

## 직분식 가솔린 분무의 내부구조에 미치는 분위기 압력의 영향

### Effect of Ambient Pressure on Internal Structure of a DI Gasoline Spray

성기진\*, 최동석\*\*, 김덕줄\*\*\*  
Keejin Sung, Dong-Seok Choi, Duck-Jool Kim

#### ABSTRACT

The objective of this study is to examine a DI(Direct Injection) gasoline spray development process under different ambient pressures using PIV(Particle Image Velocimetry). Fuel spray experiments were performed within a constant volume chamber. The spray structure, velocity maps, velocity and vorticity contours were obtained to investigate its spray characteristics. It was found that higher ambient pressure has a significant effect on radial growth of the spray. The position which has a maximum velocity moved from the spray edge to the spray center as ambient pressure was increased. Higher ambient pressure moved a maximum vorticity position upward of the spray.

주요기술용어 : Particle image velocimetry(입자 영상 속도계), Direct injection(직접 분사), Spray structure(분무구조), Vortex(와류), High-pressure swirl injector(와류형 고압 인젝터), Cross-correlation(상호 상관)

#### Nomenclature

- $L_p$  : spray penetration length (mm)  
 $P_a$  : ambient pressure (MPa)  
 $R$  : radial distance from injector (mm)  
 $t_i$  : time after injection start (ms)  
 $W$  : spray width (mm)  
 $Z$  : axial distance from injector tip (mm)

#### 1. 서론

최근 전 세계적으로 에너지 절약차원과 CO<sub>2</sub>

에 의한 지구 온난화 문제 등 환경에 대한 사회적 요구와 세계적으로 강화되는 ULEV(Ultra Lean Emission Vehicle)와 CAFE(Corporate Average Fuel Economy)등과 같은 배기 규제 때문에 가솔린 자동차용 엔진의 고연비화와 고출력화가 절실히 요구되고 있는 추세이다. 따라서 현재 주류를 이루고 있는 PFI(Port Fuel Injection)방식에서 디젤 차량에 비교 될 수 있는 연비 성능과 기존의 전자 제어식 가솔린 엔진의 출력성능을 능가 할 수 있는 직접 분사방식으로 전환이 고려되고 있는 추세이다. DISI(Direct Injection Spark Ignition) 엔진은 부분 부하영역에서는 성층화 연소에 대한

\* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부

초회박 연소가 가능하기 때문에 유해 배기가스의 저감 및 열효율 향상을 실현할 수 있으며, 고부하 영역에서는 이론 공연비 조건에서의 연소에 의한 고출력을 기대할 수 있다. 이러한 DISI엔진의 연구가 절실히 요구되는 상황이며, 전 세계적으로 이에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다.<sup>1,2)</sup> 직접분사 방식을 채택한 가솔린엔진의 성능 및 배기 특성은 실린더 내에 연료를 직접 분사하기 때문에 연료의 미립화특성과 최적의 위치에 연료를 분사시키는 분무특성에 따라서 크게 좌우되므로 실린더 내에서 일어나는 분무의 발달과정 및 분무내부에서의 공기·연료간 상호 작용에 의한 유동의 이해가 매우 중요하다.<sup>3,4)</sup>

최근 이를 위하여 분무실 및 실제 엔진 내에서 분무 내부의 유속을 측정하는 방법으로 기존의 PDA(Phase Doppler Anemometry)에 의한 점 측정 방식에서 순간적인 유속장의 정보를 2차원 해석이 가능한 PIV를 이용하여 연료 분무의 내부 구조와 분포를 해석하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>5-8)</sup>

따라서 본 연구에서는 상용 직분식 인젝터를 대상으로 분무 가시화 실험 및 PIV기법을 적용하였다. 정적 분무실에서 분위기 압력변화가 직분식 분무의 내부구조 및 유동에 미치는 영향을 조사하고, 활발한 혼합의 결과로 발생하는 와류에 대한 와도해석을 통하여 혼합과정에 대한 정보를 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

#### 2.1.1 2화상 상호상관 PIV

Fig. 1은 2화상 상호상관과정을 나타내고 있다. 2화상 PIV는 각각의 화상에 독립적인 광원을 가진 두 개의 이미지 화상을 사용하며 유속은 첫 번째 화상에서 두 번째 화상으로 이동한 입자들의 패턴에 상호상관 알고리즘을 적용하여 이동한 거리를 계산하고 이를 광원

