

레이저 산란 영상을 이용한 GDI 인젝터의 엔트로피 해석법에 의한 분무 균일도 특성에 관한 연구

An Investigation on the Spray Homogeneous Characteristics of a GDI Spray for Entropy Analysis Method using Laser Scattering Images

우영완*, 이창희*, 이기형**, 이창식**
Youngwan Woo, Changhee Lee, Kihyung Lee, Chang Sik Lee

ABSTRACT

The spray characteristics of GDI(Gasoline Direct Injection) injector affects on engine efficiency and emission of a GDI engine. Thus, many researchers have investigated the spray characteristics and the mixture formation of GDI injector. In this study, it was tried to provide the fundamental data for GDI injector design which effects on the spray macroscopic characteristics such as penetration and spray angle. In addition, the mixture formation 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. The results show that as injection pressure increases but as ambient pressure increases, spray penetration decreases and spray angle doesn't affected by increasing injection pressure and ambient temperature. 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.

주요기술용어 : GDI(가솔린 직접 분사), Momentum exchange(운동량 교환), Penetration(관통 거리), Spray angle(분무각), Homogeneity(균일화)

1. 서론

최근 전 세계적으로 자동차로 인한 대기 오염 문제를 해결하기 위해 자동차 배기가스 규제를 강화하고 있다. 특히, 가솔린 엔진에서는 CO, HC, NOX 등의 유해 배출가스 뿐만 아니라 지구

온난화의 주원인인 CO₂ 배출량도 문제시되고 있다. 직접분사식가솔린(GDI : Gasoline direct injection) 엔진은 SI엔진과 CI엔진의 장점을 결합한 하이브리드(hybrid) 엔진 개념으로 연비 향상 측면과 갈수록 강화되어 가는 SULEV(Super Ultra Lean Emission Vehicle) 등과 같은 배기 규제에 대응할 수 있는 차세대 가솔린 엔진으로 각광 받고 있다. 따라서, GDI 엔진 개발의 필수 핵심

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학부

부품인 GDI용 고압 와류형 인젝터에 대한 연구가 전 세계적으로 활발하게 수행되고 있다.^{1,2)}

Zhao 등³⁾은 직분식 가솔린 엔진용 인젝터 분무의 전체적인 발달과정을 2차원 Mie 산란기법을 이용하여 가시화 하였고 분무의 무화과정을 밝히기 위해 PDPA(Phase doppler particle analyzer)로 연료입자의 Sauter 평균입경(SMD : Sauter mean diameter)과 속도를 측정하였다. Yamauchi 등⁴⁾은 GTT(Generalized Tank and Tube) code를 이용하여 와류형 고압 인젝터의 증공분무를 수치적으로 해석하였고 PDA를 이용하여 얻은 결과와 비교하였다. Masahisa 등⁵⁾은 새로운 계측 수법인 LIF-PIV(Laser induced fluorescence - particle image velocimetry)를 이용하여 분위기압 변화에 따른 분무에 의해 유도된 공기의 속도장을 구하여 분무형상과 연결지어 해석을 시도하였다.

본 연구에서는 레이저 산란 영상 취득 시스템을 구축하여, GDI엔진용 와류형 고압 인젝터의 분무 도달 거리 및 분사각과 같은 거시적 분무 특성을 측정하였으며, 통계 열역학적 엔트로피 개념을 이용한 엔트로피 해석 방법을 개발하여 테스트 이미지를 이용한 검증과 분무에 적용하여 혼합기 형성과정의 분석을 수행하였다. 이 해석 방법은 Ryo 등⁶⁾이 디젤 분무에 적용하여 분무의 확산현상과 분무의 균일 혼합 정도를 평가하는데 사용한 방법으로 최근 많은 연구에 인용되고 있다.

