

## 횡방향 유속 변화에 따른 고압 가솔린 스월 인젝터의 분무특성

최재준·이용석·최욱·배충식\*

한국과학기술원 기계공학과

### Spray Characteristics of High Pressure Gasoline Swirl Injector with Various Cross-flow Speeds

Jaejoon Choi · Youngseok Lee · Wook Choi · Choongsik Bae\*

<sup>1)</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea  
(Received 8 May 2004 / Accepted 22 November 2004)

**Abstract** : The spray prepared for direct fuel injection into cylinder is of great importance in a DISI(Direct Injection Spark Ignition) engine. The interaction between air flow and fuel spray was investigated in a steady flow system embodied in a wind tunnel to simulate the variety of in-cylinder flow conditions in the DISI engine. The Mie-scattering images presented the macroscopic view of the liquid spray fields interacting with cross-flow. Particle sizes of fuel droplets were measured with phase Doppler anemometer(PDA) system. A faster cross-flow field made SMD larger and  $D_{10}$  smaller. The atomization and evaporation processes with a DISI injector were observed and consequently utilized to construct the database on the spray and fuel-air mixing mechanism as a function of the flow characteristics.

**Key words** : DISI(Direct Injection Spark Ignition, 가솔린 직접분사), Wind tunnel(풍동), Cross-flow(횡방향 유동), PDA(위상 도플러 입자분석기), SMD(Sauter Mean Diameter, 사우터 평균입경)

### 1. 서론

직접분사식 가솔린엔진(DISI engine)은 실린더 내 직접분사를 통해 기존의 PFI(Port Fuel Injection) 엔진에 비해 저공해, 저연비를 이룰 수 있도록 설계된 엔진이므로, 연료의 분사 과정 및 주변 조건의 분무에 대한 간섭이 엔진성능에 중요한 영향을 미치게 된다.<sup>1)</sup>

직접분사식 가솔린엔진에서 연료가 분사될 때의 고압분위기 조건을 상정하여 연료 분무의 특성을 파악하기 위한 많은 선행 연구가 있었다.<sup>2,3)</sup> 특히 분사가 이루어지는 실린더 내에서는 유동과 유속의 변화가 비교적 빠르게 이루어지기 때문에, 이와 관

련된 연구 또한 활발하다.<sup>4,6)</sup> DISI 엔진에서 성층연소가 수행될 때 연료는 압축 행정 말기에 분사되어 지는데, 분사가 시작될 때의 실린더 내 유동 평균속도는 최대 15 m/s 정도라는 사실이 밝혀진 바 있다.<sup>4)</sup> 이를 토대로 본 연구에서는 정상유동장치에서 발생하는 빠른 유동과 분무장과의 상호 작용을 관찰함으로써, DISI 엔진에서의 성층화 연소과정을 위한 혼합기 형성 기구를 파악하고, 흡기계 및 연소실 최적 설계를 할 수 있는 기초 자료를 구축하고자 하였다. 미-산란(Mie-scattering) 이미지 기법을 이용하여 거시적인 분무 특성을 측정하였고, 위상 도플러 입자분석기(phase Doppler anemometry, PDA)를 이용하여 미시적인 특성인 액적의 속도와 입경의 크기를 측정하였다.

\*To whom correspondence should be addressed.  
csbae@kaist.ac.kr

## 2. 실험 방법

개략적인 실험장치의 구성은 Fig. 1과 같다. 풍동을 이용한 정상유동장치의 사용으로 단면적 200 mm×200 mm 내에서 균일한 유속으로 1.5 m/s~15 m/s의 유동이 발생되도록 하였고, 측정공간은 아크릴로 제작해 가시화를 용이하게 하였다. 또한 가시화 영역의 하류 쪽에는 환기 시스템을 설치하여 분사된 연료가 잘 배출되도록 설계하였다. 대부분의 역텀블(reverse tumble)을 이용한 직접분사식 가솔린 엔진에서는 분사가 이루어질 때의 유동이 분무장과 주유동이 직각을 이루는 데에 착안하여, 직접분사식 가솔린엔진용 스윙인젝터를 주 유동(풍동 유동의 생성방향)에 수직하게 장착하였다. 또한 직접분사식 가솔린엔진에서의 모터링 시의 유동속도가 약 10 m/s<sup>5,6)</sup>인 점을 감안하여, 주 유동 속도를 1.5 m/s (ventilation only), 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s로 변화시켜 가며 분무와의 관계를 살펴보았다. 풍동에서의 난류강도는 열선유속계(Hot-wire anemometer)로 측정된 결과, 최고 3.5% 정도를 나타내었다.

