

공기보조형 가솔린 연료분사기의 흡기포트내 연료분무 거동에 관한 연구

노병준* · 감신재* · 김원태**
(1998년 7월 24일 접수)

A Study on the Spray Behavior of Air-Assist Type Gasoline Fuel Injector in Intake Port

Byung-Joon Rho, Shin-Jae Kang and Won-Tae Kim

Key Words : Air Assist (공기 보조), Intake Port (흡기포트), Spray Visualization (분무 가시화), PDPA (phase Doppler particle analyzer), SMD (Sauter mean diameter), Droplets Size Group (액적크기군), Secondary Atomization (2차 미립화)

Abstract

The fuel spray behavior in the intake port of an electronic control port injection gasoline engine has a strong influence on engine performance, exhaust emission and fuel consumption. Thus, in this study, fuel spray behavior and flow characteristics of the air assist gasoline spray injected into a suction flow in a simulated rectangular intake port have been investigated. Macro-behavior of spray characteristics was investigated by means of visualization and the measurements of SMD and velocity were made by PDPA. For analysis the flow field with droplets size, droplets are classified five droplets size groups. As a result, the normal distance of suction flow increasing, the relatively large droplets distribution and SMD increase because small droplets easily follow suction flow. Near impinging wall, after impinging against the wall, secondary atomized small droplets of $D < 30\mu\text{m}$ bound from the wall. And the increasement of suction flow progress to the large droplets of $D > 100\mu\text{m}$ distribution. Therefore, SMD are apparently increased near impinging wall, $Z/d = 9.0$.

기호설명

- D : 액적 직경
- d : 하우징외 오리피스 직경
- $F(D)$: 액적크기 분포함수
- P_{air} : 보조 공기 공급압력
- U, V : 평균속도
- u, v : 순간속도
- V_s : 흡입공기 유속
- T : 분사 개시 이후 시간

- T_i : 분사기간(5ms)
- X, Z : 좌표축
- α : 유동각
- θ : 연료분사기외 경사각

1. 서론

흡기포트 내로 연료가 분사되는 전자제어 포트 분사식 가솔린 엔진의 경우, 연료-공기 혼합기의 불완전 연소에 의해 미연탄화수소(HC)의 배기 배출이 발생된다. 특히, 저온 시동과 아이들링(idling)시인 엔진 구동의 첫 번째 5분 동안에 HC 배출량은 전 작동 중 배출량의 80%를 차지한다.⁽¹⁾ 이는 흡기 밸브가 닫힌 상태에서 연료 분사기로부터 분사가 이루어져 흡기포트 내에 형성

* 회원, 전북대학교 기계공학과,
** 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

되는 연료분무가 저온 상태의 포트 벽 및 밸브 면에서 쉽게 기화되지 못하여 연료 액적들의 벽 부착에 의한 벽류물 형성하고, 흡입과정 중 밸브가 열리면서 실린더 내로 유입되어 불완전 연소가 일어나기 때문이다. 이런 문제들을 해결하기 위하여 흡기포트 내로 분사되는 연료 분무의 액적들을 작게 미립화시키는 방법⁽²⁾과 흡기밸브가 열린 상태, 즉 실린더 내로 흡입유동이 발생하는 중에 연료를 분사시키는 방안이 강구되고 있다.⁽³⁾ 이들 연구들은 흡입유동이 발생하는 포트 내에서 연료 분무 거동이 매우 중요하게 고려되어야 한다는 것을 보여준다. 그러므로, 포트 내에서 분사되는 연료의 분무 거동에 관한 연구로서, Nemecek 등⁽⁴⁾은 연료 액적들의 액체 상이 흡입 공기의 기체 상으로의 유입현상을 PDPA 장치를 가지고 계측하여, 연료 액적이 기체 상으로의 유입이 용이하기 위해서는 0~20 μ m의 작은 액적들이 생성되어야함을 밝혔다. Arcoumanis 등⁽⁵⁾은 흡기포트를 모사한 직사각형 풍동 내에서 분무의 벽면 충돌 후 생성된 작은 크기의 2차 미립화된 액적들이 공기유동을 잘 따름을 관찰하였다. 또한, Wagner 등⁽⁶⁾은 공기 보조에 의해 미립화를 향상시킨 분무를 모델 포트 내에 분사시켜 흡기 밸브에 근접한 영역에서 PDPA 시스템을 사용하여 액적 속도와 크기를 계측함으로써 흡기 밸브에 분무의 도달은 분사기의 특성과 분사시기에 따른 연료 공급이 강한 영향을 준다는 사실을 보고하였다.

따라서, 본 연구에서는 밸브가 열린 상태를 고려하여 일정한 흡입유동 중에 연료 분무를 간헐적으로 분사하고, 연료 분무의 미립화를 향상시키기 위한 보조 공기를 연속적으로 공급하는 분무조건에서 흡입공기 유속과 연료분사기의 경사각의 변화에 따른 모델 흡기포트 내에서의 연료 분무 거동을 가시화하고, PDPA 계측을 통하여 액적크기에 따른 유동 특성을 고찰하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 연료분사기는 전자제어 가솔린 엔진의 연료분사장치와 일종인 MPI (multi-point injection) 시스템용 핀볼형 연료분사기(핀볼의 외경:0.79mm, 오리피스외 직경:0.92mm,

핀볼의 선단부 확산각:33°)를 이용하여 Fig.1과 같이 분사되는 연료분무에 보조 공기를 가할 수 있게 분사기 선단을 보호하고 있는 캡(cap)에 공기 보조 어댑터(adaptor)를 설치하고, 이들을 분사기 하우징(housing)으로 결합하였다. 연료는 핀볼의 오리피스 출구로부터 분출되고, 보조 공기는 하우징의 공기 유입구를 통하여 유입되어 어댑터와 하우징 사이의 통로를 따라 유동하여 하우징의 바닥 면과 밀착되어 있는 어댑터의 4개 홈을 통하여 액막(liquid sheet)으로 분출되는 연료에 충돌함으로써 액막의 분열을 촉진하여 연료 분무의 미립화를 향상시킨다.

Fig. 2는 포트 내에서 흡입유동 중에 연료 분무의 거동을 관찰하기 위하여 구성된 실험장치의 개략도를 보이고 있다. 연료분사기에 일정한 압력의 연료를 공급하기 위하여 공기 압축기로 압축된 공기를 충전용기(surge tank)를 거쳐 연료 탱크의 연료를 일정한 압력으로 가압하였다. 가압된 일정한 압력의 연료는 연료필터를 통과하여 연료분사기에 공급된다. 분무의 미립화를 위한 보조 공기는 충전용기에 저장된 가압 공기 중 일부를 일정한 압력으로 조절하여 분사기 하우징의 공기 유입구로 공급하였다. 분사기의 연료 공급압 및 보조 공기 공급압력을 계측하기 위하여 각각의 유입구 근처에서 정압판을 인출하여 압력센서(Druck, PDCR 910)와 연결하고 검출된 압력을 디지털 압력변환기(Druck, DPI 420)로 관측하였다. 간헐적인 분무를 생성하기 위하여 연료분사 제어부는 연료 분사 조절장치를 컴퓨터와 인터페이스(interface)하여 분사기의 솔레노이드(solenoid)

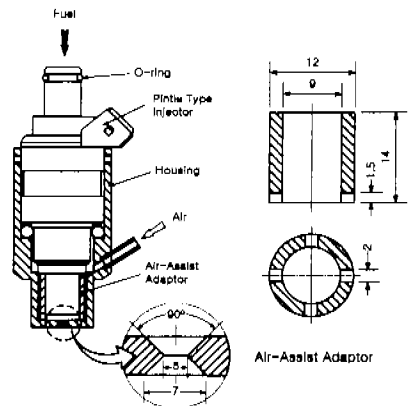


Fig. 1 Configuration of air assist injector.

