

〈 논문 〉

## 팬형분무의 주변조건에 따른 입자분포 변화

문석수\* · 최재준\*\* · 배충식†

(2007년 2월 13일 접수, 2007년 6월 15일 심사완료)

### The Droplet Size Distribution of Fan Spray at Different Surrounding Conditions

Seoksu Moon, Jaejoon Choi and Choongsik Bae

**Key Words:** DISI(Direct-Injection Spark-Ignition; 직접분사식 가솔린), Fan Spray(팬형분무), DropletSize Distribution(입자분포), Air Entrainment(공기유입)

#### Abstract

In this study, the droplet size distribution of a slit injector at different surrounding conditions, such as air flow and fuel temperature, were investigated. Phase Doppler anemometry (PDA) was utilized to investigate the initial droplet size distribution and the effect of fuel temperature and air flow on droplet size distribution. The entrained air motion was also evaluated by the temporal velocity profile of droplets. When the air flow velocity increased, the small droplets were more entrained to the upper and central parts of the spray and this tendency was confirmed by plotting the temporal velocity profile of droplets. This entrainment of small droplets at high airflow velocities caused relatively small mean droplet size at upper and central parts of the spray and the large mean droplet size at downstream and edge of the spray, compared to that of low airflow velocities. The total mean droplet size, obtained by averaging the size of all droplets measured at all test locations, decreased when the high airflow velocities were applied. The increased fuel temperature, with an airflow velocity of 10m/s, caused reduced droplet size at all test locations. However, the decreased value of mean droplet size at high fuel temperatures was relatively higher at upper parts of the spray, compared to downstream, as a result of enhanced entrainment of small droplets to upper parts of the spray.

#### 1. 서론

직접분사식 가솔린 엔진이 가지는 가장 큰 장점인 연료경제성의 향상은 부분부하의 성층 희박 연소를 통해서 구현되므로, 연료경제성의 향상을 극대화하기 위해서는 성층 희박 연소구간을 최대화 시키는 것이 중요하다 할 수 있다.<sup>(1)</sup> 성층 희박 연소를 위해서는 점화플러그 주변에 안정된

연소를 구현할 수 있는 혼합기를 형성시켜 주어야 하며, 이러한 혼합기 분포는 벽면유도 방식(wall-guided system)의 경우, 분무 자체의 형상 뿐만 아니라 피스톤 보울(bowl)의 형태, 흡기유동에 의해서도 영향을 받게 된다.<sup>(1)</sup> 점화플러그 주변의 혼합기 형성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 피스톤 보울 형상이 일정한 상태에서는 흡기유동과 분무의 운동량이라고 할 수 있으며, 지금까지 선행된 연구들에서는 연소의 최적화를 위하여 분무 형태 개발 및 이에 적합한 유동의 형태 결정에 연구의 초점이 맞추어져 있었다.<sup>(1-6)</sup> 기존의 연구에서 이미 흡기유동에 따른 분무의 발달 및 입자의 미립화 과정에 대한 연구들이 수행되었으나

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원

E-mail : csbae@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3044 FAX : (042)869-5023

