(2002년 3월 5일 접수, 2002년 5월 9일 심사완료)

### A Study on the Spray Characteristics for a Gasoline Direct Injector by Using Entropy Analysis and PIV Methods

Youngwan Woo, Changhee Lee, Kihyung Lee and Changsik Lee

**Key Words:** GDI Injector(가솔린 직접 분사식 인젝터), Diffusion(확산), Vorticity Strength(와도 강도), Degree of Homogeneity(균일화 정도), PIV(입자 영상 속도법)

#### Abstract

To improve the fuel consumption and exhaust emission for gasoline engines, GDI(Gasoline Direct Injection) system was spotlighted to solve above requirements. Thus, many researchers have been studied to investigate the spray characteristics and the mixture formation of GDI injector. In this study, we tried to study the spray characteristics of a gasoline direct injector by using entropy analysis and PIV methods. The entropy analysis is based on the concept of statistical entropy, and it identifies the degree of homogeneity in the fuel concentration. The PIV method was adopted to determine the fluid dynamics information at the spray. From the applied results on a direct injection gasoline spray, we could find that the direct diffusion phenomena was a dominant factor in the formation of a homogeneous mixture at downstream of GDI spray especially under vaporizing ambient conditions, and mixing phenomena was also progressed by momentum exchange with induced air. In addition, the correlation between entropy and vorticity strength enabled to find their relation.

#### 1. 서 론

최근 전세계적으로 고무되고 있는 에너지의 절약과 CO<sub>2</sub>에 의한 지구 온난화 문제 등 환경개선에 대한 사회적 요구와 세계적으로 강화되는 SULEV(Super Ultra Lean Emission Vehicle) 배기 규제 때문에 가솔린 자동차용 엔진의 고연비화와 고출력화가 절실히 요구되고 있는 추세이다. 따라서, GDI엔진은 연비 향상 측면과 갈수록 강화되어 가는 배기가스 규제에 대응할 수 있는 차세대 가솔린 엔진으로 각광 받고 있고, 전세계적으로

로 대학 및 연구소에서 활발한 연구가 수행되어지고 있다.<sup>(1-3)</sup> 이런 가솔린 직접 분사를 이용한 차세대 가솔린 엔진의 개발은 위에서 언급한 고연비와 미래 배기 배출물 기준에 만족되는 정교한 연소계(Combustion systems)를 필요로 한다.<sup>(4)</sup> 이러한 연소계의 설계과정은 혼합기 형성과정과 준비 기구의 상호작용에 대한 기본적인 지식에 근간을 두어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 연소실 내에 분사되는 분무를 모사하기 위하여 고압 챔버 내에 분사되는 직접 분사 가솔린 분무의 영상을 취득하는 시스템을 구축하였다. 그리고, 통계 열역학적 엔트로피 개념을 이용한 엔트로피 해석방법<sup>(5)</sup>과 상호상관 입자 영상 속도법(Particle Image Velocimetry, PIV)을 개발하여 직접 분사 가솔린 분무에 적용하여 혼합기 형성과정의 해석을 수행하였으며, 엔트로피 값과 와도 강도(vorticity strength)와의 상관관계를 분석하였다.

<sup>†</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : wooyw@hanmail.net  
TEL : (031)418-9293 FAX : (31)406-5550

<sup>\*</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과

<sup>\*\*</sup> 한양대학교 기계공학과

2. 실험 방법 및 장치

2.1 엔트로피 해석 방법

$N_i$ 를 계(system 또는 검사체적) 내에서 어떤 에너지 준위  $\epsilon_i$  상태에 있는 입자의 개수라 하자. 그러면,  $E = \sum N_i \epsilon_i$ ,  $N = \sum N_i$ 가 될 것이다. 편의상 계 내에서 에너지 준위가 가장 낮은 경우를  $\epsilon_0$ 라 하자. 또한, 이 값을 다른 에너지 준위와 상대적으로 0으로 놓자. 예를 들어, 가능한 입자 배열은 모두가  $\epsilon_0$  상태에 있는 경우는  $\{N, 0, 0, \dots\}$ (case A)와 같이 표현된다. 그러면,  $\{N-2, 2, 0, \dots\}$ (case B)는  $\epsilon_0$ 의 상태가  $N-2$ 개,  $\epsilon_1$ 의 상태가 2개 존재하는 경우이다. 일반화시켜 각 에너지 준위  $\epsilon_i$ 에  $N_i$ 개의 입자가 있다면 이 계에서 구별되는 전체  $N$ 개의 입자들간의 가능한 조합수  $W$ (이름 가중비)는