밸브를 개폐하도록 하여 연료 분사시기와 기간을 조절할 수 있게 하였다.

모델 포트 내 흡입 유동은 압송형 송풍기를 역으로 이용하여 발생시켰으며, 송풍기의 회전수를 조절하여 흡입공기 유속을 변화시켰다. 흡입공기 유속을 측정하기 위하여 모델 흡기포트 내에 4공 피토포관(Pitot tube)을 삽입하고, 이를 디지털 마이크로 마노메타(digital micro manometer)를 사용하여 관측하였다. 흡기포트를 모사하기 위하여 사용한 모델 흡기포트는 폭 70mm, 높이 50mm, 길이 460mm의 직사각형으로 제작하였다. 모델 흡기포트의 재질은 아크릴을 사용하였으며, 연료 분사기로부터 분사되는 연료의 분무 거동을 측정하기 위하여 50×170mm의 관측창을 모델 흡기포트의 양측에 설치하였다. 관측창은 두께 2mm의 무명한 유리를 사용하였으며, 연료 액적들이 관측창에 부착하여 발생하는 얼룩으로 인한 PDPA 측정의 어려움을 방지하기 위하여 얼룩이 깨끗이 제거된 관측창을 교대로 설치하여 측정하였다.

본 연구에서는 레이저광을 원통형 렌즈에 투과시켜 막(sheet) 형태로 만들어 분무 중심을 통과하게 하여 전체적인 분무 거동을 가시화 하였으며 또한, 스트로보스코프(stroboscope : DX-525A)의 발광 주기를 연료분사기와 분사주기와 동기 시키고 스트로보스코프의 발광시기를 지연함으로써 분사 개시 이후 특정 시간의 정지 분무 영상을 얻어 CCD 카메라(Toshiba, IK-536)를 이용하여 VCR에 기록하여 시간변화에 따른 분무거동을 분석하였다.

액적크기에 따른 유동을 측정하기 위한 PDPA 시스템(DANTEC)의 광원으로 공랭식 Ar-ion 레이저를 사용하였다. 송광부는 속도의 방향성 측정이 가능하도록 브라셀(Bragg cell)을 설치하였으며, 두 쌍의 488nm(blue)와 514.5nm (green) 파장의 레이저광을 서로 교차하여 한 점에서 측정체적을 형성하여 2차원 유속 및 액적크기를 동시에 측정하도록 하였다. 측정체적을 통과하는 액적의 굴절되는 산란광을 측정하기 위하여 송광부와 수광부가 이루는 각도를 빔의 진행방향으로 58°가 되게 설치한 전방산란방식(forward scattering)을 채택하였다. 송광부와 수광부는 컴퓨터에 의해 정확하게 측정위치로 이동이 가능한 3차원 이동장치에 설치하였다. 액적의 속도와 크기 데이터는 PDPA 시스템의 신호처리기(DANTEC,

58N10)와 연결된 컴퓨터를 사용하여 분석하였다.

2.2 측정방법

흡입 유동이 존재하는 모델 흡기포트 내로 분사되는 연료 분무의 거시적인 고찰을 위한 분무 유동 가시화는 연료의 분사압력을 300kPa로 고정한 채로 연료분사기간을 5ms로 설정하고, 분사 주기는 100ms(10Hz)로 간헐적으로 분사하였다. 흡입공기 유속은 10 ~ 30m/s로 변화시켰다. 미립화 향상을 위한 보조 공기 압력은 15kPa(23.14 l/min)로 공급하였으며, 보조 공기가 공급되지 않은 경우($P_{air} = 0kPa$)와 비교하였다. 또한, 연료분사기의 경사각을 30°와 45°로 변화시켰다.

모델 포트 내의 연료 액적들의 속도와 크기 분포를 정량적으로 고찰하기 위하여 연료분사기의 흡구 중심과 모델 포트의 교차점을 원점으로 하여 흡입유동에 수직인 방향을 Z축, 흡입유동방향을 X축으로 설정하였다. PDPA 측정은 분무 유동

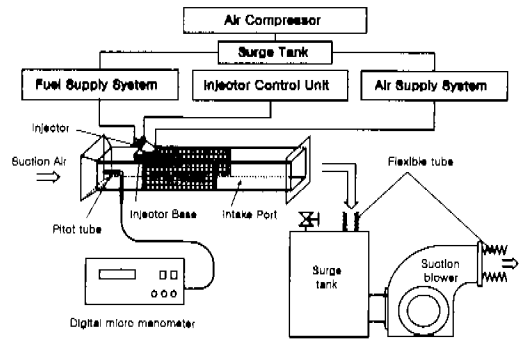


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

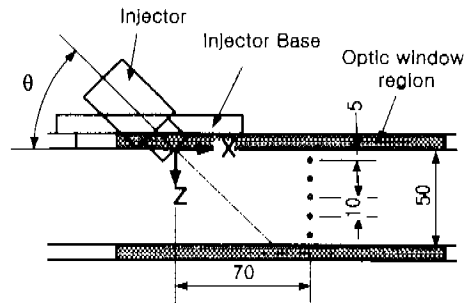


Fig. 3 Measuring position in model intake port.

가시화와 동일한 실험조건에서 좌표축의 원점으로부터 Fig. 3과 같이 흡입유동방향으로 70mm ($X/d = 14.0$) 떨어진 위치에서 수직 방향으로 10mm 간격으로 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 포트 내 분무 유동 가시화

Fig. 4는 공기보조형 연료분사기의 경사각과 흡입공기 유속 변화에 대하여 간헐적으로 연료 분사가 이루어지고, 보조공기는 연속적으로 공급된 실험조건에서 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 사용하여 레이저광을 막(sheet) 형태로 형성한 뒤 분무 중심을 통과하게 하여 형성된 분무중심 평면을 보이고 있다. $\theta = 30^\circ$, $V_s = 10\text{m/s}$ 인 상태에서 보조 공기의 공급이 없을 때, 액적들의 밀집도가 희박한 분무의 중심 영역은 어둡게 보이고, 액적 밀집도가 높은 분무 외곽이 밝게 나타나는 핀돌형 분사기의 전형적인 중공(hollow) 형태의 분무 형상을 볼 수 있다. 보조 공기가 15kPa의 압력으로 공급됨에 따라 중공형상의 분무 형태는 사라지고, 분무 중심부에 액적 밀집도가 조밀한 매우 밝은 영역이 존재하고 있다. 흡입공기 유속이 30m/s로 증가하고, 보조 공기의 공급이 없는 경우에 분무 형태가 흡입공기 유속에 의해 휘어짐을 분명하게 볼 수 있다. 또한, 보조 공기가 주어질 때 분무가 흡입유동 방향으로 휘어지는 정도는 크게 나타나고 있음을 확인할