2. 실험 방법 및 장치

2.1 통계 열역학적 엔트로피 개념을 이용한 엔트로피 해석 방법

레이저 산란 영상을 이용한 엔트로피 해석의 기본원리는 통계 열역학의 엔트로피 개념에 기초하고 있다. 이것은 검색영역 내의 입자 분포의 발생 확률과 엔트로피와의 관계에 대한 Boltzmann의 연구결과로 임의의 검색영역(시스템 또는 검사체적) 내에 어떤 에너지 준위 ϵ_i 상태에 N_i 개의 입자가 있다면 이 계에서 구별되는 전체 N

개의 입자들간의 가능한 조합수 W (가중비)는

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

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

(단, $E = \sum N_i \epsilon_i$, $N = \sum N_i$)

가 된다.

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

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

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

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

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

$$S = k \ln(W) \quad (3)$$

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

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 입자개수 및 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,

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

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 평균치 255가 차지하는 셀의 수로 두면 다음과 같이 표시된다.

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

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

$$S^* = \frac{S - S_0}{S_1 - S_0} \quad (8) \\ = \frac{I_t \cdot \ln(I_{MAX}) - \sum_i (I_{(i)} \cdot \ln(I_{(i)}))}{I_t \cdot \{\ln(M) - \ln(I_t) + \ln(I_{MAX})\}}$$

식 (8)의 정규화된 엔트로피 값으로부터 분무의 균일 혼합 정도(homogeneity degree)와 확산현상(diffusion phenomena)을 해석할 수 있다.

2.2 실험 장치 구성

본 연구에서는 직접 분사 가솔린 분무의 엔트로피 해석을 위하여 Fig. 1과 같은 산란 영상(scattering image) 취득 시스템을 구성하였다.

엔진 내의 연소실 상태를 모사하기 위하여 고

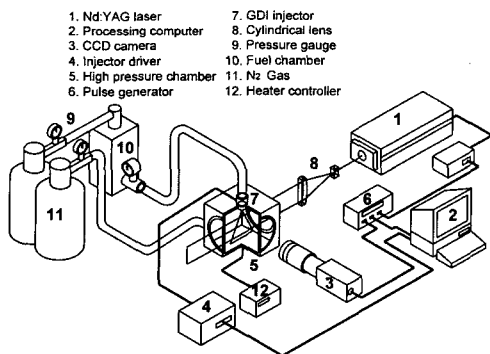


Fig. 1 Experimental apparatus

압챔버 내의 분위기 압력과 분위기 온도를 변화시켜가며 직접 분사 가솔린 분무의 영상을 분무 시작 후 시간 경과에 따라 취득하였다. 광원으로서는 Nd : YAG 레이저(200mJ, 532nm)를 사용하였고 레이저로부터 유도된 빔은 원통 렌즈군을 통하여 2~3mm의 두께의 쉬트(sheet)형태로 관측 영역으로 주사된다. CCD 카메라의 노출시간, 인젝터의 분무와 레이저 주사 타이밍은 LabVIEW 프로그램을 이용하여 제작한 펄스 발생 프로그램으로 제어하였다. 레이저 트리거(trigger)신호의 지연시간(delay time)을 제어함으로 분무 성장 과정에 따른 산란 영상을 취득할 수 있었으며, 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 저장되었다. 실험에 사용한 인젝터의 분사압력은 연료 챔버를 질소 가스로 가압하여 사용하였으며, 챔버내의 분위기 압력 역시 레귤레이터(regulator)를 조절하여 주입되는 질소량을 제어하여 실험하였다. Table 1에 실험조건을 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Ambient temperature		25 °C, 100 °C
Ambient pressure		1(atm), 10bar
Spray	Injector	Swirl type
	Fuel	Gasoline
	Fuel pressure	60, 80, 100bar
	Injection period	3ms

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 엔트로피 해석 방법의 검증

Table 2는 Fig. 2, 3에 있는 테스트 영상들에 대한 엔트로피 해석 결과이다. Fig. 2는 가습기의 출구근처 상류 부(Upstream)와 출구로부터 20cm 떨어진 하류 부(Downstream)에서의 영상을 비교한 것이다. Fig. 3의 영상은 모두 이미지 강도의 총합이 같은 영상으로 원의 분포, 크기 및 경계의

형광강도 구배가 다른 영상(이미지 1과 이미지 2)과 원의 크기와 이미지 강도가 다른 영상(이미지 2와 이미지 3)을 비교한 것이다. 테스트에 사용된 모든 영상의 크기는 150×150 화소이다.

