

## 흡입공기분류를 가로지르는 가솔린 분무의 유동특성 연구

### A Study on the Flow Characteristics of Gasoline Spray across the Suction Air Stream

김원태\*, 강신재\*\*, 노병준\*\*\*  
Wontae Kim, Shinjae Kang, Byungjoon Rho

#### ABSTRACT

When a fuel was injected with opening the intake valve of a port fuel injection engine, the spray atomization and flow characteristics in the intake port have a strong influence on the mixture formation of a combustion chamber. Thus, this study was to clarify the spray flow characteristics of the air-assist gasoline spray with fine droplets across the suction air stream in model intake port. For the simulated opening intake valve in port, suction air stream was varied to 10 m/s ~ 30 m/s. And fuel pressure was fixed to 300 kPa, but air assist pressure was varied to 0 ~ 25 kPa for a variable spray conditions. Spray flow trajectory was investigated by means of laser sheet visualization and the measurements of droplet sizes and velocities were made by PDPA system. Measured droplets within the spray flow field were subdivided into five size groups and then, the flow characteristics of droplet size groups were investigated to the spray across a suction air stream.

주요기술용어 : Air-Assist(공기보조), Suction Air Stream(흡입공기분류), Spray Flow Trajectory(분무유동궤적), SMD(Sauter mean diameter), Droplet Size Group(액적크기군), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer),

#### Nomenclature

$a, b$  : constants

$d$  : nozzle orifice diameter, 5mm

$D$  : droplets diameter,  $\mu\text{m}$

$q$  : momentum ratio

$P_a$  : assist air pressure, kPa

$T$  : time after start of injection, ms

$T_i$  : fuel injection duration, ms

$X, Z$  : coordinate

$V$  : suction air streamwise velocity, m/s

$V_n$  : normal velocity, m/s

$v'$ RMS : turbulence velocity of  $v$ , m/s

$v_n'$ RMS : turbulence velocity of  $v_n$ , m/s

$V_s$  : suction air stream velocity, m/s

$\theta$  : injection angle

\* 정회원, 전북대학교 대학원

\*\* 정회원, 전북대학교 기계공학부,  
자동차신기술연구소

\*\*\* 정회원, 전북대학교 기계공학부,  
국책지원사업단

## 1. 서론

포트 분사식 가솔린 엔진의 경우, 저온 시동시 연료 분무의 벽면 부착으로 발생하는 연소실 내에서의 공기와 연료의 이론 혼합비를 고려하기 위하여 더욱 많은 연료가 분사되어 벽부착 연료의 보상이 이루어진다. 또한, 벽부착 연료가 벽류를 형성하여 실린더 내로 유입되면서 불완전 연소로 다량의 미연탄화수소(HC)가 배출된다. 이와 같이 연료의 벽부착으로 발생하는 연료 소비량의 증가와 HC 배출을 감소시키기 위하여 연료 분사시기를 흡기밸브가 열린 상태, 즉 흡입공기 유동 중에 연료 분무를 형성함으로써 연료 액적들이 흡입공기 분류를 따라 실린더 내로 유입되도록 하는 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1)</sup> 또한, 흡입공기 분류에 대하여 일정한 각으로 설치되어 있는 분사기로부터 분출되는 연료분무가 흡입 공기 분류에 의해 실린더 내로 유입되기 때문에 연료 분사기의 미립화 특성이 상대적으로 중요한 역할을 하여 공기-연료의 혼합특성 및 저온상태에서 포트 벽, 밸브 면의 연료 부착으로 인한 배기가스 특성에 영향을 끼치게 된다. 그러므로, 포트 내에서 흡입공기 분류 중에 분사되는 연료분무의 유동특성과 함께 연료분무의 미립화 향상에 대한 연구가 동시에 수행되어야 한다. 이와 같이 주분류인 공기 유동을 가로질러 액체 연료가 분사되는 유동은 일부 연소 시스템에 폭 넓게 적용되고 있다. 특히, 고속의 공기 분류를 가로질러 분사되는 액체 유동은 주로 항공관련 추진장치와 결부되어 오래 전부터 많은 연구가 이루어져 왔다.<sup>(2~5)</sup> 그러나, 가솔린 엔진의 흡기포트 내 형성되는 저속의 공기 분류에 대하여 분사되는 연료 분무에 대한 상세한 연구는 상대적으로 적은 편이다.<sup>(6~8)</sup>

따라서, 본 연구에서는 노 등<sup>(9,10)</sup>의 연구와 같이 상용되고 있는 가솔린 연료분사기의 미립화 향상을 위하여 분사기의 선단에 공기보조 어댑터를 부착하여 연료 분무에 보조공기를 가함으로서

미립화 향상을 고려하였다. 그리고, 분무의 분사각, 흡입공기 유속변화 및 분사기의 분무특성 변화에 따른 흡기포트 내에서 분무의 거시적인 거동을 고속 유동을 가로질러 분사되는 액체유동과 비교하여 고찰하였으며, 분무조건 변화에 의해 형성되는 연료 액적의 유동을 5가지의 액적크기 범위로 구분하여 이들의 유동특성을 각각의 액적크기군에 따라 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2.1 실험장치

흡입공기분류 중에 분사되는 연료분무의 유동 특성 고찰을 위해 Fig. 1과 같이 분무 액적들의 크기와 속도를 계측할 수 있는 실험장치를 구성하였으며 또한, 레이저광을 원통형 렌즈에 투과시켜 막(sheet)으로 만들어 분무 중심을 통과하게 하여 전체적인 분무 거동을 가시화하고 이를 디지털 카메라로 촬영하였다. 핀틀형 연료분사기의 연료 공급을 위하여 공기 압축기와 충전용기를 사용하여 얻은 일정 압력의 압축공기가 연료 탱크의 연료를 가압함으로써 일정한 압력의 연료가 공급되게 하였다. 분무의 미립화 향상 및 분무 특성 변화를 위한 보조 공기는 충전용기에 저장된 압축공기 중 일부를 분사기 하우징의 공기 유입구에 공급하였다. 분사기의 연료 공급압력 및 보조공기압력은 유입구 근처에 정압관을 인출하여 압력센서와 연결하고 검출된 압력을 압력변환기로 관측하였다.