수 있다. 이는 보조 공기로 인한 분무 미립화의 향상으로 생성된 다수의 작은 액적들이 흡입유동을 잘 따라가기 때문으로 생각된다. 연료분사기의 경사각이 45° 로 증가함에 따라 벽면에 충돌 지점이 흡입유동의 상류 쪽으로 앞당겨지고, 경사각이 30° 인 경우 보다 분무가 흡입유동 방향으로 휘어짐을 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 분무 액적들이 벽면 도달 이후의 영역에서 밝게 나타나는 것은 분무가 벽면에 충돌 이후 벽면으로부터 휘어 오르는 작은 크기의 액적들에 의해 액적 밀집도가 증가하기 때문이라 생각된다. 이들 전체적인 분무 거동은 모델 흡기포트 내에서 PDPA 측정점들을 선정하는 데 고려하였다.

동일한 분무 조건에서 스트로보스코프의 발광 주기를 연료분사기의 분사주기와 동기 시키고, 발광시기를 지연시켜 분사개시 이후의 시간 변화에 따라 얻은 정지 영상을 Fig. 5에 보이고 있다. (a)는 공기 보조가 없이 각각의 연료분사기의 경사각에 따라 흡입공기 유속을 변화시켰을 경우로써 분사 개시 이후 3.5ms 까지는 분사기로부터 큰 운동량을 가지고 포트 내로 분사가 이루어지기 때문에 분무가 큰 흡입유동 방향으로 휘어짐은 관찰되지 않으나, 분무가 점진적으로 분사초기의 운동량을 상실해 감에 따라 흡입공기 유속이 증가할수록 분무의 휘어짐이 나타나고 있다. 특히, 흡입공기 유속에 대하여 분사되는 각도가 큰 경사각 45° 인 경우에 더욱 확연하게 나타나고 있으며, 분사개시 이후 5.5ms 시간 영역에서

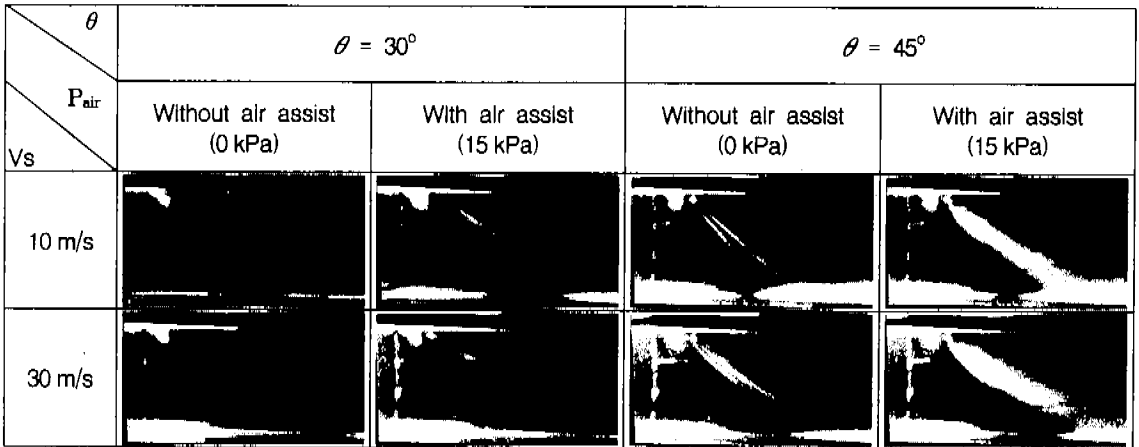
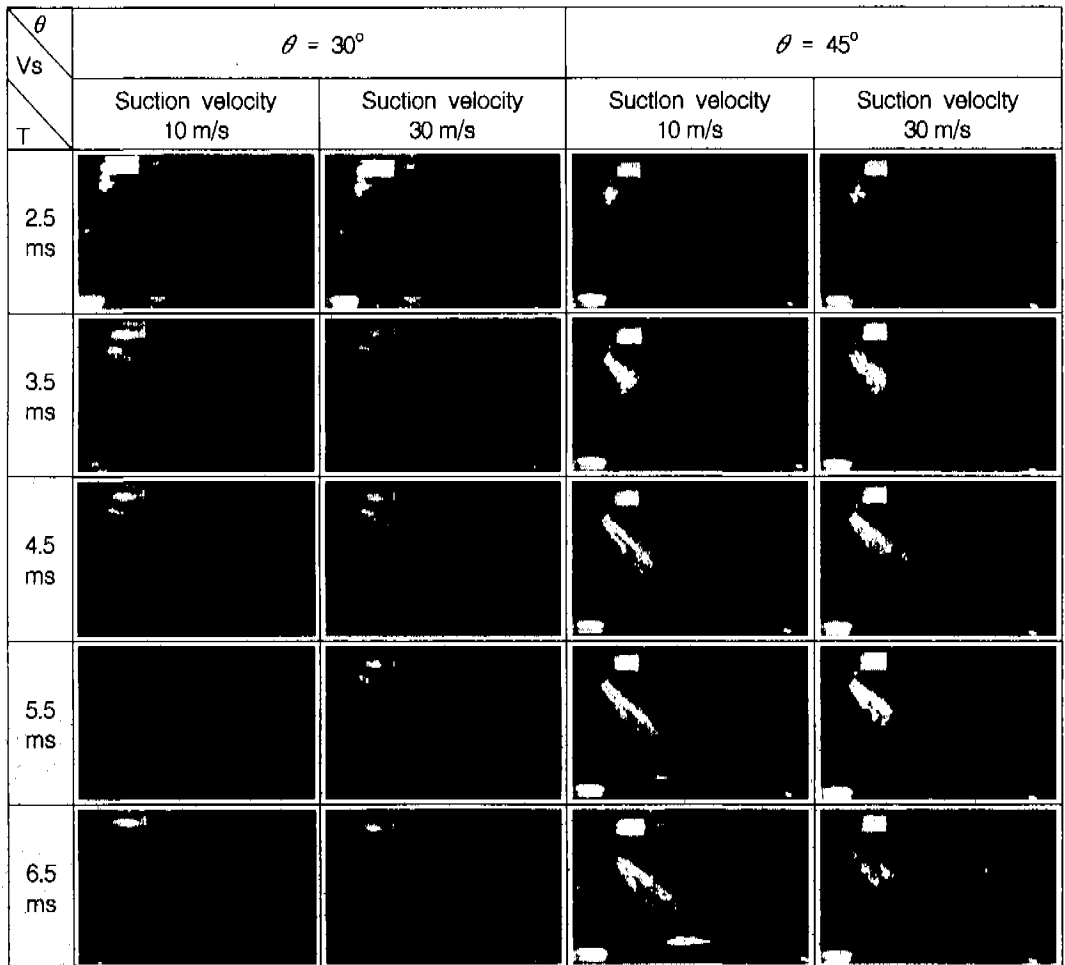


Fig. 4 Visualization of spray behavior in model port by laser sheet.

