

노즐의 스윌러각과 형상비가 이중분무의 평균속도와 입경의 크기에 미치는 영향

김영진* · 정지원** · 최경민*** · 김덕줄†

(2004년 7월 12일 접수, 2004년 8월 25일 심사완료)

Effect of the Swirler Angle and Aspect Ratio of Nozzle on the Mean Velocity and SMD of Twin Sprays

Young-Jin Kim, Ji-Won Jung, Gyoung-Min Choi and Duck-Jool Kim

Key Words : Swirler Angle(스윌러각), Swirl Chamber Aspect Ratio(스윌실 형상비), Twin Spray(이중분무), PDA(위상도플러 입자분석기), SMD(자우터 평균 직경)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of swirler angle and the aspect ratio of swirl chamber of nozzle on the characteristics of single and twin spray. The characteristics of sprays have been investigated by measuring the spray angle, droplet size and velocity. Visualization of spray was conducted to obtain the spray angle and breakup process. The spray characteristics such as droplet size and velocity were measured by Phase Doppler Anemometry(PDA). It was found that the spray angle was increased with increasing the swirler angle. For both sprays, the axial velocity and SMD were decreased with increasing the swirler angle. It was also shown that the axial velocity and SMD were decreased with increasing the aspect ratio of swirl chamber, but for the twin spray, the axial velocity and SMD were not influenced significantly by the changing the aspect ratio of swirl chamber. The effect of swirler angle on the spray characteristics was greater than the aspect ratio of swirl chamber for single spray. The nozzle pitch was one of the important factors affecting the spray characteristics of twin spray.

기호설명

D_{32} : 자우터 평균 직경(SMD), (μm)
 d : 스윌실 직경 (mm)
 l : 스윌실 길이 (mm)
 l/d : 스윌실 형상비
 P_i : 분사압력 (MPa)
 r : 측정 반경방향 위치 (mm)

s : 노즐 피치 (mm)
 \bar{U} : 축방향 속도 (m/s)
 Z : 선단거리 (mm)
 α : 스윌러 각도 ($^\circ$)

1. 서 론

현대 사회에서 액체의 분무는 다양한 산업 및 기술 분야에서 응용되고 있다. 특히 미세가공공정, 연료분사장치 및 농업 등의 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 분사노즐로서 널리 사용되는 압력식 스윌노즐은 공간적으로 넓은 분무각을 가지면서 분사압력이 증가할수록 분무각이 커지고 액적의 크기는 작아지는 특성을 가진다. 따라서 로켓이나 제트엔진, 분무건조, 반도체 및

* 회원, 부산대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

***회원, 부산대학교 기계공학부

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : djkim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3072 FAX : (051)516-9598

전자부품 제조공정 등의 산업용 분무시스템에 널리 이용된다. 이에 따라 산업용 분무시스템 최적화를 위해 스웰노즐의 분무특성에 관한 연구⁽¹⁻⁷⁾가 활발히 진행되고 있다. Jung 등⁽⁸⁾은 이중분무의 중첩영역과 단일분무에서 액적의 거동 특성을 분석하여 이중분무의 중첩영역에서의 액적크기는 단일분무와는 다르다는 것을 관찰했으며, 노즐피치가 협소할수록 중첩영역에서 액적의 크기가 감소한다는 결론을 얻었다. Jung 등⁽⁹⁻¹¹⁾은 미세가공시스템에서 분무특성이 에칭특성에 미치는 영향을 연구하여 에칭특성과 분무특성이 상호 연관성을 가진다고 분석하였다.