$$W = {}_N C_{N_1} \times {}_{(N-N_1)} C_{N_2} \times \dots \times {}_{N_0} C_{N_0} \tag{1}$$

$$= \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots N_0!} = \frac{N!}{I! N_i!}$$

가 된다. case A보다 case B가 일어날 가능성이 더 큰 것은 자명하다.

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

$$\ln n! \approx n \ln n - n \quad (n \gg 1) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \ln W &= \ln N! - \sum \ln N_i! \\ &= N \ln N - N - \sum N_i \ln N_i + \sum N_i \\ &= N \ln N - \sum N_i \ln N_i \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} S &= k \ln(W) \\ &= k [N \cdot \ln(N) - \sum (N_i \cdot \ln(N_i))] \end{aligned} \tag{4}$$

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.

$$\begin{aligned} S &= \alpha \cdot \left\{ \sum_i I_{(i)} \right\} \cdot \ln \left\{ \alpha \cdot \sum_i I_{(i)} \right\} \\ &\quad - \sum_i \alpha \cdot I_{(i)} \cdot \ln(\alpha \cdot I_{(i)}) \\ &= \alpha \cdot \left\{ \sum_i I_{(i)} \right\} \cdot \ln \left\{ \sum_i I_{(i)} \right\} \\ &\quad - \alpha \cdot \sum_i I_{(i)} \cdot \ln \{ I_{(i)} \} \end{aligned} \tag{5}$$

여기서,  $\alpha$ 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,

$$\overline{I_{(i)}} = \frac{1}{M} \cdot \sum_i I_{(i)} = \frac{I_t}{M} \tag{6}$$

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

$$S_1 = \alpha \cdot I_t \cdot \ln(M) \tag{7}$$

한편, 영상 전체의 이미지 강도의 총합이 일정하고, 0과 255로 그 영상분포를 이산화 시킬 경우의 엔트로피  $S_0$ 는  $P$ 를 평균치 255( $I_{MAX}$ )가 차지하는 셀의 수로 두면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} S_0 &= \alpha \cdot [I_t \cdot \ln(I_t) - P \cdot I_{MAX} \cdot \ln(I_{MAX})] \\ &= \alpha \cdot [I_t \cdot \ln(I_t) - I_t \cdot \ln(I_{MAX})] \end{aligned} \tag{8}$$

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

$$\begin{aligned} S^* &= \frac{S - S_0}{S_1 - S_0} \\ &= \frac{I_t \cdot \ln(I_{MAX}) - \sum_i (I_{(i)} \cdot \ln(I_{(i)}))}{I_t \cdot \{\ln(M) - \ln(I_t) + \ln(I_{MAX})\}} \end{aligned} \tag{9}$$

식 (9)의 정규화된 엔트로피 값을 MATLAB으

로 취득된 레이저 산란 영상으로부터 직접 구할 수 있게 프로그래밍하여 분무의 균일 혼합 정도 (homogeneity degree)와 확산현상을 해석할 수 있다.