\* 회원, 한국과학기술원

\*\* 회원, 한국에너지기술연구원

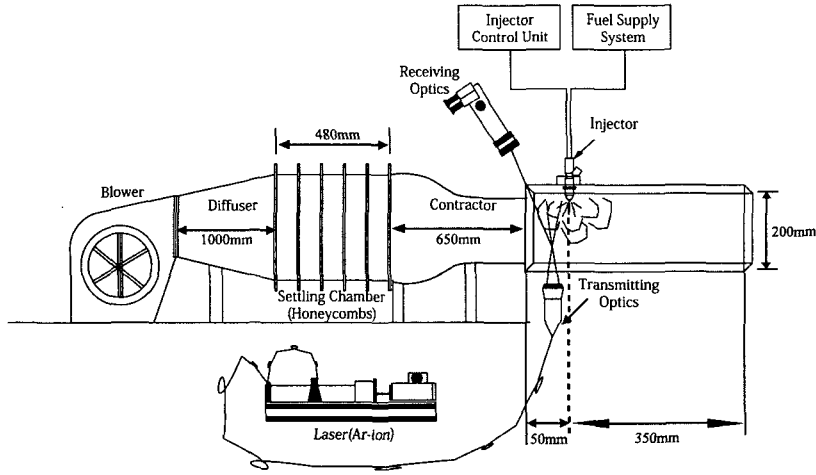


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

이는 linear instability 해석과 같은 모사 기법에 의존하였으며, 실험적인 접근은 거시적 발달과정에만 국한되어 있었다.<sup>(7-10)</sup> 뿐만 아니라 연료온도의 증가에 따라 입자크기가 감소함으로써 축방향 운동량이 감소하고, 주변유동에 의해 반경방향으로 크게 영향을 받음이 확인된 바 있다.<sup>(11)</sup> 그러나 피스톤 보울과 상호작용을 통해 점화플러그 주변에 혼합기를 형성하는데 중요한 인자인 분무의 입자크기 분포에 대한 실험적인 연구 및 이러한 입자크기 분포 변화를 일으키는 데 중요한 요인인 공기 유입특성에 대한 고려는 충분히 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 벽면유도방식 및 균일혼합연소에 널리 이용되어 온 팬형 분무의 대기상태 입자분포에 대해서 살펴보고, 횡방향 유속과 연료온도의 변화에 따른 분무 입자분포의 변화를 살펴보고자 하였다. 이에 더불어 이러한 입자크기의 변화를 일으키는 공기 유입 특성에 대해서 살펴보고자 하였다. 주변조건으로써 횡방향 유속과 연료온도를 택한 이유는 이 두 인자가 각각 연소실에서 변화하는 외부의 힘과 분무 자체의 운동량을 대변하기 때문이다. 분무의 입자분포와 이러한 입자분포의 변화를 초래하는 공기유입 (air entrainment) 정도를 살펴보기 위해 위상도플러기법 (PDA; phase Doppler anemometry)을 적용하였다.

## 2. 실험 장치 및 조건

Fig. 1은 실험장치도를 나타내고 있다. 횡방향 유동을 생성하기 위하여 풍동을 이용하였으며, 인젝터는 유속방향에 수직으로 장착하였다. 입자의 크기 및 속도분포를 측정하기 위해서 Ar-ion 레이저를 이용한 위상도플러기법(PDA; phase Doppler anemometry)을 적용하였다. 6W 급의 Ar-ion 레이저를 이용하여 1W(multi-line)의 강도로 레이저를 방사하였고, 여기에서 514.5nm의 빛만 분리해 내어 TSI 사의 분광기 (beam splitter)를 이용하여 빔을 두 개로 나누었다. 또한 분리된 두 빔을 초점거리 362.6mm의 볼록렌즈로 집광시켜서 측정체적을 만들었다. 이 측정체적 내에는 두 빔의 간섭현상에 의해 프린지(fringe)가 형성되게 되며, 이 프린지를 입자가 지나갈 때 수광부(receiver)에서 감지하는 주파수는 입자의 속도에 비례하며, 두 빔의 위상차는 입자의 크기에 비례하게 된다. 측정가능한 입자의 속도범위는 -5~56m/s로 설정하였으며, 측정을 위한 설정 인자들을 Table 1에 나타내었다.

연소실 내의 혼합기 분포를 살펴보기 위하여 레이저유도형광법 (LIF; laser induced fluorescence)을 적용하였다. 광원은 266nm의 Nd-Yag 레이저를 이용하였으며, 볼록렌즈 및 원통형 렌즈를 이용하여 레이저 시트(sheet)를 형성시켰다. 이 경우

**Table 1** Specifications of the phase Doppler anemometry system (TSI APV)

Fringe Spacing	3.73 $\mu$ m
Number of Fringes	24.2
Received data range	3~20MHz
Frequency shift	5MHz
Scattering angle	30°

**Table 2** Experimental conditions

Airflow velocity [m/s]	0, 5, 10, 15
Fuel temperature [K]	298, 358
Injection pressure [MPa]	9
Injection duration [ms]	1.6
Fuel	Commercial gasoline

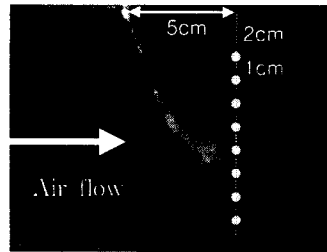
연료는 이소옥탄(isooctane)을 이용하였으며 형광 신호는 ICCD (intensified charge coupled device) 카메라를 통해서 취득되었다.

Table 2는 실험조건을 나타내고 있다. 흡기 유동의 속도는 0m/s에서 15m/s까지 적용하였으며, 이는 일반적으로 엔진 내에서 발생하는 텀블유동(tumble flow)의 속도이다. 연료온도는 상온조건인 298K에서부터 일반적인 냉각수(coolant)온도인 358K까지 변화시켰다. 분사압은 9MPa로 고정하였으며, 분사기간은 1.6ms로 고정하였다. 분무실험에 적용된 연료는 일반적인 가솔린차에 적용되는 상용 가솔린이다.

