

## 4공 가솔린 분사기의 2중 분무 사이에서 연료 액적들의 유동특성

김원태\* · 강신재\*\* · 노병준†

(2002년 10월 23일 접수, 2003년 2월 10일 심사완료)

### The Flow Characteristics of Fuel Droplets between the Twin Spray for 4-hole Gasoline Injectors

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

**Key Words:** Twin Spray(2중분무), 4-Hole Gasoline Injector(4공 가솔린분사기), Joint Probability Density Function(결합확률밀도함수), PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)

#### Abstract

This study investigates the flow characteristics of fuel droplets between twin spray for the 4-hole injector used a 4-valve gasoline engine. The injectors for this study were the three types of 4-hole gasoline injector in which orifice diameter was 0.24mm. The spray behavior of twin spray was investigated by means of visualization employed stroboscope. A PDPA system was employed to simultaneously measure the size and velocity of fuel droplets. The 3 dimensional mean velocities, droplet size distributions, SMD and joint probability density function of velocity and droplet size are analyzed at the center of the spray and the center region of twin spray. As a result, the configurations of injector exit such as orifice interval and length of outlet, are very important factors that affect the flow characteristics of fuel droplets at the center region of twin spray.

#### 기호설명

A,B,C : 분사기의 종류  
D : 액적직경 ( $\mu\text{m}$ )  
F(D) : 수확률 밀도분포 함수  
st : 분사기의 행정  
U,V,W : 평균속도 ( $\text{m/s}$ )  
u,v,w : 순간속도 ( $\text{m/s}$ )  
X,Y,Z : 직각좌표계 ( $\text{mm}$ )

#### 첨자

c : 2중 분무의 중심  
max : 최대값  
mid : 중간값  
min : 최소값

#### 1. 서론

자동차 엔진의 흡입능력을 표시하는 체적효율은 피스톤이 실린더 내로 흡입한 실제의 공기체적을 행정체적으로 나눈 값으로서 엔진의 출력향상에 중요한 인자로 작용한다. 즉, 체적효율이 증가함에 따라 엔진의 출력은 증가한다. 따라서, 대부분의 가솔린 엔진들은 고회전시 흡입구가 협소하여 체적효율이 떨어지고, 밸브계가 무거워 고회전 하는데 장애가 되는 기존 흡배기 시스템을

† 전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술 연구센터

E-mail : rhobj@chonbuk.ac.kr  
TEL : (063)270-2370 FAX : (063)277-7308

\* 전북대학교 기계항공시스템공학부

\*\* 전북대학교 기계항공시스템공학부, 공업기술연구소

개량하여 흡기밸브 2개 배기밸브 2개의 4밸브엔진을 채택하고 있다. 엔진 설계시 실린더 내경이 결정되면 흡기밸브도 그에 비례하여 결정되는데, 흡기밸브와 배기밸브가 각각 1개씩인 2밸브엔진에서는 실린더 내경의 0.5배, 4밸브엔진의 경우는 0.4배 전후가 흡기밸브의 최대 지름으로 2밸브에서 4밸브화 함으로서 약 30%의 흡기밸브 면적이 증가한다. 그 결과 보다 높은 고회전에서 체적효율을 감소 없이 고출력을 얻을 수 있다.<sup>(1)</sup> 그러나, 엔진의 체적효율을 향상시키기 위해 4밸브 시스템을 채택한 포트 분사식 가솔린 엔진의 경우, 흡기포트 내에 단일 분무가 형성되면 연료 액적들이 아무리 양호하게 미립화 된다고 할지라도 2개의 밸브로 갈라지는 흡기포트의 분리벽에 부착되는 연료 액적들로 인하여 벽류가 형성되어 엔진의 저온 시동시 미연탄화수소의 배출량은 도리어 증가한다.<sup>(2,3)</sup> 그러므로, 연료 액적들이 분리벽 부착에 의한 벽류 생성을 억제하기 위하여 2중 분무가 형성되는 2공 분사기가 개발되어졌으며, 2중 분무를 유지하면서 미립화를 촉진하려는 연구들이 시도되었다.<sup>(4-8)</sup> 그러나, 흡기포트 내부의 분리벽이 위치하는 2중분무 사이에서의 분무유동특성에 관한 연구는 아직까지 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 연료분사기 출구의 4개의 오리피스로 분출되는 연료가 서로 충돌하여 2중 분무를 형성하는 4공 분사기들의 분사기 출구 형상변화에 따른 분무유동특성을 파악하고, 2중 분무 사이의 연료 액적들의 액적크기 분포 및 3차원 유동 특성을 고찰함으로써 2개의 흡기밸브를 갖는 포트 분사식 4밸브 가솔린 엔진의 흡기계 설계의 기본 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

### 2.1 4공 가솔린 분사기

Fig. 1에 본 연구에 사용된 3가지 형태의 4공 가솔린 분사기들의 노즐부 형상과 동일한 직경을 갖는 오리피스의 구성을 보이고 있다. A형은 각각 0.72mm 떨어진 두개의 오리피스에서 분출되는 연료 분류가 충돌하여 2중 분무를 형성하도록 설계되어 있는 단순한 형상을 하고 있으며, 오리피스로부터 분출되는 연료 분무를 단속하기 위하여 볼 밸브를 사용하였고, 볼 밸브의 스템(stem)은 천공된 판을 말아 밸브 전체의 무게를 경량화하

였다. 그러므로, 적은 솔레노이드 코일(solenoid coil)로도 쉽게 스프링력을 이길 수 있는 자성을 만들어 분사기의 전체적인 크기와 무게를 감소시켰다. B형은 일반적인 2공 분사기의 외형과 내부가 동일하며 각각 0.5mm 떨어진 2개의 오리피스로 분출되는 분무가 충돌하여 2중 분무를 형성하고, 여기에 연료 분무의 미립화를 촉진하기 위한 공기가 하나의 공기 유입구로부터 유입되어 그림에서와 같이 복잡한 유동통로를 거쳐 오리피스에서 분출되는 연료분무에 작용한다. C형은 노즐 출구부에 직경 1mm의 분리봉이 설치되어 있는 형태로 A형과 같은 볼밸브를 가지고 있는 유사한 구조를 하고 있으며, 4개의 오리피스로 분출되는 연료 분무의 미립화 향상을 위한 보조공기는 4개의 공기 유입구를 통하여 공급된다. 그러나, 본 연구에서는 보조 공기의 공급이 없는 상태에서 분사기 출구 형상에 따른 2중 분무 사이의 유동특성을 고찰하였다.

### 2.2 실험장치

4공 가솔린 연료 분사기의 분무 액적의 크기와 속도를 동시에 측정하기 위하여 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 연료 공급부, 연료 분사 제어부 및 분무 액적의 크기와 속도를 동시에 측정하기 위한 PDPA 측정장치로 구성하였다.