흡입공기 유동은 압송형 송풍기를 역으로 이용하여 발생시켰으며, 송풍기의 회전수를 조절하여 흡입공기 분류의 유속을 변화시켰다. 일정한 흡입공기 분류의 유속은 흡기포트를 모사한 모델 흡기포트의 입구에 4공 피토펜(Pitot tube)을 삽입하여 디지털 마이크로 마노메타를 사용하여 계측하였다. 모델 흡기포트는 70×50×460mm(폭×높이×길이)의 직사각형의 아크릴로 제작하였다. 연료 분무유동을 측정하기 위하여 50×170mm의 관측창을 설치하였다. 측정체적을 통

과하는 액적의 크기와 2차원 유속을 동시에 측정하기 위하여 위상도플러입자분석기(PDPA) 시스템을 사용하였다. 송광부와 수광부는 벤치에 고정하고, 3차원 이송장치에 설치하여 이송함으로써 송광부에서 방사되는 4개의 빔으로 형성되는 측정체적의 위치를 변화시켰다. 연료 분무를 형성하는 액적들의 속도와 크기 데이터는 PDPA 시스템의 신호처리기(Dantec, 58N10)와 연결된 IBM PC를 사용하여 분석하였다.

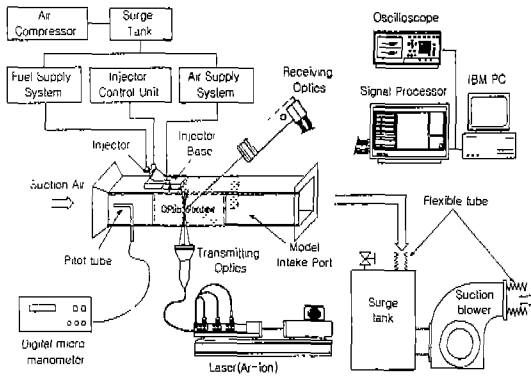


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

## 2.2 측정방법

일정한 흡입공기분류 중으로 분사되는 연료 분무는 연료의 공급압력이 300kPa로 고정된 상태에서 연료분사기간을 5ms로 설정하고, 분사주기를 100ms로 하여 10Hz의 간헐적인 분사가 이루어지게 하였다. 이때 연료의 동적분사량은 12.6 mg/stroke 이었다. 분무의 비렬화 향상을 위하여 공급한 보조공기압력은 15kPa(27.91 g/min)과 25kPa(33.23 g/min)을 사용하였다. 흡입공기 유동에 대한 연료분무의 분사각은 30°, 35°, 40°, 45°로 변화를 주었다. 또한, 흡입공기분류의 유속을 10~30m/s로 변화를 주었다. 측정좌표는 Fig. 2와 같이 연료분사기의 출구 중심과 모델 포트의 교차점을 기준 원점으로 하여 흡입공기분류에 수직인 방향을 Z축, 흡입공기의 분류방향을 X축으로 설정하였다. 흡입공기분류를 가로질러 분사되는 연료분무의 수직방향에 따른 유동특성을

고찰하기 위한 PDPA 측정위치는 흡입공기 분류 방향으로 70mm( $X/d = 14.0$ ) 하류의 분무중심 횡단면에서 벽면으로부터 5mm 떨어진 위치에서부터 10mm 간격으로 5점을 여러 조건에 따라 측정하였다. 또한, 분무 중심 횡단면의 전체적인 분무 유동을 파악하기 위하여 모델 포트의 윗 벽면으로부터 2mm, 아래 벽으로부터 3mm 떨어진 위치의 X-Z 중심 단면을 5mm 간격으로 측정원점으로부터 130mm( $X/d = 26.0$ )의 흡입공기분류의 먼 하류까지 측정하였다. 이 경우, 각각의 분무조건에서 측정체적 내 분무 입자가 도달하지 않는 영역은 측정에서 제외시켰다.

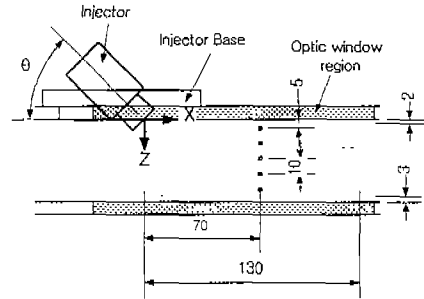


Fig. 2 Measuring positions of PDPA in model port

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 분무 거동 특성

Fig. 3은 흡입공기 분류의 유속 변화에 따라 흡입유동에 대하여 연료가 45°로 분사되는 연료 분무의 거동을 레이저 평면광을 이용하여 가시화하여 촬영한 것이다. 보조공기의 공급이 없는 경우( $P_a = 0kPa$ ), 핀틀형 분사기의 증공형태의 분무 형상이 뚜렷하게 보이고 있다. 즉, 액적들의 밀집도가 희박한 분무 중심영역은 빛의 산란이 적어 어둡게 보이고, 액적 밀집도가 높은 분무 외곽은 많은 액적들에 의해 강한 산란을 일으켜 밝게 나타나고 있다. 그러나, 보조 공기가 공급되면서 증공형태의 분무는 사라지고, 분무 중심부에 액적 밀집도가 조밀한 매우 밝은 영역이 존재하고 있음을 알 수 있다. 흡입공기분류의 유속이 증

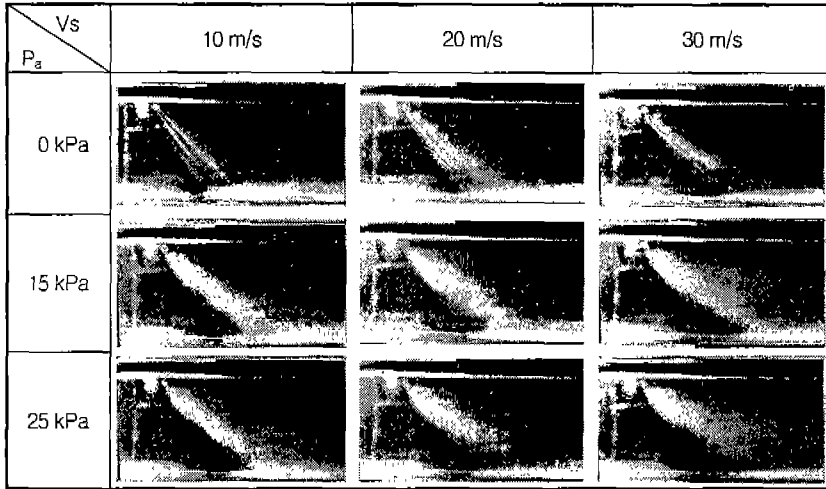


Fig. 3 Photograph of spray behavior in model port by laser sheet for  $\theta = 45^\circ$

가함에 따라 흡입공기 유동방향으로 분무가 휘어서 유동함을 분명하게 볼 수 있으며, 흡입공기분류의 유속이 크고, 보조공기의 공급량이 증가할수록 휘어지는 정도는 크게 나타나고 있다. 이는 보조공기의 공급으로 인한 분무의 미립화 향상으로 흡입공기 유동을 잘 따르는 작은 액적들이 다수 생성되기 때문으로 고려된다.