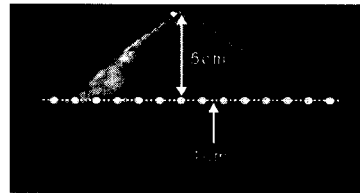
### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 PDA 측정점

Fig. 2는 선형 분무의 초기 입자분포 및 주변 조건의 변화에 따른 입자크기 변화를 살펴보기 위해 수행된 PDA의 측정지점을 나타내고 있다. 측면에서 바라본 단면의 입자분포를 살펴보기 위해 수직측정지점들을 설정하였으며, 하방에서 바라본 단면의 입자분포를 살펴보기 위해 수평측정지점들을 설정하였다. 유동이 공급되지 않은 상태에서 분무가 경사를 가지고 분사되는 이유는 실험에 적용된 선형분사기의 경우 슬릿이 노즐축 기준으로 15° 방향으로 형성되어 있기 때문이다. 수직측정지점은 노즐로부터 수평방향으로 5cm,

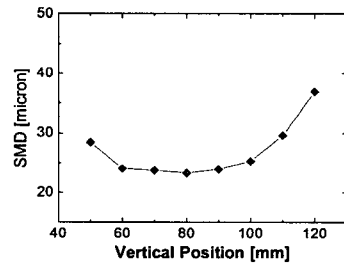


(a) Vertical line

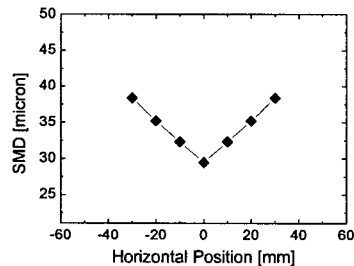


(b) Horizontal line

**Fig. 2** PDA test points



(a) Vertical line



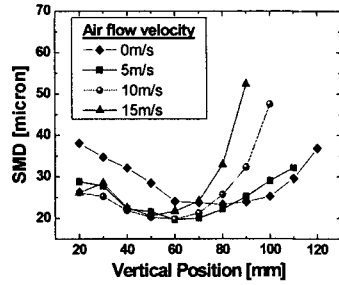
(b) Horizontal line

**Fig. 3** Initial droplet size distribution [Airflow velocity: 0m/s, Fuel temperature: 298K]

수직방향으로 2cm 떨어진 지점을 첫 측정점으로 하여 수직방향으로 1cm씩 내려가면서 입자크기를 측정하였다.

3.2 대기상태에서의 팬형분무 입자 분포

Fig. 3은 대기 상태에서 수직측정지점 및 수평측정지점에서의 팬형분무 입자분포를 나타내고 있다. 결과를 통해서 수직측정지점의 상부에서 전체적으로 작은 입자들의 비중이 큰 것을 알 수 있으며, 분무 주류의 하부에서는 초기운동량을 유지하고 있는 큰 입자들이 많이 존재하는 것을 알 수 있다. 수평측정지점의 경우 선형 분무의 좌우 양단으로 갈수록, 초기 운동량을 유지하고 있는 큰 입자의 분포가 점차 증가함을 확인할 수 있다.

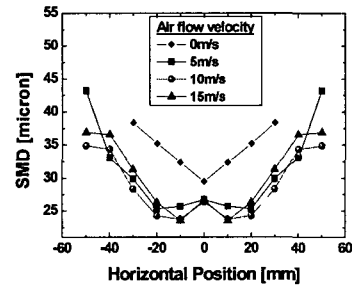


(a) Vertical line

3.3 주변조건에 따른 팬형분무 입자분포 변화

3.3.1 횡방향 유속의 영향

Fig. 4는 수직측정지점 및 수평측정지점에서 횡방향 유속에 따른 SMD(Sauter mean diameter)를 나타내고 있다. 각각의 측정지점에서의 SMD 값은 모든 분사기간 동안에 수집된 모든 입자크기를 이용해서 계산된 값이다. 수직측정지점의 입자크기 분포를 살펴보았을 때, 유동속도가 증가함에 따라 분무 상류 쪽의 SMD 값이 대폭 감소하고, 하류 쪽의 SMD 값이 대폭 증가함을 알 수 있으며, 이는 작은 크기의 입자가 상류 쪽으로 유입되고 상대적으로 운동량이 큰 입자들은 분무 하류에 잔류하기 때문이라 판단된다. 이러한 입자의 재배치는 유동속도의 증가에 따른 수평측정지점의 입자크기 분포 변화에서도 살펴볼 수 있다. 모든 지점에서의 입자크기는 유동속도의 증가에 따라 전체적으로 감소한 것을 확인할 수 있으며, 유동속도의 증가에 따라 분무 중앙부분의 SMD 값이 대폭 감소하였음을 알 수 있다. 이러한 수평방향과 수직방향에서의 입자의 재배치는 유동 속도의 증가에 따른 공기유동의 유입에 의한 것으로 판단되며, 이러한 공기의 유입은 작은 입자들을 분무 상류방향 그리고 분무 중심방향으로 동시에 유입시킨다.