연료의 공급은 연료 탱크 내에 설치되어 있는 연료 공급 펌프에 의해 연료 분사기의 분사압력보다 높은 압력으로 이루어진다. 연료펌프에서 연료 분사기로 공급되는 연료는 연료 속에 잔존

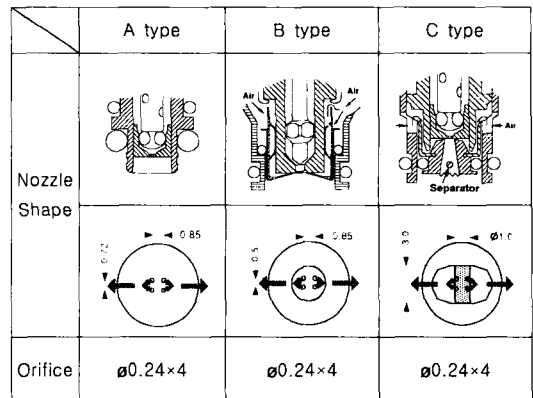


Fig. 1 Configuration of 4-hole type injectors

하는 미세한 입자들을 제거하기 위하여 연료 필터를 통과시켰다. 연료 필터를 통과한 연료는 딜리버리 파이프(delivery pipe)에 공급되고 설정 분사 압력을 유지하기 위하여 압력 조절기에 의해 설정 압력을 초과시 연료는 다시 연료 탱크로 되돌아가도록 하였다. 딜리버리 파이프 내의 연료 압력을 측정하기 위하여 정압관을 인출하여 압력 센서(Druck, PDCR 910)와 연결하고 검출된 압력을 디지털 압력변환기(Druck, DPI 420)로 관측하였다. 연료분사기의 솔레노이드 밸브를 개폐하여 간헐적인 분무를 생성하기 위한 연료분사 제어는 연료 분사 조절장치를 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터에 의해 연료 분사시기와 기간을 조절할 수 있도록 하였다. 가솔린 연료 분무의 액적 크기와 속도를 동시에 측정하기 위해 본 연구에서는 3차원 PDPA 시스템을 이용하였다. 광원으로 사용되는 레이저는 공냉식 Ar-ion 레이저(Ion Laser Technology, Max. power : 750mW)를 사용하였다. 본 실험에서는 산란광을 측정하기 위하여 송광부와 수광부가 이루는 각도는 송광부에서 방사된 레이저광의 진행방향으로 56°가 되게 설치한 전방산란방식을 채택하였다. 3개의 측정체적이 한 점에서 이루어져야 3차원 유속 측정이 가능하므로 송광부와 수광부는 벤치에 견고하게 고정하였으며, 연료분사기를 컴퓨터에 의해 정확하게 측정위치로 이동이 가능한 3차원 이동장치에 설치하여 측정위치로 이동하였다. 측정된 데이터의 처리를 위하여 PDPA에서 나오는 신호를 버스트(burst) 검출방식으로 입자의 크기와 속도를 각각 도플러 신호의 상대적 위상차와 주파수에 의해 측정하는 신호처리기(DANTEC, 58N10)와 컴퓨터를 온라인화 하였다.

2.3 측정방법

연료분사기로부터 분사되는 2중 분류를 형성하는 분무 액적들의 유속과 액적크기를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 PDPA 측정영역을 설정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 연료분사기의 선단으로부터 분무 하방향을 Z축으로 설정하여 각각 10mm, 40mm, 70mm, 100mm의 4개의 측정단면을 설정하였으며, 각각의 측정단면인 XY단면은 분무 가시화로부터 액적들이 밀집되고, 액적의 속도가 빠른 분무 중심영역은 조밀한 간격으로 측정을 하고, 액적 속도가 느리고 희박한 영역은

성기계 측정 위치를 설정하였다. 연료분사기의 분사압력은 300kPa로 일정하게 유지하였고, 분사기간은 5ms, 분사주기는 100ms로 고정하였다. 이때 각 분사기들의 연료분사량은 A형 분사기는 10.5 mg/st, B형 분사기는 8.1 mg/st, C형 분사기는 8.5 mg/st로 A형 분사기가 다른 분사기 보다 약 24% 정도 다소 많은 동적연료분사량을 보였다.

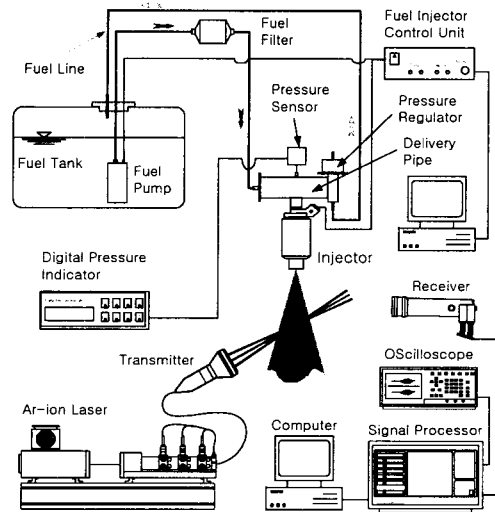


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

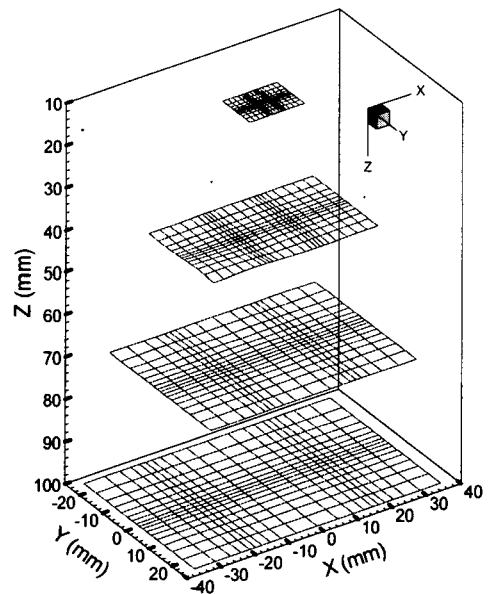


Fig. 3 Measuring positions for PDPA

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분무거동 특성

연료분사기에 분사개시 펄스를 입력한 이후 시간변화에 따라 분무가 발달되어 가는 형상을 고찰하기 위하여 스트로보스코프의 발광주기를 연료분사기의 분사펄스 주기와 동기시킨 후 스트로보스코프의 발광시기를 지연시킴으로서 지연된 시간에 분사된 연료분무의 거동을 파악하였다. 스트로보스코프의 지연시간은 분사기의 분사 개시 펄스 이후 시간과 동일하다. Fig. 4는 연료분사기에 분사개시 펄스 이후 0.6ms 지난 시간에서의 분무 가지화 영상을 보다 명확한 이해를 위해 음영 처리하여 나타내었다. A형과 B형 분사기의 경우, 두 분무사이에 다수의 분무 액적들이 분산됨을 알 수 있으나, C형 분사기는 분사기 출구의 분리봉에 의한 영향으로 두 분무 사이의 액적들의 밀집이 다소 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 동일한 시간에 분사기 출구로부터 측정된 분무의 길이가 A형 분사기의 경우 다른 형태의 분사기 보다 다소 길게 보이고 있다. 이는 A형 분사기 출구부의 형상이 다른 분사기들보다 짧고 분사되는 연료량이 많기 때문으로 판단된다.

분무 가지화 영상으로부터 보다 정량적인 분무 특성을 고찰하기 위하여 분사개시 이후 동일 시간 대에서 얻은 10여 장의 가지화 영상을 합성한 이중 분무의 오른쪽 분무에 대한 분무 특성들을 고찰하였다. Fig. 5는 이들 가지화 영상으로부터 얻은 분무의 관통도를 보이고 있다. A형 분사기의 분무 관통도가 가장 크게 나타나고 있으며, B형 분사기의 경우, 분사기의 밸브 시트와 접하는 니들 밸브의 관성력이 A형과 C형의 볼 밸브의 관성력 보다 크기 때문에 분사 초기에는 작은 분무 관통도를 보이다가 분사개시 이후 5.8ms부터는 분사기의 오리피스로부터 출구까지의 길이가 긴 C형 분사기를 앞지르고 있다. 이런 현상은 분사 개시 이후의 시간변화에 따라 분무의 관통거리가 분사초기에는 선형적으로 증가하나 분무 선단이 정지 대기로부터 받는 항력에 의한 운동량 손실로 점차 감소하기 때문이라 생각된다.

