

노즐의 내부형상이 이중분무의 유속과 입경에 미치는 영향

김영진[†] · 정지원^{*} · 김덕줄^{**}

Effect of Internal Geometry of Nozzle on the Velocity and Droplet Size of Twin Spray

Young-Jin Kim, Ji-Won Jung and Duck-Jool Kim

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

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of swirler angle and swirl chamber aspect ratio of nozzle on the characteristics of single and twin spray. The performances of nozzle have been investigated by measurements of spray angle, droplet size, velocity and Weber number at a water pressure 0.4MPa. 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 smaller swirler angle, the larger axial velocity became. It was also shown that the larger aspect ratio, the smaller droplet diameter became.

기호설명

d : 스윌실 직경
l : 스윌실 길이
ld : 스윌실 형상비
 α : 스윌러 각도

1. 서론

현대 사회에서 분무는 다양한 산업 및 기술 분야에서 응용되고 있다. 특히 미세가공공정, 연료 분사장치, 농업등의 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 또한 분사노즐로서 널리 사용되는 압력

식 스윌노즐은 공간적으로 넓은 분무각을 가지면서 분사압력이 증가할수록 분무각이 커지고 액적의 크기는 작아지는 특성을 가진다. 따라서 로켓이나 제트엔진, 분무건조, 반도체 및 전자부품 제조공정등의 산업용 분무 시스템에 널리 이용된다. 이에 따라 산업용 분무시스템 최적화를 위해 스윌노즐의 분무특성에 관한 연구¹⁾가 활발히 진행되고 있다.

Yule²⁾는 고압분사에서 스윌노즐의 성능을 분출계수와 분무각, 액적크기등을 측정하여 연구하였다. 유입구 면적이 작아질수록 평균액적크기는 작아지고 또한 일반적으로 분사압력이 증가하면 평균액적크기가 작아진다는 것을 관찰하였다. Widger³⁾는 노즐의 기구학적 형상을 변화시켜 총 157종에 이르는 노즐을 시험하여 다양한 분야에 응용할 수 있도록 노즐제작의 기초자료를 마련하였다. Im⁴⁾는 스윌러가 장착된 벤츨리 노즐의 매개변수를 연구하여 벤츨리관의 길이가 길수록 넓은 분무각을 가지고 액적의 크기가 작아진다는 것을 관찰하였다. Choi⁵⁾는 액체의 물성치와 노즐

[†] 부산대학교 대학원 기계공학과

E-mail : djkim@pusan.ac.kr

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

^{*} 회원, 부산대학교 기계기술연구소

^{**} 회원, 부산대학교 기계공학과

의 형상 변화에 따른 압력스웰 노즐의 분무 특성을 연구하여 액적의 축방향 속도는 동점도가 증가함에 따라 감소하고 액적의 SMD와 축방향 속도의 상관관계에 있어서는 동점도가 증가함에 따라 저속의 큰 액적들이 많이 분포하고 있음을 관찰하였다. 그러나 현재까지 스웰실 형상비와 스웰러각도가 액적크기나 속도에 미치는 영향에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 단일 및 이중분무를 대상으로 노즐 내부 스웰러각과 스웰실 형상비 변화가 분무각, 액적크기 및 속도와 같은 분무특성에 미치는 영향을 PDA시스템을 통해 분석하였다. 이를 토대로 하여 산업용 분무시스템 최적화를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1는 본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 실험장치의 구성은 크게 두 부분, 즉 분사시스템과 PDA시스템으로 나눌 수 있다. 분사시스템은 분사노즐, 압력계, 펌프, 송풍기, 대형수조, 정수필터와 분사압 조절을 위한 밸브 등으로 구성되어 있다. PDA시스템은 레이저를 포함한 송광부(Transmitting optics), 수광부(Receiving optics), 신호처리기(signal processor), 3차원 이송장치(3D Traverse), 이송장치 제어기(Traverse controller), 오실로스코프, PC등으로 이루어져 있다.

분무의 가시화 장치는 Nikon FM2 camera와 105 mm zoom 렌즈, 스트로브스코프로 구성되어 있다.