Yule 등⁽¹²⁾은 고압분사에서 스웰노즐의 성능을 유출계수 (discharge coefficient, C_d)와 분무각, 액적크기등을 측정하여 연구하였다. 유입구 면적이 작아질수록 평균액적크기는 작아지고 일반적으로 분사압력이 증가하면 평균액적크기가 작아졌으며, 또한 출구 오리피스 지름이 감소하고 출구 오리피스와 스웰실의 길이가 증가함에 따라서 분출계수가 상당히 증가함을 보고하였다. Iciek⁽¹³⁾는 실험을 통해서 노즐의 형상비(l_0/D_0)가 2보다 작고 모서리가 날카로운 노즐의 경우에는 이력 현상이 나타났음을 보고하였는데, 이는 짧은 노즐의 경우 액체 분류가 오리피스의 내벽에 완전히 접하지 않은 상태에서 분사되기 때문인 것으로 결론지었다. Choi 등⁽¹⁴⁾은 액체의 물성치와 노즐의 형상 변화에 따른 압력스웰 노즐의 분무 특성을 연구하여 액적의 축방향 속도는 동점도가 증가함에 따라 감소하고 액적의 SMD와 축방향 속

도의 상관관계에 있어서는 동점도가 증가함에 따라 저속의 큰 액적들이 많이 분포하고 있음을 관찰하였다.

이러한 연구들은 단일분무에 대하여 스웰실 형상비에 주로 역점을 두고 있으나 스웰러각을 동시에 고려한 연구는 아직 미흡한 단계에 있다.

따라서 본 연구에서는 노즐의 기하학적인 형상, 즉 노즐내 스웰러 각도와 스웰실 형상비를 동시에 변화시켜 단일 및 이중분무를 대상으로 분무각, 액적크기, 속도와 같은 분무특성을 PDA 시스템을 통해 측정하여 비교하였다. 이러한 결과는 미세가공시스템의 산업용 분무 공정에 적합한 분무를 형성시킬수 있는 최적 노즐 설계의 기초자료로 제공될 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 실험장치의 구성은 크게 세 부분, 즉 분사시스템, 측정시스템 및 신호처리시스템으로 구성되어 있다. 분사시스템은 저장수조와 정수필터, 펌프 및 분사노즐 등으로 구성되어 있다. 측정시스템은 레이저를 포함한 송광부, 수광부, 3차원 이송장치, 이송장치 제어기 및 오실로스코프로 이루어져 있다. 신호처리시스템은 측정신호를 검출, 분석하는 신호처리기와 데이터를 처리하는 컴퓨터로 구성되어 있다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 노즐과 스웰러의 형

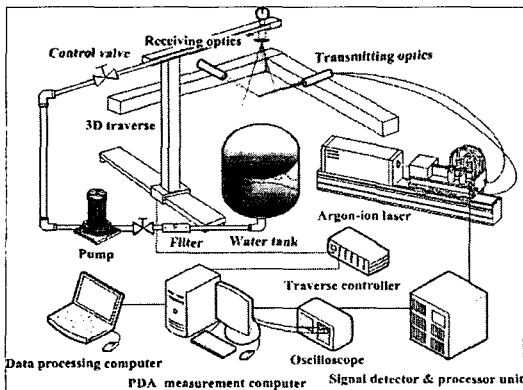


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

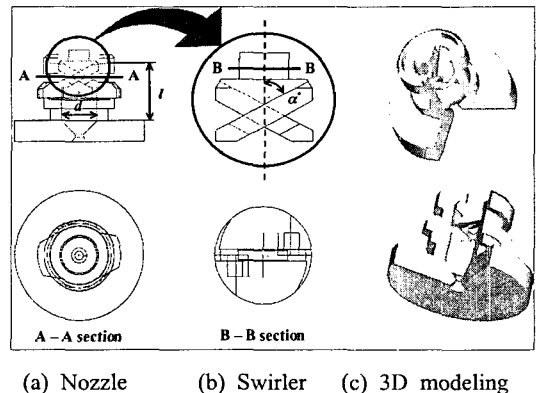


Fig. 2 Configuration of nozzle and swirler

상 및 3차원 모델링을 나타낸 그림이다. 노즐제작시 재료로는 가공의 용이함을 위해 금속을 대신해 내피로성, 강인성, 내마모성 등의 우수한 특성을 지니고 있는 폴리아세탈을 사용하였고 노즐은 밀링머신(NCHVN-85FO)을 이용하여 제작하였다.