Fig. 6은 이중 분무 중 오른쪽 분무의 분무각과 두 분무의 중심선 사이의 각인 분리각을 각각의 분사기에 따라 도시하였다. B형 분사기의 경우 다른 분사기와 비교하여 분리각과 분무각의 크기가 작게 나타나고 있으며, A형과 B형 분사기는 분리각과 분무각이 큰 차이를 나타내지 않았으나 C형 분사기의 경우 분리봉의 영향으로 분리각이 분무각 보다 약 4.4% 크게 나타났다. 또한, 분사

가 작게 나타나고 있으며, A형과 B형 분사기는 분리각과 분무각이 큰 차이를 나타내지 않았으나 C형 분사기의 경우 분리봉의 영향으로 분리각이 분무각 보다 약 4.4% 크게 나타났다. 또한, 분사

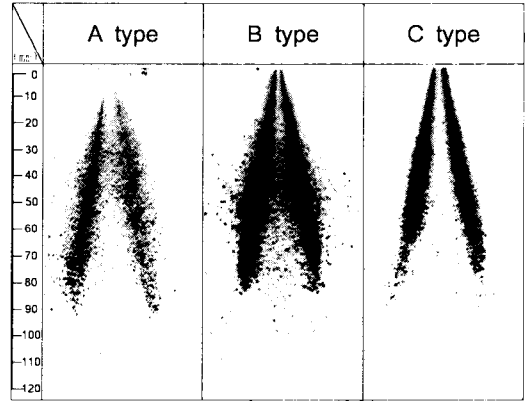


Fig. 4 Spray visualization at 6.0 ms after start of injection

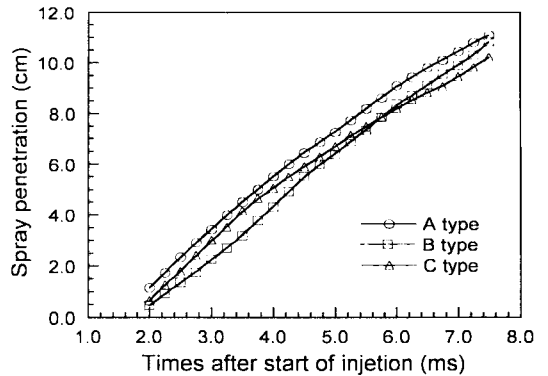


Fig. 5 Spray penetration of 4-hole injectors

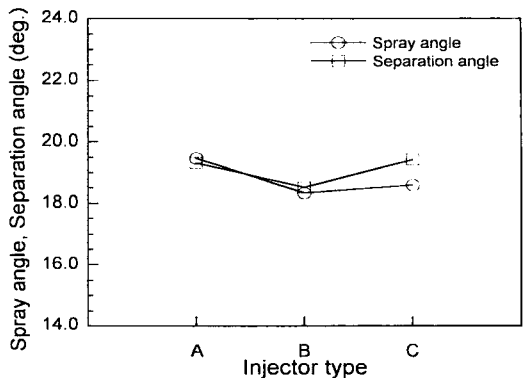


Fig. 6 Spray angle and separation angle

기 형상이 유사한 A형과 C형의 분리각은 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이들 분무 거동의 고찰로부터 분사기의 출구 형상에 따라 분무거동의 확연한 차이를 나타냄을 알 수 있다. 특히, C형 분사기의 경우는 출구부에 설치되어 있는 분리봉의 영향으로 두 분무 사이에 분산되는 액적들이 거의 나타나지 않고, 분리각과 비교하여 분무각이 작게 형성됨으로 포트 분사시 분리벽 및 포트벽면에 부착되는 연료 액적들의 양이 적을 것으로 판단된다.

3.2 분무 액적들의 속도분포

Fig. 7은  $Y=0mm$ 의 분무 중심선상에서 B형 분사기의 출구로부터 분무 하방향 측정단면에 따른 평균속도분포를 보이고 있다. 그림 (a)는 Z방향의 속도성분인 W의 평균속도분포를 도시하였다. 두 분무의 최대평균속도는 유사하게 나타났으며, 분무 상류의 W 평균속도의 최대값은 분무 하류로 진행하면서 급격하게 감소하고 있다. 이는 분무가 하류로 진행하면서 분무 폭의 증가와 정지 대기의 항력 때문으로 판단된다. 2중 분무 사이의 중심위치인  $X=0mm$ 에서 W 속도성분은 최대평균속도와 유사하게 분무 상류에서는 높게 나타나지만 분무 하류로 갈수록 속도의 감소 폭은 작아짐을 알 수 있다. 이는 분무 상류영역에서 두 분무 사이의 거리가 가깝기 때문에 각 분무의 중심영역에서 형성되는 최대속도에 의하여 영향을 크게 받지만 하류로 갈수록 두 분무 사이의 거리가 멀어지고 분무 중심의 최대속도값의 크기가 작아지면서 분무 중심영역의 W 속도의 영향력은 점진적으로 작아지고 있다. 이런 경향은 다른 연료 분사기에서도 동일하게 나타나고 있다. 그림 (b)는 Y방향의 속도성분인 V의 평균속도분포를 도시하였다. 2중 분무의 중심선상의 속도이므로 분무 하방향 측정 위치의 변화에 관계없이 거의 0에 가까운 속도분포를 보이고 있다. 그림 (c)는 X방향의 U 속도성분의 평균값을 보이고 있다. W 평균속도가 최대값을 보이는 분무중심 위치에서 U 속도도 최대값을 나타내며, 분무 하방향으로 진행할수록 최대값은 감소하고 있다. 또한, 두 분무의 중심위치인  $X=0mm$ 에서 거의 대칭적인 분포를 나타내고 있다. 두 분무의 중심위치에서 오른쪽의 속도분포가 음의 속도값을 나타내는 것은 두 분무의 중심을 기점으로 X방향 속도의 방향

이 반대가 되기 때문이다.

Fig. 8은 두 분무 중심에서의 W속도성분이 2중 분무의 중심에 미치는 영향을 평가하기 위하여 2중 분무 중심 위치인  $X=0mm$ 에서의 W속도성분의 평균속도( $W_c$ )를 각 분무의 최대 W평균속도를 평균( $W_{max}$ )하여 나누었다. 이 값이 클수록 분무