실험에 사용된 분사기는 분사각 60°인 직접분사식 가솔린 엔진용 고압 스윙분사기이며, 분사압력은 50 bar로 설정하였다. 연료의 가압에는 고압의 질소가스를 이용하여 연료탱크 내의 연료를 후방 가압한 후, 압력을 분사기에 전달하는 방식을 사용하였다. 연료로는 상용 가솔린을 사용하였고, 실제의

4기통, 2 L급 엔진<sup>7)</sup>에서의 중부하 조건에 해당하는 1.57 ms동안 21 mg의 연료를 분사하였다. 영상취득 시기와 분사신호 사이의 지연 시간은 약 0.24 ms였다.

유동의 거시적인 관찰을 위하여 Mie 산란 방법을 사용하였다. 광원으로는 6W cw(continuous wave) Ar-Ion 레이저(Stabilite 2017, Spectra Physics, USA)를 사용하였고, 초점거리 1 m의 볼록렌즈, 초점거리 7.5 mm의 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 평면광을 만들었으며, 분무의 중심 단면을 ICCD 카메라(4Quick05A, Stanford, USA)로 1 μs의 노출 시간을 주어 촬영하였다. 1 μs 동안에는 100 m/s로 움직이는 입자가 0.1 mm 움직이므로, 본 실험에 사용된 인젝터의 분무 특성상 충분히 동결(freeze)되었다고 할 수 있다.

분무 입자의 속도와 입경 측정을 위하여 1차원 속도측정이 가능한 위상 도플러 입자 분석기(PDA, TSI, USA)를 사용하였다. 횡방향으로 주유동이 생성되고 있을 때에 종방향 속도를 측정하고, 그로부터 입자 크기를 측정할 때에는 정확히 횡방향으로 입자가 지나가는 순간에 입자의 속도와 크기를 측정할 수 없으므로, 횡방향 유속을 측정할 수 있도록 transmitting optics를 설치하여 입자직경을 도출하였다. Table 1에는 PDA 장치의 설정값과 변수, 측정범위를 나타내었다. Table 1에 나타나 있는 측정변수

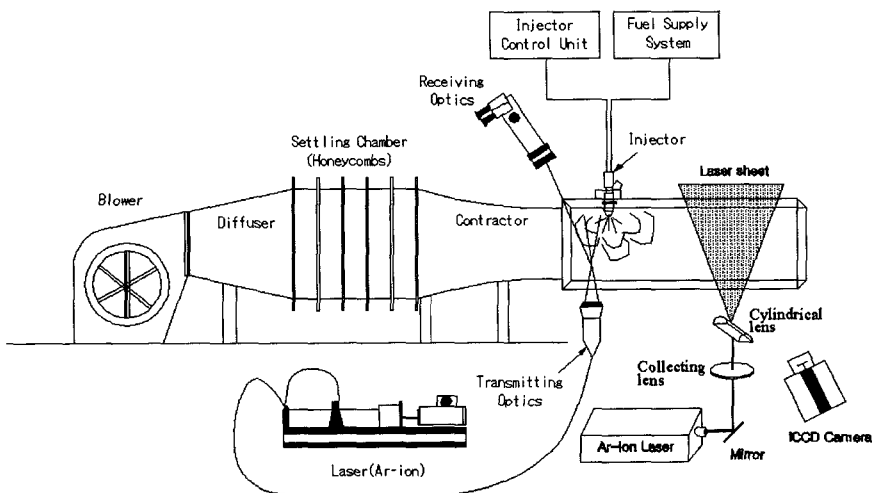


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

를 적용했을 때, -7.5 m/s~56 m/s 의 속도 범위 내에 있는 입자를 측정할 수 있다.