(b) Horizontal line

Fig. 4 Droplet size distribution at different airflow velocities [Fuel temperature: 298K]

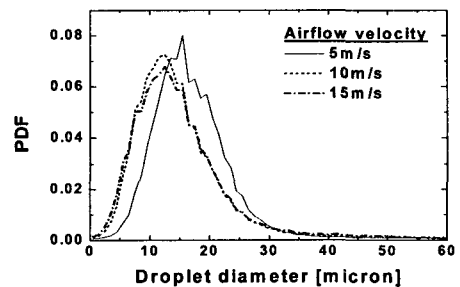


Fig. 5 Probability density function under varied airflow velocities [Fuel temperature: 298K]

Fig. 5는 횡방향 유속에 따른 입자크기의 변화를 확률밀도함수 (PDF; probability density function)로 나타내고 있다. 확률밀도함수는 수직측정지점과 수평측정지점에서 취득된 모든 입자들을 취합하여 계산되었다. 결과를 통해 횡방향 유속이 증가할수록 전반적으로 작은 입자의 분포가 증가하는 것을 살펴볼 수 있다. 이러한 현상은 공기유속

의 증가에 의해 대류물질전달이 증가됨으로써 입자의 증발이 촉진되었기 때문이다. 물론 유속의 증가에 따라 입자의 합착(coalescence)현상이 발생할 수도 있으나, 본 연구결과를 통해서 입자의 증발현상이 작은 입자분포를 증가시키는데 크게 영향을

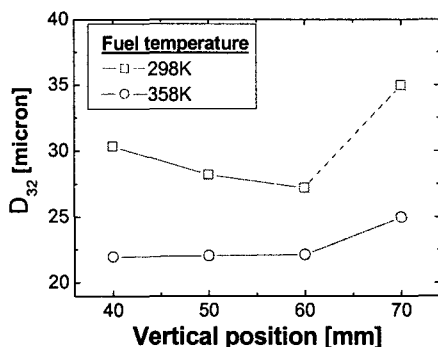


Fig. 6 Droplet size distribution at different fuel temperatures [Airflow velocity: 10m/s, A vertical line horizontally 50mm away from the nozzle axis]

미쳤음을 판단할 수 있다. 그러나 큰 입자영역을 보면, 유속의 증가에 따라 큰 입자분포가 미세하게나마 증가하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 적용된 속도범위에서 연료의 흡착현상 역시 발생했음을 말해준다. 이러한 결과는 적용속도 범위에서 계산된 웨버수가 각각 0.027, 0.110, 0.246이라는 사실에서 확인할 수 있다.<sup>(12)</sup>

### 3.3.2 연료온도의 영향

Fig. 6은 연료온도의 변화에 따른 수직축정지점에서의 입자분포변화를 나타내고 있다. 횡방향 유동속도에 의한 경향성과는 달리 연료온도가 증가하였을 때, 모든 수직축정지점에서의 SMD값은 감소하였다. 이는 연료온도 증가에 따른 국부적인 기포핵(bubble nuclei)의 형성으로 인한 분열길이(break-up length)의 감소와 입자의 표면장력 및 점성의 감소로 인해 2차 분열이 증대되었기 때문이다.<sup>(2,8)</sup>

그러나 수직축정지점의 위치에 따라서 SMD가 감소하는 정도는 다르게 나타났다. 분무 상류의 경우, 연료온도가 증가하였을 때 SMD값의 감소 정도가 크게 나타난 반면, 분무 하류로 내려갈수록 그 감소폭이 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이는 횡방향 유속이 일정한 상태에서 연료온도의 증가에 의해 작은 입자가 분무 상류로 유입되는 정도가 커짐을 의미한다.