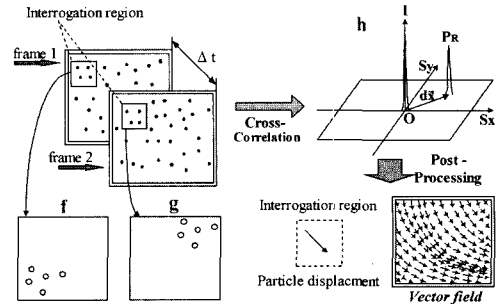


Fig. 1 Two-frame cross-correlation processing

의 펄스 간격과 조합함으로써 속도로 환산하여 얻어진다. 2화상 PIV 사용의 한계는 이미징 획득률(framing rate)이라고 할 수 있다. 본 실험에서는 이미징 획득률을 증가시키기 위하여 frame straddling 기법을 사용하였다. 이 기법은 전체적인 시간을 카메라의 노출 시간에 맞춘 후에 동기화장치를 사용하여 레이저와 카메라를 동조시키는 방법으로 레이저의 펄스가 카메라의 셔터 역할을 하는 방법이다. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 frame straddling 기법에 대한 각 실험 장치들의 시간선도를 보여준다. Frame straddling 기법에서 첫 번째 레이저는 첫 번째 노출기간의 끝과 두 번째 노출기간의 시작에서 pulse된다. 이것은 높은 속도장을 측정하기 위해서 pulse간의 짧은 시간간격을 허용하기 위한 것이다.

본 실험에서의 속도벡터의 추출은 TSI사의 INSIGHT\_NT 프로그램을 이용하여 2화상 상호상관기법으로 구하였다. 상호상관계수를 구하기 위한 조사영역의 크기(interrogation window)는 32×32 pixels이고 50%의 겹침(overlap)이 허용되었다. 구해진 속도 벡터는 후처리 프로그램을 이용하여 비정상적인 입자에 의한 불량벡터를 제거한 후 속도구배의 계산과 양상블 평균을 통한 통계적 처리를 수행하였다.

#### 2.1.2 실험장치

Fig. 3은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략

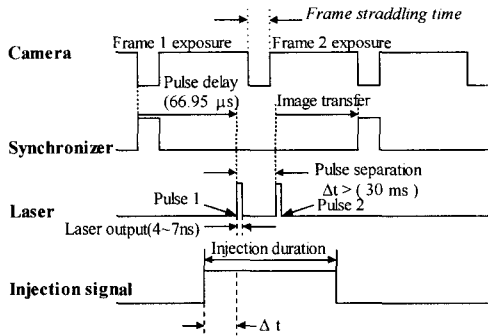


Fig. 2 Timing diagram for synchronization of each component

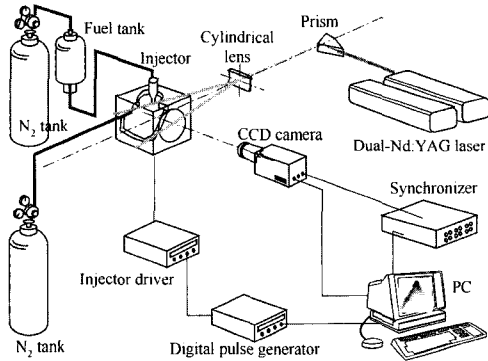


Fig. 3 Experimental setup

도이다. 실험장치는 크게 직분식 분사계와 신호처리계, 온라인 PIV 시스템으로 이루어져 있다. 본 실험에서의 분사계는 상용 와류형 고압 인젝터, 연료 탱크 및 가압용 질소 탱크로 구성되어 있다. 인젝터는 60°의 분무각과 분무축이 수직축에 대하여 5° 기울어진 분무 패턴을 나타낸다. 이런 종류의 인젝터는 실제 엔진에서 측면 분사시 피스톤 보울에 충돌되는 연료의 분포를 보다 균일화시키기 위하여 개발되었다.<sup>9)</sup> 연료의 분사압력은 bladder형 연료탱크에 질소로 가압하여 조절함으로써 분사시 발생하는 맥동과 압력 변동을 줄일 수 있도록 하였다. 정적 분무실은 직경 130mm, 두께 13mm인 석영 가지창을 설치하였다. 본 연구에서 사용한 온라인 PIV시스템은 이중 펄스 방식의 Nd:YAG레이저 시스템과 1K×1K