Table 1 PDA system setup parameters

Measurement vol. diameter( $\mu\text{m}$ )	90.5 $\mu\text{m}$
Measurement vol. length(mm)	1.31mm
Fringe spacing( $\mu\text{m}$ )	3.73 $\mu\text{m}$
Number of fringes	24.2
Received data range	3~20MHz
Frequency shift	5MHz
Scattering angle	30°

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 분무 도달 거리

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 직접분사식 가솔린 엔진용 인젝터에서 분출되는 거시적 분무형태의 정의를 나타낸다. sac 부분에서 나온 분무 방향으로의 속도가 빠르고 입경이 큰 부분을 색분무 도달거리 (sac spray penetration, ②)이라고 하였고, 주 분사인 스웰 유동의 발생 부분이 분무축 방향으로 도달한 거리를 주분무 도달거리(main spray penetration, ①)이라고 하였으며 주분무의 반경방향으로 도달한 거리를 분무폭(spray width, ③)이라고 정의하였다. 각 분무도달거리와 분무폭을 측정할 때에는 소프트웨어를 사용하여 영상의 그레이 레벨(gray level)을 인지한 후 쓰레숄드 레벨(threshold level)을 정하여 분

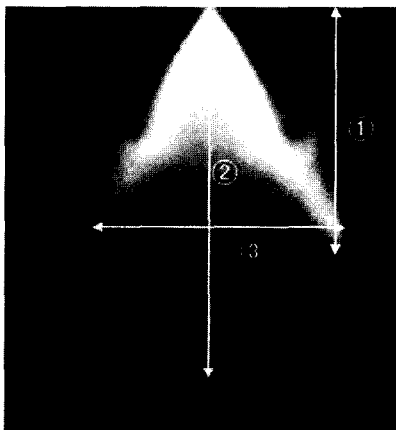
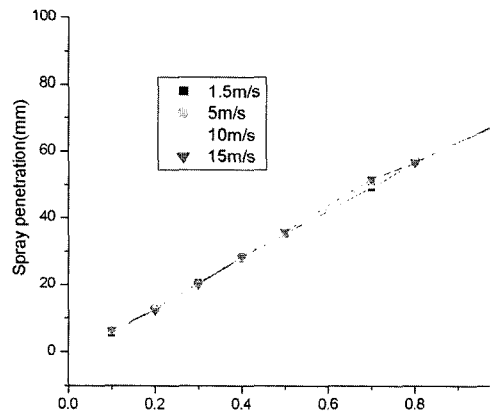


Fig. 2 Definition of DISI spray  
 ① main spray penetration  
 ② sac spray penetration  
 ③ spray width

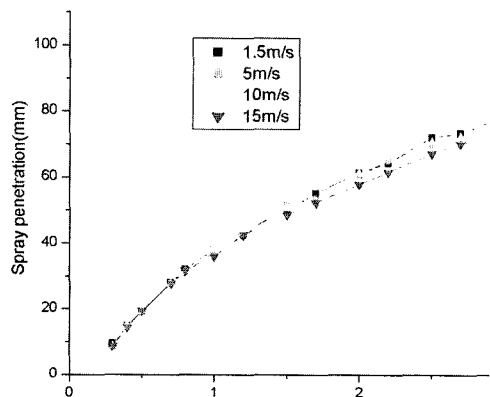
무장과 주변공기의 경계를 정하였다.

Fig. 3은 색분무 도달거리와 주분무 도달거리를 나타낸 그래프이다. 두 인자 모두 분무와 직각 방향의 유동에는 영향을 받지 않으므로 풍동의 유속에 따라 분무도달거리의 값이 거의 변화하지 않음을 관찰할 수 있다. 색 분무 도달거리는 선형적으로 증가함을 볼 수 있고, 주분무의 도달거리는 시간이 지날수록 기울기가 완만해짐을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 기존의 연구자들의 결과<sup>2,4)</sup>와 일치한다.

Fig. 4는 분위기 유속에 따른 분무 폭의 변화를 나타낸다. 풍동에서 주유동이 분무의 반경방향으로 발생하므로, 분 유동은 분무폭 쪽으로 가장 많은 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다. Fig. 4(a)는 분무의 반경방향으로 양쪽 끝단의 위치를 측정한 그래프이며, Fig. 4(b)는 (a) 그래프에서 측정된 양쪽 끝단