2.2 상호상관 입자 영상 속도법(PIV)

PIV의 근본원리는 레이저를 연속 2회 주사시키 입자의 영상을 CCD 또는 사진기를 이용하여 기록하여 속도를 계측하는 것이다. 전통적인 방법으로는 단일화상 이중노출 이미지를 취득하여 자기상관법(auto-correlation)을 통하여 속도장을 계산하여 왔으나, 이와 같은 방법은 속도 벡터의 방향 판별에 모호성을 발생시켰다. 따라서, 회전 거울을 이용한 이미지 쉬프팅(image shifting)기법과 Lee et. al<sup>(6)</sup>이 개발한 이색 PIV기법 등으로 방향의 모호성을 극복할 수는 있지만, 실험의 복잡성을 초래하였다. 가장 좋은 대처방안으로는 CCD 카메라를 이용하여 각각의 노출에 의한 영상기록을 분리된 프레임에 기록하고 상호 상관법(cross-correlation)을 이용하여 해석하는 것이다. 서로 다른 분리된 프레임에 영상을 기록하기 때문에 각각의 레이저 펄스의 이미지에 대한 시간 정보를 알 수 있으며, 따라서 방향의 모호성이 발생하지 않는다. Fig. 1과 같이 연속된 CCD 프레임에 두 펄스가 각각 위치하게 하는 이 기술을 "Frame-Straddling"이라고 한다. 이렇게 취득된 영상은 Fig. 2에 나타낸 속도산출 알고리즘을 통하여 속도벡터를 구하였다. 속도산출은 FFT를 이용하여 상호상관 계수의 최대값 위치 좌표를 계산하는 방식으로 프로그래밍 하였다

2.3 실험 장치와 광학계 구성

Fig. 3은 본 연구에서 직접 분사 가솔린 분무의 엔트로피 해석과 PIV를 적용하기 위하여 구축한 실험장치 구성을 나타낸 것이다. 엔트로피 해석은 PIV를 위하여 취득한 두 프레임 중 하나의 산란 이미지에 대하여 적용하였다. Fig. 3에 나타낸 것처럼 운전 조건에 따른 분무를 모사하기 위하여 고압 챔버 내의 분무기 압력과 연료를 질소가스로 가압하여 실험하였고, 히터를 장착하여 온도를 변화시켰다. 광원으로는 Nd:YAG 레이저 (200mJ, 532nm)를 사용하였으며, DPO(Double Pulse Option)를 통하여 짧은 시간간격의 연속 2회의 레이저 발진을 유도하였다. 레이저로부터 유도된

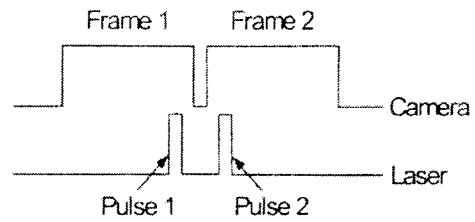


Fig. 1 Schematic diagram of frame straddling

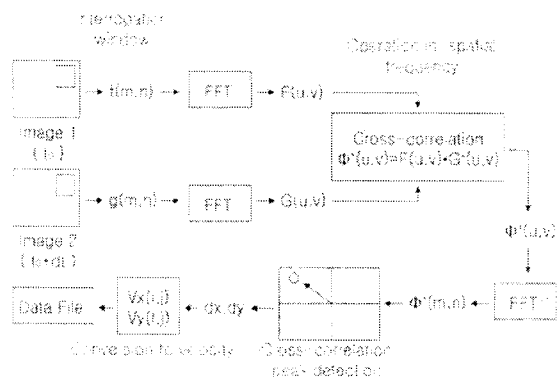


Fig. 2 Schematic diagram of cross-correlation PIV algorithm

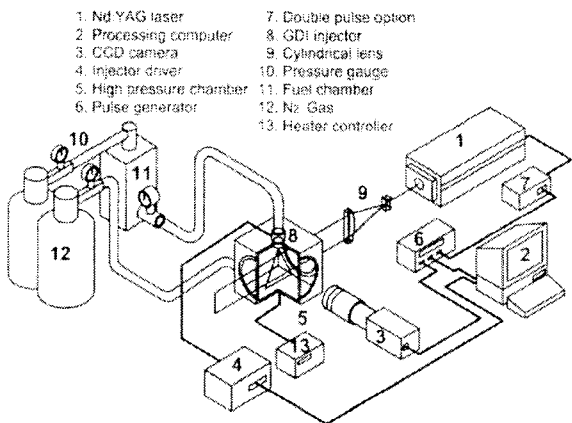
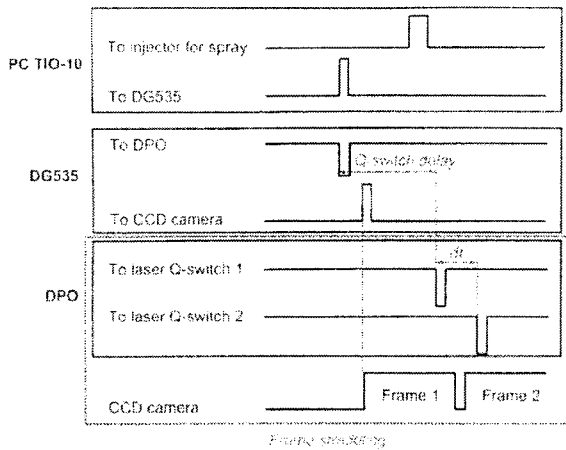