의 고해상도 CCD카메라, 동기화 장치 (TSI 610032) 및 구동용 컴퓨터로 구성되어 있다. 광원으로부터의 레이저빔은 구면렌즈와 원통형렌즈를 거치면서 폭 120mm, 두께 0.1mm의 평면광으로 만들어져 분무실내로 조사되었다. 영상의 왜곡오차를 최소한으로 줄이기 위해 CCD카메라에 Nikon 50mm 표준렌즈를 부착하였다.

## 2.2 실험방법

Table 1은 본 실험의 조건을 나타낸 것이다. 분위기 기체는 불활성 기체인 질소를 사용함으로써 화염의 발생을 방지하였다. 분무의 형성과 분포거동에 있어서 분위기 압력의 영향을 조사하기 위하여 세가지의 각기 다른 압력 조건하에서 실험을 수행하였다. PIV 측정결과와 비교를 위한 분무의 가시화 실험을 위해서 200mJ/pulse의 Nd:YAG 레이저를 4ns동안 조사하여 순간적인 유동장에서의 분무단면 영상을 획득하였다. 분위기 온도는 상온이며, 실험을 위한 분사량은 실제 직분식 가솔린 기관에서의 회박연소모드와 유사한 15mg으로 설정하였다. 분사기간은 2ms로 고정하고 분사 시작 후 0.25ms 간격으로 4ms까지 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 본 PIV실험에서 쓰인 분무의 특성을 파악하기 위하여 분위기압이 1.0MPa, 분사 후 3.0ms 일 때의 분무단면과 PIV 결과처리과

Table 1 Experimental conditions

| Fuel                     | Hexane(C6H14)             |
|--------------------------|---------------------------|
| Injection pressure (MPa) | 5.1                       |
| Injection duration (ms)  | 2                         |
| Injection quantity (mg)  | 15                        |
| Ambient gas              | Nitrogen(N <sub>2</sub> ) |
| Ambient temperature (K)  | 293                       |
| Ambient pressure (MPa)   | ++ 0.1, 0.5, 1.0          |

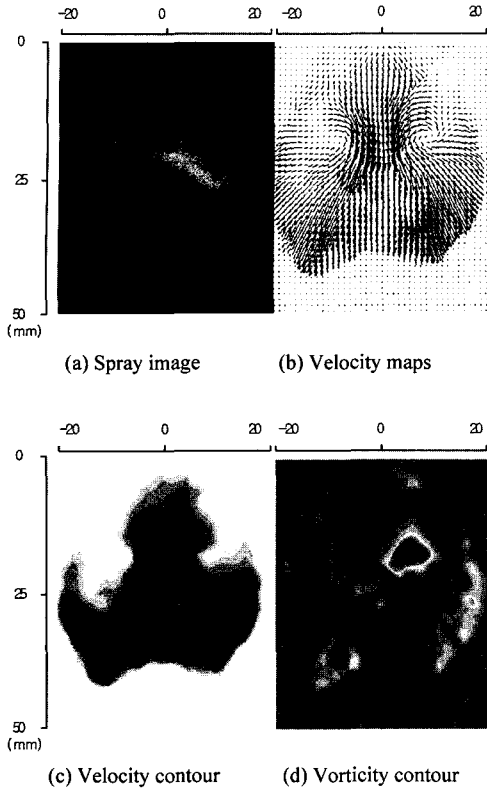


Fig. 4 Cross-sectional spray image of visualization and PIV processed of results( $P_a = 1.0\text{MPa}$ ,  $t_s = 3.0\text{ms}$ )

정을 나타낸 것이다. 먼저 원하는 시간에서 분무 단면영상을 취득한 후에 2화상 상호상관 처리과정을 거쳐서 분무 내부의 속도 벡터성분을 구할 수 있다. 그리고 이 속도벡터들의 절대 값을 취함으로써 분무 내부의 속도 분포를 파악할 수 있고, 벡터장의 수치미분을 통하여 와도분포를 얻을 수 있다.