엔트로피의 기본 개념에서도 알 수 있듯이 엔트로피 값이 큰 영상일수록 입자가 균일(homogeneous)하게 분포하고 확산이 보다 진행된 상태를 나타내는 것을 예상할 수 있다. 예를 들어, Fig. 2의 하류(Downstream) 영상은 상류(Upstream) 영상보다 입자의 분포상태가 보다 균일하며, 엔트로피 해석결과 역시 상대적으로 큰 엔트로피 값을 갖고 있다. 이는 수증기 입자들이 좁은 가습기 출구로부터 넓은 주위공간으로 분출되면서 진행된 확산현상을 말해 주고 있다. Fig. 3의 이미지 1과 이미지 2를 비교하여 볼 때, 이미지 1이 보다

작은 입자군(particle cloud)으로 분할되어 있고 원들의 경계가 날카롭지 않아 이미지 2보다 확산이 보다 진행되어진 것처럼 보일 수 있다. 그러나, 엔트로피 해석결과 이미지 1이 이미지 2보다 작은 엔트로피 값을 갖는다. 그 이유는 엔트로피는 모든 입자가 한 점에 모여 있을 경우, 0(zero)의 값을 갖는 반면, 한 점에서 주위로 확산되어 나감에 따라 보다 큰 엔트로피 값을 갖기 때문임을 알 수 있다. 즉, Fig. 3의 이미지 2는 확산이 어느 정도 진행된 것으로 볼 수 있는 균일한 강도의 보다 큰 원을 갖고 있는데 반하여 이미지 1은 각 입자군들의 가운데 형광강도가 강한 것으로 보아 입자들이 가운데에 몰려있고 아직 확산을 많이 진행하지 않은 상태이기 때문이다. Fig. 3의 이미지 2와 이미지 3의 비교에서도 위와 같은 결과를 확인 할 수 있었다. 이로부터 식 (8)의 정규화된 엔트로피 값은 이미지 강도가 영상 전체에 균일하고 고르게 분포함에 따라 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서, 엔트로피 해석을 통하여 측정영역의 균일화 정도(homogeneity degree)와 확산 현상을 측정할 수 있음을 확인하였다.

Table 2 Results of the entropy analysis for test images

Pictures	Figure No.	Entropy
Upstream	2	0.8224
Downstream	2	0.9731
Image 1	3	0.2875
Image 2	3	0.3392
Image 3	3	0.4595