이들 가시화 사진으로부터 연료 분무의 유동특성을 고찰하고자 Fig. 4에 연료분무와 보조공기의 단위면적 당 운동량과 흡입공기분류의 단위면적 당 운동량 비( $q$ )에 따라 도시하였다. 분사각에 관계없이 운동량비  $q = 18.0$  인 분무조건( $V_s = 10$  m/s,  $P_a = 0$  kPa)의 분무 유동특성이 흡입분류를 가장 잘 따르지 않고,  $q = 4.3$ 인 분무 조건( $V_s = 30$  m/s,  $P_a = 25$  kPa)이 흡입공기 분류의 유동을 가장 잘 따르고 있다. 이는 주분류인 공기에 수직으로 분사되는 액체의 운동량비가 작을수록 공기 분류방향으로 유동특성이 더 휘어져 나타난다는 Inamura 등<sup>(2)</sup>과 Baranovsky와 Schetz<sup>(3)</sup>, Salzman과 Schwartz<sup>(4)</sup>의 결과와는 다소 다른 경향을 보이고 있다. 이런 이유는 이들 연구자들이 고려한 공기분류의 유속이 본 실험조건과 많은 차이를 나타내고, 보조공기의 공급으로 인하여 분무의 미립화가 향상되어 생성되는 크기가

작은 액적들이 흡입공기 유속에 의해 흡입공기 유동을 잘 따라가므로 분무유동특적이 흡입유동방향으로 휘어짐이 크게 발생하기 때문이다. 따라서, 본 연구의 분무조건에서는 노즐로부터 분사되는 유체와 공기 분류의 운동량비와는 무관하고, 보조 공기압력의 증가에 인한 미립화가 향상된 분무가 높은 흡입공기 분류 층을 횡단함으로써 크기가 작은 액적들이 흡입 분류를 잘 따르므로 분무유동특적이 흡입공기 분류방향으로 휘어짐이 크게 나타난다는 사실을 알 수 있다. 그러므로, 분무유동특적을 흡입유동방향거리( $X/d$ )와 분사각( $\theta$ )의 관계로 식(1)과 같이 고려하여 각각의 분무 조건에 따라 곡선맞춤을 하여 상수  $a$ ,  $b$ 를 구하여 Table 1에 나타내었다.

$$\frac{Z}{d} = a \left( \frac{X}{d} \right)^b \sin \left( \frac{2\theta}{3} \right) \quad (1)$$

흡입공기 분류의 유동방향에 수직인 거리에 따른 분무특성을 고찰하기 위하여 Fig. 5에 흡입공기의 유속이 30m/s이고,  $45^\circ$ 로 분사되는 연료 분무에 15kPa의 압력으로 공기가 보조되는 경우에 분사개시 이후 흡입공기 유동방향으로 70mm ( $X/d = 14.0$ ) 떨어진 위치에서 수직방향으로 측정된 액적들의 직경분포와 0.5ms 시간간격으로

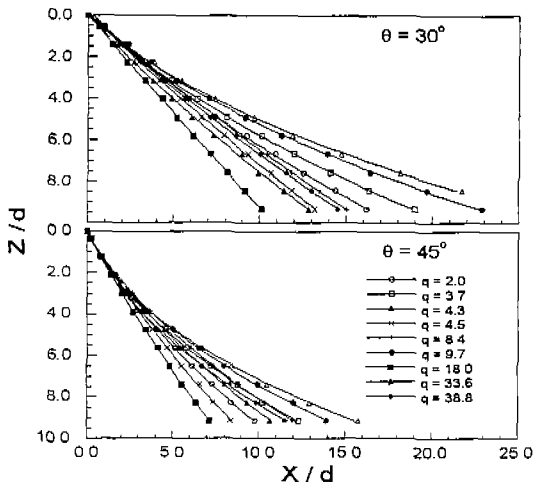


Fig. 4 Spray flow trajectory with momentum ratio

구한 액적들의 개수 및 SMD분포를 보이고 있다.  $Z/d = 1.0$  과  $5.0$  의 SMD는 각각  $30\mu\text{m}$ ,  $35\mu\text{m}$ 로 분사 개시이후 시간변화에 따라 거의 균일한 분포를 나타내고 있으나,  $Z/d = 9.0$  에서는  $85\sim 100\mu\text{m}$  로 시간변화에 따라 다소 SMD의 변동을 보이며 상대적으로 높은 SMD 값을 나타내고 있다. 이와 같이 분무의 충돌벽면에 근접한  $Z/d = 9.0$  에서 SMD가 증가하는 것은  $30\mu\text{m}$  이하의 액적들의 분포는 감소하는 반면, 크기가 큰  $100\sim 200\mu\text{m}$  이상의 직경을 갖는 액적들이 다수 분포하기 때문이다. 따라서, 연료분사기로부터 분사된 연료분무 중 크기가 작고, 운동량이 작은 액적들은 흡입

유속에 의해 쉽게 흡입유동을 따라 유동하기 때문에 수직거리 위쪽에 주로 위치하고 크기가 커 상대적으로 운동량이 큰 액적들은 아래쪽에서 유동함을 알 수 있다.

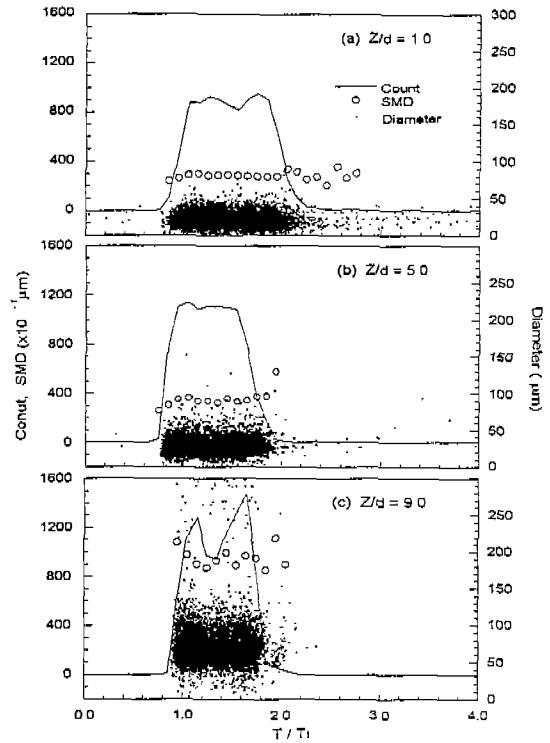


Fig. 5 SMD and droplet diameter distribution after start of injection

Table 1 Constants of spray flow trajectory equation with momentum ratios

$V_s$	$P_a$	$q$	$a$	$b$
10 m/s	0 kPa	18.0	3.07	0.932
	15 kPa	33.6	2.55	0.876
	25 kPa	38.8	2.82	0.809
20 m/s	0 kPa	4.5	2.96	0.876
	15 kPa	8.4	2.48	0.841
	25 kPa	9.7	2.74	0.755
30 m/s	0 kPa	2.0	2.95	0.812
	15 kPa	3.7	2.77	0.772
	25 kPa	4.3	2.82	0.725