### 3.1 분무 거동의 가시화

Fig. 5는 분위기압력이 각각 0.1, 0.5, 1.0 MPa일 때 분사 후 시간에 따른 분무 거동을 보여준다. 분위기압력이 0.5, 1.0MPa일 경우에는 측정영역이  $64\text{mm} \times 64\text{mm}$ 인데 반해, 0.1MPa일 경우 상대적으로 큰 분무성장 크기로 인해 다른 측정 영역인  $102\text{mm} \times 102\text{mm}$ 을 적용하였다. 실험 결과를 통해 분위기압력이 커짐에 따라서 분무의 전체 크기가 작아짐을 알 수 있고 초기 분무의 형상을

유지하는 경향을 보이고 있다. 이는 다른 연구의 결과들과 잘 일치한다.<sup>10)</sup> 즉, 분위기압력이 낮을 경우에는 주위 기체의 영향을 거의 받지 않고 본래의 액적이 가지고 있던 운동량을 비교적 그대로 유지한다. 반면 분위기압력이 높은 경우에는 주위 기체의 밀도가 커짐에 따라 주위 기체와 액적간의 마찰저항이 커지게 되고, 운동량의 소산이 일어나서 성장 속도가 감소하게 되므로 분무의 관통길이 및 폭을 수축시키는 결과를 가져온다. 이러한 결과는 GDI엔진에서 요구되는 흡기 행정과 압축행정 시의 압력조건에 따른 상반된 분무특성을 만족시킬 수 있음을 알 수 있다. 그리고 세가지 분위기압력에서 1.5ms 이후에는 분무의 양쪽 외곽선단에서 와류(vortex)가 형성됨을 볼 수 있다. 저압에서는 이런 와류는 분사가 끝난 후( $t_s = 2\text{ms}$ )에 소멸되었고 고압에서는 형상을 유지하면서 그 크기가 증가함을 알 수 있다.

Fig. 6은 분위기압력변화에 따른 성장비의 변

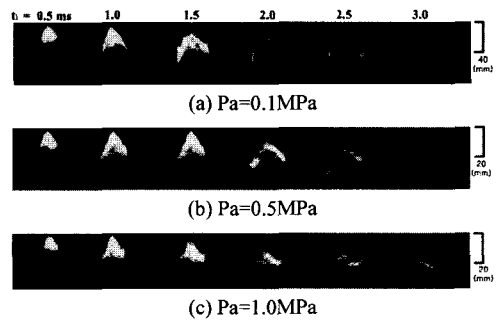


Fig. 5 Temporal changes in fuel spray at different ambient

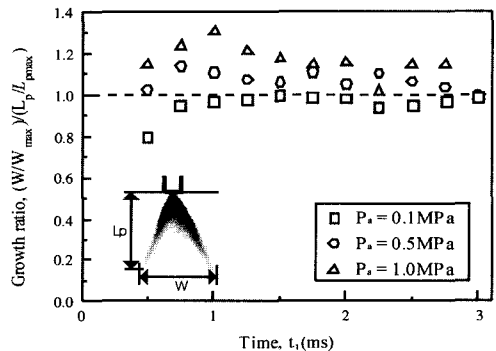


Fig. 6 Spray growth ratio with time after injection

화를 분사 후 시간의 경과에 따라 나타낸 것이다. 성장비는 축방향 성장비( $L_p/L_{pmax}$ )에 대한 반경방향 성장비의 비( $W/W_{max}$ )로 정의가 된다. 분위기 압력 0.5MPa을 기준으로, 낮은 분위기 압력일 때는 축방향의 성장이 활발하고, 높은 분위기 압력일 때는 반경방향의 성장이 활발함을 알 수 있다.

### 3.2 분무내의 속도 분포

Fig. 7은 PIV기법에서 최적화조건중의 하나인 실질적인 벡터의 크기를 결정하는 조사영역의 영향을 나타낸 그림이다. 분위기 압력은 0.1MPa, 분사 후 3.0ms, 축방향으로 50mm지점에서 축방향의 속도만을 검출한 것이다. 두 가지 조사영역에서 속도의 정확도 차이는 분무 내부에서 다소 나타난다. 이것은 조사영역의 설정이 실제의 속도에 영향을 주고 있음을 나타낸다. 본 실험에서는 보다 정확하고 작은 유동까지 측정이 가능한  $32 \times 32$  pixels 크기의 조사영역을 채택하였다.