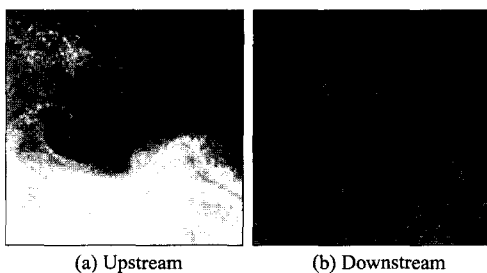


Fig. 2 Comparison of apparently different particle distributions

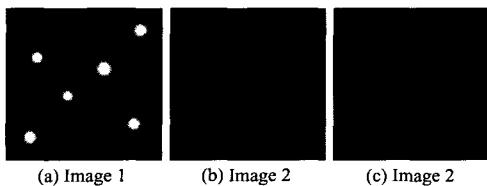


Fig. 3 Comparison of the different state images

3.2 거시적 분무 구조 해석

Fig. 4는 직접 분사가술린 분무의 분열 현상을 설명하기 위하여 구분한 영역으로 거시적으로 크게 leading edge, cone region, trailing edge 및 vortex cloud region의 네 영역으로 구분할 수 있다. 분무의 분열현상은 크게 분사 개시 후 천이영역인 분무초기와 분무가 완전히 발달하여 정상상태의 분무가 이루어지는 시기 및 분사 종료 후의 과정으로 크게 나눌 수 있다. 분사 개시 후 초기에 분사되는 분무는 대부분이 leading edge로서 액주에 가까운 형태이며, 노즐 중심 축에 대하여 약간 비대칭적으로 성장한다. 이런 leading edge 영역은 구동 신호에 의하여 니들 밸브가 열리면서 초기 천이영역에 형성되는 큰 액적으로 이루어진다. 이러한 현상은 스월러(swirler)와 니들(needle) 사이에 존재하는 섹 체적(sac volume)

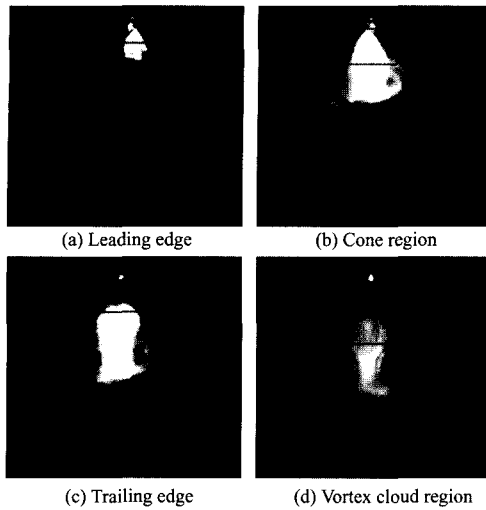


Fig. 4 Structures of GDI spray

의 연료가 분사초기에 충분한 속도를 얻지 못하고 분무되기 때문에 발생된다고 판단된다. 분무 개시 후 1.5ms부터 노즐 선단에서 콘(cone)형태가 되면서 대칭적인 분무구조로 발전되는데 이것은 정상상태 분무가 이루어지면서 선회효과(swirl effect)에 의하여 분무 가장자리의 윤곽이 뚜렷한 cone region이 생성되기 때문이다. 또한, cone region은 하류로 내려갈수록 연료 액막의 표면장력에 의하여 안쪽으로 수축되는 모습을 보였다. cone region 끝단에서 크기가 작은 지상구조(branch like structure)가 형성되는데 이것은 노즐 출구에서 주위 공기와 분무의 경계에서 발생하는 Helmholtz's 불안정성(instability)이 하류로 진행되면서 성장한 와(vortex)에 의하여 주위 공기는 분무주류로 유입되고 액적들은 분무의 외측으로 모이면서 발생된다. 분무 개시 후 2ms 후부터는 정상적인 분무가 이루어지면서 분무 표면에 약한 와가 형성되어 계속 성장하다가 분사 말기, 특히 분사 종료 직후부터 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이는 액체의 분무가 종료되면서 분무 중심으로 유입되는 공기량이 더욱 많아지기 때문이라고 판단된다. 분무신호가 끝남에 따라 니들이 닫히면서 trailing edge가 생성된다. 마지막으로 분무주류의 중심부를 통하여 주위 공기 유입양이

증가되고 가장자리의 분무균들이 주류방향으로 유입되면서 vortex cloud region을 형성한다.

3.3 엔트로피 해석 결과

Fig. 5, 6은 Fig. 1의 시스템을 이용하여 취득한 레이저 산란 영상(laser scattering images)들을 40×40 화소(pixel) 크기의 검색 영역으로 전 공간 영역을 분할하여 식 (8)의 정규화된 엔트로피를 구한 후 같은 엔트로피 값을 갖는 등고선 분포로 공간 영역에 나타낸 것이다.