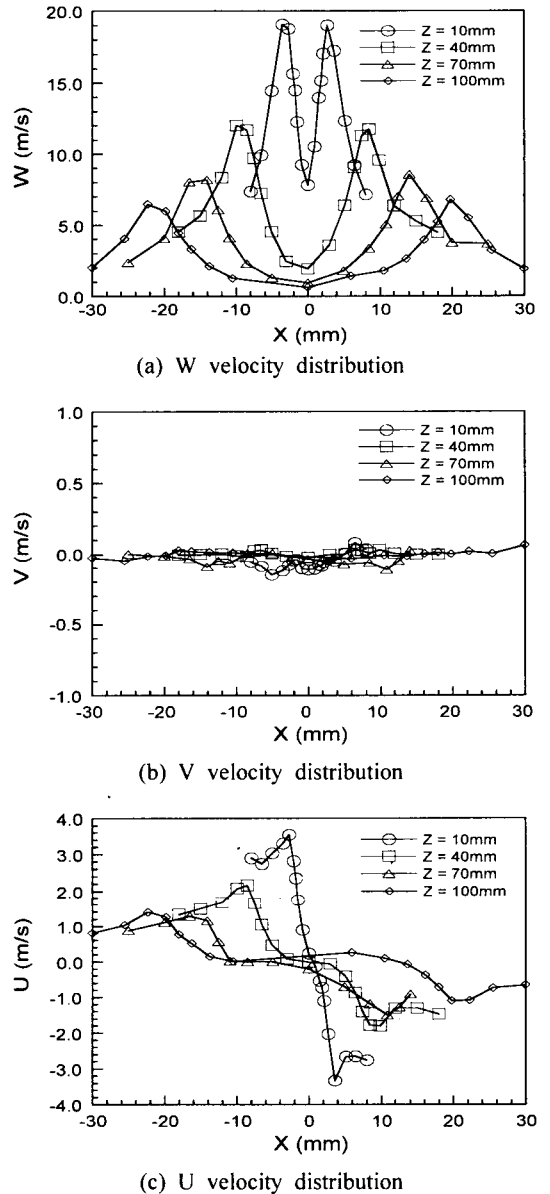


Fig. 7 Mean velocity distribution for B type injector at  $Y=0mm$

중심의 최대 W속도에 의한 영향이 2중 분무의 중심 위치의 W속도에 크게 작용한다. 모든 분사기가 분무 하류로 갈수록 두 분무 사이의 거리가 멀어지면서 W속도성분의 분무 중심에서의 최대값의 영향은 작게 나타났고 있으며, A형 분사기의 경우 다른 분사기와 비교하여 전 측정 영역에 걸쳐 분무 중심에서의 최대값의 영향이 크게 나타나고 있다. 그러나, C형 분사기의 경우는 다른 분사기들과 달리 분사기 출구의 선단 영역에서부터 분무의 최대 W값의 영향이 두 분무 사이의 중심에서 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 분사기 출구부가 다른 분사기보다 길고, 분리봉이 설치되어 있어 두 분무의 상호작용에 의한 영향이 상대적으로 미약하기 때문으로 판단된다.

Fig. 9는 속도성분의 통계학적인 분석을 적용함으로써 독립된 두 속도성분들을 동시에 결합하여 얻어진 결합빈도수를 이용하여 액적이 갖는 w속도 성분과 u속도 성분을 결합확률밀도함수로 두 분무의 중심선상에서 W평균속도가 최대인 위치와 가장 최소 평균값을 갖는 X=0mm에 대하여 도시하였다. 그림 (a)의 Z=40mm 위치의 W평균속도가 최대인 위치(X=-9.9mm)에서 큰 w속도 성분과 u속도성분의 빈도수가 높게 나타나고 있으며, 작은 크기의 w속도와 u속도의 빈도수도 다소 보이고 있다. 두 분무의 중심 위치인 X=0.0mm에서는 u속도성분이 0값을 중심으로 대칭적인 빈도수 분포를 보이고, u속도가 0값에 근접하는 액적들이 다소 큰 w속도성분을 보이는 것을 알 수 있다. 이로부터 Z=40mm 위치의 2중 분무 중심 위치에서는 두 분무가 분무 하방향으로 발달

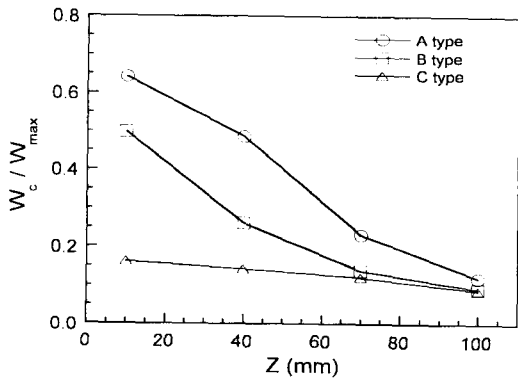
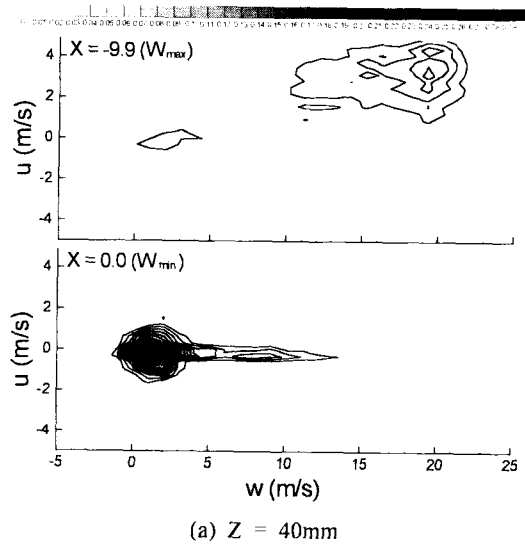
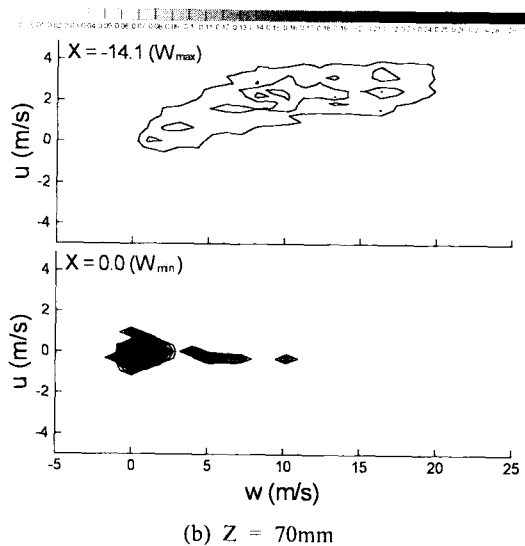


Fig. 8 Effect of  $W_{max}$  at the center of each twin spray centerlines

되어 가면서 두 분무 상호간의 영향이 작용하고 있음을 알 수 있다. 보다 분무가 진행한 그림 (b)의 Z=70mm 단면의 최대 W속도값을 갖는 X=-14.1mm에서 액적들의 w속도성분과 u속도성분 모두 넓은 범위의 속도분포를 나타내고 있다. 이는 분무의 중심 영역에서 액적들이 특정한 속도의 빈도수가 집중되지 않고 고른 속도분포를 보



(a) Z = 40mm



(b) Z = 70mm

Fig. 9 Joint probability density function of w velocity and u velocity for B type injector at Y=0mm

이므로 더욱 발달된 분포 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 2중 분부의 중심 위치인  $X = 0\text{mm}$ 에서는  $Z = 40\text{mm}$  위치보다는 큰  $w$ 속도의 빈도수가 감소하고 작은  $w$ 속도의 빈도수가 증가함에 따라 각각의 분부중심에서 주 속도성분에 의한 영향이 감소하고 있음을 보이고 있다.