Fig. 3 Experimental apparatus

법은 원통 렌즈군을 통하여 2~3mm두께의 쉬트(sheet)형태로 관측영역으로 주사된다. CCD 카메라의 노출시간과 인젝터의 분무와 레이저 주사시키는 타이밍 보드(PC-TIO-10, NI co.)와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제어하였다. 레이저 트리거(trigger)신호의 지연시간(delay time)을 제어함으로써 분무 성장과정에 따른 산란 영상을 취득할 수 있었으며, 고해상도 CCD 카메라 (1008\*1018, Kodak, MegapluS ES 1.0)를 이용하여



Q-switch delay : 180µs, dt : 80ms  
**Fig. 4** Timing chart of experiment system

**Table 1** Experimental conditions

Ambient Temperature		25°C, 100°C
Ambient Pressure		1bar, 10bar
Spray	Injector	Swirl Type
	Fuel	Gasoline
	Fuel pressure	100bar
	Injection period	3ms
	Spray angle	60°

취득된 영상은 PC에 있는 이미지 보드(frame grabber, metoerll /digital)에 의하여 디지털 이미지로 저장하였다. Fig. 4에 실험장치의 동기신호들에 대한 개략도를 나타내었고, Table 1에 실험조건을 나타내었다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 엔트로피 해석 방법을 이용한 직접 분사 가솔린 분무의 혼합기 형성과정 분석

Fig. 5, 6은 Fig. 3의 시스템을 이용하여 취득한 레이저 산란 영상(laser scattering images)들을 40×40 화소 크기의 검색 영역으로 전 공간 영역을 분할하여 식 (9)의 정규화된 엔트로피 값을 구한 후, 같은 엔트로피 값을 갖는 등고선 분포로 공간 영역에 나타낸 것이다.

혼합기 형성 기구(mixing mechanism)는 주로 공기와의 점성 마찰에 의한 운동량 교환(momentum exchange)과 증발에 따른 직접 확산(direct

diffusion)을 들 수 있다. 이러한, 분무의 혼합(mixing)과 확산(diffusion)은 균일 혼합기 형성에 중요한 인자들이다.

