

엔트로피 해석과 PIV를 이용한 HCCI 엔진용 스월 인젝터의 분무 특성 해석에 관한 연구

안 용 흠¹⁾ · 이 창 희¹⁾ · 이 기 형^{*2)} · 이 창 식³⁾

한양대학교 대학원¹⁾ · 한양대학교 기계공학과^{2,3)}

A Study on the Spray Characteristics of Swirl Injector for Use a HCCI Engine using Entropy Analysis and PIV Technique

Yonghum An¹⁾ · Changhee Lee¹⁾ · Kihyung Lee^{*2)} · Changsik Lee³⁾

¹⁾Graduate School, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Gyeonggi-do 425-791, Korea

³⁾Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 31 July 2003 / Accepted 6 November 2003)

Abstract : The objective of this study is to analyse the spray characteristics according to the injection duration under ambient pressure condition and to investigate the relationship between vorticity and entropy for controlling diffusion process that is the most important thing during the intake stroke injection process. Therefore, the spray velocity was obtained by using the PIV method that has been an useful optical diagnostics technology, and vorticity calculated from spray velocity component with vorticity algorithm. In addition, the homogeneous diffusion rate of spray was quantified by using the entropy analysis based on the Boltzmann's statistical thermodynamics. From these method, we found that as injection duration increases, spray velocity increases and the location of vortex is moved to the downstream of spray. In the same condition, as the entropy decrease, mean vorticity increases. This means that the concentration of spray droplets caused by the increase of injection duration is more effective than the increase of momentum dissipation.

Key words : HCCI(Homogeneous Charge Compression Ignition : 예혼합 압축착화), PIV(Particle Image Velocimetry : 입자 영상 속도계), Vorticity(와류강도), Frame-straddling(이중화상 이중노출)

1. 서 론

전 세계적으로 에너지 절약과 환경오염에 대한 문제가 심각하게 대두됨에 따라 자동차 배기가스에 대한 규제가 강화되고 이에 상응하는 자동차용 엔진의 고연비화와 저배기화가 절실히 요구되는 상황이다. 최근 예혼합 압축착화(HCCI) 엔진은 배기가스 규제에 상응할 수 있는 차세대 엔진으로서 전 세

계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 이러한 HCCI 엔진의 경우에는 예혼합을 위하여 조기분사를 수행하기 때문에 실린더 내 압력이 낮고 벽류생성이 더욱 더 많아져 커먼레일 분사 시스템을 적용하기에는 어려움이 따른다. 이러한 분사연료의 벽류생성을 억제하기 위해서는 저압으로 연료를 분사시키면 되나, 이 또한 연료의 미립화 성능을 저하시킨다는 단점이 있다. 직접분사식 예혼합 압축착화 엔진에 커먼레일 시스템을 적용하기 위해서는 분사 압력을 낮추어 분무 도달거리를 줄이고, 스월노즐

*To whom correspondence should be addressed.
hylee@hanyang.ac.kr

을 장착함으로써 분사압 저하에 따른 미립화 성능 감소를 최소화 한 방식의 연료 분사 시스템이 필요하다. 또한 혼합기 형성과정과 이에 수반되어 발생하는 엔진 내 연소과정에 대한 기본적인 지식을 필요로 한다.¹⁾ 본 연구에서는 흡입행정 시 고압분사로 인한 벽류형성의 억제와 짧은 시간 내의 미립화 촉진에 필요한 HCCI 엔진에 적용 중인 스웰 인젝터의 분무 특성 파악에 주력하였다. HCCI용 인젝터의 분무 속도 산출은 속도 분해능과 공간 분해능이 뛰어난 상호 상관 입자영상 속도법을 이용하였고 속도 산출에 의한 와류강도를 계산할 수 있는 프로그램을 제작하였다. 또한 볼츠만의 통계 열역학적 엔트로피 개념을 이용한 엔트로피 해석을 통해 분무의 균일 혼합 상태와 확산 정도를 파악하였다. 위의 방법들을 통해 분무액적의 속도분포에 수반되어 나타나는 와류 특성과 균일혼합 상태 확산 정도의 상관관계를 파악하였고 이를 통하여 최적의 분사 시스템을 도출하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 실험에서 대기분사 분무 PIV를 적용하기 위하여 사용된 실험장치의 개략도이다. 광원으로 532nm 파장을 갖는 Nd:YAG 레이저를 사용하였고 발진된 빔은 렌즈군을 통하여 2~3mm 두께의 쉬트빔으로 검사영역 내에 조사된다. 발진된 광원을 double pulse mode로 변환하기 위해 DPO(Double Pulse Option)를 사용하였고 레이저의 발진시기와 인젝터의 분사시기, CCD 카메라의 영상 취득시기를 동기시키기 위해 pulse generator로 DG535를 사용하였다. 실험에 사용된 인젝터의 분사압 조절은 질