3.3 액적크기와 속도 상관관계

분부를 형성하고 있는 액적들의 크기와 속도의 상관성을 보다 명확하게 고찰하기 위하여 PDPA

측정에 대한 오류가 없고 유동장이 발달되어 가는 단면위치인  $Z=40\text{mm}$ 와 이후 유동이 안정화되는  $Z=70\text{mm}$  단면을 비교하였다. Fig. 10은 각각의 측정 단면에서  $W$ 평균속도를 등속도선도로 표시하고,  $U$ 평균속도와  $V$ 평균속도를 속도벡터로, 액적의 평균직경인  $SMD$ 를 원으로 표시하여 측정 위치에 따른 액적들의 평균속도와  $SMD$ 를 도식적으로 나타내었다.  $Z = 40\text{mm}$  측정단면에서 C형 분사기의 경우 가시화 사진에서 알 수 있듯이 주위로 산포되는 액적들의 양이 적으므로 분부의 확

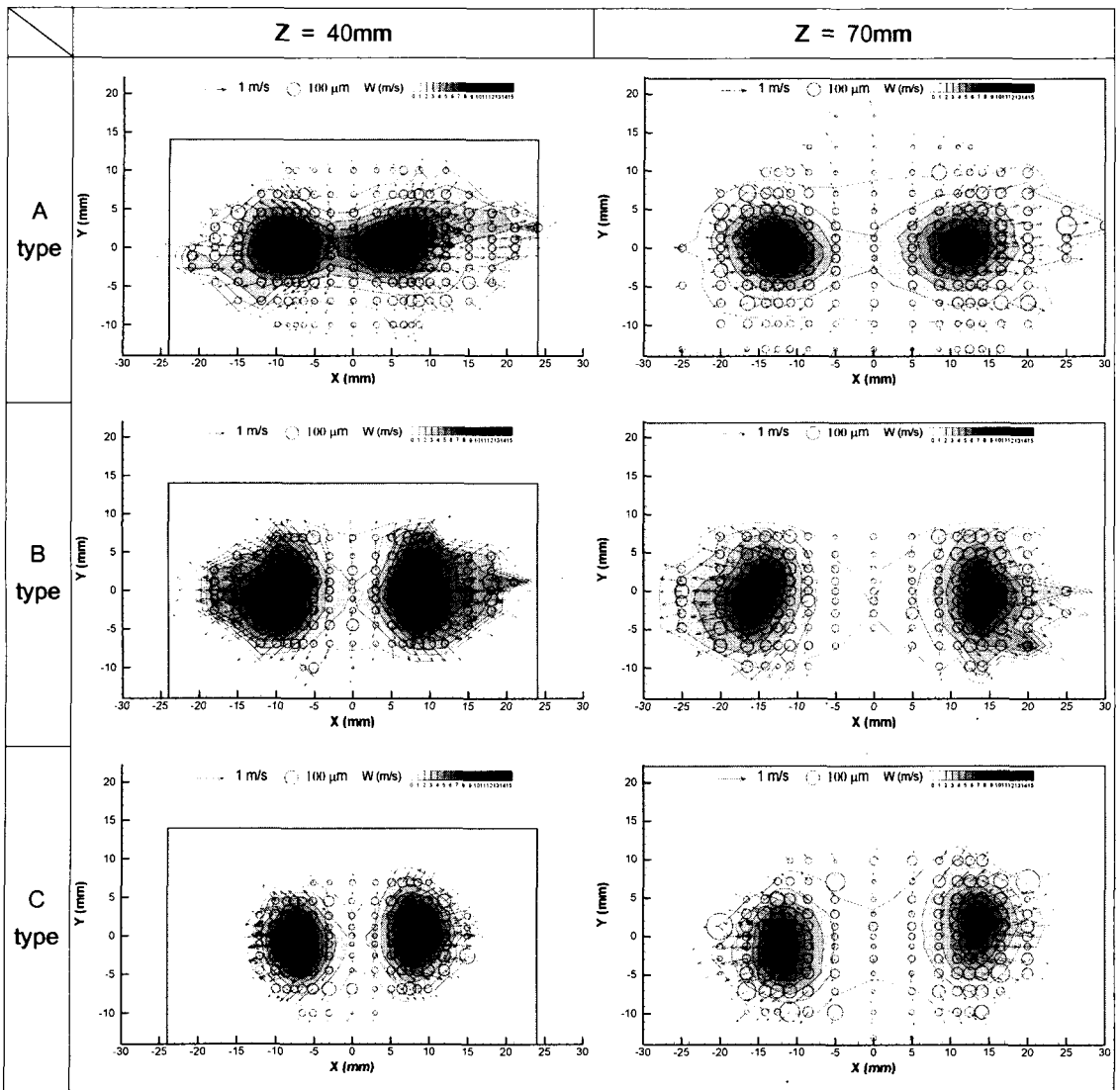


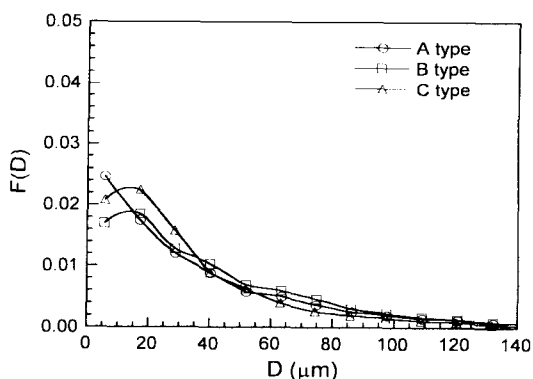
Fig. 10 Relations of the mean velocities and SMD

산폭이 상대적으로 작게 형성되고 있음을 알 수 있다. 그러나, A형과 B형 분사기의 경우는 주분무 영역에서 분산되는 액적들에 의하여 액적들이 유동하는 면적이 상대적으로 넓게 분포하고 있다. 또한, 액적들의 유동속도가 빠른 분무 중심영역에서 액적의 평균직경인 SMD가 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 2중 분무의 중심영역에서는 작은 크기의 SMD 분포를 보이고 있다.  $Z = 70\text{mm}$  단면에서는  $Z = 40\text{mm}$  단면보다 분무유동 폭이 증가하여 보다 넓은 영역에까지 액적들이 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, W평균속도가 최대를 보이는 분무 중심영역의 SMD가 크게 나타나고 있으며, 2중 분무의 중심에서는 액적들이 매우 작은 크기를 보이거나, 분무 외곽으로 갈수록 SMD는 큰 값을 유지하고 있다. 따라서, 분무 외곽영역에서는 액적들의 유속이 작아 액적들의 재부착 현상이 발생하여 SMD의 증가를 초래한 것으로 생각된다. Z방향 측정 단면 모두, 각각의 분무 중심에서 2중 분무의 중심영역( $X = 0\text{mm}$ ) 방향으로의 U평균속도는 나타나지 않고 있다. 이는 단일 분무의 경우와는 달리 분무 중심에서 분무 외곽으로의 퍼짐 현상은 발생하지 않고, 두 분무가 분리벽에 부착되지 않기 위해 일정한 분리각을 유지하면서 유동하기 때문이다.

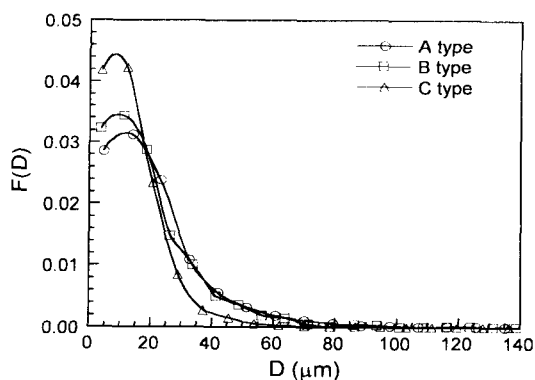
2중 분무의 중심선상에서의 액적들의 크기를 보다 명확하게 고찰하기 위하여 Fig. 11에  $Z = 40\text{mm}$  단면에서 2중 분무 중 왼쪽 분무에 대하여 최대 W 평균속도를 나타내는 분무의 중심과 2중 분무의 중심 위치( $X = 0.0\text{mm}$ )인 최소 W 평균속도 위치를 선정하여 이들의 액적들의 크기 분포를 고려하기 위하여 액적들의 크기에 따른 빈도수로 표시하는 확률밀도분포함수로 나타내었다. 그림 (a)의 최대 W 평균속도를 보이는 왼쪽 분무의 중심에서 A형, B형, C형 분사기 모두 약 5~20  $\mu\text{m}$  영역의 액적크기의 빈도수가 높게 나타나고 있으며, 60  $\mu\text{m}$  이상의 액적들도 분사기 형상과 관계없이 거의 일정한 분포의 빈도수를 보이고 있다. 그러나, 그림 (b)의 2중 분무의 중심위치인 W 평균속도가 가장 작은 위치에서는 약 10  $\mu\text{m}$  영역의 액적들의 빈도수가 가장 높게 나타나고 있으며 A형, B형, C형 순으로 빈도수가 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 분사기의 형상에 따른 특성으로 생각된다. 그리고 분무중심의 경우 40  $\mu\text{m}$  이상의 크기가 큰 액적들이 다수 분포하고 있으나,