### 3.2 분사 개시 이후 시간변화에 따른 분무 유동 특성

시간변화에 따른 연료 액적들의 유동특성을 고찰하기 위하여 분사 개시이후 시간변화에 대하여 0.5ms 단위로 시간구간을 나누어 Fig. 6에 분사 각 45°에서 수직방향속도성분을 평균한 값( $V_n$ )과 파동성분( $v_n'$ )을 RMS한 값을 흡입공기 유속( $V_s$ )으로 나누어 시간 분해한 수직평균속도와 난류강도를 수직거리 변화에 따라 도시하였다. 흡입공기 유속이 10m/s로 작은 경우,  $Z/d = 9.0$ 인 분무 충돌벽에 가까운 위치에서 수직방향의 시간분해 평균속도가 분무초기에 가장 높게 나타나고 있으며, 분사기와 가까운 수직거리  $Z/d = 1.0$ 에서 가장 작은 수직방향속도를 보이고 있다. 또한,  $Z/d = 9.0$  위치에서 수직방향의 파동속도의 난류강도는 주분무가 통과하는 시간대에서 높게 나타나고 있으며,  $Z/d = 1.0$ 에서는 분사 개시 이후의 시간변화에 따라 가장 낮은 수직방향 성분의 난류강도분포를 보이고 있다. 이런 현상은 분무가 45°의 각을 이루고 분사된 상태에서 흡입유동의 수직방향으로 축정이 이루어졌기 때문에 분사기와 가까운 수직거리에서는 운동량이 상대적으로 작고 크기가 적은 액적들이 흡입공기 유동의 영향을 크게 받아 균일한 속도를 이루기 때문에 이들의 파동속도는 작은 값을 나타내고 있다. 그러나,  $Z/d = 9.0$ 의 분무 충돌벽면 근처에서 주분무 영역 시간대에서 높은 난류강도를 보이는 것은 분무가 벽면으로부터 충돌한 이후 벽면으로부터 튀어 오르는 액적들이 갖는 작은 음의 수직속도 때문으로 생각된다. 흡입공기 유속이 30m/s로 빠른 경우, 강한 흡입공기 유동 때문에  $V_s = 10$ m/s인 경우 최대 수직방향속도를 나타낸  $Z/d = 9.0$  위치에서 흡입공기 유속의 35% 이하로 작은 값을 나타내고 있다. 또한, 흡입공기 유속이 작은 경우에 나타났던 분무 충돌벽면 근처의 높은 수직방향성분의 난류강도분포는 다른 수직방향 거리와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이로 보아, 충돌벽면 근처에서 벽면 충돌 후 튀어 오르는 액적들 뿐만 아니라 흡입공기 유동의 모든 수직

거리에서 강한 흡입공기 유속에 의해 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 그러나,  $Z/d = 1.0$ 인 분사기가 부착되어 있는 벽면 근처에서는 흡입 유속에 관계없이 분사초기와 말기에 음의 속도가 계속되고 있다. 이로부터 분사기 선단에 의해 생성되는 후류의 영향으로 형성되는 재순환영역의 존재를 확인할 수 있다. 이런 재순환영역에 의해 포트의 위쪽 벽면에 연료 액적의 부착으로 벽류가 형성되기 때문에 분사기 선단의 형상을 고려한 포트의 형상 설계가 반드시 이루어져야 한다.

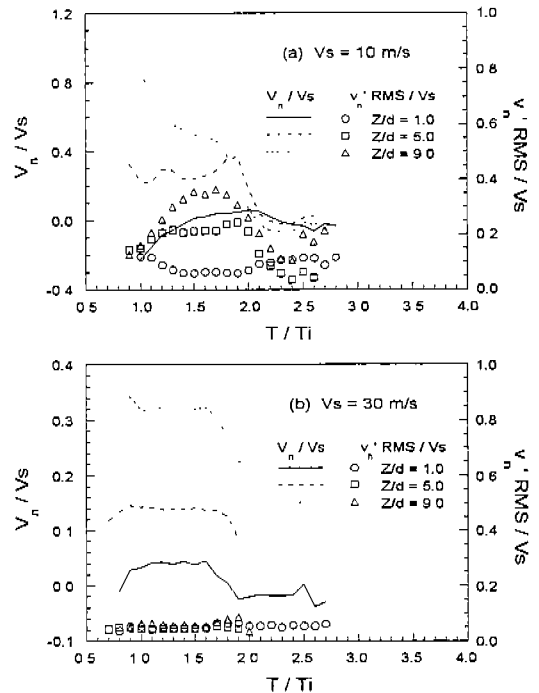


Fig. 6 Normal velocity and turbulence intensity after start of injection along normal distance

Fig. 7은 Fig. 6과 동일한 조건에서 흡입공기 유동방향의 시간분해 평균속도와 난류강도분포를 보이고 있다. 수직방향속도의 시간 변화에 따른 분포와 유사하게 흡입공기 유속이 10m/s인 (a)의 경우는 분사초기에 수직거리가 증가함에 따라 흡입공기의 유속보다 큰 시간분해 평균속도를 나타내고 있다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 점진적으로 흡입유동방향 속도는 감소하며,  $Z/d = 9.0$