30m/s의 흡입공기 유속에 의해 분무 선단의 분열이 촉진되어 짐을 볼 수 있다. 그림 (b)에서 보조 공기가 15kPa로 공급되고 흡입공기 유속이 증가할수록 분사기가 위치한 포트의 윗면에 밀착된 형태로 분무가 이루어지고 있으며, 경사각이 작은 30° 일 때 극심하게 나타나고 있다. 그러므로, 분사각이 작고 흡입공기 유속이 빠른 경우 분무 후방에 발달된 재순환 영역 내의 액적들에 의해 포트 위 벽면에 액적들의 부착으로 인한 벽류 생성이 우려된다. 따라서, 흡기포트 설계시 연료분사기의 경사각과 관련하여 포트의 형상이 함께 고려되어야 할 것이다.

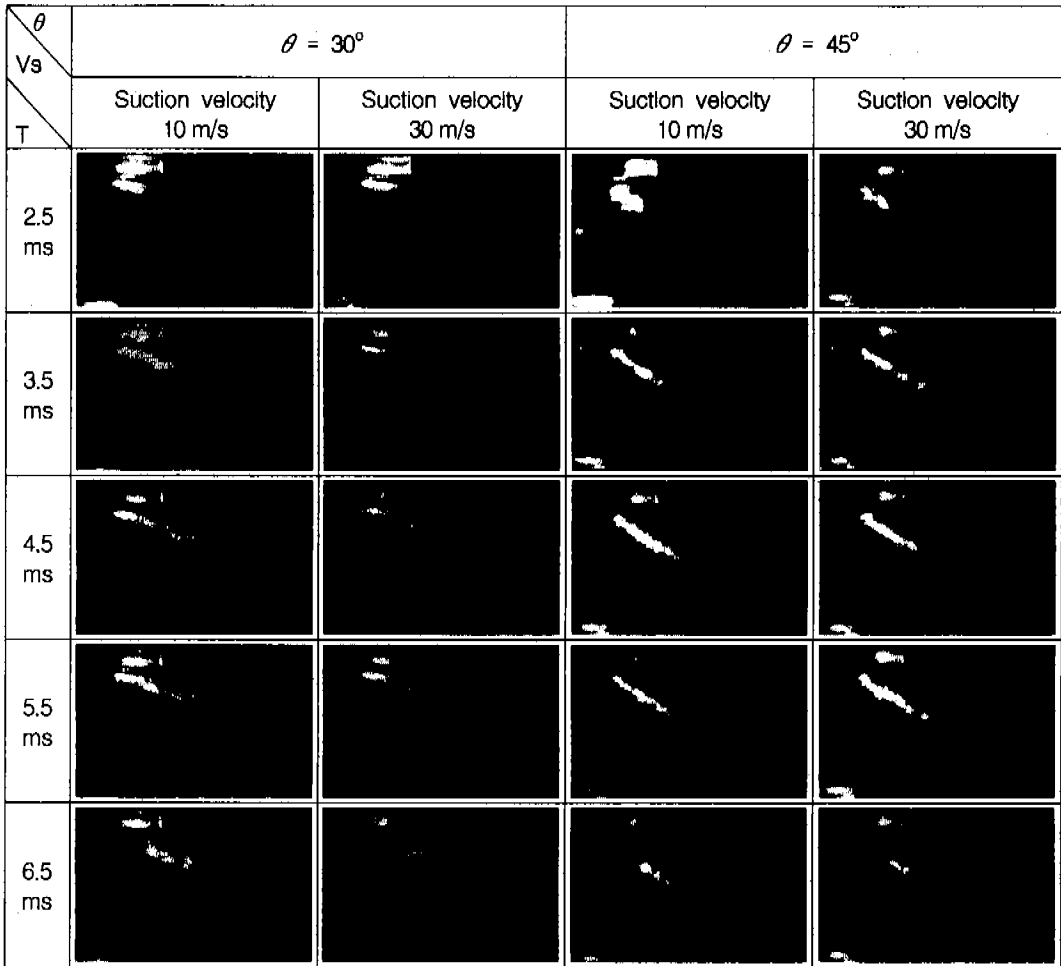
3.2 액적 크기분포와 평균직경

Fig. 6은 연료분사기의 경사각 30°, 흡입공기 유속 30 m/s일 경우, 흡입유동에 수직인 방향에 대한 연료 액적들의 크기분포를 나타내고 있다. 보조 공기의 공급 유무에 관계없이 Z/d가 증가함에 따라 크기가 큰 액적들의 분포가 늘어나고 있다. 작은 크기의 액적들은 상대적으로 운동량이 작기 때문에 쉽게 흡입공기 유속의 흐름을 잘 따르지만, 크기가 큰 액적들은 작은 액적들이 가지는 운동량 보다 크기 때문에 보다 먼 흡입유동에 수직인 방향의 위치에서 주로 분포하고 있음을 짐작할 수 있다. 보조 공기에 의해 분사기로부터



(a) For without air assist ($P_{air} = 0$ kPa)

Fig. 5 Spray behavior in model port after injection with time.



(b) For with air assist ($P_{air} = 15 \text{ kPa}$)

Fig. 5 Spray behavior in model port after injection with time (continued)

분출되는 연료 분무의 미립화가 더욱 촉진되므로 작은 크기의 액적들이 생성되기 때문에 보조 공기가 공급되는 (b)의 경우 보조 공기가 공급되지 않은 (a) 보다 모든 흡입유동에 수직인 방향에서 작은 액적들의 분포가 증가하고 있다.

흡입공기 유속의 영향에 따른 분무 액적들의 크기분포를 고찰하기 위하여 Fig. 6과 동일한 분무 조건에서 공기 보조가 있는 경우에 대하여 Fig. 7에 흡입유동에 수직 거리에 따라 도시하였다. 모든 측정위치에서 흡입공기 유속이 증가함에 따라 보다 크기가 큰 액적들의 분포가 증가함

을 볼 수 있다. 이런 현상은 $Z/d = 9.0$ 인 포트의 바닥 면에 근접한 위치에서 확연하게 나타나고 있다. 흡입공기 유속이 증가함에 따라 크기가 큰 액적들이 증가하는 이유는 보다 큰 흡입공기 유속에 의해 크기가 큰 액적들도 쉽게 흡입유동을 따라서 유동하므로 흡입유동에 수직인 방향 거리와 하류로 갈수록 보다 크기가 큰 액적들의 분포가 증가하기 때문이다.