혼합기 형성 기구(mixing mechanism)는 주로 공기와 점성 마찰에 의한 운동량 교환(momentum exchange)과 증발 조건하에서의 직접 확산현상(direct diffusion)으로 구분할 수 있다. 이러한 분무의 혼합(mixing)과 확산(diffusion)은 균일 혼합기 형성에 중요한 인자들이다.

Fig. 5, 6에 보여지는 것처럼 전반적으로 분무는 하류로 갈수록 공간상에 넓게 분포하며 높은 엔트로피 값을 나타내었다. 특히 증발조건인 100℃에서는 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 와의 형성과 더불어 균일 혼합 상태를 나타내는 높은 엔트로피가 반경방향으로 넓게 분포하는 것을 알 수 있다. 주목할 것은 실험에 사용한 인젝터가 solid cone 타입으로 분무 중심부에 연료가 많이 밀집되어 있음에도 중심부의 엔트로피 값이 높게 나타났다. 이것은 분무 중심에 많은 연료 입자가 밀집되어 있지만 검색영역의 각 셀에 입자들이 균일한 수로 분포하고 있는 상태를 타나낸다. 이런 현상은 분위기 온도가 100℃인 분무의 엔트로피 결과에서도 보여지며, 대기온도분사일 때 보다 상대적으로 넓게 분포하고 있다.

Fig. 3에서 보여진 결과와 Fig. 5와 6의 결과를 비교하여보면, Vortex cloud 영역이 큰 부분에서

운동량 교환에 의해 엔트로피가 증가함을 확인하였다. 특히, 온도가 높은 경우 엔트로피 값은 온도가 낮은 경우와 비교하여 엔트로피가 전반적으로 증가함을 확인하였다.

또한 대기 온도 하에서의 하류 방향의 급격한 엔트로피 증가는 확산현상에 기인하기보다는 분무에 의하여 유도된 공기와의 운동량 교환에 의하여 이뤄진 것으로 보이고, 증발조건인 100℃에서 분사된 연료의 엔트로피 증가는 확산현상에 기인한 것으로 사료된다. 분사압력 증가에

따른 엔트로피 결과는 60bar일 때는 역삼각형 모양의 엔트로피 분포를 보이다가 분사 압력이 100bar로 증가함에 따라 달걀모양의 타원 형태의 분포로 바뀌고 있다. 이것은 분사 압력 증가에 따라 반경 방향의 속도 성분의 증가율보다는 축 방향의 속도 성분 증가율이 커서 분무가 축 방향으로 길게 분포하여 발생한 결과로 판단된다. 또한, 분위기 압력을 10bar로 증가시켰을 경우 분무가 공간적으로 작은 영역에 좁게 밀집되어 분포하여, 엔트로피 해석 결과 역시 공간적으로 큰 스케일의 불균일도(heterogeneous)를 나타내고 있다. 여기서 주목할 것은 분무 선단에 대기압 분사일 때는 없었던 둥근 모양의 불균일 입자분포 영역이 존재하는 것을 확인할 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. 이러한 선단 부의 불균일 혼합 영역은 분사압력 증가에 대하여 공기 역학적 혼합이 촉진되어 시간 경과에 대하여 큰 폭의 엔트로피 증가 경향을 나타내었다.

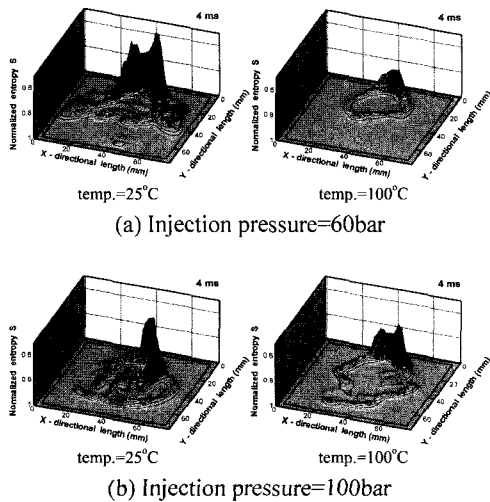


Fig. 5 Entropy analysis results (ambient press.=1 bar)