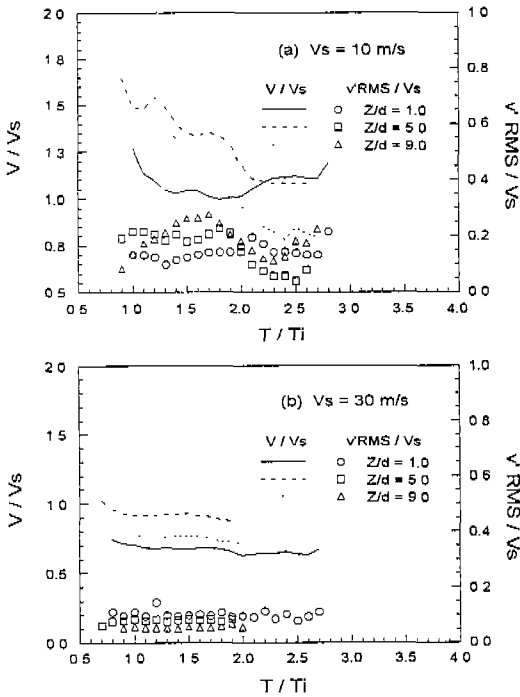


Fig. 7 Air streamwise velocity and turbulence intensity after start of injection along normal distance

인 총돌벽과 근처에서  $T/T_i = 2.0$  시간 이후부터는 흡입공기의 유속보다 작은 속도를 보이고 있다. 이는 분무가 벽면 충돌후 상대적으로 운동량이 감소된 액적들이 튀어 오르기 때문으로 생각된다. 또한, 시간변화에 따른 난류강도는 수직거리에 따라서 구별할 수 있을 정도의 큰 차이는 보이지 않으나, 각각의 수직거리에서 분사개시 이후의 시간변화에 따른 난류 폭은 크게 나타나고 있으며, 충돌 벽면 근처인  $Z/d = 9.0$  위치에서는 수직방향성분의 난류강도분포와 유사하게 주변부 영역 대에서 높은 난류강도를 나타내고있다. (b)와 같이 흡입공기 유속이 30m/s로 증가함에 따라 수직거리에 따른 흡입유동방향 시간분해 평균속도는  $Z/d = 5.0$ 의 분무초기영역을 제외하고는 대체적으로 흡입공기 유속보다는 작게 나타나고 있으며, 시간이 경과함에 따라 거의 일정한 속도분포를 보이고 있다. 이로부터 보다 강한 흡

입공기 유속에 의하여 연료 액적들이 보다 안정된 유동분포를 이룬다는 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 수직방향 거리에 무관하게 대략 15%의 난류강도를 보이며, 시간변화에 따라 거의 균일한 분포를 나타내고있다. 따라서, 흡입공기 유속이 증가함에 따라 분무 유동장은 흡입공기의 유동에 의해 지배적인 영향을 받아 액적들은 더욱 균일한 속도분포를 유지한다는 사실을 알 수 있다.

흡입공기 유동에 대하여 분사되는 연료의 분사각 변화에 따른 분무 유동의 시간변화 특성을 고려하기 위하여 Fig. 8에 흡입공기 유속이 20m/s 이고,  $Z/d = 5.0$ 에서 수직방향속도의 시간분해 평균속도와 난류강도분포를 도시하였다. 보조공기의 공급이 없는 (a)의 경우, 분사초기에는 분사각에 관계없이 낮은 속도분포를 보이고 있으나, 공기가 보조되는 (b)의 경우는 분무초기에 높은 속도분포를 보이고, 주변부 영역에서는 시간변화에 따라 거의 안정된 속도분포를 유지하고 있다. 이는 보조 공기의 공급이 이루어지면서 분무초기 영역에 보조공기의 운동량이 부가되기 때문으로 생각된다. 보조 공기의 공급 유무에 관계없이 연료의 분사각이 작을수록 높은 수직방향속도분포를 보이며, 분사각이 보다 큰 경우에는 보다 낮은 수직방향속도분포를 보이고 있다. 이는 흡입공기 분류를 가로질러 분사되는 연료분무의 분사각이 작을수록 흡입공기분류에 의해 수직방향의 운동량 손실이 작게 나타나고, 연료분무의 분사각이 클수록 수직방향의 운동량손실이 크게 일어남을 알 수 있다. 따라서, 흡입공기분류에 분사되는 연료분무가 벽면과 충돌하여 벽류를 형성하지 않고 흡입유동을 따라서 유동하기 위해서는 연료분무의 분사각이 중요한 인자임을 알 수 있다. 분사개시 이후 시간변화에 따른 난류강도분포는 공기 보조 유무에 관계없이 10% 미만의 낮은 분포를 이루고 있으며, 보조공기가 공급되는 경우, 연료분무의 분사각에 관계없이 거의 균일하고 안정된 분포를 보이고 있다. 이로부터,  $Z/d = 5.0$ 인 수직거리에서 시간평균 수직속도가 주변부 기간에 보

다 안정된 분포를 보이므로 시간변화에 따른 액적들의 수직방향의 파동속도는 연료분무의 분사각 변화에 관계없이 거의 일치하는 경향을 나타내고 있다.

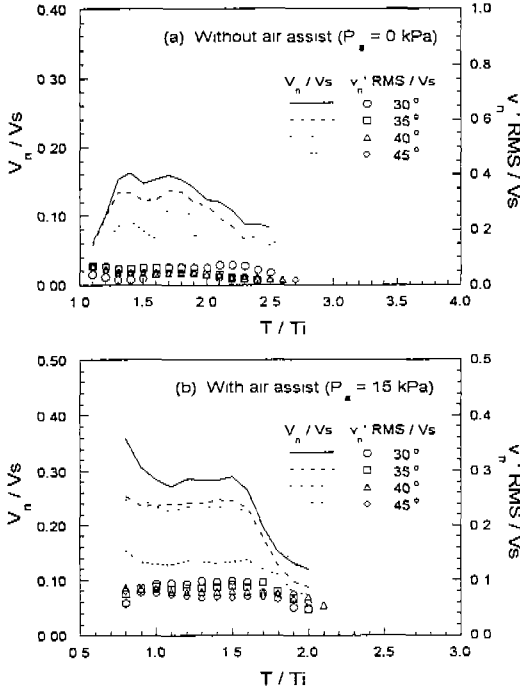


Fig. 8 Normal velocity and turbulence intensity after start of injection with injection angle

### 3.3 액적크기에 따른 분무 유동 분포

흡입공기분류를 가로질러 분사되는 분무 유동장 내의 액적들의 유동특성을 수직거리 변화에 따라 고려하기 위하여 Figs. 9와 10에 각각 수직방향 평균속도와 흡입유동방향 평균속도를 흡입공기 유속으로 무차원하여 나타내었다. 액적들은 크기별로  $0\mu m < D \leq 10\mu m$ ,  $10\mu m < D \leq 30\mu m$ ,  $30\mu m < D \leq 60\mu m$ ,  $60\mu m < D \leq 100\mu m$ ,  $D > 100\mu m$ 의 5가지로 분류하고, 이들 크기군들의 유동특성을 고찰함으로써 액적크기에 따른 유동특성을 고려하였다. Figs. 9와 10은 흡입 유속이 30m/s이고, 분사각이 45°로 동일하다. 보조공기가 없는 Fig. 9 (a)의  $Z/d = 1.0$  수직거리에서는 모든 액적크기군