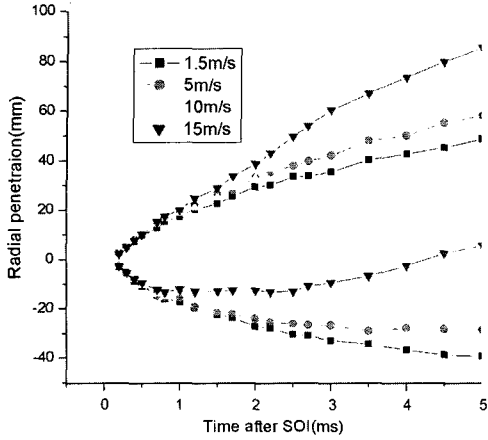


(a) Left and right end location

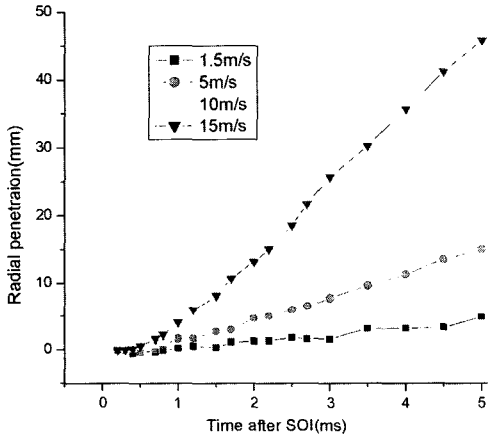


(b) Main spray penetration

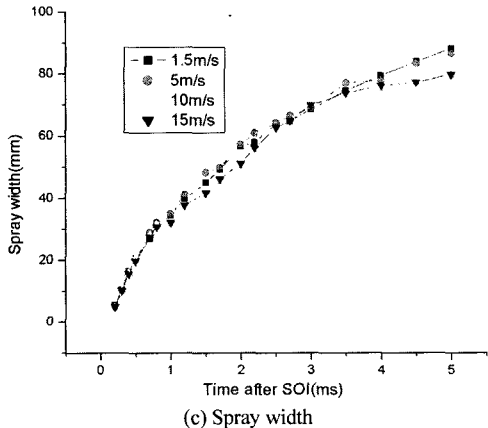
Fig. 3 Sac spray penetration and main spray penetration



(a) Sac spray penetration



(b) Spray middle location(average of (a))



(c) Spray width

Fig. 4 Spray width and radial end locations

의 중앙값을 나타내었으며, Fig. 4(c)는 (a) 그래프에서 측정된 양쪽 끝단의 차이, 즉 분무폭을 나타낸다.

분무폭은 분무와 직각방향으로 발생하는 유속과는 많은 상관관계가 보이지 않지만, 직각방향 유동속도가 빠른 10 m/s와 15 m/s에서 다른 두 경우보다 분무 폭이 약간 작은 것으로 측정되는데, 이는 분무의 끝단이 유동에 의하여 약간 밀려 들어갔음을 의미한다. 직각방향 유동의 속도가 빠를수록 분무 중앙의 위치가 유동 방향으로 진행되는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 진행 속도는 실제 유동의 속도보다는 느린 것을 알 수 있는데, 이는 분무 액적이 유동의 속도를 추적하는데 있어서 시간이 소요되기 때문이다.

### 3.2 액적 크기와 속도 분포

분무에 수직으로 발생하는 유속의 변동에 따른 액적 크기의 변화를 측정하기 위하여, Fig. 5와 같이 인젝터 끝단으로부터 반경방향 5 cm, 하류방향으로는 2 cm 떨어진 지점부터 축방향으로 10 cm 구간에 걸쳐, 1 cm 간격으로 10개의 측정점에서 PDA 계측을 수행하였다. 본 측정선은 횡방향으로 이동하는 유동의 영향을 알아보기 위하여 채택되었고, 본 실험의 목적에 부합한다. 노즐 팁으로부터 하류방향으로 5 cm 지난 지점에서는 횡방향 유속이 없다면 모든 분무장이 측정선 안에 들어가지 못한다. 본 실험에서 관찰한 바로는 횡방향 유속 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s에서는 거의 모든 입자가 본 측정선을 한 번씩 통과하도록 되어 있었고, 횡방향 유속 1.5 m/s일 때에는 본 측정선을 통과하지 않고 아래로 지나가거나 측정부 아래쪽 아크릴 표면에 충돌하는 경우도 있었다. 앞서서도 밝힌 바 있지만, 본 실험은 엔진 내부의 유동을 모사하며 10 m/s를 중심으로 횡방향

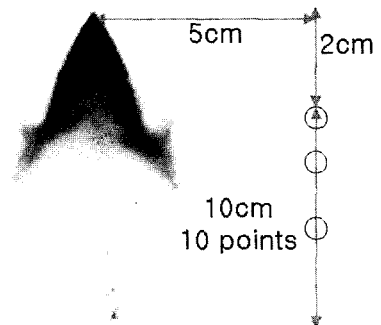


Fig. 5 Configuration of diameter-measurement locations

유속이 더 빠를 때와 더 느릴 때를 구현한 것이며, 횡방향 유속 1.5 m/s인 것은 기준이 된다는 것 외에는 많은 물리적 의미를 가지지 않으므로, 횡방향 유속이 1.5 m/s일 때에 연료 액적이 모두 측정선을 통과하지 않는 효과는 무시하기로 하였다. 각 지점에서 500회 분사하여 데이터를 취득하였다.