2중분무 중심에서는 40  $\mu\text{m}$  이상의 액적들의 분포는 급격하게 감소하고 20  $\mu\text{m}$  이하의 크기가 작은 액적들이 대부분의 분포를 나타내고 있다. 따라서, Fig.10에서 2중 분무의 중심위치에서 SMD가 각각의 분무 중심보다 작음을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 분무 중심영역과 두 분무의 중심사이의 액적크기분포를 보다 명확하게 고찰하기 위하여 A형 분사기의 수확률밀도분포를 수학적분포함수인 대수정규분포와 함께 최소 W평균속도를 갖는 위치, 최소 W 평균속도를 갖는 위치, 그리고 이들 평균속도의 대략적인 중간 위치의 2중 분무의 중심선상에서 액적크기분포를 도시하였다. 2중 분무의 중심 위치의 액적크기분포가 다른 위치보다 대수정규분포에 보다 접근하고 있으며, 60  $\mu\text{m}$  이상의 액적크기 분포의 경우 대수정규분포와 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 (a)의  $Z = 40\text{mm}$  단면에서 약 35  $\mu\text{m}$  이상의 액적들



(a) Spray center of left steam



(b) Center of dual steam

Fig. 11 Number probability density distribution of droplet size at  $Z = 40\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$



의 빈도수가 2중 분부의 중심으로 갈수록 급격하게 감소하고, 15-20 $\mu\text{m}$ 의 작은 액적들이 빈도수가 점진적으로 증가하여 SMD가 감소하는 원인이 되고 있음을 알 수 있다. 분부가 보다 하류로 진행된 그림 (b)의 Z = 70mm 위치에서 2중 분부의 중심 위치인 최소 W 평균속도를 갖는 영역에서 액적크기는 감소하여 대략적으로 10 $\mu\text{m}$  액적들이 최대 빈도수를 보이고 있으며, 분부 상류인 Z = 40mm 위치 보다 작은 크기의 액적들의 빈도수는 증가하고 있다. 따라서, 분부 하류로 분부가 발달되어 가면서 2중 분부의 중심위치에서는 약 10 $\mu\text{m}$  영역의 크기가 작은 액적들의 빈도수가 증가한다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 13은 A형 분사기의 분부 하방향으로 Z = 40mm 단면에서 왼쪽분부의 분부 중심인 최대 W 평균속도분포를 보이는 위치와 최소 W평균속도

를 보이는 2중 분부의 중심 그리고 이들 W평균속도의 대략적인 중간 값을 갖는 X방향위치에서 w속도성분과 액적크기와의 결합확률밀도분포를 보이고 있다. 그림 (a)의 최대 W평균속도를 나타내는 X = -8.5mm에서 약 25 $\mu\text{m}$ 이상의 액적들이 상대적으로 큰 w속도 성분을 보이고 있으며, 2중 분부의 중심에 접근할수록 25 $\mu\text{m}$  이상의 액적들은 액적 크기가 클수록 높은 w속도를 갖는 선형적인 분포를 나타내고 있다. 그러나, 25 $\mu\text{m}$  이하의 크기가 작은 액적들은 2중 분부의 중심 위치로 갈수록 w속도의 크기는 감소하고 그 빈도수가 증가함을 알 수 있다. 그러므로 25 $\mu\text{m}$  액적의 크기를 기준으로 이 보다 작은 액적들은 상대적으로 운동량이 작기 때문에 분부중심 영역뿐만 아니라 2중 분부의 중심영역에 까지도 작은 w속도를 유지하지만 이 보다 큰 액적들은 분부중심영

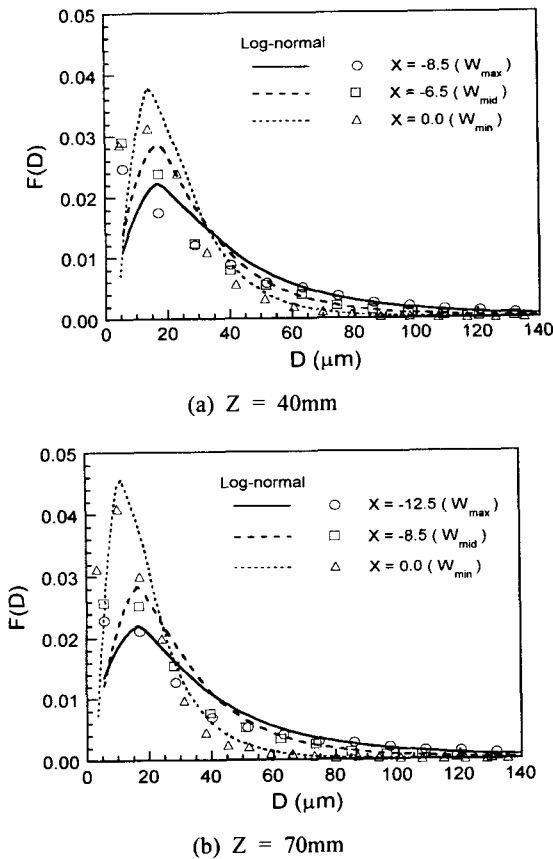


Fig. 12 Number probability density distribution of droplet size for A type injector at Y = 0mm