Fig. 5, 6에서 보이는 것처럼 전반적으로 분사 시작 후 시간 경과에 대하여 분무는 하류로 갈수록 공간상에 넓게 분포하며 높은 엔트로피 값을 나타내었다. 특히, 증발조건인 100°C에서는 분무 전 영역에 걸쳐 엔트로피 값이 확연히 증가하는 결과들을 나타내고 있다. Fig. 5의 그림들을 보면 분무 팁 근방의 cone region 영역에서 가장 불 균일한 혼합을 나타내는 낮은 엔트로피 값을 나타내다가 cone region 끝단에 와(vortex)의 형성과 더불어 균일 혼합 상태를 나타내는 높은 엔트로피가 반경방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 이것은 분무와 분무에 의해 유도된 공기와의 운동량 교환에 따른 혼합이 촉진된 결과로 판단된다. 또한, 엔트로피 해석 결과에서 주목할 것은 실험에 사용한 인젝터가 solid cone 타입으로 분무 중심부에 연료가 많이 밀집되어 있음에도 분무 중심부의 엔트로피 값이 비교적 높게 나타났다. 이것은 분무 중심에 많은 연료 입자가 밀집되어 있지만 검색영역의 각 셀(cell)에 입자들이 균일한 수로 분포하고 있는 상태를 나타낸다. 이런 현상은 분무기 온도가 100°C인 분무의 엔트로피 결과에서도 보이며, 대기온도 분사일 때보다 상대적으로 넓게 분포하고 있다. 이상의 엔트로피 해석 결과를 비교해 볼 때, 대기 온도(25°C) 하에서 분무의 하류 방향에서의 급격한 엔트로피 증가는 확산현상에 기인하기보다는 분무에 의하여 유도된 공기와의 운동량 교환에 의하여 이뤄진 것으로 보이고, 증발조건에서 분사된 연료의 엔트로피 증가는 확산현상에 기인한 것으로 사료된다. 분위기 압력 변화에 대하여 분위기 압력을 증가시켰을 경우, 분무가 공간적으로 작은 영역에 좁게 밀집되어 분포하여, 공간적으로 큰 스케일의 불균일도(heterogeneous)를 나타내고 있다. 여기서 주목할 것은 분무 선단에 대기압(1bar) 분사일 때는 없었던 둥근 모양의 불균일 입자분포 영역이 존재하는 것을 확인 할 수 있는데, 이것은 분무 경계에 발생한 와(vortex)와 분무 중심의 빠른 속도 분포에 의한 압력강화로 외부의 분무 입자가 분무 축 중심부로 공기와 더불어 도입되면서 형성된 결과로 사료된다. 아직까지는 분무의 혼합상태를 나타내는 엔트로피 변화가

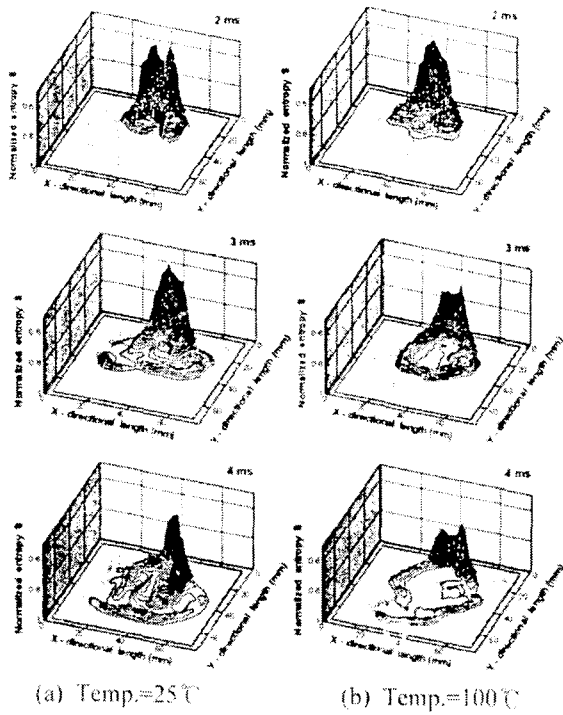


Fig. 5 Entropy analysis results (ambient pressure=1bar)

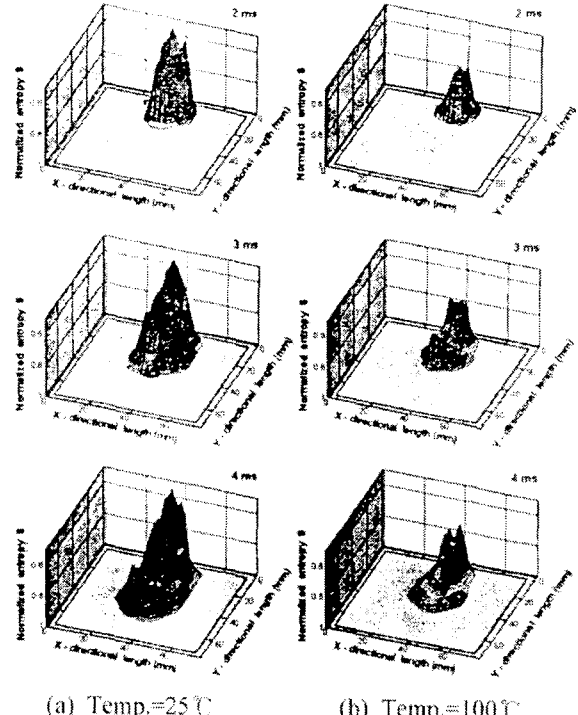


Fig. 6 Entropy analysis results (ambient pressure=10bar)