Fig. 6은 10개의 측정점에서 취득한 모든 데이터를 합하여 입경의 평균과 SMD(Sauter Mean Diameter)를 나타낸 그래프 (a)와 취득한 데이터의 개수를 나타낸 그래프이다. (b) 횡방향 유속이 빨라질수록 SMD가 증가함을 관찰할 수 있는데, 이는 횡방향 유속이 분무 액적의 분열보다 증발이나 합착(coalescence)에 영향을 미치기 때문이다. 증발에 의한 액적 지름의 감소는 시간에 비례하고 액적 지름의 크기에 반비례하게 된다.<sup>8)</sup> 이에 따라 주위에 유동이 존재할 때의 액적의 증발은 직경이 큰 입자보다는 직경이 작은 입자에 더 많은 영향을 미치게 되

므로, 액적의 지름이 작을수록 빨리 그 크기가 작아지게 된다. 따라서 본 실험의 결과에서는 직경이 큰 액적들의 숫자는 크게 감소하지 않고, 직경이 작은 액적들의 숫자만 대폭 감소한 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6(b)의 그래프에서도 확인할 수 있는데, 분무 액적 증발과 합착의 영향으로 횡방향 유속이 빨라질수록 PDA 기법으로 취득되는 데이터의 개수가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 입자의 평균인  $D_{10}$  (산술평균입경)은 횡방향 유속이 클수록 줄어들지만, 횡방향 유속 10 m/s와 15 m/s에서는 크게 차이가 나지 않는다.

Fig. 7(a)는 10개의 측정점에서 취득한 데이터의 PDF (Probability Density Function)을 그래프로 나타낸 결과이다. 이 그래프는 전체의 데이터 개수로 표준화(normalize)를 하였기 때문에 데이터 개수와 상관없이 상대적인 입자 직경의 분포를 보여준다. 그림에서 횡방향 유속이 1.5 m/s 일 때와 5 m/s일 때에는 직경 분포가 상대적으로 큰 쪽으로 많이 분포되어  $D_{10}$ 이 클 것이라고 쉽게 예측할 수 있다. 횡방향 유속 10 m/s와 15 m/s에서는 15 m/s 때의 최대 PDF의 높이가 낮아졌을 뿐 다른 점을 발견할 수 없다. 그러나, 입경이 큰 쪽인 30  $\mu\text{m}$  이상의 경우만 비교한 Fig. 7(b)의 그래프에서 보면, 큰 직경에서의 PDF가 횡방향 유속 10 m/s일 때보다 큰 것을 알 수 있다. SMD는 작은 입자보다는 큰 입자의 영향을 훨씬 많이 받으므로 횡방향 유속이 클 때에 SMD가 커진다는 사실을 Fig. 7(b)의 그래프로부터 설명할 수 있다. 또한, Fig. 7(c)의 그래프는 PDF 그래프가 아닌 측정된 데이터의 실제 개수를 표현해 주고 있는데, Fig. 6(b)에서 횡방향 유속이 빠를수록 전체적인 데이터 개수가 감소함에도 불구하고, Fig. 7(c)에서는 횡방향 유속이 빠를 때와 횡방향 유속이 느릴 때의 데이터 개수가 차이가 나지 않고, 오히려 더 많은 것처럼 보인다. 이처럼 횡방향 유속의 차이가 날 때에 입자의 개수가 줄어드는 현상은 30  $\mu\text{m}$  이하의 입자 개수에서 차이가 발생함을 의미하는 것으로, 작은 입자일수록 빨리 기화되고 합착 현상이 일어난다는 사실을 뒷받침 해 주고 있다. 한편, Fig. 6에서 횡방향 유속이 1.5 m/s 일 때에는 전술한 바와 다르게, SMD가 크고 측정된 데이터의 개수가 적는데, 이는 횡방향 유