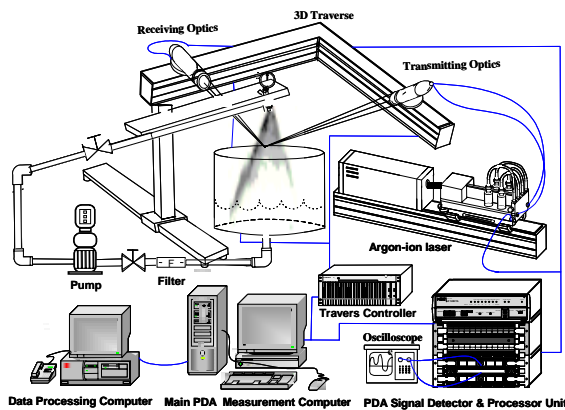


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

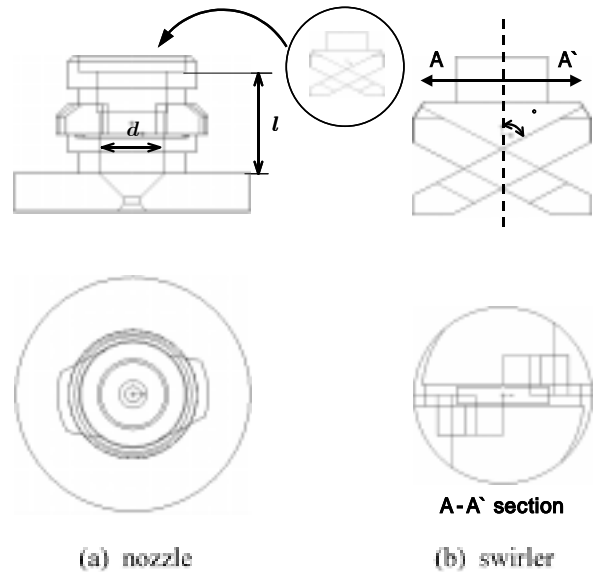


Fig. 2 Configuration of nozzle and swirler

Fig. 2는 본 연구에 사용된 스웰노즐과 스웰러의 개략적인 형상을 나타내고 있다.

노즐제작시 재료로는 가공의 용이함을 위해 금속을 대신해 내피로성, 강인성, 내마모성 등의 우수한 특징을 지니고 있는 폴리아세탈을 사용하였고 노즐은 NCHVN-85FO milling machine을 이용하여 제작하였다.

2.2 실험방법

Table 1는 본 연구에 사용된 노즐들의 제원을 나타내고 있다. 작동유체는 상온의 수돗물을 사용하였고, 분사압력은 0.4MPa, 선단거리는 분무축 방향으로 150, 200, 250mm의 단면에 대해 반경방

Table 1 Specification of nozzles

Nozzle	Swirl chamber diameter d (mm)	Swirl chamber length l (mm)	Aspect ratio (l/d)	Swirler angle α (°)
A1	11.0	13.2	1.2	76.5
A2				63
A3				49.5
A4		17.5	1.6	76.5
A5				63
A6				49.5
A7		22.0	2.0	76.5
A8				63
A9				49.5

향으로 노즐중심으로부터 분무가 분포하는 최외곽영역의 위치까지 측정하였다. 또한 단일분무 실험결과를 토대로 두 개의 노즐에서 분사되는 이중분무의 중첩되는 영역의 분무특성을 조사하였다. 분사압력 0.4MPa, 선단거리는 150mm이고 두 노즐간의 거리(pitch)가 60mm의 단면에 대해 중첩 영역의 중심점에서부터 최외곽영역 위치까지 측정하였다.

분무특성은 액적의 축방향 속도와 SMD(Sauter Mean Diameter), 웨버수로 나타내었고 액적크기분포는 Rosin-Rammler곡선으로 표현하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일분무의 가시화

Fig. 3는 분사압력 0.4MPa, 노즐 출구에서 축방향 90mm까지 스윙실 형상비와 스윙러각 변화에 따른 분무형상 및 분열과정을 가시화한 것이다. 스윙실 형상비 변화는 분무형상 변화에 별다른 영향을 미치지 않음을 볼 수 있다. 스윙러각 변화에 따른 분무형상 및 분열과정을 가시화한 것으로 스윙러각이 증가할수록 분무각이 증가하는 경향이 있다. 이것은 노즐내부의 스윙러각이 증가할수록 분무액적의 반경방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다.