들이 음의 값을 나타내고있다. 따라서, 이 측정위치에서는 재순환 유동이 발생하고 있음을 짐작할 수 있다. 그러나, 보조 공기가 공급되면서  $Z/d = 1.0$  위치에서는 양의 속도를 나타내는 것으로 보아 공기보조에 의하여 형성된 유동장에 의해 다수의 액적들이 유동에 영향을 받음을 알 수 있다. 공기 보조 여부에 관계없이 수직거리가 증가함에 따라 대부분의 액적크기군들의 수직방향 평균속도는 증가하고 있으나,  $Z/d = 9.0$ 의 위치에서  $10\mu m < D < 30\mu m$  액적크기군의 수직방향 평균속도는 감소하고 있다. 이는 보조공기의 공급이 없을 때 뚜렷하게 보이고 있다. 이와 같이  $Z/d = 9.0$ 의 벽면 근처에서  $10\mu m < D < 30\mu m$ 의 액적크기군의 속도가 감소하는 이유는 액적들의 벽면 충돌 이후 튀어 오르는 액적들의 상당부분이  $10\mu m < D < 30\mu m$  액적크기 범위를 갖기 때문이라 생각된다. 그러나, 공기가 보조됨에 따라  $Z/d = 9.0$ 의 벽면 근처에서  $10\mu m < D < 30\mu m$ 의 수직속도의 감소는 다

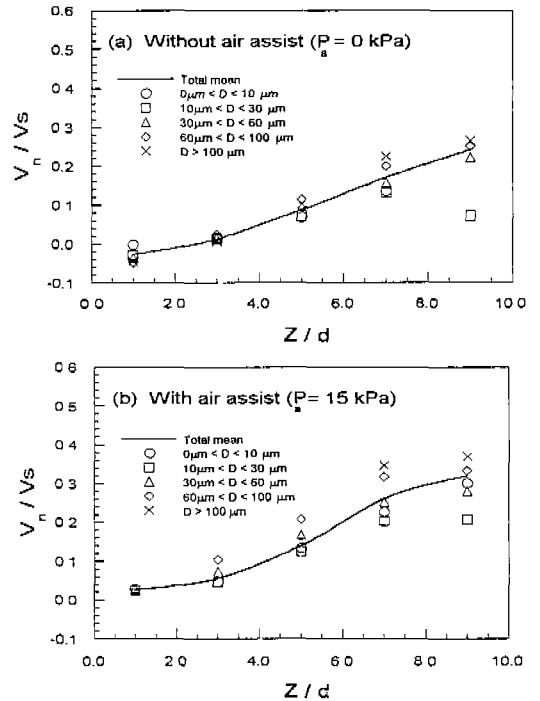


Fig. 9 Profile of normal mean velocity with droplet size group



소 분화되고 있다. 이는 앞서 논의한 것과 같이 보조공기에 의해 유동장이 영향을 받기 때문으로 판단된다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 동일한 분무조건에서 흡입유동방향의 평균속도분포는 공기 보조 유무에 관계없이 작은 크기의 액적크기군이 높은 속도분포를 보이고 있으며 특히, 보조공기의 공급이 없는 (a)의 경우 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러므로, 흡입공기 유동에 수직인 각각의 측정 위치에서 크기가 작은 액적들일수록 흡입공기 유동을 잘 따라감을 확인할 수 있다. 공기 보조가 없는 (a)의 경우,  $100\mu\text{m}$  이상의 크기가 큰 액적들은  $Z/d = 2.0$ 에서는  $30\mu\text{m}$  이하의 작은 크기의 액적들과 약 60% 정도의 상당히 큰 속도차를 보이나, 수직거리가 증가함에 따라 흡입유동방향 속도는 증가하여 분무의 충돌 벽면에 근접한 위치인  $Z/d = 9.0$ 에서는 대략 10% 이하의 속도 차이를 보이고 있다. 이는  $Z/d = 9.0$ 에서 분무의 벽면 충돌로 운동량 손실이 큰 작은 크기의 액적들이 다수 측정되어지기 때문으로 생각된다. 공기 보조가 이루어지는 (b)의 경우, 액적들의 흡입유동방향 평균속도는  $Z/d = 5.0$ 을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않으며,  $100\mu\text{m}$  이상의 크기가 큰 액적들은  $Z/d = 7.0$  이후의 수직거리에서 보이고 있다. 따라서, 이들 평균속도분포로부터  $100\mu\text{m}$  이상의 크기가 큰 액적들은 흡입공기 분류의 영향을 크게 받지 않고, 상대적으로 큰 운동량을 유지하면서 아래 벽면으로 충돌이 이루어지나,  $30\mu\text{m}$ 이하의 작은 액적들은 상대적으로 수직방향 운동량의 감소가 크고 쉽게 흡입공기에 의해 영향을 받음을 알 수 있다.

흡입공기 분류를 가로질러 분사되는 연료분무의 분무 유동장의 특성을 고찰하기 위하여  $X/d = 0.0$ 의 분사기 출구 원점으로부터 흡입유동방향으로  $X/d = 26.0$  까지 확장하여 분무 중심 평면의 각각의 측정점에서 얻은 전체 액적들에 대하여 Fig. 11에 유속을 벡터로 평균크기인 SMD를 원의 크기로 하여 함께 도식적으로 표현하였다. Fig. 11은 연료의 분사각이  $45^\circ$ 이고, 흡입공기의