Table 1은 본 연구에 사용된 노즐의 스윙실의 형상비와 스윙러각을 나타내고 있다. 스윙실의 직경(d)은 11.0mm이고 스윙실 길이(l)는 13.2, 17.5 및 22.0mm이다. 스윙실 형상비(l/d)는 스윙실 내부 직경에 대한 스윙실 내부 길이의 비로서 1.2, 1.6 그리고 2.0이다. 스윙러 각도(α)는 노즐의 수직중심축과 스윙러면이 이루는 각도이다. 본 연구에서 스윙러각의 선정은 스윙실의 출구부의 수축각(63°)에 대하여 0.8, 1.0, 1.2배로 하였다. 즉 49.5°, 63° 및 76.5°이다.

2.2 실험방법

본 실험에서 사용한 작동유체는 상온의 수돗물 이었고, 분사압력은 0.4MPa로 하였다. 측정위치는 축방향으로는 노즐의 출구로부터 분무 축방향으로의 선단거리가 150mm이었고, 반경방향으로는 분무 중심에서 분무가 존재하는 외곽영역까지로 하였다.

Fig. 3은 이중분무의 개략도이다. 단일분무 실험결과를 토대로 두 개의 노즐에서 분사되는 이중분무의 중첩되는 영역의 분무특성을 조사하였다.

두 노즐 중심축간의 거리(피치)가 60, 90, 120mm의 단면에 대해 중첩영역의 중심점에서부터 중첩

Table 1 Specification of nozzles

Nozzle		Aspect ratio (l/d)	Swirler angle α (°)
A	1	1.2	49.5
	2		63
	3		76.5
B	1	1.6	49.5
	2		63
	3		76.5
C	1	2.0	49.5
	2		63
	3		76.5

최외곽영역 위치까지 축방향 속도와 SMD를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일분무의 가시화

Fig. 4는 분사압력 0.4MPa일 때, 스윙러각과 스윙실 형상비 변화에 따른 분무형상을 가시화한 것이다. 스윙러각이 커질수록 분무각은 증가하였다. 이것은 노즐내부의 스윙러각이 커질수록 분무액적의 반경방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다. 또한 스윙실 형상비가 커질수록 분무각은 감소하였다. 이것은 스윙실 형상비가 커질수록 액체가 스윙실 내부에 체류하는 시간이 길어져

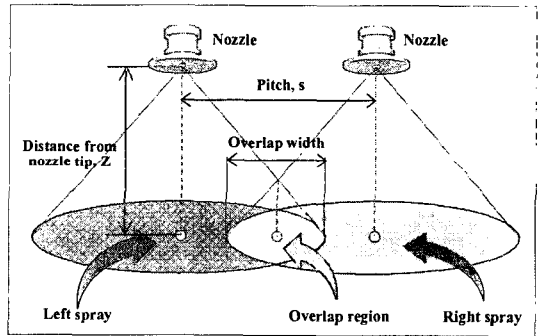
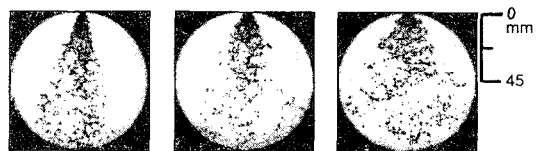
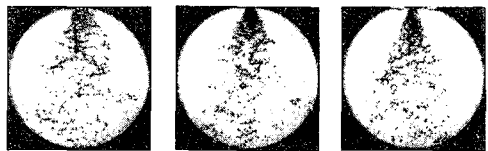


Fig. 3 Schematic of twin spray



$\alpha = 49.5^\circ$ 63° 79.5°

(a) Swirler angle (l/d=1.6)



l/d=1.2 1.6 2.0

(b) Aspect ratio ($\alpha = 63^\circ$)

Fig. 4 Visualization of spray at $P_1=0.4\text{MPa}$

노즐 내부에서 유동 박리-재부착 등에 의한 불안정한 난류 현상이 줄어들고 발달된 안정적인 유동 형태의 액체가 분출되기 때문에 사료된다.