공기와 의 운동량 교환에 의한 결과인지 아니면 확산에 의한 결과인지 단정지어 판단 내리기 어려우며, 이에 대하여 보다 많은 연구가 수행되어야 한다. 따라서 다음 장에 PIV를 이용하여 와도 강도(vorticity strength)를 구하고 엔트로피 값과의 상관 관계 해석을 시도하였다.

### 3.2 PIV 해석 결과

#### 3.2.1 PIV를 이용한 직접 분사 가솔린 분무의 유동 특성 분석

Fig. 7은 시간 경과에 따른 분무의 속도장 분포를 상호상관 PIV를 이용하여 계측한 결과의 예이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 대기압 분사일 때 분사 초기 분무의 속도는 35 m/s 정도의 빠른 속도분포를 보이다가 분무가 발달함에 따라 15 m/s 정도의 평균속도를 갖는 넓게 분포한 속도장을 나타내었다. 또한, 분무가 발달함에 따라 분무 경계에서 역 방향의 속도 구배가 발생하면서 생긴 지상구조가 큰 스케일의 와로 발달하면서 분무가 와의 외각으로 밀려나는 현상을 확인할 수 있다. 이런 큰 스케일의 와의 형성과 속도장 분포에서

알 수 있듯이 분무 중심의 강한 하류 방향의 속도로 인하여 분무중심에서 압력 강하가 발생하여 외부 공기의 분무 중심으로의 유입이 촉진되는 것을 알 수 있다. 분위기 압력이 10 bar일 때는, 분무의 평균 속도가 10 m/s 정도의 느린 속도 분포를 나타내었으며 이는 공기밀도의 증가로 항력이 증가하여 분무의 속도가 감소한 결과로 판단된다. 또한, 분위기 압력이 증가할수록 역 방향 속도 구배를 갖는 지상구조의 스케일이 작아 지는데, 이것은 분위기 압력이 증가할수록 반경 방향 속도 성분의 감소율이 축 방향 속도 성분의 감소율보다 크기 때문이라고 판단된다.

#### 3.2.2 엔트로피와 와도 강도의 관계 분석

전 절에서의 엔트로피 해석결과와 PIV를 이용한 유동장 계측 결과를 통하여 알 수 있듯이 엔트로피를 증가시키는 요인으로는, 속도 구배(velocity gradient)에 의해 유도된 점성 마찰(viscous friction)과 증발(vaporization)을 들 수 있다.

따라서, 엔트로피와 와도(vorticity) 사이의 관계를 분석하고, 증발 효과와의 관계를 분석하였다. 여기서, 와도라 함은 속도 구배를 대변하는 말로,

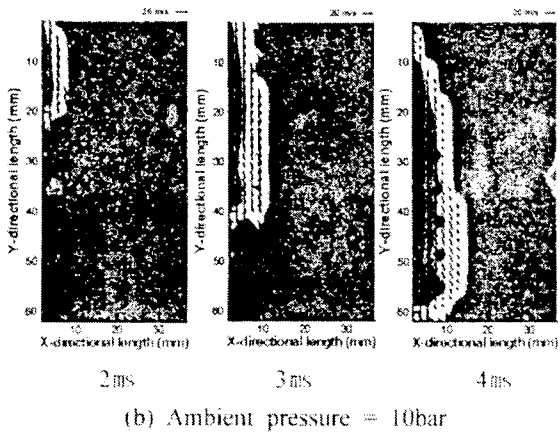
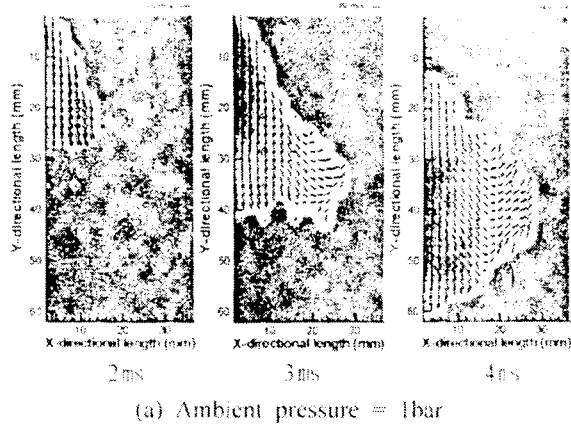