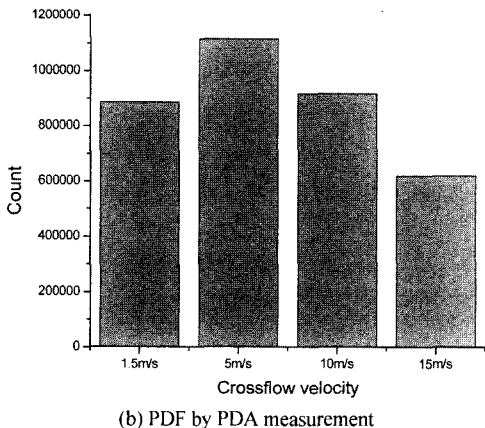
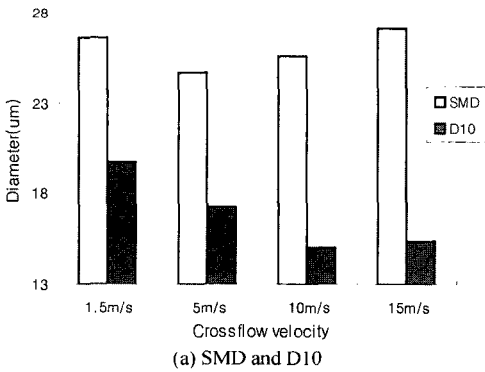
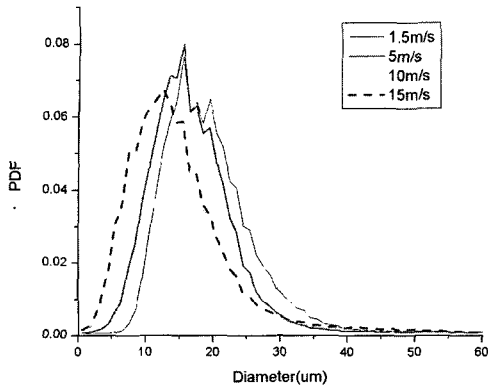
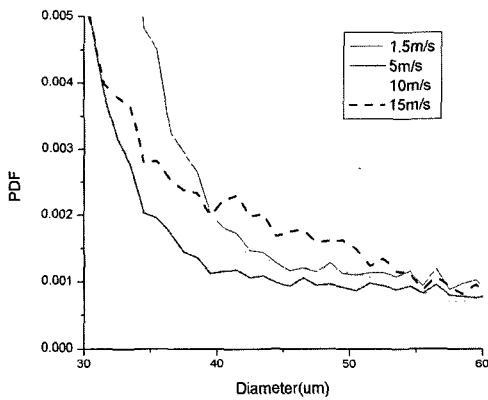


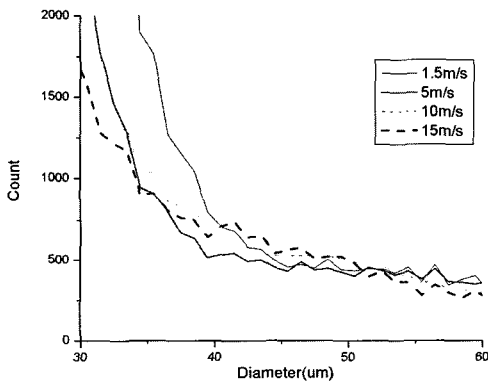
Fig. 6 Diameters and data counts from the PDA measurement



(a) PDF



(b) Data counts



(c) Data counts during whole experimental time

Fig. 7 Particle diameter distribution measured by PDA

속이 작기 때문에 분무장이 측정점을 지나지 못하고 측정점 아래쪽으로 지나가거나 풍동의 측정 단면적의 크기인 20cm 지점에서 벽에 유착되었기 때문이다.