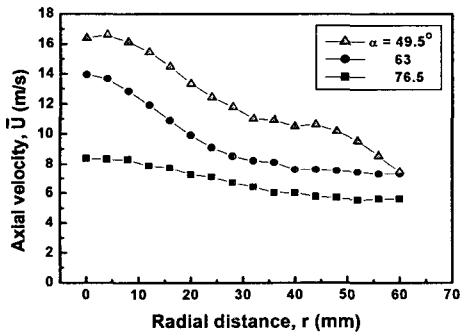
3.2 스월러각의 변화

3.2.1 단일분무

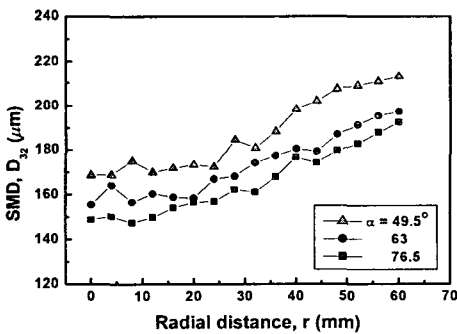
Fig. 5는 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스월실 형상비 1.6일 때, 단일분무에서 노즐내 스월러각 변화에 따른 분무의 축방향 속도 및 SMD를 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)에서 스월러각이 증가할수록 축방향 속도는 감소하였다. 이것은 분무의 가시화에서 나타난 바와 같이 노즐내부의 스월러각이 증가할수록 분무액적의 축방향 모멘텀이 감소하기 때문으로 사료된다.

Fig. 5(b)에서 스월러각이 증가할수록 SMD는



(a) Axial velocity



(b) SMD

Fig. 5 Single spray characteristics with swirler angle at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$ and $l/d=1.6$

감소하였다. 이것은 스월러각이 클 경우 반경 방향의 모멘텀이 증가하여 난류의 유동이 강하게 작용하여 분사된 액체의 분열을 촉진시킨 것으로 사료된다.

3.2.2 이중분무

Fig. 6은 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스월실 형상비 1.6, 피치 60mm일 때, 이중분무의 노즐내 스월러각 변화에 따른 축방향 속도와 SMD 변화를 좌우로 각각 나타낸 것이다.

이중분무에서 두 분무의 축방향 교차위치는 스월러각이 49.5°일 때 74mm, 63°일 때 50mm, 76.5°일 때 37mm이었다. 중첩영역의 폭은 선단거리 150mm에서 스월러각이 49.5°일 때 60mm, 63°일 때 90mm, 76.5°일 때 120mm 이었다.

액적의 축방향 속도는 단일 분무에서 볼 수 없었던 쌍봉성의 속도를 가지고 있다. 스월러각이 클수록 축방향 속도는 감소하였고 특히 스월러각이 작은 경우는 중첩부분이 중심의 좌우에 쌍봉성의 속도 분포를 나타내지만, 큰 경우는 그렇지 않았다. 이 쌍봉성은 단일노즐의 분무중심을 의미한다. 이것은 스월러각이 클수록 두 분무의 교차위치가 노즐 출구 가까이로 이동하여 상대적으로 분무의 중첩부분이 넓어져서 이중분무의 영향이 작아진 것으로 사료된다.