Fig. 8은 포트 내의 흡입공기 유속이 30 m/s인 조건에서 45° 로 연료분사가 이루어지는 경우, 분

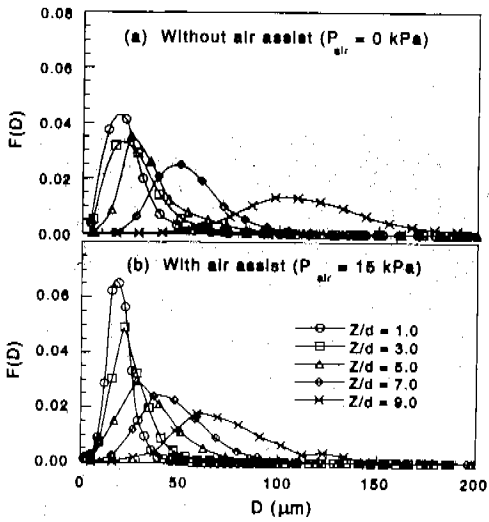


Fig. 6 Distribution of droplet size for $\theta = 30^\circ$, $V_s = 30 \text{ m/s}$.

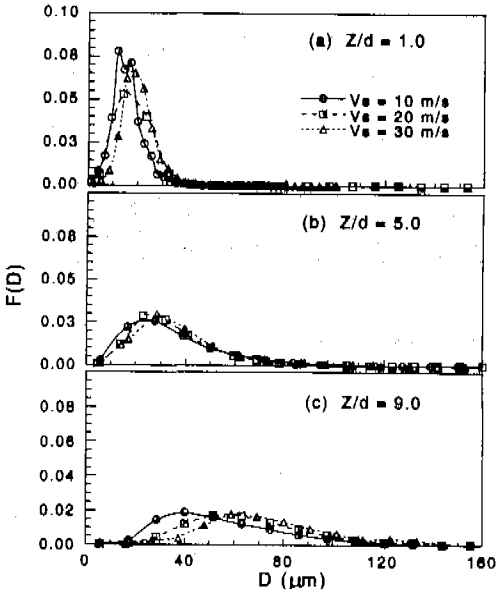


Fig. 7 Distribution of droplet size with suction velocity for $\theta = 30^\circ$, $P_{\text{air}} = 15 \text{ kPa}$.

사개시 이후 0.5ms 시간 간격으로 측정체적을 통과하는 액적의 개수와 SMD를 보이고 있다. 보조 공기의 공급이 없는 (a)의 경우, $Z/d = 1.0$ 의 위치는 다른 위치와 비교하여 상대적으로 오랜 시간

동안 액적이 존재하며, 보조 공기가 공급되어지는 (b)의 경우 액적이 존재하는 시간이 짧게 나타나고 있다. 보조 공기의 공급 유무와 관계없이 Z/d 가 증가함에 따라 SMD는 증가하고, 보조 공기의 공급이 없는 경우, 흡입유동에 수직인 방향 위치에 따라 SMD의 뚜렷한 차이를 볼 수 있다. 그러나, 보조 공기가 공급되어지면서 분무의 미립화 향상에 의해 좀더 균일한 SMD의 변화를 볼 수 있다. $Z/d = 1.0$ 과 5.0 위치에서는 SMD 차이가 작게 나타나고 있다. 또한, 분무의 층돌 벽면에 근접한 영역인 $Z/d = 9.0$ 에서는 다른 위치와 비교하여 시간에 따른 SMD 변동이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 분무 거동 가시화 사진에서 관찰된 것처럼 분무가 벽에 충돌 이후 2차 미립화가 이루어진 작은 액적들이 튀어 오르면서 측정체적을 통과하는 액적들의 크기가 불균일하기 때문으로 판단된다.

측정 위치별로 얻어진 액적들의 SMD 분포를 보조 공기가 공급되어지는 조건에서 흡입공기 유속에 따라 Fig. 9에 도시하였다. 흡입유동에 수직인 거리(Z/d)가 증가함에 따라 SMD는 증가하고 있다. 연료분사기의 경사각이 30° 인 경우, 분무가 충돌하는 벽면에 근접한 영역인 $Z/d = 9.0$ 위치를 제외한 다른 측정영역에서는 흡입공기 유속이 증가함에 따라 SMD는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 그러나, 경사각이 45° 로 증가하는 경우, $Z/d =$

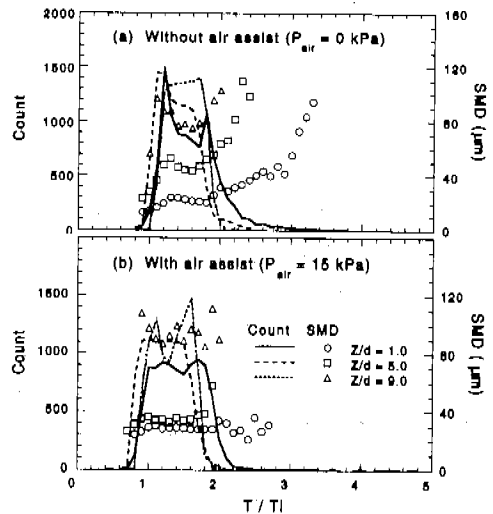


Fig. 8 Droplets count and SMD distribution with time resolved.

7.0 위치에서도 흡입공기 유속이 증가함에 따라 SMD는 다소 증가하는 경향이 나타나고 있다. 이로 보아 Fig. 7의 액적크기 분포의 고찰에서 논의한 바와 같이 흡입공기 유속이 증가함에 따라 크기가 큰 액적들의 분포가 증가하고, 벽면 충돌 이전의 액적들과 충돌 이후 벽면으로부터 튀어 오르는 액적들이 강한 흡입공기 유속에 의해 액적들의 상호 합착 현상을 촉진하여 다른 측정 위치와 비교하여 흡입공기 유속이 증가할수록 SMD의 증가를 촉진한다고 생각된다.

3.3 액적들의 유동분포

흡입공기 유동이 존재하는 포트 내에서 액적들의 크기에 따른 유동특성을 고찰하기 위하여 Fig. 10에 보조 공기가 공급되고, 연료분사기의 경사각이 45°, 흡입공기 유속 10m/s 인 분무 조건에서 한 측정 위치에서 얻어진 10,000 여개의 액적 직경에 따른 유동각 분포를 보이고 있다. 유동각(α)은 각각의 액적들이 측정체적을 통과 하면서 얻어지는 순간속도를 이용하여 $\alpha = \tan^{-1}(u/v)$ 으로 계산하였다. 흡입유동 방향을 기준으로 하여 양의 유동각을 갖는 액적들은 포트의 아래 벽면을 향하고, 음의 유동각을 갖는 액적들은 분사기가 위치한 위 벽면을 향한다. (a)의 $Z/d = 1.0$ 인 위치에서 $40\mu\text{m}$ 이하의 액적들이 유동각 0° 을 기준으로 양과 음으로 대칭적 분포를 이루는 것으로 보아 작은 크기의 액적들이 재순환 유동을 하고 있음을 짐작할 수 있다. (b)의 $Z/d = 5.0$ 에서도 작은 크기의 액적들이 음의 유동각을 갖는 것은 흡입유동 중을 가로지르는 연료 분무의 뒷면에 형성되는 와동 때문으로 생각된다. 분무가 충돌하는 벽면에 가까운 영역인 (c)의 $Z/d = 9.0$ 은 아래 벽면으로부터 위 벽면으로 향하는 음의 유동각을 갖는 $70\mu\text{m}$ 이하의 많은 액적들이 존재함을 확인할 수 있으며, $30\mu\text{m}$ 이하 액적들의 분포가 주류를 이루고 있다. 이는 분무 거동 가시화에서 관찰된 분무의 벽면 충돌 이후 2차 미립화가 이루어진 비교적 작은 크기의 액적들이 벽면으로부터 튀어 오른다는 것을 확인할 수 있으며, 액적들의 크기가 클수록 유동각의 크기는 증가하고 있다.