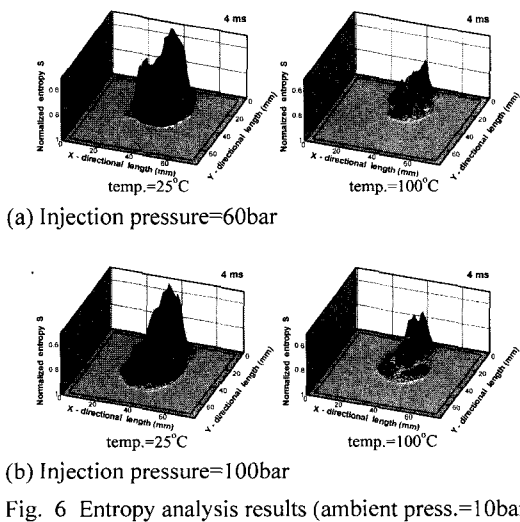


Fig. 6 Entropy analysis results (ambient press.=10bar)

4. 결론

직접 분사 가솔린 엔진용 와류형 고압 인젝터의 분무 영상을 엔진내 연소실 상황을 모사한 고압 챔버 내에 분사하여 취득하고, 취득한 영상으로부터 거시적인 분무 특성인 분무 도달 거리와 분사각을 측정하였으며, 통계 열역학적 엔트로피 개념을 이용한 엔트로피 해석방법을 이용하여 분무의 혼합기 형성 과정을 해석한 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 통계 열역학적 엔트로피 개념을 이용하여 분무의 균일 혼합 정도와 확산 현상을 분석할 수 있음을 확인하였다.

2) 직접 분사 가솔린 분무는 거시적으로 분무가 발달함에 따라 leading edge, cone region, trailing edge, vortex cloud region이 형성됨을 알 수 있었으며, 분무 개시 후 1.5ms부터 cone region 끝

단에 지상구조가 형성되기 시작하여 분무가 진행됨에 따라 큰 스케일의 와(vortex)로 성장하는 것을 확인할 수 있었다.

3) 분무는 하류로 갈수록 공간상에 넓게 분포하며 높은 엔트로피 값들을 나타내었다. 특히 증발조건인 100℃에서는 분무 전 영역에 걸쳐 엔트로피 값이 확연히 증가하는 결과들을 나타내었다.

4) 대기 온도 하에서의 하류 방향의 급격한 엔트로피 증가는 확산현상에 기인하기보다는 분무에 의하여 유도된 공기와의 운동량 교환에 의하여 이뤄진 것으로 보이고, 증발조건인 100℃에서 분사된 연료의 엔트로피 증가는 확산현상에 기인한 것으로 사료된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- 1) M. Shelby, B. A. VamDerWege, S. Hochgreb, "Early Spray Development in Gasoline Direct-Injected Spark Ignition Engines," SAE 980160, 1998.
- 2) F.-Q. Zhao, M.-C. Lai, "A Review Mixture Preparation and Combustion Control Strategies for Spark-Ignition Direct-Injection Gasoline Engines," SAE 970627, 1997.
- 3) F.-Q. Zhao, J.-H. Yoo, M.-C. Lai, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines," SAE 961925, 1996.
- 4) T. Yamauchi, T. Wakisaka, "Computation of the Hollow-Cone Sprays from a High-Pressure Swirl Injector for a Gasoline Direct-Injection SI Engine," SAE 962016, 1996.
- 5) M. Yamakawa, S. Isshiki, T. Yoshizaki K. Nishida, "Measurement of Ambient Air Motion of D.I. Gasoline Spray by LIF-PIV," COMODIA, pp.499-504, 2001.
- 6) R. Yuyama, T. Chikahisa, K. Kikuta, Y. Hishinuma, "Entropy Analysis of Microscopic Diffusion Phenomena in Diesel Sprays," COMODIA, pp.542-550, 2001.