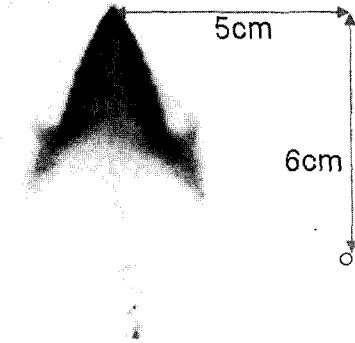


Fig. 8 Configuration of velocity-measurement points

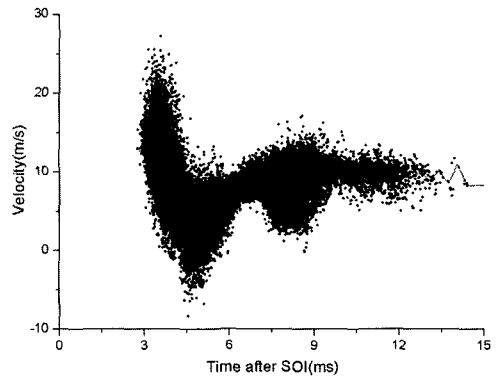


Fig. 9 Raw data of x-velocity components

Fig. 8은 PDA 기법을 통한 연료 액적의 속도측정에 적용된 측정 위치를 나타낸다. PDA는 연료 액적의 속도와 크기가 동시에 측정되는 장치이지만, 액적의 속도를 표현하는 데에는 한 지점의 정보로도 충분하다고 생각하여, 본 절에서는 이에 대한 고찰만 하도록 한다. 측정점은 풍동의 하류방향으로 5cm, 인젝터의 축방향으로 6cm 떨어진 지점이 선택되었다. 인젝터에서 축방향으로 2cm 떨어진 지점이나 10cm 이상 떨어진 지점에서는 주위유동의 속도에 따라서 측정되지 않는 조건도 있었지만, 본 측정점에서는 모든 조건에서 데이터를 취득할 수 있었기 때문에 선택되었다.

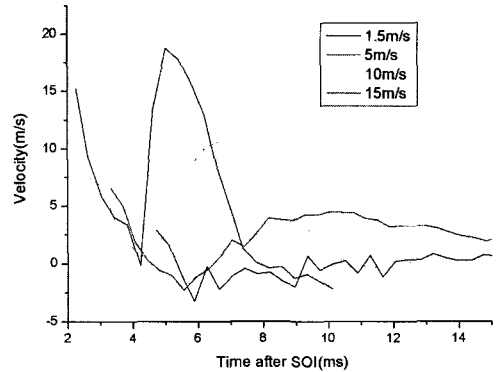
Fig. 9는 본 실험에서 측정된, 횡방향 유동 속도 10m/s에서 측정시각에 따른 반경방향(유동방향) 속도의 원본 데이터(raw data)이다. 이 그래프에서는 분사 후 0~15ms의 구간을 30개로 나누어 그 평균값을 선으로 나타내었다. 초기에 분무장의 오른쪽 부분이 먼저 측정점을 통과하기 때문에 횡방향 유속이

빠른(20 m/s 이상) 입자들이 먼저 측정점을 지나가고, 다음으로 와(vortex)의 역방향 성분이 측정되어 속도가 음인 부분이 측정된다. 횡방향 유속이 10 m/s로 일정하게 유지되고 있기 때문에, 분무장의 왼쪽 부분이 측정부위에 도달되어 음의 속도를 가진 액적들과 양의 속도를 가진 액적들이 차례로 측정부를 지나가게 된다. 여기에서 분무장의 왼쪽 부분에서 측정되는 음의 속도를 가진 입자들은 횡방향 유속을 추종하고, 측정부위를 지날 때까지 횡방향 유속에 노출되는 시간이 길기 때문에, 실제로는 양의 속도이고 원래 양의 속도를 가진 유동장보다 느린 속도를 갖게 된다. 측정영역에 나중에 도달한 액적들은 유동장 속도를 거의 추종하는 것을 볼 수 있다.

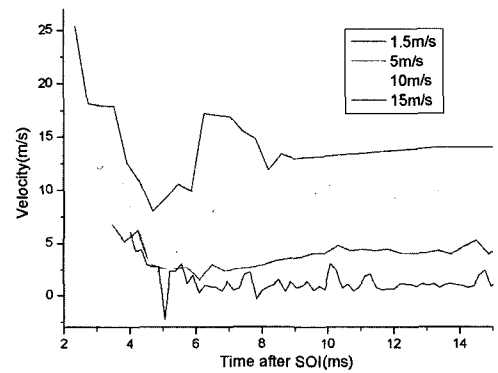
Fig. 10은 측정부에서 수직, 수평으로 설치된 PDA 장치를 이용하여 측정한 시간에 따른 속도장을 평균한 그래프이다. 횡방향 유속이 빠를수록 측정부에 입자가 도달하는 시간이 짧아지고, 입자가 더 이상 측정되지 않는 시간이 빨라짐을 알 수 있다. 본 그래프에서 수직 방향으로서는 분무장의 진행방향을, 그리고 수평 방향으로서는 횡방향 유속의 진행방향을 양의 방향으로 설정하였다.