Table 1 Specification of measurement system

Equipment	Specification
Nd:YAG laser	450mJ, 1064nm
CCD camera	1008×1018
Double pulse option	Pulse separation 200ns~80µs
Pulse generator	5 Pico resolution 4 Channel
Frame grabber	PCI interface

소가스를 이용하여 가압하였고 레이저에 의해 조사된 연료액적은 고성능 CCD 카메라를 사용하여 frame-straddling 기법으로 영상을 취득하였다. 취득된 영상은 PC에 내장된 이미지 보드에 의해 디지털 이미지로 저장된다. Table 1은 본 실험에 사용된 장비들의 제원이다.

2.2 실험방법

Table 2는 본 실험에서 적용한 실험조건들을 나타낸 것이다. 주변온도는 상온이며 대기압 하에서 인젝터에서 분사된 연료의 분무형태가 어떻게 변하는지를 관찰하고 각각의 분사시간에 대해 연료 분사 후 시간경과에 따른 분무액적의 거동을 파악하였다. CCD 카메라를 통해 취득된 영상은 상호 상관법을 이용한 PIV 시스템을 통해 분무 전체 영역에 대한 속도벡터를 취득하고 취득된 속도벡터를 second order central difference를 이용한 와류강도 계산 프로그램에 적용하여 검색영역 전체에 대한 공간평균 와류강도를 계산함과 동시에 검색영역 내 각 부분에 대한 와류강도를 파악하였다. 또한 볼츠만의 통계 열역학 개념을 이용한 엔트로피 해석을 통해 각각의 조건에 대한 확산정도를 파악하였다.

이상의 분무특성 해석기술을 이용하여 분사시간

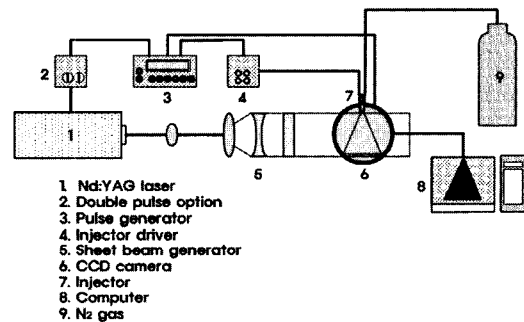


Fig. 1 Experimental setup

Table 2 Experimental condition

	Fuel	Gasoline
Surrounding pressure	Ambient pressure	
Surrounding temperature	293K	
Injection pressure	50 bar	
Injection duration	2, 3, 4 msec	
Image achieve timing	AEOI 1~3 msec (per 0.5 msec)	

의 변화와 분사 후 시간경과에 따른 분무속도, 와류 강도, 엔트로피의 변화를 파악하여 각각의 인자들의 상관관계를 규명, 흡입행정 시 예상할 수 있는 최적의 분사 시스템을 도출하였다.

3. 해석 알고리즘

3.1 상호 상관 입자영상 속도법

PIV는 유동장에 부유된 입자를 일정한 시간 간격을 두고 단속적인 레이저 등으로 조사하여 산란되는 빛을 영상에 담아 분석함으로써 유동장의 속도분포를 얻는 광계측 방법이다. 본 연구에서 수행된 상호 상관법은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 일정한 시간간격을 두고 취득된 2장의 이미지를 50% 겹침을 적용하여 각각의 검색영역으로 분할하고 이미지강도의 평균값에 경험적인 상수값을 적용한 threshold level (raw grey level × 1.0~1.1)을 지정하여 이미지 처리를 한 후 푸리에 변환의 합성정리를 이용하여 상관계수를 구하는 방식이다.²⁾ 구해진 상관계수에 따라 각각의 검색영역마다 한 개의 입자 이동거리가 계산되고 오류벡터의 최소화를 위해 전체 이미지에 대한 보간, 제거작업이 수행된다. 마지막으로 cutoff 주파수를 이용하여 필터링 한 후 시간항을 적용, 최종적으로 전체 이미지에 대한 속도벡터를 얻게 된다.