Fig. 7 Example of GDI spray velocity distributions on elapse time and ambient pressure

본 연구에서는 점성 마찰을 표현하는 의미로 와도 강도(vorticity strength)를 사용하였다. 또한, 주목해야 할 것으로 본 연구에서의 와도는 PIV를 통하여 얻은 속도장의 공간 분해능의 한계상 미시적 스케일(micro scale)이라기 보다는 거시적인 스케일(macro scale)의 운동을 나타낸다. 그러나, 엔트로피 개념은 미시적 스케일의 운동이라는 가정을 기초로 한다. 따라서, 각각의 값들은 다른 스케일의 운동을 대변하고 있다.

본 연구에서는 정규화된 와도 강도를 식 (10)과 같이 정의하였다. 이것은 각 검색영역의 절대 와도값을 그 총합으로 나눈 것으로, Fig. 8의 엔트로피 해석결과에 표시한 검색영역들에 대하여 그 값을 계산하여 비교하였다.

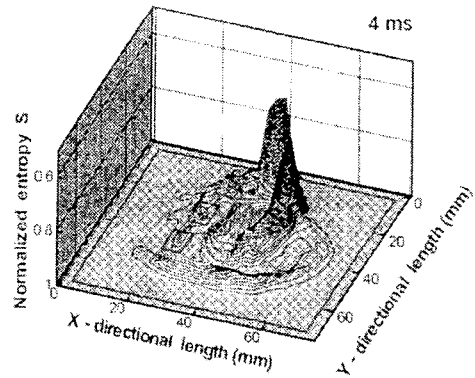


Fig. 8 Interrogation areas for relative comparison of normalized entropy and vorticity strength on A, B, and C

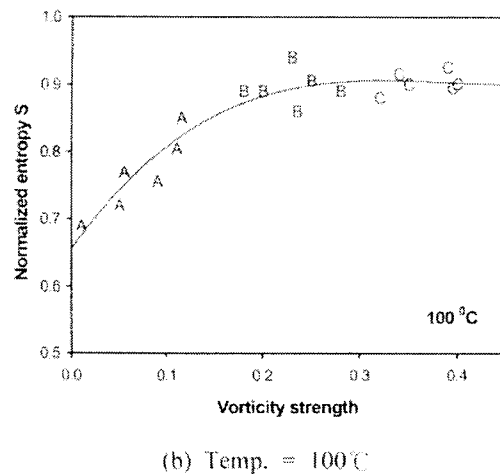
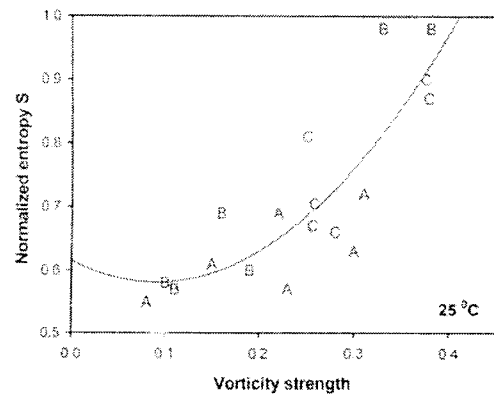


Fig. 9 Relation between entropy and vorticity strength

$$w_x = \frac{\sum_i |w_{x,i}|}{\sum_i \sum_j |w_{x,i}|} \quad (10)$$

일반적으로, 이 값들은 연료 분무에 대하여 하류방향으로 갈수록 큰 값을 갖고 있으나, 항상 같은 경향을 나타내지는 않으며, 실험조건에 따라 변화할 수 있다.