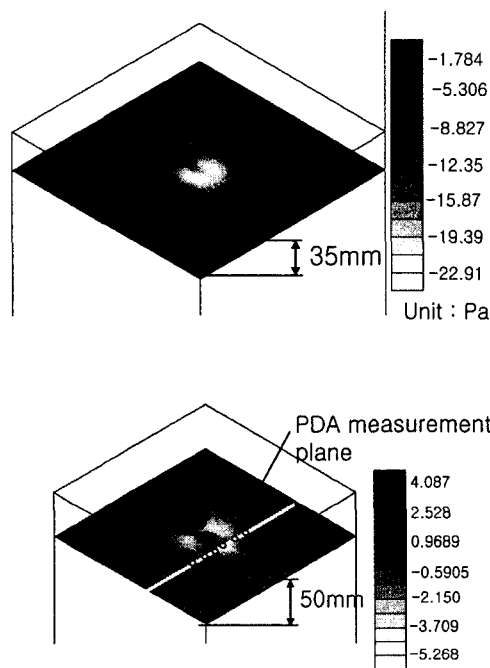
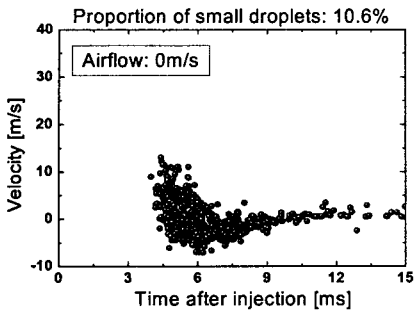


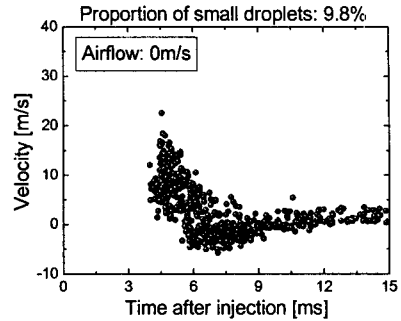
Fig. 7 Air pressure near the spray at different axial locations with the airflow velocity of 10m/s

### 3.4 공기유입 특성 및 고찰

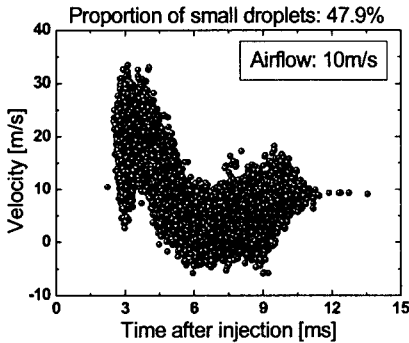
입자의 재배치 현상을 일으키는 가장 중요한 원인은 분무주변 압력의 변화에 따른 공기유입특성의 변화에 의한 것이라고 판단되었으며, 이러한 논의를 검증하기 위하여 분무 우측의 정압 및 유입되는 입자의 분포를 3차원 모사기법 및 속도결과를 통해서 살펴보았다. 모사기법의 경우 Eulerian-Lagrangian 방법이 이용되었으며 이를 STAR-CD를 통해서 구현하였다. 분무가 존재하는 부분은 2.5mm×2.5mm×2.5mm의 격자를, 그 외의 부분은 5mm×5mm×5mm의 격자를 형성하였다. Fig. 7에 나타난 모사결과를 통해 10m/s의 공기유동이 공급되었을 시, 분무 우측의 공기압력이 강하하는 현상을 확인하였으며, 강하정도는 축방향 거리가 증가함에 따라 점차 감소하였다. 이러한 축방향 거리에 따른 압력 차이는 공기의 유입을 유도하게 되며, 이에 의해 작은 입자들이 분무로 재유입되는 결과를 가져오게 된다.



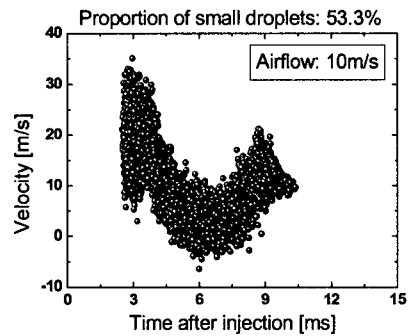
(a) Airflow velocity: 0m/s



(a) Airflow velocity: 0m/s



(b) Airflow velocity: 10m/s



(b) Airflow velocity: 10m/s

**Fig. 8** Temporal droplet velocity at points of vertical line [Small droplet group: Droplet size <math>< 15 \mu\text{m}</math>; Airflow 0m/s: 6cm location, Airflow 10m/s: 5cm location]

**Fig. 9** Temporal droplet velocity at points of horizontal line [Airflow 0m/s: 6cm location, Airflow 10m/s: 5cm location]