3.2 스윙러각의 변화

3.2.1 단일분무

Fig. 4(a)는 분사압력이 0.4MPa, 선단거리가 150mm, 스윙실 형상비가 1.6일 때 단일분무에서 노즐내

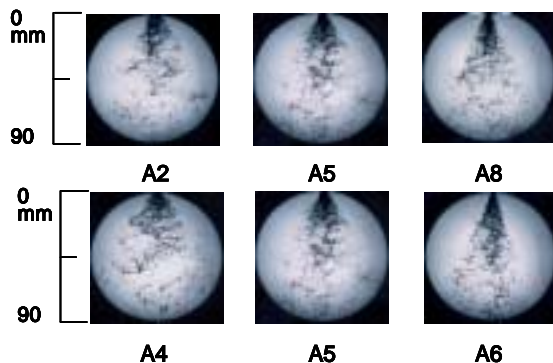
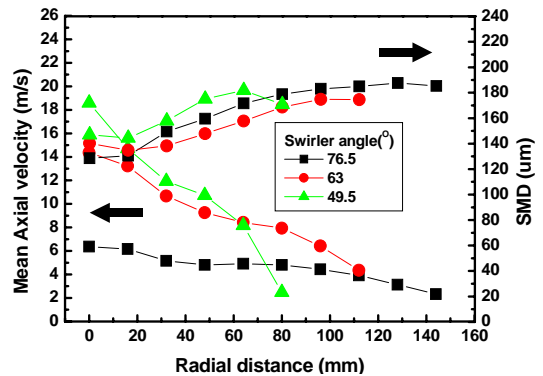
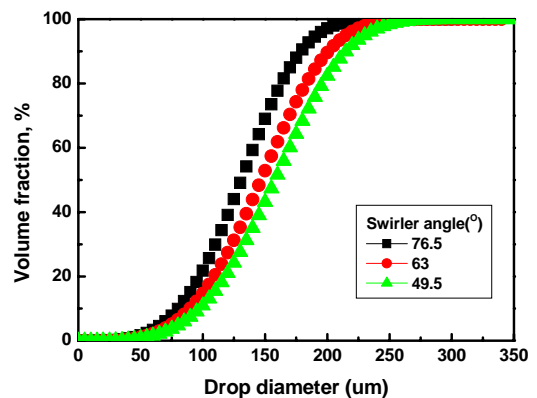


Fig. 3 Visualization of spray with aspect ratio and swirler angle (Pi=0.4MPa)

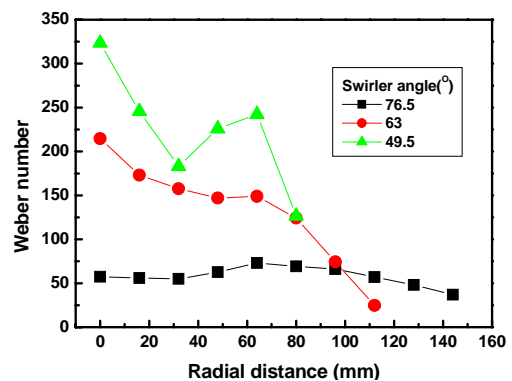
스윙러각 변화에 따른 반경방향으로의 축방향 속도와 SMD변화를 나타낸 것이다. 축방향 속도의 전체적인 경향은 스윙러각이 감소할수록 축방향 속도가 증가하는 경향이였다. 이것은 노즐내부의 스윙러각이 작을수록 분무액적의 축방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다.



(a) Mean axial velocity and SMD



(b) Drop diameter distribution



(c) Weber number

Fig. 4 Single spray characteristics with swirler angle (Pi=0.4MPa, Z=150mm, Aspect ratio=1.6)

또한 스윙러각이 감소할수록 SMD는 증가하였다. 이것은 노즐내부의 기하학적인 형상에 의한 요인으로 액체 분류가 노즐외부로 분출시 스윙러각이 클 경우 반경 방향의 속도가 증가하며 발생하는 난류의 정도를 강하게 한다. 난류 유동 상태로 분사되는 경우에는 반경 방향의 속도가 액주 표면을 깰 수 있는 충분한 운동량을 가질 수 있으므로 액주의 분열이 용이하며 종류 유동 분사의 경우에는 단지 축방향의 속도만이 나타나고 유동이 안정하므로 분열이 잘 일어나지 않게 된다.

Fig. 4(b)은 스윙러각 변화에 따른 입경분포를 Rosin-Rammler 곡선을 사용하여 나타내었다.