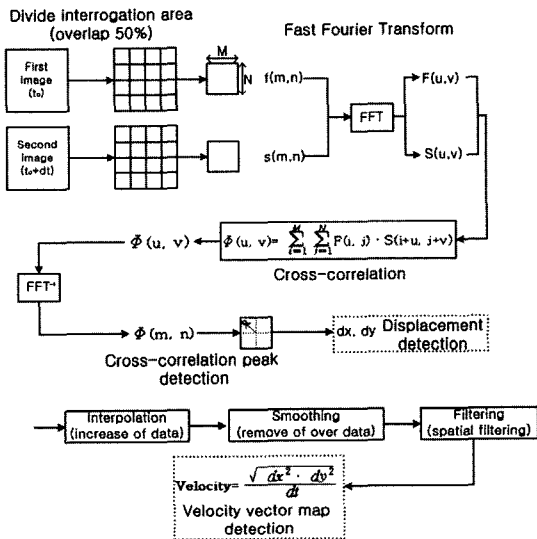


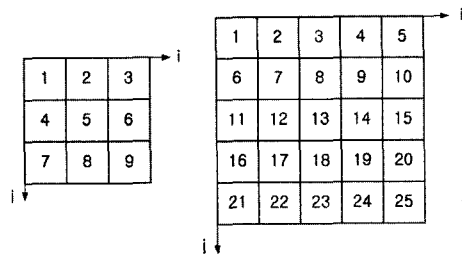
Fig. 2 PIV algorithm

3.2 와류 강도

일반적으로 와도의 계산은 수평방향으로의 수직방향 속도 변화와 수직방향으로의 수평방향 속도변화의 차에 의해 계산된다. 본 연구에서는 PIV에서 많이 사용되고 있는 Osseen 와류이론을 채택하여 적용하였다. Osseen 와류이론에서는 단순 차, 8격자점 순환, 2차 중앙 차를 이용하여 와류강도를 계산하며 본 연구에서는 현재 와류강도의 계산 시 보편적으로 사용되고 있는 8격자점 순환과 2차 중앙 차이론에 따른 와류강도 계산 프로그램을 작성하여 비교, 분석하였다. Fig. 3의 (a)와 식 (1)에서 나타난 바와 같이 8격자점 순환을 이용한 와류강도의 계산은 한 개의 검색영역 내 와류강도의 계산 시 주변 8개의 검색영역에서 얻어진 수평, 수직방향의 속도성분을 이용하고, Fig. 3의 (b)와 식 (2)에서 나타난 바와 같이 2차 중앙 차를 이용한 와류강도의 계산은 그 보다 한 차수 높은 범위 내 8개의 검색영역에서 얻어진 속도성분을 이용하여 보다 더 정확한 와류강도의 계산이 가능하다.³⁾ 그러나 Fig. 3에 나타난 바와 같이 전체 이미지의 경계부분에 존재하는 검색영역에 대한 와류강도의 계산은 주변 검색영역의 속도성분의 부재로 인하여 와류강도의 산출이 불가능하다. 따라서 알고리즘 상에서 이를 보완할 수 있는 보간작업을 필요로 한다.

$$\omega_5 = \frac{\Delta t}{(2\Delta l)^2} [(u_2 - u_8) + (v_6 - v_4) + 0.5\{(u_3 - u_9) + (u_1 - u_7) + (v_9 - v_7) + (v_3 - v_1)\}] \quad (1)$$

$$\omega_{13} = \frac{1}{\Delta t} \left[\frac{(v_{11} - v_{15}) + (u_3 - u_{23})}{12} + \frac{8(v_{14} - v_{12}) + 8(u_{18} - u_8)}{12} \right] \quad (2)$$



(a) 8-point circulation (b) Second order central difference
Fig. 3 Data grid for vorticity algorithm

3.3 엔트로피 해석

계의 거시상태는 체적이나 온도, 압력 등과 같은 열역학적 변수에 의해서 규정된다. 그리고 하나의 거시상태는 보통 많은 수의 미시상태가 대응된다. 통계열역학의 목적은 열역학 함수와 같은 거시상태를 나타내는 물리량을 미시상태의 변수로 도출하고자 하는 것이다. 볼츠만이 이러한 작업을 하는 과정에서 부딪친 문제는 물리량에 대한 시간평균 문제이었다 즉, 물리량의 측정이 순간적으로 완료될 수 없기 때문에 모든 물리량의 측정치는 어떤 시간에 걸친 평균값이어야 한다는 이론이다. 이러한 시간평균을 적용하기 위해 계의 상태가 위상공간의 허용된 상태에 머무르는 시간이 같다는, 즉 확률의 개념을 이용한 에르고딕 가설을 도입하였다. 따라서 오랜 시간이 경과하면 각각의 미시상태가 실현될 빈도수는 같게 된다는 것을 의미한다. 이 가정을 바탕으로 어떤 거시상태가 실현 될 확률은 이 거시상태에 얼마나 많은 미시상태가 대응되는가에 따라서 결정된다. 또한 미시상태의 수는 구속조건이 허락하는 한 최대한으로 존재한다. 이러한 엔트로피와의 유사한 성격으로부터 볼츠만은 다음과 같은 미시적 양 Ω (미시상태 수)과 거시적 양 S (엔트로피)를 연결하는 관계식을 유도하였다.