공기유속에 따른 유입 공기유동의 특성을 PDA를 통해서 측정된 속도결과를 통해서도 살펴볼 수 있다. 이는 실제적으로 공기가 분무 방향으로 유입되는지, 그리고 유입되는 입자 중 작은 입자의 함유 비율이 얼마인지에 대한 기본적인 정보를 제공할 것이라 기대하였다. Fig. 8과 9는 수직측정지점과 수평측정지점에서 시간에 따른 입자의 속도분포 변화와 유입되는 입자 중  $15 \mu\text{m}$  이하의 작은 입자 비율을 나타내고 있다. 수직방향(Fig. 8)의 경우 측정 지점은 0m/s 조건에서는 6cm 지점이고, 10m/s 조건에서는 5cm 지점이었다. 수평방향(Fig. 9)의 경우 측정 지점은 0m/s와 10m/s 모두 중심으로부터 1cm 지점이었다. 이 측정점들은 모두 각 조건에서 최소의 입자크기가 분포되고, 흡입유동에 의해 가장 영향을 받는 지점들이라 판단하여 설정되었다. 결과에서 양의

속도 값은 입자가 유동방향으로 진행됨을 의미하며, 음의 값은 유동과 반대방향 즉 분무 쪽으로 재유입됨을 의미한다. 작은 입자의 비율은 음의 속도를 가지는 전체 입자 개수 중에서  $15 \mu\text{m}$  이하의 입자가 차지하는 비율을 나타낸다. Fig. 8과 9을 통해서 살펴보았을 때 공기유동이 없는 상태에서 와류에 의해 작은 입자들이 분무 쪽으로 유입되는 것을 알 수 있다. 그리고 유입되는 입자 중 작은 입자가 차지하는 비율이 수직방향 및 수평방향에서 각각 10.6%와 9.8%였다. 그러나 유동속도가 10m/s로 증가하였을 때는 유입되는 입자 중 작은 입자가 차지하는 비율이 유동이 없을 때보다 5배 정도(수직방향: 47.9%, 수평방향: 53.3%) 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수직 및 수평방향에서 유동속도 증가에 의해 작은 입자의 유입정도가 증가하여 분무 상류 및 중심부의 SMD값이 감소한다는 설명을 뒷받침 한다.

3.5 입자분포의 변화가 연소에 미치는 영향에 대한 고찰

앞선 결과에서 유동의 속도 증가 및 연료온도의 증가에 따라 전체적인 입자크기는 감소하게 되며, 이로 인해 직접분사식 가솔린엔진의 균일 혼합연소특성이 개선될 것이라 예상할 수 있다. 성층연소의 경우, 분무 내부 입자크기의 재배치는 최적의 점화위치와 점화시기를 결정하는데 중요한 영향을 미치게 된다. 노즐 근처에서는 실제적으로 초기 유동속도는 10m/s 정도이나 분무 자체가 가지는 속도는 이보다 훨씬 큰 40m/s 이상이 되며, 이는 분무 상단에서 수평방향 유동이 미치는 영향은 무시할 만한 것임을 말해 준다. 그러나 입자의 대부분이 운동량을 상실한 분무 하류에서는 공급되는 수평방향 유동의 영향이 크게 나타나게 된다. 따라서 이 분무 하류 부분이 피스톤 보울과 상호작용을 하게 된다면 피스톤 보울 형상은 연소를 결정짓는데 매우 중요한 역할을 하게 된다. 피스톤 보울 형상에 의해 유도되는 유동은 입자들을 점화플러그 주변에 위치시키거나 확산시키게 된다. 따라서 이 경우에는 분무와 피스톤의 충돌보다는 피스톤 보울에 의해서 유도되는 유동이 점화플러그 주변 혼합기를 형성하는데 중요한 영향을 미치게 된다. 또한 유동에 의해 분무 주류에서 작은 입자들이 분리되게 되면 분무의 액상과 기상이 분리되어 존재함으로써, 액상 연료가 더 증발할 수 있는 가능성을 제공하게 된다. 이러한 유동에 의한 영향은 혼합이 잘 된 혼합기를 점화플러그 주변에 위치시킬 수 있는 가능성을 가진 동시에 분무를 과도하게 확산시켜 점화플러그 주변의 혼합기를 희박하게 할 수 있는 가능성도 있다.

또한 연료온도 변화에 의한 입자크기 및 입자분포의 변화는 동일한 유동 하에서 점화플러그 주변 혼합기 형성에 크게 영향을 미치게 된다. 연료온도 증가에 따른 입자크기의 감소는 분무의 운동량을 감소시키고 피스톤 보울에 의해 유도되는 외부유동에 의해 작은 입자들을 더 확산시킴과, 피스톤 보울과의 상호작용을 약화시켜 혼합기가 점화플러그 주변에 보다 희박하게 형성될 가능성을 가지게 된다.