Fig. 8은 각각의 분위기 압력에서 분사 후 3.0ms에서 활발한 난류 유동을 나타내는 분무 내부의 순간적 벡터장과 속도분포를 나타내었다. 분위기압이 0.1MPa일 경우는 분사 후 액적들이 분위기 기체의 영향을 받지 않고 하류 쪽으로 진행함으로써 중공 원추형 분무의 유동 특성인 분무 선단의 양쪽 하단 쪽에 최대 속도(약 10m/s)들이

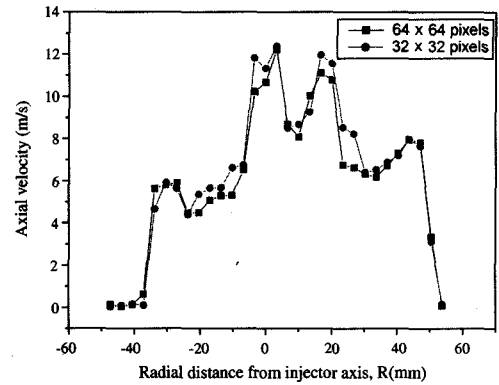


Fig. 7 Velocity accuracy in the function of interrogation window size

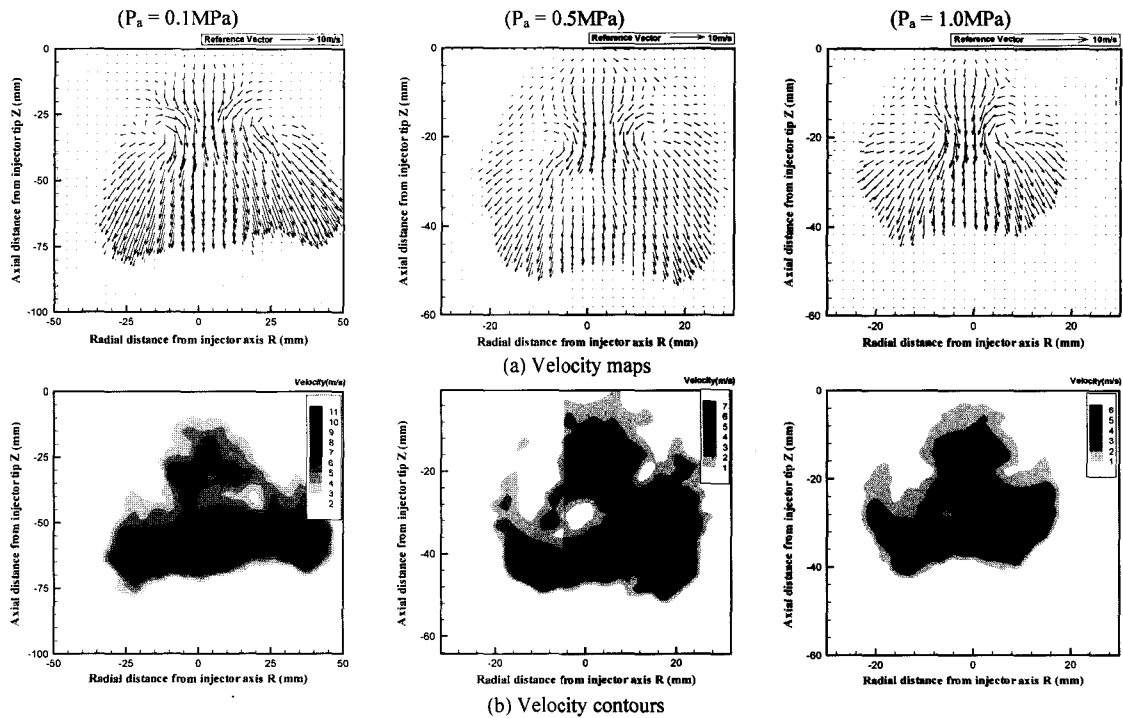


Fig. 8 Spray velocity maps and velocity contours at different ambient pressure (  $t_i=3.0ms$  )