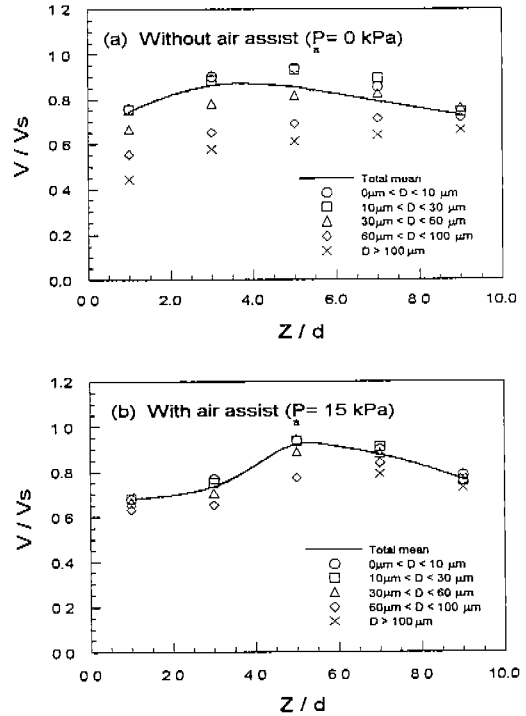
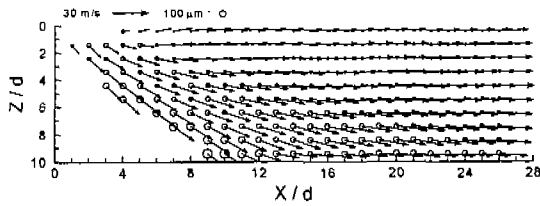
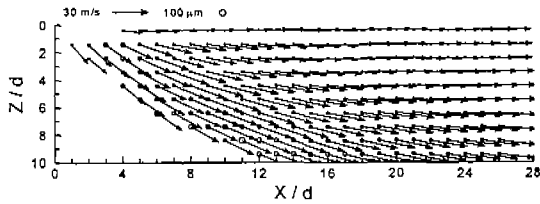


Fig. 10 Profile of air streamwise mean velocity with droplet size group

유속이  $30\text{ m/s}$ 로 공기 보조가 없는 (a)의 경우, 분사기 바로 후면에서는 적은 SMD 크기를 보이며, 유동방향이 위쪽 벽면을 향함을 알 수 있다. 이는 앞서 고려한 것처럼 분사기 후면에 발생하는 후류의 영향으로 생각된다. 또한, 흡입공기 분류와 분무가 접하는 영역에서 보다 높은 SMD 분포를 보이고 있으며, 거의 유동방향이 휘어짐이 없이 초기 분사기로부터 분출되는 분무각을 유지함을 볼 수 있다. 이는 흡입공기 분류에 영향으로 작은 크기의 액적들은 쉽게 흡입공기 분류를 따라 유동하고 보다 운동량이 큰 액적들이 초기 유동방향을 유지한 채로 유동하기 때문이다. 보조공기가 공급되어지면서 (b)와 같이 미립화가 향상되어져 전체 분무 유동장에 걸쳐 공기 보조가 없는 (a)와 비교하여 보다 작은 SMD 분포를 나타내고 있다. 흡입유동의 하류로 갈수록 액적의 크기들은 감소하여 SMD는 점진적으로 감소



(a) without air assist( $P_a = 0$  kPa)

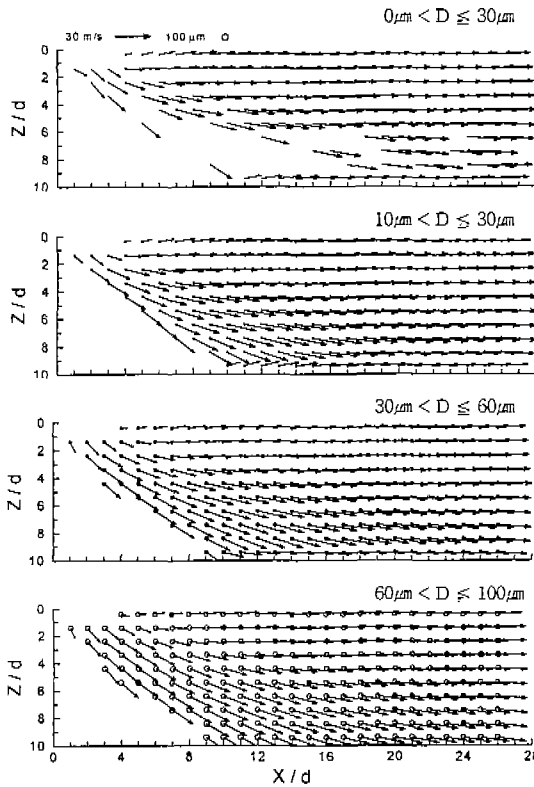


(b) with air assist( $P_a = 25$  kPa)

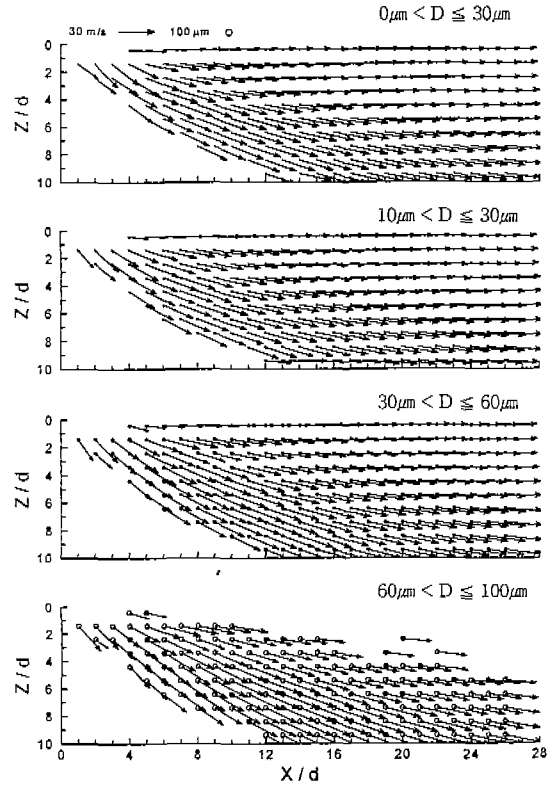
Fig. 11 Plots of mean velocity and SMD for total droplets( $\theta = 45^\circ$ ,  $V_s = 30$  m/s)

하며, 이들 액적들은 흡입공기 분류를 잘 따라가고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11과 동일한 분무조건에서 유동장을 형성하고 있는 다양한 크기의 액적들을 본 연구에서 고려한 5가지 액적크기군으로 분류하고, 각각의 액적크기군들의 유동분포를 도식화하여 나타내었다. 그러나, 본 연구에서 고려한 5가지 액적크기군 중  $100\mu\text{m}$  이상의 크기가 큰 액적들은 보조공기가 공급되는 경우에는 거의 존재하지 않았고, 더욱이 공기 보조가 없는 경우에도 측정 빈도수가 적어 고려하지 않았다. 공기 보조가 없는 (a)의 경우,  $0\mu\text{m} < D \leq 10\mu\text{m}$ 의 아주 작은 액적크기들은 연료분무와 흡입공기 분류가 접하는 부분을 제외하고는 대체적으로 흡입공기 분류의 유동방향을 잘 따름을 알 수 있다. 그리고, 분사기 선단 후면과 분무의 충돌 벽면에 근접한 영역