이중분무에서 SMD는 단일분무의 경우와 같이 스월러각이 클수록 입경은 작아졌다. 특히 스월러각이 상대적으로 적은 경우는 중첩부분의 중심부 근방에서는 속도 분포와 유사한 형태를 가지

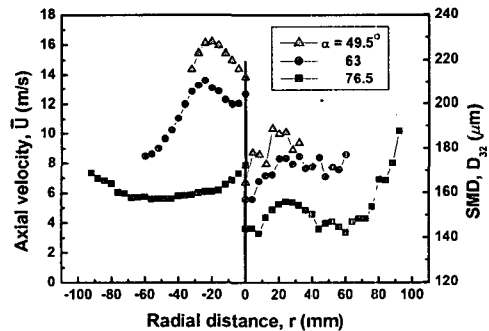


Fig. 6 Axial velocity and SMD with swirler angle in twin spray characteristics at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, $l/d=1.6$ and $s=60\text{mm}$

며 반경방향으로 갈수록 입경은 커졌다. 이것은 스윌러각에 따라서 분무의 중첩부분의 영역이 변하고 중심에서 반경방향으로 멀어질수록 이중분무의 효과가 적어져서 단일분무의 특성을 가지기 때문이다.

Fig. 7은 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스윌실 형상비 1.6, 피치 60mm일 때, 분무의 중첩영역의 중심에서 액적의 크기와 축방향 속도의 상관관계를 나타내고 있다. 스윌러각이 49.5°일 때, 액적들은 상대적으로 축방향 속도와 직경이 큰 액적들이 분포하고 있다. 또한 스윌러각이 76.5°일 경우에는 상대적으로 축방향 속도와 직경이 작은 액적들이 분포하고 있음을 알 수 있다.

3.3 스윌실의 형상비 변화

3.3.1 단일분무

Fig. 8은 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스윌러각 63°일 때, 단일분무에서 노즐내 스윌실 형상비 변화에 따른 축방향 속도와 SMD 변화를 나타낸 것이다. 스윌실 형상비 변화에 따른 축방향 속도와 SMD는 스윌실 형상비가 큰 값을 가지는 노즐에서 다소 작게 나타났다. 이것은 스윌실 길이가 길수록 유체의 스윌실 내부 체류시간이 길어져 스윌실 내부에 접하는 유동 단면적이 늘어나 마찰력의 증가를 가져와 액적의 축방향 속도의 저하와 스윌실 내부에서의 교란의 증가로 인하여 SMD가 작아지는 것으로 사료된다.

3.3.2 이중분무

Fig. 9는 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스윌러각 63°, 피치 60mm일 때, 이중분무에서 노즐내 스윌실 형상비 변화에 따른 축방향 속도와 SMD 변화를 좌우로 각각 나타낸 것이다. 이중분무에서는 스윌실 형상비 변화에 따른 분무특성들은 스윌러 각도의 영향만큼 크게 나타나지 않으나

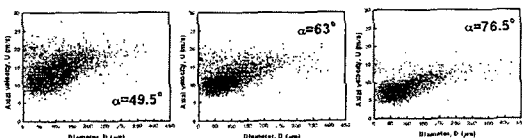
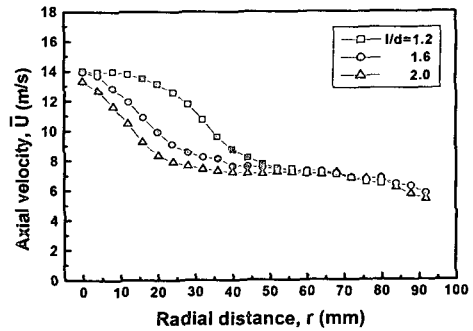
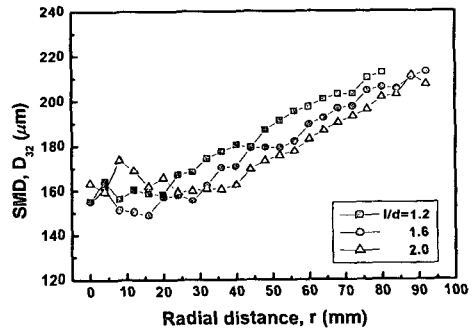