액적크기에 따른 유동특성을 고려하기 위하여 Tokuoka와 Zhang 등^(7,8) 이 선회 분사기의 분무 구조 고찰에 적용한 4가지의 액적크기군의 액적크

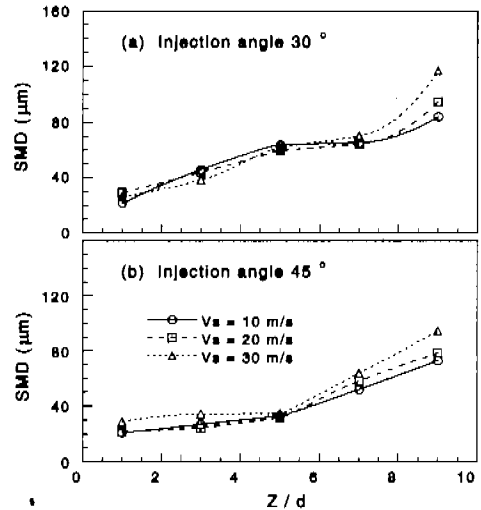


Fig. 9 SMD distribution with suction velocity.

기 구간을 확장하고, 김 등⁽⁹⁾ 이 가솔린 분무의 유동 고찰에 고려한 액적크기 범위를 더욱 세분화하여 본 연구에서는 5가지 액적크기군을 고려하여 액적크기군에 따른 유동특성을 고찰하였다. 액적크기군은 액적크기가 매우 작아 공기유동을 잘 따르는 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$,^(7,8,9) 대체적으로 흡입 유동을 잘 따르므로 흡기 밸브가 열릴 때 밸브면에 부착되지 않는 액적 크기인 $10\mu\text{m} < D < 30\mu\text{m}$ 와 포트 내의 온도가 25°C 정도 일 때 밸브에 도달하기 전에 기화되어 벽부착이 이루어지지 않는 액적크기인 $30\mu\text{m} < D < 60\mu\text{m}$,⁽¹⁰⁾ 대체적으로 큰 액적크기인 $60\mu\text{m} < D < 100\mu\text{m}$ 와 $D > 100\mu\text{m}$ 으로 분류하고, 각각의 측정점에서 얻어진 액적들의 평균값과 비교하였다.

Fig. 11은 보조 공기가 공급되면서 45°의 경사각을 갖는 분무 액적들의 흡입유동에 수직인 방향의 평균속도를 각각의 흡입공기 유속으로 무차원하여 액적크기군에 따라 도시한 것이다. 공기보조에 의해 미립화된 액적들은 흡입공기 유동을 잘 따르기 때문에 $Z/d = 7.0 \sim 9.0$ 을 제외한 영역에서는 $100\mu\text{m}$ 이상의 큰 액적들은 존재하지 않고 있다. 흡입공기 유속이 10m/s 인 경우 분사기가 부착되어 있는 포트 면에 근접한 영역인 $Z/d = 1.0$ 은 매우 작은 음의 속도분포를 보이고 있다. 그러므로, 이 위치에서는 Fig. 10에서 고려하였던 것처럼 재순환영역이 존재함을 알 수 있다. 액적크기

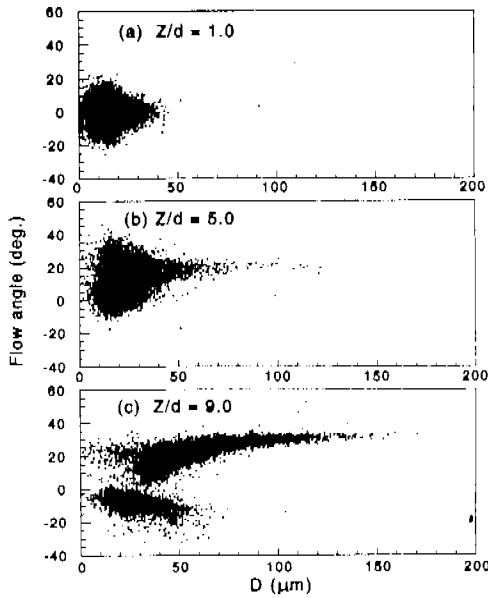


Fig. 10 Variation of flow angle with droplets size for $\theta = 45^\circ$, $V_s = 10$ m/s.

가 클수록 상대적으로 운동량이 크므로 다른 액적크기군과 비교하여 높은 속도를 보이고 있으며, $Z/d = 9.0$ 을 제외한 수직거리에서, 흡입공기 유속이 증가함에 따라 흡입유동에 수직한 방향 속도는 상대적으로 감소하고 있다. 그러므로, 큰 흡입공기 유속에서는 액적들의 흡입유동에 수직한 속도 성분이 감소하여 액적들이 흡입유동을 따라 이동한다는 것을 알 수 있다. 총들 벽면 근처인 $Z/d = 9.0$ 에서는 주로 $10\mu\text{m} < D < 30\mu\text{m}$ 의 액적크기군이 분무의 벽면 총들 이후 튀어 오르므로 옴의 수직속도를 보이고 있다. 또한, 전체 액적들의 흡입유동에 수직한 방향 평균속도는 액적크기가 매우 작아 공기유동 속도로 정의하여 사용하는 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ 액적크기군과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 Fig. 11과 같은 분무 조건에서 흡입 유동방향의 평균속도를 액적크기군에 따라 도시하였다. 전체 액적들의 흡입유동방향 평균속도는 $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ 의 액적크기군의 평균속도와 거의 일치하고 있다. 흡입공기 유속이 작은 10m/s의 경우, Fig. 11의 흡입유동에 수직한 방향 평균속도 분포와 같이 액적크기가 큰 경우에 높은 흡입 유동방향 속도를 보이고 있으나, 흡입공기 유속이

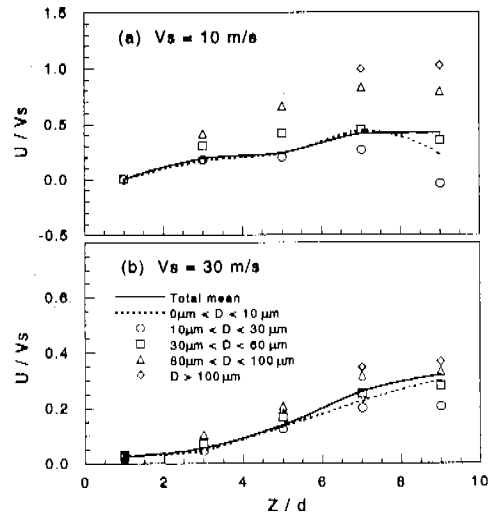


Fig. 11 Distribution of U velocity for $\theta = 45^\circ$, $P_{air} = 15$ kPa

30m/s로 증가하면서 작은 크기의 액적들이 높은 흡입유동방향 속도를 보이고 있으며, 흡입공기 유속이 작은 경우와 비교하여 액적크기군에 따른 속도 차이가 크게 나타나지 않고 있다. 그러므로, 포트 내에서 액적들의 유동은 흡입공기 유속이 작은 경우 분사기로부터 분출되는 유동장에 의해 영향을 받고, 흡입공기 유속이 증가함에 따라 액적들은 증가된 흡입공기 유속에 의해 지배적인 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