존재하고 있으며 분무의 주류 벡터들이 중심 쪽 보다는 분무의 선단 쪽에 밀집해 있는 것을 알 수 있다. 분위기 압력이 0.5MPa 일 경우에는 주위 기체의 밀도가 증가함에 따라서 분무 하단과 더불어 분무 중심 쪽으로 최대속도(약 8m/s)가 존재하는 것을 알 수 있다. 분위기 압력이 1.0MPa의 경우는 액적들이 주위 기체의 영향으로 더 이상 진행되지 못하고 속도가 감소하며, 분무중심에 최대속도(약 6m/s)가 밀집함을 알 수 있다. Fig. 8(a)를 통하여 각각의 분위기 압력 조건에서 인젝터 팁으로부터 축방향으로 각각 다른 양쪽 선단에서 대칭적으로 와류의 특성을 가진 속도 성분이 있음을 알 수 있다. 이를 정량화하기 위하여 축방향으로 20mm와 30mm에서의 반경방향 속도와 축방향속도 성분들로 나누어서 분사시간의 경과에 따른 축방향 속도의 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 분위기 압력이 0.1MPa일 때에는 액적들이 일정한 속도를 가지면서 분사시간 경과에 상관없이 분무의 하류로 진행함을 알 수 있으며, 분사시간이 4ms가 지난 후의 20mm지점의 분무 중심의 속도감소를 보였다. 이것은 분사종료 후에 증발 및 비산되고 남은 액적들의 속도로 사료된다. 분위기 압력이 0.5MPa, 1.0MPa 일 경우는 Z=20mm 에서는 액적들의 속도가 분사 후 2ms에서는 속도가 급격히 감소한 후 분사시간 경과 후에는 속도가 다시 증가함을 알 수 있다. 또한 속도성분이 분위기압력 0.1MPa일 경우는 Z=30에서 반경방향 좌측으로 약 20mm, 우측으로 약 25mm부근에서 0이하의 속도 성분이 보이고 있다. 분위기 압력이 0.5MPa, 1.0MPa인 경우에도 Z=20에서 반경방향 좌 · 우측 10mm부근에서 0이하의 속도성분이 측정되었다. 이것은 액적과 주위기체와의 운동량 교환의 결과로 발생되는 와류에 의한 영향으로 분위기 압력의 변화가 와류의 형성 위치에도 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 즉, 분위기 압력의 증가는 내부로의 공기 유입으로 인하여 와류의 형성 위치를 분무의 상단 쪽으로 이동시키게 된다.

### 3.3 분무내의 와류 특성해석

분무양쪽 선단에서 일어나는 와류의 특성을 해석하기 위하여 분무 내부의 와도(vorticity :  $\omega_y$ )를 식 (1)을 통하여 계산하였다.

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (1)$$

여기서, u는 반경방향의 속도, w는 축방향의 속도이며 z는 축방향, x는 반경방향을 나타낸다.

Fig. 10은 분위기압이 1.0MPa일 때의 분사 후 3.5ms에서의 와도분포를 나타낸 것이다. 분무의 양쪽 선단 부근에서 강한 와류의 형성을 보이고 있으며 분무 내부로의 공기 유입현상을 분명하게 보여준다. 이는 분위기 압력이 높아질수록 더욱 분명하게 관찰할 수 있었다.

분위기 압력에 따라서 일어나는 와도의 크기를 비교하기 위해서, 세 가지 분위기 압력에서의 최대 와도값의 시간에 따른 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 분위기압력이 0.1, 0.5 MPa일 경우는 분사 후 3.0ms에서 최대값을 가지며, 1.0MPa일 경우는 3.5ms에서 최대 값을 가진 후에 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 분무내부의 유입 현상이 특정한 분사시간 후에는 더 이상 발달하지 않고 줄어든다는 것을 나타내고 있다. 분위기 압력이 증가할수록 와도의 크기 커지는 현상은 가시화 실험에서도 볼 수 있듯이 분위기 압력이 증가할수록 반경방향의 성장이 활발한 것과 동일한 이유이다. 즉 축방향의 속도성분이 작아져서 상대적으로 와도의 크기가 커지기 때문이다.