이러한 경향성은 연료온도의 변화에 따른 연소실 내 혼합기 분포의 변화 및 형광강도의 변화를 나타낸 Fig. 10 및 Fig. 11을 통해서 재

인할 수 있었다. 분사시기는 BTDC 40°로 동일하게 적용하였다. Fig. 10을 통하여 연료온도가 증가할수록 초기 분무의 운동량이 약화되어 분무의 축방향도달거리는 감소하고 반경방향 도달 거리는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 연료온도의 증가에 따른 입자크기 감소에 의해 분무가 가지는 운동량이 감소함을 나타낸다. 또한 분사 후 40°가 되면, 연료온도가 높았을 때 점화플러그 주변에 연료가 분포되는 영역이 넓어지고 형광강도가 낮아짐을 확인할 수 있다. 이러한 형광강도의 정도 및 연료분포는 Fig. 11의 형광강도 분석결과를 통해 확인할 수 있다. 점화플러그 주변에 형성된 혼합기를 하나의 선 또는 평면으로 살펴보았을 때 연료온도가 증가하였을 때 혼합기가 분포하는 영역은 넓어지고 형광강도의 최대값은 감소하는 결과를 확인하였다. 이는 연료온도 증가에 의해 작아진 입자들이 피스톤 보울에 의해서 유도되는 유동에 의해 보다 넓은 기상영역을 형성했기 때문이며 또한 분무의 운동량이 약화되어 피스톤 보울에 의해 유도되지 않고 보다 넓은 영역으로 확산되었기 때문이라 판단할 수 있다. 이 결과를 통해 분무의 운동량 및 공기유동의 변화에 의해 혼합기 형성과정이 크게 영향을 받음을 나타내며, 앞선 설명을 뒷받침하는 근거라고 할 수 있다.

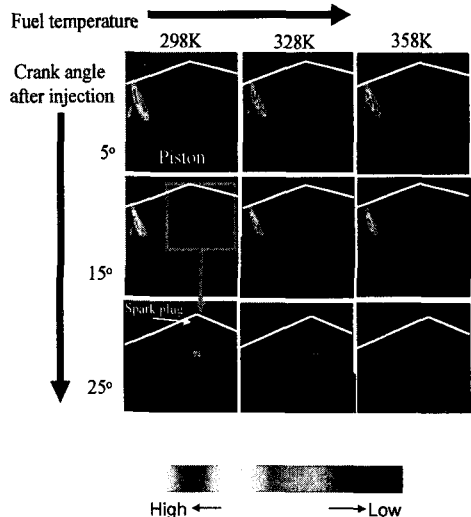
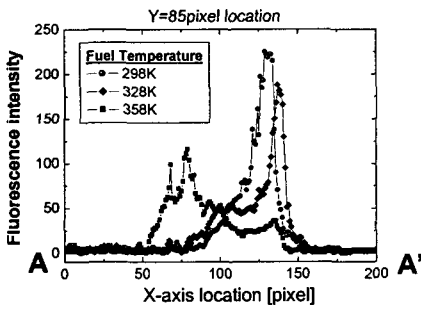
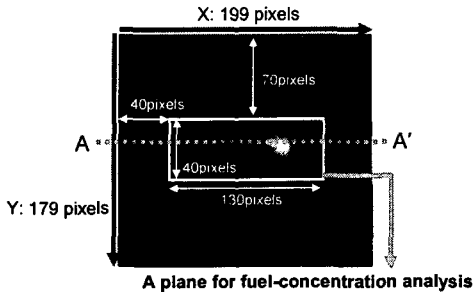
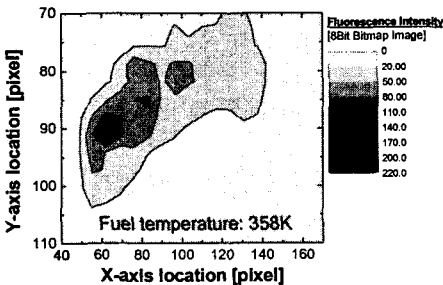
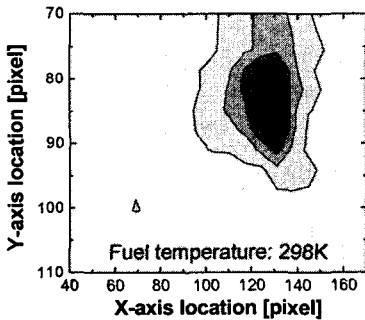


Fig. 10 LIF images at different fuel temperatures

4. 결론



(a) A-A' line



(b) A plane for intensity analysis

Fig. 11 In-cylinder fluorescence intensity analysis at different fuel temperatures

팬형 분무의 초기입자분포 및 주변조건 변화에 따른 입자분포의 변화를 살펴보았으며, 이러한 입자분포의 변화가 연소에 미치는 영향에 대해서 고찰해 보았다. 연구를 통해서 얻어진 주요 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 팬형분무의 대기상태 입자크기는 운동량이 강한 분무의 외곽과 하류부분에서 상류와 중심부에 비해서 더 크게 나타났다.