(a) Without air assist( $P_a = 0$  kPa)



(b) With air assist( $P_a = 25$  kPa)

Fig. 12 Plots of mean velocity and SMD with droplet size groups for  $\theta = 45^\circ$ ,  $V_s = 30$  m/s

에서 유동방향이 위쪽을 향하고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 고려한 것과 같이 분사기 선단 후면에서는 분사기 선단에 의해 발생하는 후류의 영향과 아래 벽면 근처에서는 분무의 벽면충돌 이후 튀어 오르는 액적들에 의한 영향으로 판단된다. 특히, 충돌 벽면 근처에서 튀어 오르는 액적들의 유동방향을 고려할 때  $0\mu\text{m} < D \leq 10\mu\text{m}$  액적크기군 보다는  $10\mu\text{m} < D \leq 30\mu\text{m}$  액적크기군이 보다 큰 운동량을 보존하고 있음을 알 수 있다.  $60\mu\text{m} < D \leq 100\mu\text{m}$ 의 큰 액적들은 흡입유동방향으로 휘어지는 정도가 적고 초기 분사기로부터 가지는 운동량을 유지하면서 유동하고 있다. 공기가 보조되는 (b)의 경우는 보조공기의 공급이 없는 (a)와 비교하여  $60\mu\text{m}$  이하의 액적크기군들은 보다 흡입유동을 잘 따라 유동하나,  $60\mu\text{m}$  이상의 액적크기군은 분사기로부터 분출될 때의 초기 유동각을 유지하며 유동하고 있음을 볼 수 있다. 보조공기의 공급이 없을 때  $30\mu\text{m}$  이하의 액적크기군들의 유동에서 나타났던 벽면충돌 후 튀어 오르는 현상이 뚜렷하지는 않지만  $10\mu\text{m} < D \leq 30\mu\text{m}$  액적크기군에서 보이고 있다. 이는 연속적으로 공급되는 보조 공기에 의해 충돌 벽면 근처에서 유동장이 영향을 받기 때문으로 생각된다. 이상의 결과들로부터  $30\mu\text{m}$  이하의 액적크기들의 유동은 흡입공기 분류의 유동을 잘 따라가지만  $60\mu\text{m}$  이상의 액적들은 분사기로부터 분출되어지는 유동각을 유지하고 상대적으로 운동량이 크기 때문에 흡입공기 분류를 잘 따르지 않아 아래 벽면에 충돌함으로써 충돌력에 의하여 2차 미립화를 발생하여 벽면으로부터 튀어 오르는 액적들을 생성하거나 벽류(wall wetting)를 형성하리라 생각된다. 따라서, 보다 연료분사기의 미립화 향상이 요구되어진다.

#### 4. 결 론

흡기밸브가 열린 상태의 공기보조 연료분사를 조사하여 흡입공기 분류 중을 일정한 각을 가지고 분사되는 분무 유동에 대한 실험결과로부터

다음과 같은 결론을 얻었다.

분무 유동체적은 연료분무와 보조공기의 단위면적 당 운동량과 흡입공기 분류의 단위면적 당 운동량비(q)에 무관하고, 흡입공기 유동방향거리(X/d)와 분사각( $\theta$ )의 함수관계로 표현되었다.

분무의 충돌벽면에 근접한 영역(Z/d = 9.0)에서 흡입공기분류의 유속이 작을 경우 주분무가 통과하는 시간영역에서 벽면 충돌 후 튀어 오르는 연료 액적들에 의해 복잡한 유동이 형성되어 높은 난류강도를 보였으나, 흡입공기분류가 증가함에 따라 보다 안정된 유동으로 낮은 난류강도 분포를 나타내었다. 또한, Z/d = 5.0 위치에서는 분사각이 작을수록 높은 흡입공기유동에 대한 운동량 감소가 적어 흡입공기유동에 대한 수직방향 속도분포가 높게 유지되었다.

운동량이 작은 크기가  $30\mu\text{m}$  이하의 액적들은 쉽게 흡입공기 유동을 따라 유동함으로 흡입공기 분류와 접하는 분무유동 영역에서는 상대적으로 큰 운동량을 갖는 크기가 큰 액적들이 유동하여 SMD 분포가 크게 나타났으며, 공기가 보조됨에 따른 미립화 향상으로 생성되는 다수의 작은 액적들이 흡입유동을 잘 따르므로 분무 유동의 휘어짐이 크게 나타났다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Harada, R. Shimizu, K. Kurita, M. Muramatsu, T. Makimura, and M. Ohashi, "Development of Air-Assisted Injector System", SAE 920294, pp. 400~407, 1992.
2. T. Inamura, N. Nagai, T. Hirai, and H. Asano, "Disintegration Phenomena of Metalized Slurry Fuel Jets in High Speed Air Stream", ICLASS-91, Gaithersburg, MD. U.S.A Paper 94, pp. 839~846, 1991.
3. S. I. Baranovsky and J. A. Schetz. "Effect of Injection Angle on Liquid Injection in Supersonic Flow", AIAA Journal, Vol. 18, No. 6, pp. 625~629,

1988.

4. R. N. Salzman and S. H. Schwartz. " Experimental Study of a Solid-Gas Jet Issuing into a Transverse Stream ", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 100, pp.333~339, 1978.
5. 박용국, 석지권, 이충원, " 고속유동장 내 액체 분열현상 ", 한국액체미립화학회지, 제1권 제2호, pp. 66~73, 1996.
6. T. Nogi, Y. Ohyama, and T. Yamauchi, " Effects of Mixture Formation of Fuel Injection Systems in Gasoline Engine ", SAE 891961, pp. 1932~1939, 1989.
7. L. M. Nemecek, R. M. Wagner, and J. A. Drallmeier, " Fuel Droplet Entrainment Studies for Minimization of Cold-Start Wall-Wetting ", SAE 950508, pp. 1~11,

1995.

8. R. M. Wagner, L. M. Nemecek, and J. A. Drallmeier, " Fuel Delivery in a port Fuel Injected Spark Ignition Engine", *Atomization and Sprays*, Vol. 7, pp. 629~648, 1997.
9. 김원태, 강신재, 노병준, " 간헐적인 연료분무의 유동특성에 관한 연구 ", 대기환경학회논문집(B), 제21권, 제9호, pp. 1198~1206, 1997.
10. 노병준, 강신재, 김원태, " 공기보조형 가솔린 연료분사기의 분무거동 및 미립화 특성 ". 한국자동차공학회논문집 제6권 제3호, pp. 187~197, 1998.