$$S = k \ln(\Omega) \tag{3}$$

여기서 k 는 볼츠만 상수이다.⁴⁾ 이러한 이론들과 여러 가지 가정들을 도입하여 최대일 때가 1, 최소일 때가 0이 되는 정규화된 엔트로피 S^* 를 정의하면 다음과 같다.

$$S^* = \frac{I_t \ln(I_{\max}) - \sum_i I_i \ln(I_i)}{I_t \ln(M) - \ln(I_t) + \ln(I_{\max})} \tag{4}$$

- M : 분할된 셀의 개수
- I_t : 영상전체의 이미지 강도 적분값
- I_{\max} : 이미지 강도 최대값
- I_i : M 개로 분할된 셀 내의 입자의 개수에 대응되는 이미지 강도

4. 실험결과 및 고찰

4.1 고압 스웰 인젝터의 분무 성장과정

Fig. 4는 분사시기 2, 3, 4msec에 대해 시간경과별 분무 가시화를 수행한 결과이다. 분사 초기에는 분무의 주류가 분무 중앙에 밀집되어 있는 것을 확인할 수 있고 시간이 경과함에 따라 분무 선단부의 하류쪽으로 이동함과 동시에 대체적으로 균일한 분포를 보이고 있다. 와류의 형성시기는 분사가 종료된 후 약 0.5~1 msec 시점부터이며 분사기간이 짧을수록 와류의 형성위치가 분무의 상류쪽에서 발생하고 시간이 경과함에 따라 발생한 와류의 분포영역이 증가함을 확인할 수 있다. 또한 분사기간이 길어질수록 와류의 형성위치가 분무의 하류 쪽으로 이동하고 분사기간이 짧은 경우보다 와류의 분포영역이 확연히 증가함을 확인할 수 있다. 이는 분사기간이 짧은 경우 분사된 연료의 양이 상대적으로 적어 빠른 시간 내에 공기와의 점성마찰에 의한 축방향으로의 속도 성분이 감소하고 반경방향으로의 속도 성분이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 분사기간이 긴 경우 분사된 연료의 양이 상대적으로 많아 미리 분사된 연료가 뒤따라 분사된 연료의 운동에너지에 수반되어 상대적으로 긴 시간동안 축방향 속도성분을 유지하여 분무의 하류 쪽에서 와류가 형성되는 것으로 판단된다. 또한 분사기간이 길

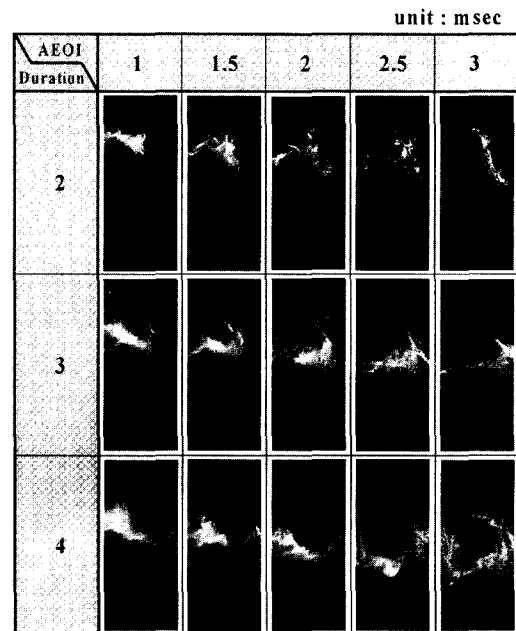


Fig. 4 Spray developing process with injection duration

어짐에 따라 분사된 연료가 분사 후반부에 급격한 축방향 속도 감소로 인해 분사시간이 짧은 경우보다 넓은 분포영역에서 와류가 형성되는 것으로 판단된다.