(2) 횡방향 유속이 증가할수록 분무에 의해 유도되는 와류에 의해 크기가 작은 입자들이 분무 중심부 및 상류로 유입되는 정도가 커짐을 3차원 모사기법 및 입자속도 결과를 통해 확인하였다. 이로 인해 분무 상류 및 중심부의 입자크기가 감소하는 결과를 나타냈다.

(3) 횡방향 유속의 증가에 따라 분무 전체의 입자크기는 점차 감소하는 경향성을 나타냈다.

(4) 연료온도의 증가에 따라 측정지점 모두에서 분무의 입자크기는 감소하는 경향성을 나타냈다. 또한 연료온도의 상승에 따라 작은 입자가 분무 상류로 유입되는 정도가 증가하여 분무 상류부분의 입자크기 감소정도가 하류에 비해서 큰 경향성을 나타냈다.

(5) 분무의 운동량 및 외부 힘의 변화는 입자분포를 변화시킴으로써 성층연소에 영향을 미치는 중요한 인자이고, 운전조건에 따라 최적화되어야 함을 연소실 내 혼합기 분포를 통해서 살펴볼 수 있었다.

후기

본 연구는 연소기술연구센터(CERC) 및 미래형 자동차사업단의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

(1) Zhao, F., Lai, M. C. and Harrington, D. L., 1999, "Automotive Spark-ignited Direct-Injection Gasoline Engines," *Prog. Energy Combustion Sci.*, Vol.25, pp. 4~8.  
 (2) Moon, S., Choi, J., Abo-Serie, E. and Bae, C. 2005, "The Effect of Temperature on Spray and



- Combustion Characteristics in a Single Cylinder DISI Engine," SAE Paper 2005-01-0101.
- (3) Choi, Y., Sohn, J., Cha, G. and Kim, D. 2001, "Effects of Different Fluid Properties on Velocity and Size of Droplets from Pressure-Swirl Nozzles," *2001 KSME Annual Spring and Fall conferences*, Vol. 1, No. 4, pp. 909~914.
- (4) Honda, T., Kawamoto, M., Katashiba, H., Sumida, M., Fukutomi, N. and Kawajiri, K., 2004, "A Study of Mixture Formation and Combustion for Spray Guided DISI," SAE paper 2004-01-0046.
- (5) Park, Y. and Lee, C., 2001, "Development of Gasoline Direct Swirl Injector," *Transactions of KSME B*, Vol. 25, No. 1, pp. 78~86.
- (6) Abe, S., Sonoda, Y., Suzuki, H., Suzuki, Y. and Basaki, M., 2006, "Development of V-6 3.5-liter Engine Adopting New Direct Injection System" SAE Paper 2006-01-1259.
- (7) Dombrowski, N. and Johns, W. R. 1963, "The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets," *Chemical Engineering Science* 1963 Vol. 18, pp. 203~214.
- (8) Okamoto, A., Sato, T., Shirabe, N. and Anezaki Y., 2001, "Development of Fan Spray Simulation for Gasoline Direct Injection Engines," SAE Paper 2001-01-0962.
- (9) Hayagawa, M., Takada, S., Yonesiga, K., Nagaoka, M. and Takeda, K., 2002, "Fuel Spray Simulation of Slit Nozzle Injector for Direct-Injection Gasoline Engine," SAE Paper 2002-01-1135.
- (10) Choi, J., Moon, S. and Bae, C., 2005, "Spray Characteristics of High Pressure Fan Spray Injector with Various Crossflow Speed," *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 10, No. 3, pp. 38~44.
- (11) VanDerWege, B. A. and Hochgreb, S., 2000, "Effects of Fuel Volatility and Operating on Fuel Sprays in DISI Engine : (1) Imaging Investigation," SAE Paper 2000-01-0535.
- (12) Bayvel, L. and Orzechowski, Z., 1993, "Liquid Atomization," Taylor & Francis Press.