Fig. 10(a)의 수직 속도를 나타낸 결과에서는 횡방향 유속이 빠를수록 높은 피크(peak)를 관찰할 수 있다. 이 피크는 시간이 지날수록 감소하며, 횡방향 유속이 낮을수록 이 피크가 낮은 이유는 횡방향 유속이 낮은 경우, 측정점에 주류(main stream)가 도달하는 순간에 속도가 이미 많이 감소하였기 때문이다. 시간이 경과할수록 수직 속도의 평균값은 0 m/s로 근접함을 관찰할 수 있다.

Fig. 10(b)의 수평 속도에서는 시간이 경과할수록 수평 속도의 평균값이 횡방향 유속을 따라가는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 보이던 4개의 양, 음의 피크는 평균속도에서는 직접적으로 찾아보기 힘들다, 변화의 경향으로써 짐작할 수 있다. 이러한 피크는 수직속도를 측정된 Fig. 10(a)의 설명에서도 언급했듯이, 횡방향 유속의 차이 때문에 측정점에 액적이 도달할 때까지의 시간의 경과가 원인이 되어, 횡방향 유속이 느릴수록 낮은 피크를 갖게 된다.



(a) Averaged vertical velocity



(b) Averaged horizontal velocity

Fig. 10 Time-resolved velocity components of swirl spray with various cross-flow speeds

#### 4. 결론

직접분사식 기술린 엔진용 고압 선회분사기에서 형성되는 분무의 거시적 형상을 색 볼륨(sac volume) 내에 들어있던 연료가 분사되는 색 분무(sac spray)와 스월 형태의 분무가 발생하는 주 분무(main spray)로 구분하여 분무특성의 횡방향 유속에 따른 변화를 살펴 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 색 분무는 직선운동에 의해 축방향 도달속도가 빠른 반면, 주 분무는 3차원적으로 회전하면서 분사된다. 이로 인해 단면 사진으로부터 아래에서 위쪽으로 달려 올라가는 와(vortex)가 항상 존재하게 되고, 이러한 와는 공기와의 혼합을 용이하게 한다.
- 2) 횡방향 유속과 주분무의 축방향으로의 도달거리는 거의 상관관계가 없었으며, 횡방향 유속이 빠를수록 분무폭의 변화 없이 분무장이 유동축

으로 이동하는 것을 볼 수 있었다.

- 3) 횡방향 유속의 증가는 SMD의 증가를 가져왔고, 평균입경인  $D_{10}$ 이 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 PDA 측정 데이터 개수는 감소하였다. 이것은 횡방향 유속으로 인한 작은 입자들의 증발현상과 합착현상에 기인한다.

## 후 기

본 연구는 국가지정 연구실 사업(NRL)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- 1) F. Zhao, M. C. Lai and D. L. Harrington, "Automotive Spark-ignited Direct-injection Gasoline Engines," Progress in Energy and Combustion Science, pp.437-562, 1999.
- 2) C. Jang, C. Bae and S. Choi, "Characterization of Prototype High-Pressure Swirl Injector Nozzles, Part 1: Prototype Development and Initial Characterization of Sprays," Atomization and Sprays, Vol.10, pp.159-178, 2000.
- 3) Y. Tanaka, T. Takano, H. Sami, K. Sakai and N. Osumi, "Analysis on Behaviors of Swirl Nozzle Spray and Slit Nozzle Spray in Relation to DI Gasoline Combustion," SAE 2003-01-0058, 2003.
- 4) J. Choi, S. Lee and C. Bae, "Fuel-Spray Characteristics of High Pressure Gasoline Injection in Flowing Field," JSME International Journal, B, Vol.43, No.4, 2000.
- 5) R. L. Liu, W. Q. Liu, L. Q. Wu and C. L. Zhao, "LDV Measurements of Velocities and Turbulence Intensities in a Production SI Engine Under Motored and Firing Condition," SAE 1999-01-0955, 1999.
- 6) E. Karaiskos, C. Arcoumanis and T. Hale, "Flow and Spray Investigation in Direct Injection Gasoline Engines," SAE 2002-01-0832, 2002.
- 7) C. Bae, D. Choi and J. Choi, "Characterization of Mixture Distribution in a DISI Optical Engine under Late Injection Mode," 1st International Conference on Optical and Laser Diagnostics, 2002. 12.
- 8) C. A. Dunbar, A. P. Watkins and J. F. Miller, "Theoretical Investigation of the Spray from a Pressurized Metered-Dose Inhaler," Atomization and Sprays, Vol.7, pp.417-436, 1997.