흡입유동이 있는 포트 내로 공기가 보조되는 연료분사기의 정상각 45° 분무에 대하여 전체 액적들의 평균 유속을 벡터로 나타내고, SMD를 도식적으로 표현하였으며, 전체 액적들을 구성하는 각각의 액적크기군의 평균유속과 SMD를 같은 방법으로 표시하여 Fig. 13에 함께 나타내어 흡입 유동에 수직한 방향에 따라 분포하는 전체 액적들을 각각의 액적크기군에 따른 액적들의 SMD와 평균 유속을 동시에 고려할 수 있도록 하였다. $0\mu\text{m} < D < 10\mu\text{m}$ 의 액적들은 흡입공기 유속을 잘 따라가고 있으며, $Z/d = 1.0$ 의 분사기와 가까운 영역에서는 $D > 100\mu\text{m}$ 의 큰 액적들은 존재하지 않음을 알 수 있다. $Z/d = 9.0$ 인 분무의 총들 벽면에 근접한 영역에서 흡입공기 유속이 10m/s에서 30m/s로 빨라짐에 따라 SMD의 크기가 증가하는 원인은 $D > 100\mu\text{m}$ 액적크기군의 SMD값이

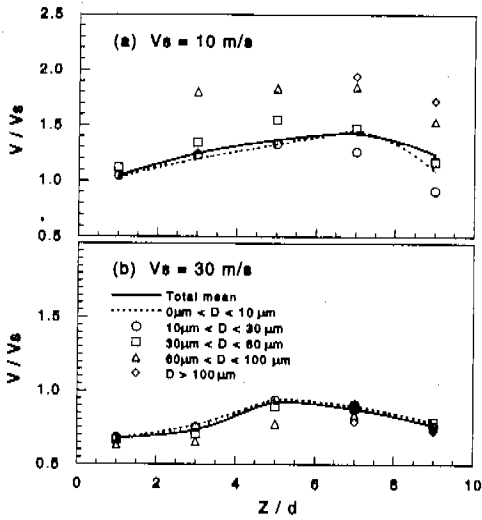


Fig. 12 Distribution of V velocity for $\theta = 45^\circ$, $P_{\text{air}} = 15 \text{ kPa}$.

상대적으로 크기 때문임을 알 수 있다. 또한, 흡입공기 유속이 10 m/s 의 경우는 $D > 100 \mu\text{m}$ 액적 크기군의 속도 크기가 $60 \mu\text{m} < D < 100 \mu\text{m}$ 의 액적 크기군 보다 크지만, 흡입공기 유속이 30 m/s 로

증가하는 경우는 오히려 감소하고 있다. 그러므로, 크기가 큰 액적들이 흡입공기 유속이 증가하면서 속도가 감소하는 것은 Fig. 9에서 논의한 것처럼 벽면 충돌 이후에 벽면으로부터 튀어 오르는 액적들과 충돌 이전의 액적들의 상호 합착으로 인하여 $100 \mu\text{m}$ 이상의 액적들의 속도가 감소한다고 판단된다.

흡입유동 중에 분사된 연료 액적크기에 따른 포로 내 유동을 고찰하기 위하여 본 연구에서 고려한 액적크기군의 평균 유동각을 각각의 연료분사기의 경사각으로 무차원하여 Fig. 14에 흡입유동에 수직인 방향 거리에 따라 도시하였다. 보조공기의 공급이 없고, 흡입공기 유속이 10 m/s 인 분무 조건에서 연료분사기의 경사각을 변화시킨 (a)의 경우, 보다 큰 액적크기군일수록 큰 유동각을 갖으며, 경사각이 30° 인 경우가 45° 인 경우보다 상대적으로 높은 유동각을 보이고 있다. 이는 측정 위치가 고정되어 있기 때문에 Fig. 4의 분무가시화 사진에서 볼 수 있듯이 연료분사기의 경사각이 큰 45° 의 경우가 흡입공기 유속에 의해 보다 안정된 유동형태를 취하기 때문이다. 경사각이 45° 일 때 벽면에 근접한 영역에서 작은 액적크기군인 $0 \mu\text{m} < D < 10 \mu\text{m}$ 와 $10 \mu\text{m} < D < 30 \mu\text{m}$ 의

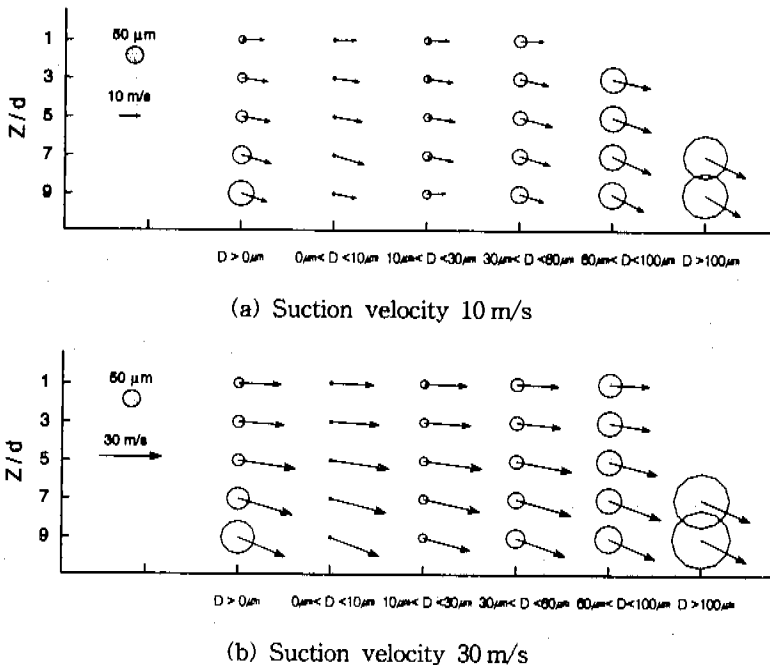
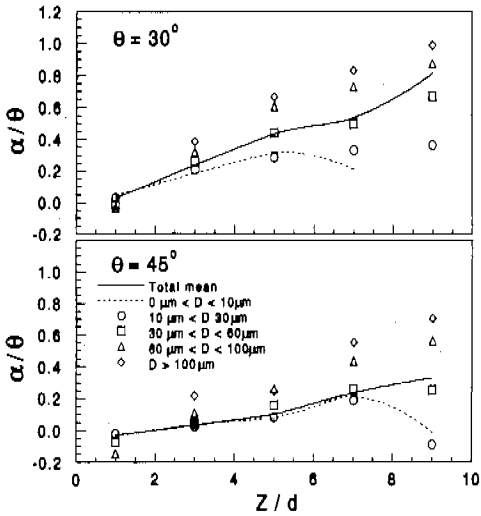
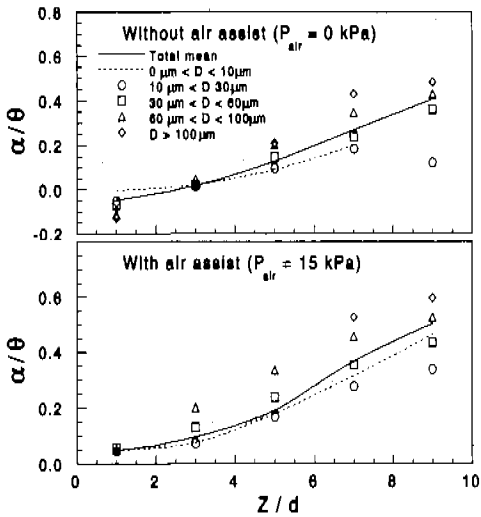