4.2 분무 속도 분포 특성

Fig. 5는 본 실험에서 제작한 가시화 시스템을 이용하여 취득된 영상에 PIV를 적용한 결과이다. 일반적으로 분무의 중앙부분에서 빠른 속도분포를 보이며 와의 형성과 함께 분무의 외각부분의 속도는 느리며 중심으로의 와류의 진입속도는 상대적으로 빨라지는 경향을 파악할 수 있다. 이는 연료분사 시 분무 중심 부분의 축방향으로의 빠른 속도분포로 인해 강한 압력강하가 발생하고 이에 수반하여 분무 외각에서 발생한 와류가 분무중심으로의 유입이 활발하게 일어나기 때문인 것으로 판단된다.⁹⁾ Fig. 6은 분사시간 증가와 시간경과에 따른 분무액적의 최대속도변화를 나타낸 그래프이다. 분사시간이 증

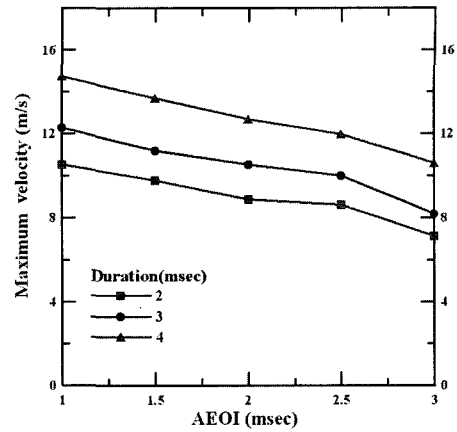


Fig. 6 Comparison of maximum velocity

가함에 따라 분사된 연료액적이 뒤따라 분사된 연료액적의 운동에너지에 수반되어 전체적으로 최대속도가 증가하는 경향을 보이며 시간이 경과함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 분사시간이 2msec인 경우 최대속도는 약 10 m/s 정도이며 분사

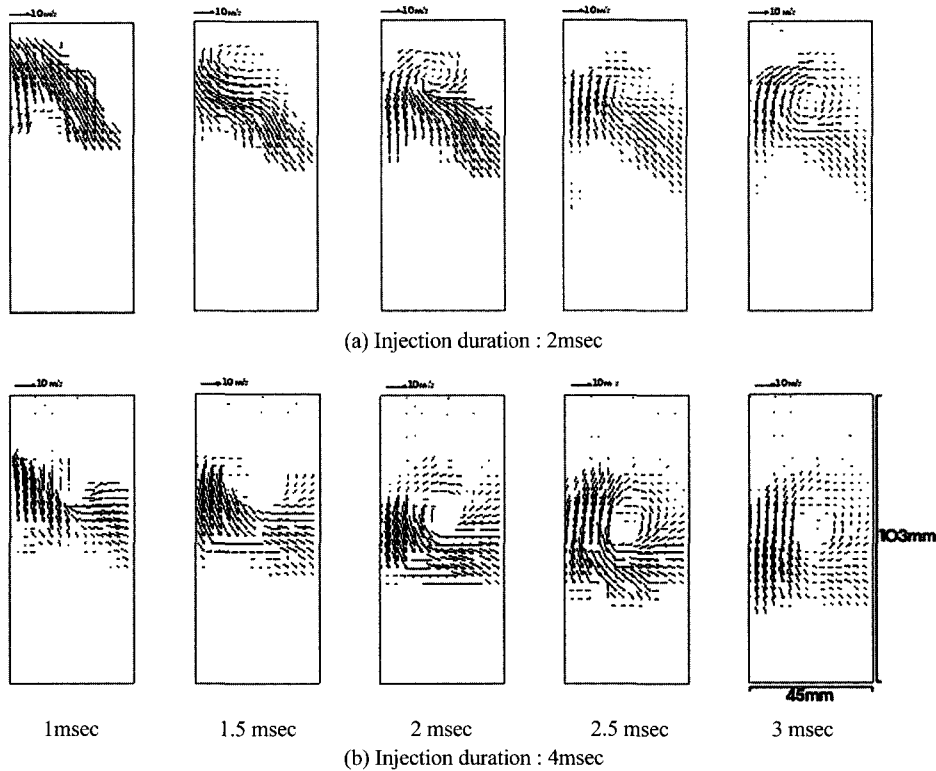


Fig. 5 Velocity distribution of high-pressure swirl injector

기간이 3, 4 msec으로 증가하면서 12 m/s, 15 m/s 정도의 최대속도를 나타낸다.