Fig. 7 Correlation between droplet size and velocity at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, $l/d=1.6$ and $s=60\text{mm}$



(a) Axial velocity



(b) SMD

Fig. 8 Single spray characteristics with aspect ratio of swirl chamber at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$ and $\alpha=63^\circ$

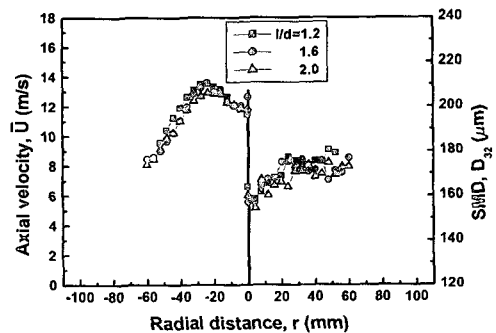


Fig. 9 Axial velocity and SMD with aspect ratio of swirl chamber in twin spray characteristics at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, $\alpha=63^\circ$ and $s=60\text{mm}$

그 경향은 유사한 형태를 보이고 있다. 이것은 이중분무에서는 스월실 형상비의 변화가 분무특성에 크게 영향을 미치지 않음을 의미한다.

3.4 노즐 피치 변화

Fig. 10은 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스월러각 63°, 스월실 형상비 1.6일 때 이중분무에서 피치 변화에 따른 축방향 속도와 SMD 변화를 좌우에 각각 나타낸 그림이다.

축방향 속도와 SMD의 분포는 스월실 형상비의 영향과 같은 경향을 보이고 있으나 특히 SMD의 경우는 다소 다른 경향을 보이고 있다.

이것은 피치가 좁을수록 중첩이 시작되는 위치가 노즐 출구쪽으로 이동하기 때문에 중첩폭이 커지게 되고 중첩영역 중심과 단일분무의 중심이 근접하여 단일분무의 유속이 큰 액적들끼리 서로 충돌하여 더 큰 분무모멘텀을 형성하여 축방향 속도가 큰 것으로 사료된다. SMD는 피치가 60mm인 경우 중첩영역 중심에서 작고 외곽으로 가면서 커지는 경향이다. 피치가 90, 120mm인 경우는 중첩영역 중심과 외곽의 크기가 균일한 경향을 나타내고 있다. 이것은 피치가 클수록 중첩영역 내의 액적들간의 상대입경차이가 작아 액적들간의 상호 간섭효과가 감소하기 때문으로 사료된다.

3.5 단일 및 이중분무의 비교

Fig. 11은 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스월러각 63°, 스월실 형상비 1.6, 피치 60mm일 때 단일분무와 이중분무의 축방향 속도와 SMD 변화를 각각 나타낸 것이다. 단일분무는 60mm 거리를 두고 두 노즐을 설치하여 각각 독자적으로 분사하는 경우의 속도와 SMD를 나타낸다.

이중분무의 유속분포는 단일분무에 비하여 전체적으로 큰 값을 가지고 쌍봉성 구조를 나타내고 있다. 또한 이중분무의 SMD는 단일분무보다 상대적으로 작은값을 가진다. 이것은 이중분무의 경우 개별 단일분무가 중첩영역에서 액적들의 충돌로 인해 미립화가 촉진되었기 때문으로 사료된다. 또한 축방향 속도의 증가는 반경방향 운동량 감소로 대부분의 액적들이 축방향으로 낙하하여 축방향 모멘텀이 커지지 때문으로 사료된다.