Fig. 12는 분무내부에서 와도의 최대 값이 측정되는 위치를 분사 후 시간의 경과에 따라 나타낸 그림이다. 먼저 축방향의 위치 변화를 살펴보면, 분위기 압력이 증가할수록 분무의 상단에 최대 값이 존재하고 분사시간의 경과에 따라 분무의 하류로 최대값의 위치가 이동함을 알 수 있다. 반경방향의 위치변화를 보면 분위기 압력이 증가함에 따라서 최대값의 위치가 분무의 중심쪽으로 이동한다. 또한 각 분위기 조건에서 시간의

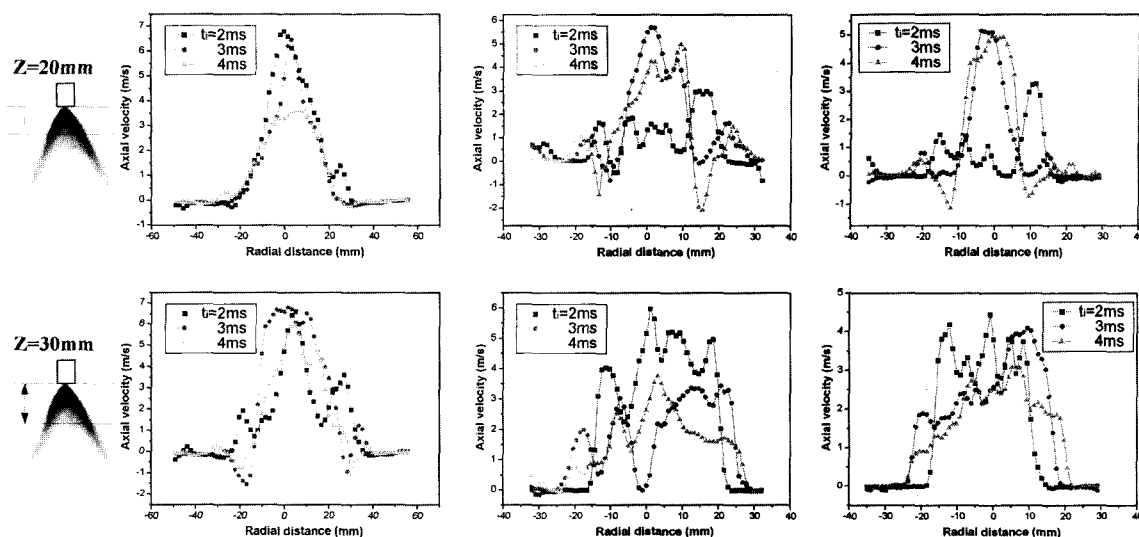


Fig. 9 Velocity distribution at axial distances of 20 and 30mm below injector tip

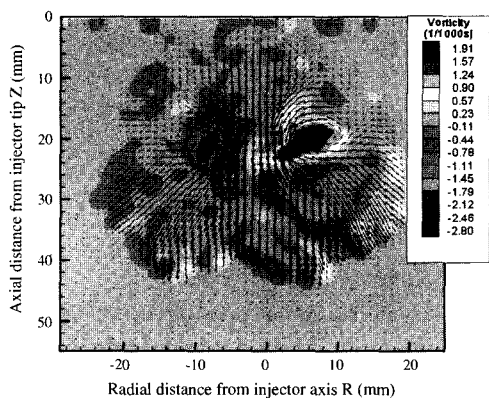


Fig. 10 Vorticity distribution at 3.5ms start of injection ( $P_i=1.0\text{MPa}$ )

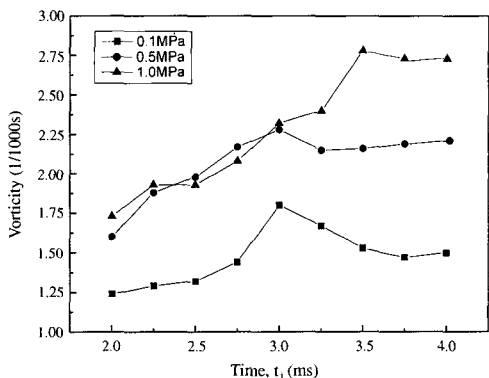


Fig. 11 Effect of ambient pressure on maximum vorticity along time after injector