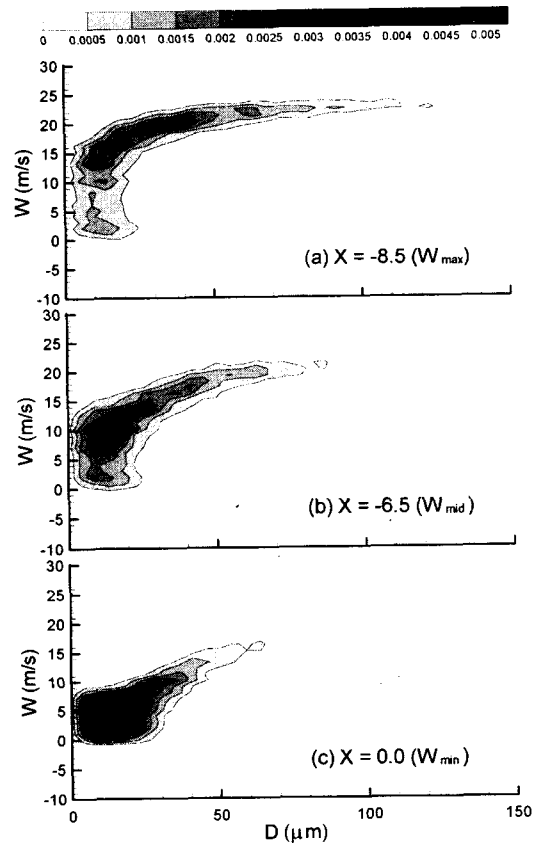
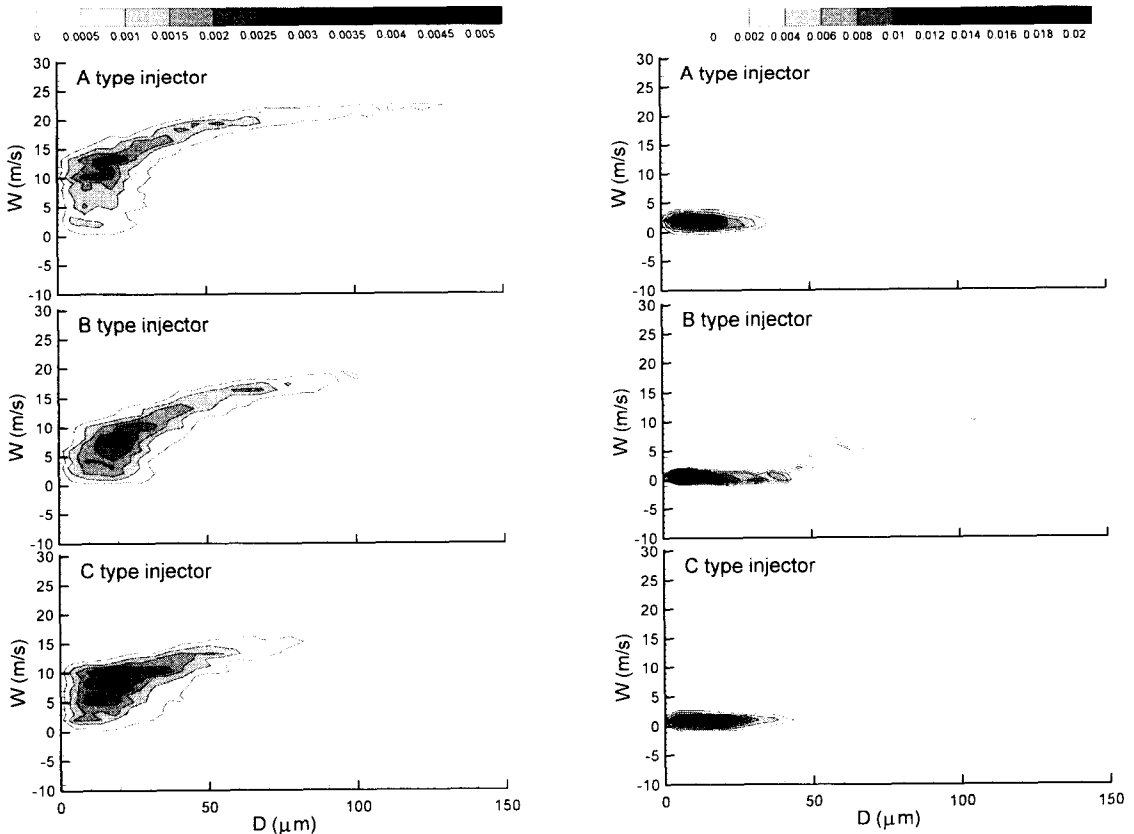


Fig. 13 Joint probability density function of w velocity and droplet size for A type injector at Z = 40mm, Y = 0mm

역에서 2중 분무의 중심으로 갈수록 액적크기와 w속도와는 선형적인 상관성을 나타내고 있다.

Fig. 14는  $Z = 70\text{mm}$  위치에서 3가지 분사기들에 대한 w속도성분과 액적크기와의 결합확률밀도분포를 도시한 것이다. 분무중심위치에서 측정된 그림 (a)의 A형 분사기의 경우는  $100\mu\text{m}$  이상의 큰 액적들이 높은 w속도 갖는 분포를 보이고 있으나, 분사기의 오리피스로부터 출구까지의 거리가 더 긴 B형과 C형 분사기는  $100\mu\text{m}$  이상의 큰 액적들은 존재하지 않고,  $50\mu\text{m}$  이상의 비교적 큰 액적들이 큰 운동량을 가지고 유동하고 있음을 알 수 있다. 특히, C형 분사기의 경우, 다른 분사기들 보다 크기가 큰 액적들이 적게 분포하고 있다. 이것은 분사기의 오리피스 이전까지 유사한 형상을 하고 있는 A형 분사기와 C형 분사기를 비교하여 볼 때 C형 분사기가 A형 분사기보다 오리피스로부터 출구까지의 거리가 2.7배정도 길

기 때문에 C형 분사기가 A형 분사기 보다 실제 PDPA의 측정위치가 분무 하방향에서 이루어지고 또한, 분사되는 연료량도 적기 때문으로 판단된다. 그림 (b)의 A형 분사기와 C형 분사기의  $Z = 70\text{mm}$  위치의 2중 분무의 중심 위치에서는  $Z = 40\text{mm}$  위치와는 달리 액적의 크기에 무관하게 w속도가 작게 나타나고 있다. 그러나, B형 분사기의 경우는  $50\mu\text{m}$  이상의 비교적 큰 액적들이 높은 w속도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로부터 B형 분사기의 경우, 두 분무의 상호작용에 의한 영향이  $Z = 70\text{mm}$ 의 2중 분무 중심까지 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서, 좁기포트 내에서 B형 분사기의 연료분사가 이루어질 경우 분사기 출구로부터 보다 먼 분무 하류까지 2중 분무의 중심에 위치하게 될 좁기포트 내부의 분리벽에 액적들의 부착량이 다른 분사기들 보다 많을 것으로 생각되어진다.



(a) Spray center of left steam

(b) Center of dual steam

Fig. 14 Joint probability density function of w velocity and droplet size at  $Z = 70\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$

Fig. 15는  $Z = 40\text{mm}$  단면에서 B형 분사기의  $u$  속도와 액적크기의 결합확률밀도분포이다. 왼쪽 분부의 중심에서 2중 분부의 중심으로 갈수록  $u$  속도의 양의 속도 크기는 감소하고, 음의 속도의 빈도수는 증가하고 있으며, 2중 분부의 중심에서는  $u$  속도가 영(zero)에 근접한 액적들이 크기에 무관하게 밀집되어 있음을 알 수 있다. 이는 왼쪽 분부의 중심에서 2중 분부의 중심쪽으로 액적들의 확산 정도가 분부 중심에서는 상대적으로 큰 속도를 가지면서 이루어지지만, 2중 분부의 중심 영역에서는 상대적으로 오른쪽 분부의 확산에 의한 영향을 받기 때문에  $u$ 속도가 영(zero)을 대칭으로 양과 음의  $u$ 속도가 높은 밀집도를 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 16은 B형 분사기의  $Z = 40\text{mm}$  위치 단면의 2중 분부의 중심선상 위치인  $Y = 0\text{mm}$ 에서  $v$ 속도와 액적크기의 결합확률밀도분포를 보이고 있다. 최대  $W$ 평균속도를 보이는 왼쪽 분부의 중심에서

최소  $W$ 평균속도를 보이는 2중 분부의 중심으로 갈수록 크기가 큰 액적들의 빈도수는 적어지고 대략적으로  $v$ 속도가 영(zero)을 중심으로 양과 음의 대칭적인 분포를 나타내고 있다. 측정위치가 분부의 중심선상이므로  $v$ 속도의 크기는  $1\text{m/s}$  이하의 작은 속도를 보이며, 특히  $20\mu\text{m}$  이하의 작은 액적들이 크기가 큰 액적들보다 주위 유동의 영향을 많이 받기 때문에 보다 넓은  $v$ 속도 범위를 나타내고 있다.