Fig. 12는 이중분무의 중심축의 중심에서 반경방향으로 거리에 따른 단일분무의 속도에 대한 이중분무의 속도의 비를 그림속의 좌측, 입경비

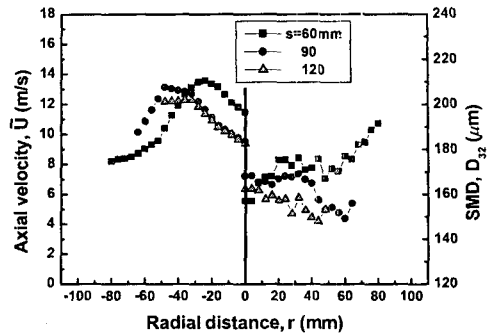
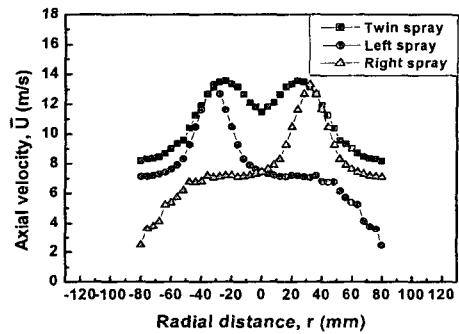
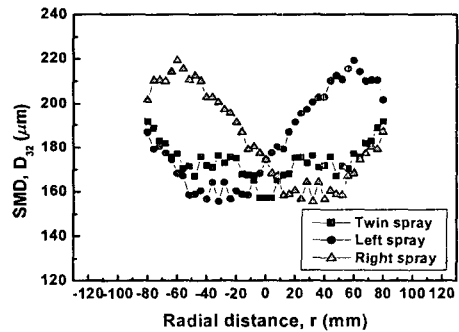


Fig. 10 Axial velocity and SMD with nozzle pitch in twin spray characteristics at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, $\alpha=63^\circ$ and $l/d=1.6$



(a) Axial velocity



(b) SMD

Fig. 11 Comparison of single and twin spray characteristics at $P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, $\alpha=63^\circ$ and $l/d=1.6$

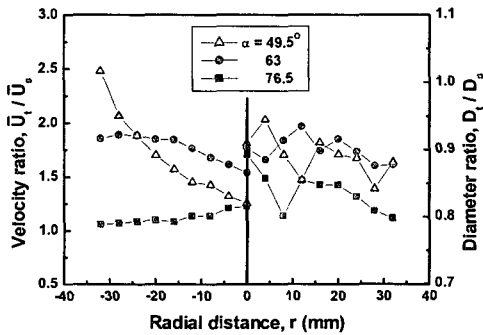


Fig. 12 Velocity and diameter ratio with swirler angle at $P_1=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, $l/d=1.6$ and $s=60\text{mm}$

를 우측에 각각 나타낸 것이다. 단일분무의 속도는 우측 노즐에서 분사되는 분무를 대상으로 중첩영역의 동일 위치에서의 속도를 나타낸다. 이중분무의 경우가 단일분무에 비하여 속도는 크게 나타나고 있다. 또한 액적의 크기는 단일분무에 비하여 작게 나타나고 있다. 또한 속도비의 경우는 스윌러각이 클 때에는 큰 값을 가지지 않고 있으나, 입경비의 경우는 다소 복잡한 양상을 보이고 있다. 이것은 노즐 내부 스윌러각의 기하학적 형상에 의한 요인으로 스윌러각이 작을 경우 분무폭이 좁아 중첩영역 내에서 단일분무의 상호간섭효과가 크기 때문으로 사료된다. 또한 스윌러각이 클 경우 중첩영역에서 액적들 상호간의 충돌시 반경방향으로의 모멘텀이 강해 액적의 분열현상이 활발히 발생하여 미립화가 되기 때문으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서 스윌러각과 스윌실 형상비 변화에 따른 노즐을 사용하여 분무형상을 가시화하고 단일 및 이중분무특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 스윌러각이 증가할수록 분무각이 증가하는 경향이었으며 스윌실 형상비가 커질수록 분무각은 감소하였다.
- (2) 단일 및 이중분무에서 스윌러각이 증가할수록 축방향 속도와 SMD는 감소하였다.
- (3) 스윌실 형상비가 증가할수록 단일분무에서

축방향 속도와 SMD는 감소하였다. 하지만 이중분무에서 스윌실 형상비 변화는 분무특성에 큰 영향을 미치지 않았다.