Fig. 13 Plots of flow vector and SMD with droplet sizes group, $\theta = 45^\circ$.



(a) With injection angle ($V_s = 10\text{m/s}$)



(b) With air assist pressure ($V_s = 10\text{m/s}$, $\theta = 45^\circ$)

Fig. 14 Distribution of flow angle with droplet sizes group.

유동각이 감소하는 것은 벽면 충돌 이후 뛰어 오르는 액적들이 갖는 음의 유동각 때문이다. 그러므로, 벽면 충돌 이후 뛰어 오르는 액적 크기 범위가 주로 $30\mu\text{m}$ 이하의 액적들임을 알 수 있다. 그림 (b)는 흡입공기 유속이 30m/s 이고 연료분사기의 경사각이 45° 인 경우 공기 보조 유무에 따른 유동각을 보이고 있다. 동일한 경사각의 (a)

와 비교할 때 흡입공기 유속이 증가함에 따라 모든 액적크기군에서 유동각이 작게 나타나는 것으로 보아 액적들의 유동이 흡입공기 유속의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 보조 공기의 공급이 있는 경우, 분사기와 가까운 영역인 $Z/d = 1.0$ 영역에서 보조 공기의 공급이 없는 경우에 나타나는 음의 유동각이 보이지 않는 것으로 보아 재순환 영역의 폭이 감소되었음을 짐작할 수 있다. 흡입공기 유속이 일정한 상태에서 보조 공기가 공급되면 보조 공기에 의한 유동의 효과 때문에 공기 보조가 없는 경우 보다 전 액적크기군에서 유동각이 크게 나타나고 있다. 이는 공기 보조의 경우 액적들이 갖는 초기 운동량이 공기 보조가 없는 경우 보다 상대적으로 크고, 흡입유동의 영향을 적게 받기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

흡입유동이 있는 포트 내에서의 연료분무 거동을 분무 가시화와 더불어 PDPA 계측하고 5개의 액적크기군을 고려하여 액적크기에 따른 유동특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

크기가 작은 액적들은 흡입유동을 잘 따르나, 큰 액적들은 흡입유동을 잘 따르지 않고 초기 분사된 운동량에 의해 유동하므로 흡입유동에 수직인 방향의 거리가 증가할수록 크기가 큰 액적들이 다수 분포하며 SMD 또한 크게 나타났다.

분무의 충돌 벽면에 근접한 $Z/d = 9.0$ 위치에서 벽면 충돌 이후 벽면으로 뛰어 오르는 액적들은 주로 $30\mu\text{m}$ 이하로 2차 미립화를 확인 할 수 있었으며, 흡입공기 유속이 증가함으로써 $D > 100\mu\text{m}$ 액적크기군의 크기가 큰 액적들의 분포가 증가하여 뚜렷한 SMD 증가를 보였다.

흡입공기 유속이 큰 유동 중에 공기 보조가 없고, 연료분사기의 경사각이 큰 경우, 흡입유동에 대한 유동각이 작게 나타나므로 흡입공기 유속을 잘 따른다는 사실을 알 수 있다.

후기

본 연구는 96년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME96-B-09)의 계속과제로 수행된 2차년도 연구결과이며 이에 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Gallopoulos, N., 1992, " Bridging the Present to the Future Personal Transportation-The Role of Internal Combustion Engines ", SAE 920721, pp.808~819.
- (2) Saikalis, G., Byers, R., and Nogi, T., 1993, " Study on Air Assist Fuel Injector Atomization and Effects on Exhaust Emission Reduction ", SAE 930323, pp.440~446.
- (3) Harada, K., Shimizu, R., Kurita, K., Muramatsu, M., Makimura, T., and Ohashi, M., 1992, " Development of Air-Assisted Injector System ", SAE 920294, pp.400~407.
- (4) Nemecek, L. M., Wagner, R. M., and Drallmeier, J. A., 1995, " Fuel Droplet Entertainment Studies for Minimization of Cold-Start Wall-Wetting ", SAE 950508, pp. 1~11.
- (5) Arcoumanis, C., Whitelaw, D. S., and Whitelaw, J. H., 1997, " Gasoline Injection against Surface and Films ", Atomization and Sprays, Vol. 7, pp. 437~456.
- (6) Wagner, R. M., Nemecek, L. M., and Drallmeier, J. A., 1997, " Fuel Delivery in a Port Fuel Injected Spark Ignition Engine ", Atomization and Sprays, Vol. 7, pp. 629~648.
- (7) Tokuoka, N., Yamaguchi, Y., Takada, M., and Zhang, F., 1991, " The Spray Structure from Swirl Atomizers (Part 1 : General Structure of the Spray) ", ICLASS-91, Paper 21, pp. 233~240.
- (8) Zhang, F., Yamaguchi, Y., Takada, M., and Tokuoka, N., 1991, " The Spray Structure from Swirl Atomizers (Part 2 : Effect of Injection Pressure and Atomizer Characteristics on the Spray Structure) ", ICLASS-91, Paper 22, pp. 241~248.
- (9) 김원태, 강신재, 노병준, 1997, " 간헐적인 연료분무의 유동특성에 관한 연구 ", 대한기계학회논문집(B) 제21권 제9호, pp.1198~1206.
- (10) Nogi, T., Ohyama, Y., Yamauchi, T., and Kuroiwa, H., 1988, " Mixture Formation of Fuel Injection Systems in Gasoline Engine ", SAE 880558, pp. 97~104.
- (11) Samenfink, W., Hallmann, M., Elsäßer, A., Wittig, S., 1994, " Secondary Break-up of Liquid Droplets : Experimental Investigation for a Numerical Description ", ICLASS-94 Rouen, France, Paper I-21, pp.156~163.
- (12) Oda, T., Nishida, K., Hiroyasu, H., 1994, " Characterization of Liquid jet atomization across a High-Speed Airstream by Laser-Sheet Tomography", ICLASS-94 Rouen, France, Paper VI-5, pp.624~631.