Fig. 9는 분사분사 압력을 100bar로 고정하고, 분사 시간은 분사 시작후 4msec일 때의 6프레임의 이미지를 분위기 온도 변화에 대한 엔트로피 값과 와도 강도와의 관계를 비증발 조건인 대기 온도(25℃)일 때와 증발 조건(100℃)일 때에 대하여 나타내었다. 비증발 조건에서의 분무의 상류에서 하류방향으로의 엔트로피 값은 와도 강도에 대하여 지수함수 형태로 비례하여 증가하는 경향을 나타내었으며, 증발 조건에서는 Fig. 9(a)의 경우와는 달리 각각의 영역에서의 엔트로피 값과 와도의 상관관계에서 상대적으로 와도 강도가 작은 분무의 상류 부에서는 와도 강도에 비례하여 특정 와도 강도까지는 증가하는 경향을 나타내다가 엔트로피 증가에 대하여 점차적으로 와도 강도와 독립적인 경향을 나타내었다. 이 결과들로부터 점성 마찰에 의한 속도 구배는 분무 하류 부에서의 증발에 의한 엔트로피 증가보다 분무의 균일 혼합과정에 영향을 주지 못하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

통계 영역학적 엔트로피 개념을 이용한 엔트로피 해석 방법과 상호상관 PIV 계측기법을 개발하여 직접 분사 가솔린 분무에 적용한 결과 다음과 같은 결과들을 얻을 수 있었다.

(1) 통계 영역학적 엔트로피 개념을 이용하여 정규화된 엔트로피 값으로 직접 분사 가솔린 분무의 균일 혼합상태와 확산현상을 해석할 수 있음을 확인하였다.

(2) Frame-Straddling 기법을 이용하여 이중화상이 중노출 영상을 취득할 수 있는 시스템을 구축하여, 직접 분사 가솔린 분무에 대하여 상호상관 PIV를 적용할 수 있었다.

(3) 엔트로피 해석 결과, 분사 시작 후 시간 경

과에 대하여 분무는 하류로 갈수록 공간상에 넓게 분포하며 높은 엔트로피 값들을 나타내었다. 특히, 증발조건인 100℃에서는 분무 전 영역에 걸쳐 엔트로피 값이 확연히 증가하는 결과들을 나타내고 있다. 또한, 분위기 압력을 증가시켰을 경우, 공간적으로 큰 스케일의 불균일도(heterogeneous)를 나타내고 있다.

(4) PIV를 이용한 분무의 유동 특성 분석 결과, 대기압 분사일 때 분사 초기 분무의 속도는 35 m/s 정도의 빠른 속도분포를 보이다가 분무가 발달됨에 따라 15 m/s 정도의 평균속도를 갖는 넓게 분포한 속도장을 나타내었다. 분위기 압력이 10bar일 때는, 분무의 평균 속도가 10 m/s 정도의 느린 속도 분포를 나타내었다.

(5) 엔트로피와 와도 강도와의 비교를 통하여, 점성 마찰에 의한 속도 구배는 분무 하류 부에서의 증발에 의한 엔트로피 증가보다 균일 혼합기 형성에 영향을 주지 못하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 CERC(연소기술연구센터) 사업의 연구비에 의해 수행된 연구결과로서, 관계 기관에 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Preussner, C., Doring, C., Fehler, S., and Kampmann, S., 1998, "GDI: Interaction Between Mixture Preparation, Combustion System and

- Injector Performance," SAE paper No. 980498.
- (5) Ryo Yuyama, Takemi Chikahisa, Kazushige Kikuta and Yukio Hishinuma, 2001, "Entropy Analysis of Microscopic Diffusion Phenomena in Diesel Sprays," *COMODIA*, pp. 542-550.
- (6) Lee Ki-Hyung, Woo Young-Wan, Park Sang-Chan, Lee Chang-Sik, 2001 "An Analysis of Intake Flow in a 5-Valve Gasoline Engine by Two Color PIV," A Volume of D of *the KSME 2001 Spring Papers*.