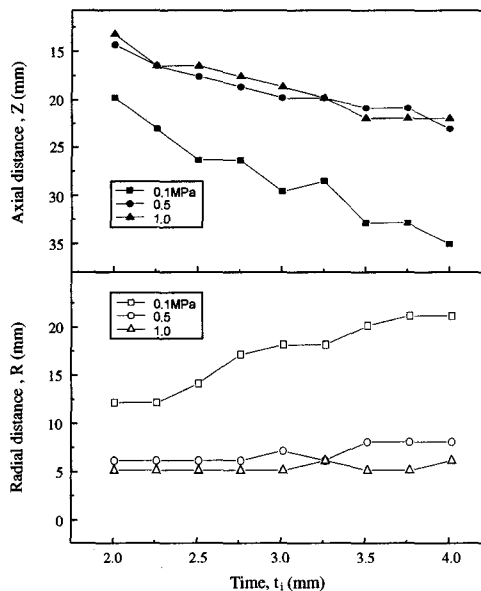


Fig. 12 Change in maximum vorticity location with time after injection

경과에 따른 변화를 살펴보면, 분위기 압력이 0.5, 1.0MPa일 경우에는 분사 후 시간의 경과에 상관없이 거의 동일한 지점에서 최대 값이 나타나는데 반해 분위기 압력이 0.1MPa일 때에는 분사시간이 지남에 따라서 분무의 외곽 쪽으로 최대값의 위치가 이동하는 것을 알 수가 있다.

#### 4. 결론

직분식 가솔린 분무를 대상으로 PIV기법을 적용하여 분위기압의 변화에 따른 분무구조의 변화를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분위기압력의 증가는 축방향으로의 성장보다는 반경방향으로의 성장을 활발하게 한다. 또한 분사 후 1.5ms이후부터는 모든 분위기압력에서 와류가 생성된다.
- 2) 분위기 압력이 증가함에 따라 최대속도를 가진 액적들의 위치가 분무의 선단에서 분무의 중심 쪽으로 이동하며 최대속도도 낮아진다.
- 3) 최대 와도값은 분위기 압력이 0.1, 0.5MPa일 경우는 분사후 3.0ms까지 발달한 후 소산되며, 1.0MPa일 경우에는 3.5ms까지 발달한 후 소산된다.
- 4) 분위기 압력의 증가는 최대 와류의 형성 위치를 분무의 상단 쪽으로 이동시키며, 분사시간의 경과에 따라 최대 와류의 형성 위치는 분무의 하단 쪽으로 이동한다.

#### 참 고 문 헌

- 1) W. Lpp, V. Wagner, H. Kramer, M. Wensing, A. Leipertz, "Spray Formation of High Pressure Swirl Gasoline Injectors Investigated by Two-Dimensional Mie and Lief Techniques," SAE 1999-01-0498, 1999.
- 2) W. Hentshel, A. Homburg, G. Ohmstede, "Investigation of Spray Formation of Gasoline Hollow-Cone Injectors Inside a Pressure Chamger and Glass Ring Engine by Mutiple Optical Techniques," SAE 1999-01-3660, 1999.
- 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) 최동석, 박형호, 김덕줄, "Exciplex 형광법에 의한 가솔린 직접 분무의 기상과 액상분포 및 농도 측정," 대한기계학회 논문집 B권, 제23권 제4호, pp.531-539, 1999.
- 5) Z. Cao, K. Nishino, S. Mizuno, K. Totii, "PIV Measurement of Internal Structure of Diesel Fuel Spray," Experimental in Fluids [Supple] 2000, pp.211-219, 2000.
- 6) N. Ishikawa, K. Niimura, "Analysis of Diesel Spray Structure Using Magnified Photograph and PIV" SAE 960770, 1996.
- 7) H. Fujimoto, J. Senda, "Flow Characteristics inside a Non-evaporating and an Evaporating Diesel Sspray," 한국 액체미립화학회 학술강연회 논문집, pp.1-14, 2000.
- 8) R. Wicker, H. Loya, P. Hutchison, "SIDI Fuel Spray Structure Investigation Using Flow Visualisation and Digital Particle Image," SAE 1999-01-3535, 1999.
- 9) A. Miyajima, Y. Okamoto, Y. Kadomukai, S. Togashi, M. Kashiwaya, "A Study on Fuel Spray Pattern Control of Fuel Injector of Gasoline Direct Injection Engines," SAE 2000-01-1045, 2000.
- 10) T. Dan, S. Takagishi, J. Senda, H. Fujimoto, "Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-reacting Diesel Fuel Spray" SAE 970352, 1997.