4.3 분무 와류 분포 특성

Fig.7은 PIV를 통해 구한 속도성분을 본 실험에서 제작한 와류강도 프로그램에 적용한 결과이다. 분무 가시화 이미지와 속도분포에서 확인된 와류의 형성위치를 비교적 정확하게 파악할 수 있고 분무 외각의 와류의 형성위치에서는 +의 와류강도를, 분무선단의 안쪽 경계부근에서는 -를 나타내었다. 와류의 분포영역은 분사기간이 증가할수록 증가하는 경향을 보이며 형성위치 또한 분무의 하류쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 주의해야 할 사항은 와류의 분포영역이 크다고 해서 그 영역에서의 전반적인 와류강도가 크다는 것을 의미하지

는 않으며 또한 최대 와류강도와 분무 전체 영역에 걸친 평균 와류강도는 비례하지 않는다는 점이다. 이를 확인하기 위해 본 실험에서는 와류강도의 절대치를 이용하여 각각의 시간별 분무 전체영역에 대한 평균 와류강도를 계산해 보았다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 분사기간이 증가할수록 평균 와류강도가 증가함을 확인할 수 있고 분사 후 시간이 경과함에 따라 분사기간 2 msec을 제외한 3, 4 msec의 경우 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 분사기간 2 msec의 경우 평균 와류강도가 불균일한 수치를 나타내고 있는데 이는 분사기간이 짧은 경우 분사 후 상대적으로 빠른 시기에 와류가 형성되고 소멸되는 특징을 갖기 때문으로 판단된다. 즉 분사기간이 길어질수록 초기에 형성된 와류를 긴 시간동안 유지하는 것으로 판단된다. Fig. 9는 각각의 분사기간에