이들 결과로부터 2중 분부의 중심선상에서 측정된  $Y$ 방향의 속도 성분인  $v$ 속도는 최대  $W$ 평균속도를 보이는 분부의 중심영역과 최소  $W$ 평균속도를 보이는 2중 분부의 중심에서 큰 차이가 없고,  $X$ 방향의 속도성분인  $u$ 속도는 2중 분부가 일정한 분리각을 유지하면서 유동하기 때문에 평균속도분포에서는 분부의 분사되는 방향으로  $U$ 속도가 나타났으나 결합확률밀도분포에서 음과 양의 속도가 모두 존재함을 알 수 있다. 또한, 2중

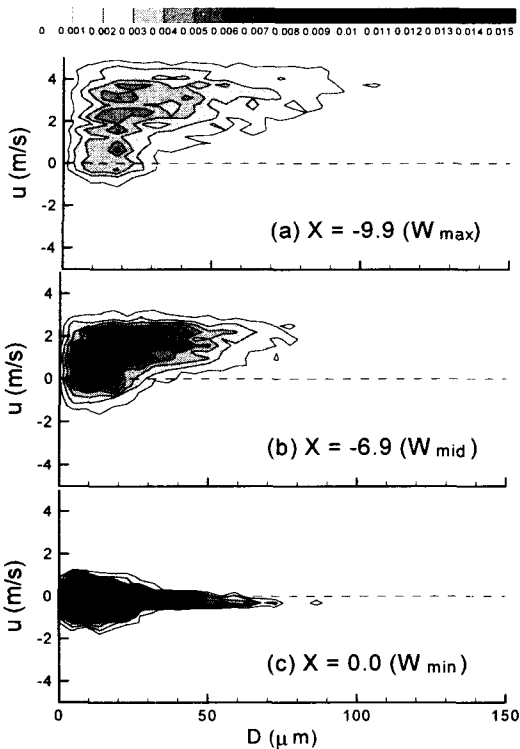


Fig. 15 Joint probability density function of  $u$  velocity and droplet size for B type injector at  $Z = 40\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$

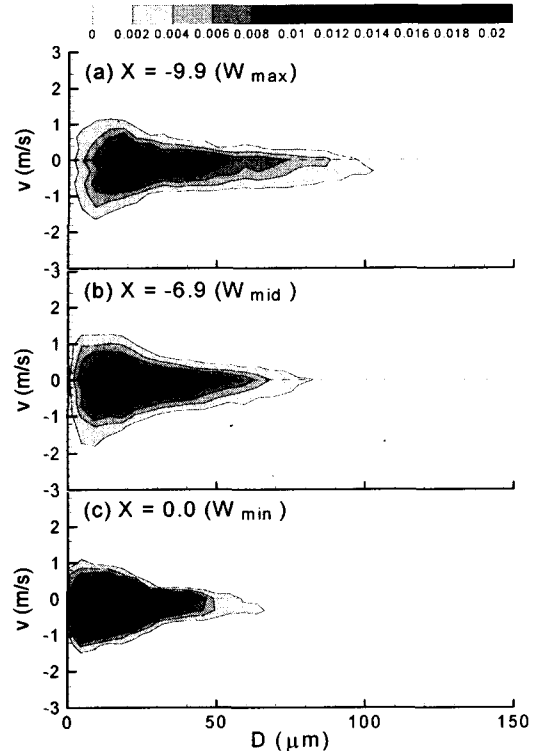


Fig. 16 Joint probability density function of  $v$  velocity and droplet size for B type injector at  $Z = 40\text{mm}$ ,  $Y = 0\text{mm}$

분무의 중심으로 갈수록 음의 방향 속도성분의 액적들의 분포가 증가하여 2중 분무 중심에서는 음의 방향속도성분과 양의 방향속도성분이 거의 일정한 분포를 보였고 큰 액적일수록 0에 근접한 속도를 나타내었다. 그러나, 분무의 Z방향 속도성분인 w속도는 분사기 출구형상에 따라 확연한 차이를 보였으며, 충돌되는 오리피스들의 중심과의 간격이 좁은 B형 분사기의 경우는 Z = 70mm의 두 분무의 중심영역까지 두 분무의 상호작용으로 인한 영향을 받음으로서 흡기포트 내부 분리벽에 부착되는 연료량이 다른 분사기 보다 많을 것으로 판단되어지며, C형 분사기의 경우는 분사기의 출구 길이가 길고, 2중 분무를 유지하기 위하여 출구부에 설치되어 있는 분리벽의 영향으로 분무 중심에서 액적크기와 w속도의 선형적인 상관성이 2중 분무의 중심영역에서는 나타나지 않고 있다.

#### 4. 결 론

각각 두 개의 오리피스로 분출되는 연료의 충돌에 의해 형성되는 4공 가솔린 분사기의 서로 다른 3가지 형상의 분무 액적들의 유동특성을 최대 평균속도를 갖는 각각 분무 중심 영역과 2중 분무의 중심영역에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 2중 분무의 중심영역으로 갈수록 대략 40 $\mu$ m 이상의 액적들의 분포가 급격하게 감소하고 약 20 $\mu$ m 이하의 크기가 작은 액적들의 분포가 증가하여 SMD가 작게 나타났다.

(2) 분무 액적들의 크기와 w속도의 상관관계는 분사기의 오리피스로부터 출구까지의 길이와 형상에 영향을 받았고 특히, 분사기 출구에 분리벽이 설치되어 있는 경우, 두 분무의 상호작용에 의한 영향이 2중 분무의 중심영역에서는 거의 영향이 없음을 알 수 있다.

(3) 분무가 서로 충돌하는 두 개의 오리피스들의 간격은 4공 분사기에 의해 형성되는 2중 분무의

중심영역의 유동특성에 영향을 미치기 때문에 흡기계 설계시 흡기포트 내부의 분리벽 위치 등의 인자들 고려하여야 할 것으로 판단된다

#### 참고문헌

- (1) Cho, J. H., 2001, *The Newest Internal Combustion Engine*, Hakyounsa, Seoul, pp. 104~116.
- (2) Fox, J. W., Min, K. D., Cheng, W. K. and Heywood, J. B., 1992, "Mixture Preparation in a SI Engine with Port Fuel Injection During Starting and Warm-up," *SAE 922170*, pp. 1088~1099.
- (3) Kashiwaya, M., Kosuge, T., Nakagawa, K. and Okamoto, Y., 1990, "The Effect of Atomization of Fuel Injectors on Engine Performance," *SAE 900261*, pp. 699~705.
- (4) Yang, J., Kaiser, E. W., Siegl, W. O., and B. W. Anderson, 1993, "Effect of Port Injection Timing and Fuel Drop Size on Total and Speciated Exhaust Hydrocarbon Emissions," *SAE 930711*, pp. 493~506.
- (5) Kim, B. G., Lee, K. H. and Lee, C. S., 1998, "A Study on the Factors of Fuel-Film Formation in an EGI Gasoline Engine," *Trans. of KSME(B)*, Vol. 22, No. 11, pp. 1530~1537.
- (6) Iwata, M., Furuhashi, M., and Ujihashi, M., 1987, "Two-hole Injector Improves Transient Performance and Exhaust Emission of 4-valve Engines," *SAE 870125*, pp. 1~7.
- (7) Okamoto, Y., Arai, N., Nakagawa, K., Kosuge, T., and Atago, T., 1992, "Atomization Characteristics of Two-Stream Injector for 4-Valve Engines," *SAE 920705*, pp. 1491~1497.
- (8) Sugimoto, T., Takeda, K., and Yoshizaki, H., 1991, "Toyota Air-Mix Type Two-Hole Injector for 4-Valve Engines," *SAE 912351*, pp. 1787~1793.