(4) 이중분무에서 노즐 피치의 변화는 분무특성을 좌우하는 중요한 요인으로서 피치가 증가할수록 중첩영역 중심에서 축방향 속도와 SMD는 감소하였다.

(5) 이중분무는 단일분무에 비하여 축방향 속도는 전체적으로 약 1~2배로 큰 값을 가지며 쌍봉성 구조를 나타내고, SMD는 10~20% 작은 값의 분포를 이루었다.

참고문헌

- (1) Hiroyasu, H., Shimizu, M. and Arai, M., 1982, "The Breakup of High Speed Jet in a High Pressure Gaseous Atmosphere," *Proceedings of the 2nd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Madison, Wis., pp. 69~74.
- (2) Arai, M., Shimizu, M. and Hiroyasu, H., 1985, "Breakup Length and Spray Angle of High Speed Jet," *Proceedings of 3rd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, London, pp. 1~10.
- (3) Lichtarowicz, A., Duggins, R. K. and Markland, E., 1965, "Coefficients for Incompressible Non-Cavitating Flow Through Long Orifices," *J. Mech. Eng. Sci.*, Vol. 7, No. 2, pp. 210~219.
- (4) Koo, J. Y., Joseph, S. S. and Goto, S., 1997 "Influence of Fuel Injector Nozzle Geometry on Internal and External Flow Characteristics," *American Technical Publishers Ltd.*, Vol. 106, No. 3, pp. 568~580.
- (5) Mrša, Z. and Medić, G., 1998, "Shape Optimization Method for Nozzle Design," *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, Vol. 5, pp. 45~54.
- (6) Marshall, W. R., 1954, "Atomization and Spray Drying," *Chem. Eng. Prog. Monogr. Ser.*, No. 2, Vol. 50, pp. 1~26.
- (7) McCarthy, M. J. and Molloy, N. A., 1974, "Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design," *Chem. Eng. J.*, Vol. 7, pp. 1~20.
- (8) Jung, J. W., Cha, K. J. and Kim, D. J., 2000, "Characteristics of the Droplet Behavior in the

- Overlap Region of Twin Spray and in Single Spray," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 24, No. 10, pp. 1300~1308.
- (9) Jung, J. W. and Kim, D. J., 2004, "A Study on Effect of Spray Characteristics on Etching Characteristics in Micro Fabrication System," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 1, pp. 109~117.
- (10) Jung, J. W., Kim, Y. J. and Kim, D. J., 2004, "Correlation Between Spray Characteristics and Etching Characteristics in Twin Spray," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 28, No. 4, pp. 449~455.
- (11) Jung, J. W. and Kim, D. J., 2004, "A Study on Improvement of Etching Characteristics by Spray Characteristics Analysis with Nozzle Geometries in Wet Etching Process," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 7, pp. 842~849.
- (12) Yule, A. J. and Widger, I. R., 1996, "Swirl Atomizers Operating at High Water Pressure," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 38, No. 8, pp. 981~1000.
- (13) Iciek, J., 1982, "The Hydrodynamics of a Free, Liquid Jet and Their Influence on Direct Contact Heat Transfer-I. Hydrodynamics of a Free, Cylindrical Liquid Jet," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 8, No. 3, pp. 239~249.
- (14) Choi, Y. C., Jung, J. W. and Kim, D. J., 2001, "Characteristics of Spray from Pressure-Swirl Nozzle with Different Liquid Properties and Nozzle Geometries," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 25, No. 12, pp. 1813~1820.