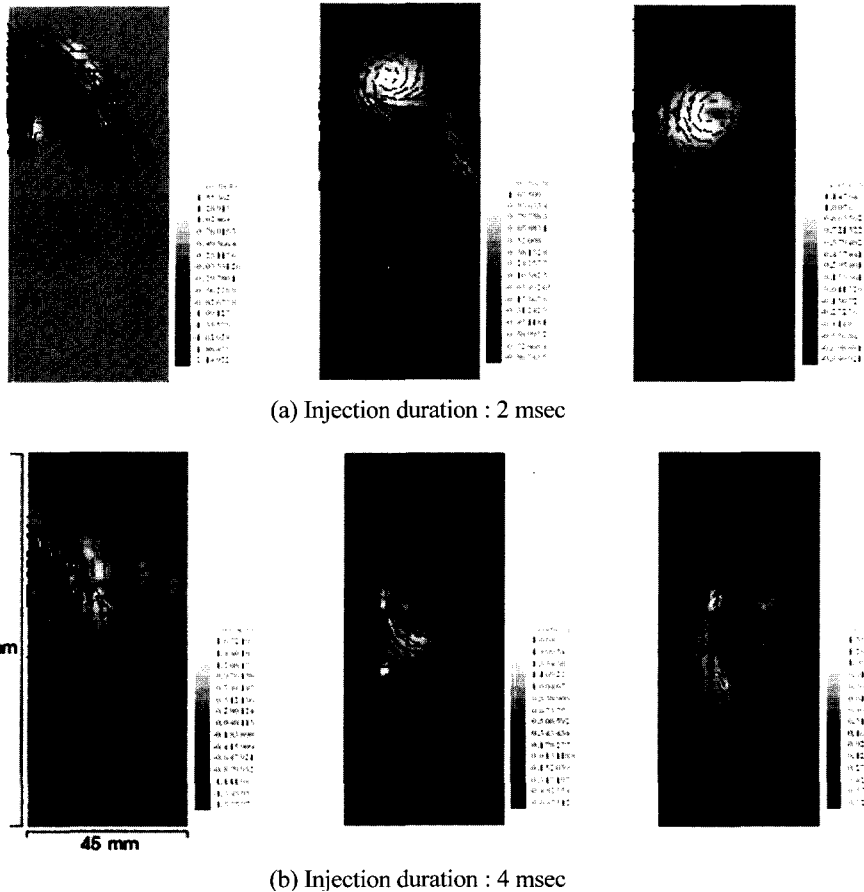


Fig. 7 Vorticity distribution with elapsed time after injection

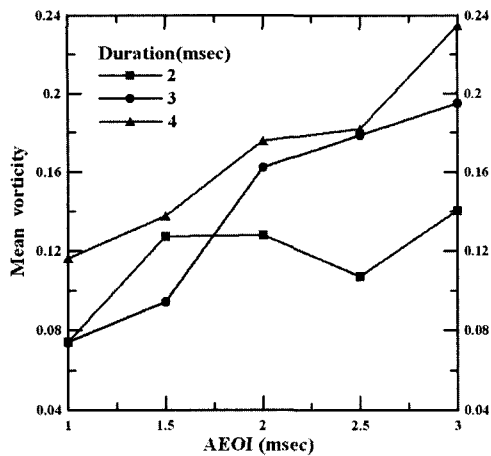


Fig. 8 Mean vorticity

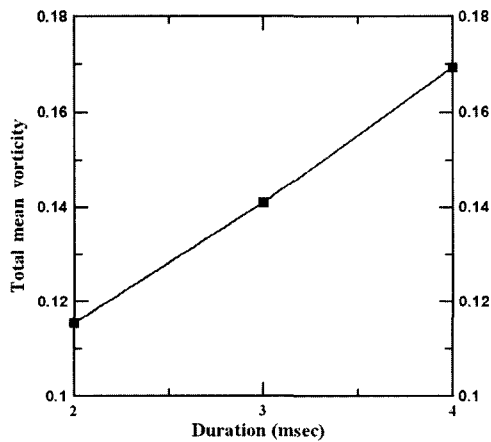


Fig. 9 Total mean vorticity

따라 전체 시간영역에 대한 와류강도의 평균을 계산한 결과이다. Fig. 8에서 예상할 수 있듯이 분사기간 증가에 따라 선형적으로 와류강도가 증가함을 확인할 수 있다.

4.4 분무 엔트로피 해석

Fig. 10은 볼츠만의 통계 열역학적 개념을 이용하여 분무영역에 대한 엔트로피 해석을 수행한 결과이다. 각각의 분사기간마다 시간이 경과하면서 엔트로피가 증가하는 것을 확인할 수 있고 특히 분무의 중앙 부분과 선단부에서 엔트로피가 낮고, 와의 형성위치에서 상대적으로 높은 엔트로피를 나타내고 있다. 이는 분무의 주류를 형성하는 분무 중앙

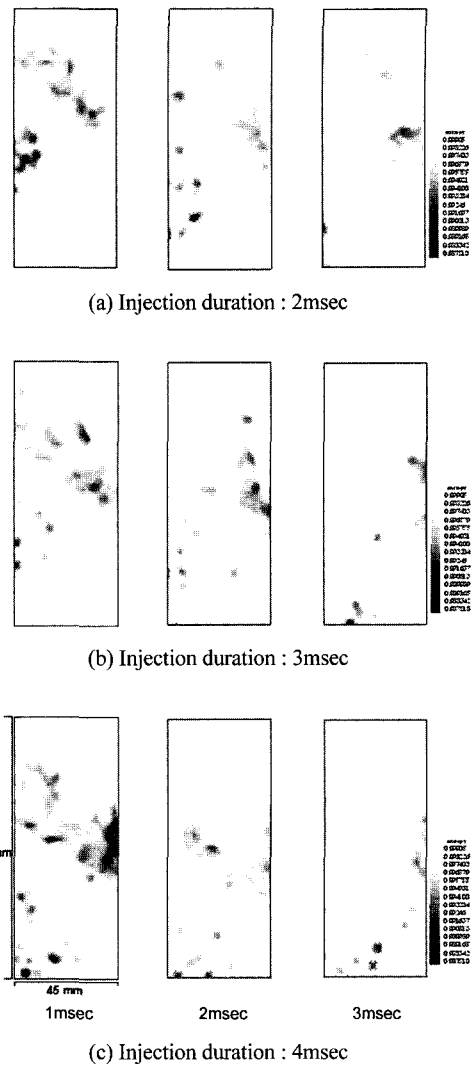


Fig. 10 Entropy distribution

부분과 선단부에 액적들이 상대적으로 많이 밀집되어 있을 확률이 높기 때문이며 확산과정에도 불리한 조건임을 확인할 수 있다. 반대로 와류의 형성위치에서의 높은 엔트로피는 점성마찰에 의한 운동량 교환이 분무의 극부적인 영역에서 확산과정을 촉진하는 요인으로 작용한다고 판단된다. 이러한 분무의 와류강도와 엔트로피와의 상관관계를 파악하기 위해 와류강도의 평균값을 계산한 것과 같이 엔트로피에 대해서도 각 시간별 분무영역 전체에 대한 평균값을 계산하여 Fig. 11에 나타내 보았다. 그래프에서 분사기간이 증가할수록 전체적인 평균 엔트로피

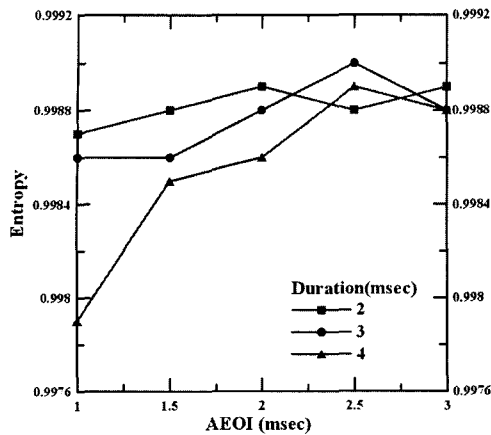


Fig. 11 Mean entropy

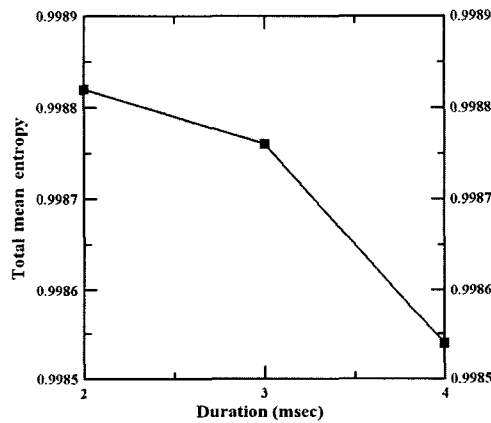


Fig. 12 Total mean entropy

피가 감소하는 경향을 보이고 이것은 전체 시간영역에 대한 평균 엔트로피를 계산한 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 분사기간 2msec, 3msec에 대해서는 시간경과에 따른 엔트로피 변화 정도가 분사기간 4msec에 비해 큰 차이를 보이지 않는다. 즉, 와류강도와 엔트로피의 평균값을 계산한 결과에 의해 점성마찰에 의한 운동량교환은 분무 전체영역에 대한 확산효과에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 파악되며 분사기간이 길어질수록 분사된 연료가 밀집되어 있을 확률이 높아 분무의 확산과정에 불리한 조건임을 확인하였다.

5. 결론

엔트로피 해석과 PIV 기술을 이용하여 직분식 기술

린 엔진용 인젝터의 분무 특성을 해석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분사기간이 증가하면 분무액적의 속도는 증가하고 와류의 형성위치는 분무의 하류쪽으로 이동한다.
- 2) 분사기간이 증가하면 전체적인 평균 와류강도는 증가하고 이것은 분무액적의 속도가 공기와의 점성마찰에 의한 운동량 소산에 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.
- 3) 분사기간이 증가하면 전체적인 평균 엔트로피는 감소하고 이것은 분사기간에 따라 분사된 연료의 양이 점성마찰에 의한 운동량 소산보다 분무의 확산효과에 큰 영향을 미침을 나타낸다.
- 4) 흡입행정 분사 시 분무의 확산효과를 증가시킬 수 있는 방안으로 분무속도 증가에 의한 미립화 뿐만 아니라 분사기간에 따른 분사된 연료의 양에도 주의를 기울여야 함을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단에서 지원하는 2002년도 협동연구 지원사업(KRF-2002-042-D00025)에 의하여 수행되었으며, 관계기관에 깊은 감사를 드립니다.

References

- 1) M. Reeves, C. P. Garner, J. C. Dent, N. A. Halliwell, "Particle Image Velocimetry Analysis of IC Engine In-cylinder Flow," *Optics and Lasers in Engineering* 25, pp.415-432, 1996.
- 2) M. Reeves, D. P. Towers, B. Tavender, C. H. Buckberry, "A High-speed All-digital Technique for Cycle-resolved 2-D Flow Measurement and Visualization within SI Engine Cylinders," *Optics and Lasers in Engineering* 31, pp.247-261, 1999.
- 3) J. D. Luff, T. Drouillard, A. M. Rompage, M. A. Linne, J. R. Hertzberg, "Experimental Uncertainties Associated with Particle Image Velocimetry (PIV) Based Vorticity Algorithms," *Experiments in Fluid* 26, pp.36-54, 1999.
- 4) Y. W. Woo, C. H. Lee, K. H. Lee, C. S. Lee, "A Study on the Spray Characteristics for a

- Gasoline Direct Injector by Using Entropy Analysis and PIV Methods," KSME B, Vol.26, No.7, pp.1047-1054, 2002.
- 5) R. B. Wicker, H. I. Loya, P. A. Hutchison, "SIDI Fuel Spray Structure Investigation Using Flow Visualization and Digital Particle Image Velocimetry," SAE 1999-01-3535, 1999.
- 6) Z. M. Cao, K. Nishino, S. Mizuno, K. Torii, "PIV Measurement of Internal Structure of Diesel Fuel Spray," Experiments in Fluids S211-S219, 2000.