이 분포 함수는 액적 제적의 누적 분율 Q 를 입경 D 에 대해서 표시한 것이다. 이 분포 함수의 형태는

$$1 - Q = \exp - (D/X)^q \quad (1)$$

이며 여기서 X 와 q 는 입경분포변수를 의미한다. 스윙러각이 커질수록 입경분포곡선의 기울기 큰 것을 확인할 수 있었다. 따라서 스윙러각이 커질수록 액적들이 입경이 작고, 고른 범위에서 분포하고 있음을 의미한다. 이것은 스윙러각이 커질수록 반경방향 모멘텀이 증가하여 분무폭이 넓어지고 따라서 주위 기체의 유입과 마찰의 영향이 커져 액적의 직경이 작아지는 것으로 사료된다.

Fig. 4(c)은 스윙러각 변화에 따른 분무반경향으로의 웨버수의 변화를 나타낸 것이다. 웨버수는

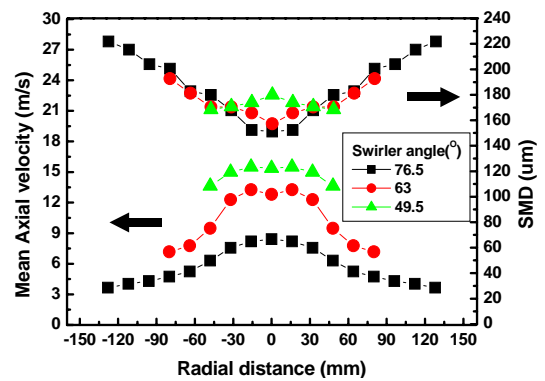
$$We = \rho u^2 D / \sigma \quad (2)$$

이며 u 는 속도, D 는 액적직경, ρ 는 유체의 밀도, σ 는 표면장력을 나타낸다. 웨버수는 액적의 형상을 유지하려는 표면장력에 대한 액적을 분열시키려는 공기역학적인 힘의 비로서 분사액체의 분열에 큰 영향을 미친다. 스윙러각이 76.5° 일 때 웨버수는 30-70정도이고 스윙러각이 49.5° 일 때 웨버수는 125-325정도로 약 4-5배 정도 크게 나타난다. 이것은 스윙러각이 49.5° 일 때 액적의 상대속도와 평균직경이 크기 때문이다. 웨버수가 증가할수록 표면장력에 대한 공기역학적인 압력의 증가로 액적의 분열이 활발히 일어나게 되는 것을 의미한다. 스윙러각이 작을수록 넓은 액적

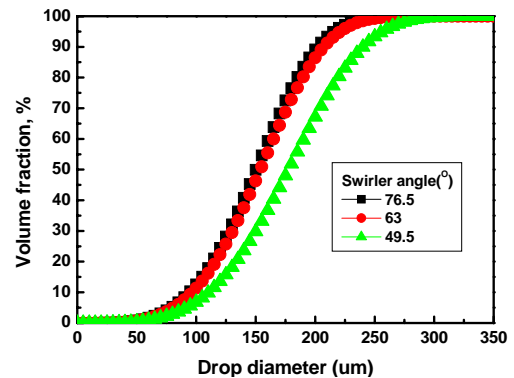
직경 분포를 나타내며 액적들 간의 크기가 상대적으로 크고 분무반경이 좁아서 충돌하는 액적들 간의 분열현상이 활발히 일어나는 것으로 사료된다.

3.2.2 이중분무

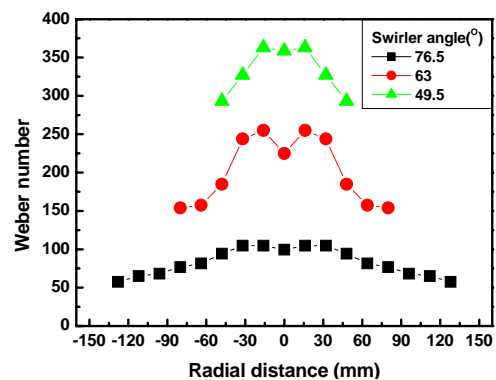
Fig. 5(a)는 단일분무와 같은 조건으로 이중분무에서 노즐내 스윙러각 변화에 따른 반경방향으로의 축방향 속도와 SMD변화를 나타낸 것이다.



(a) Mean axial velocity and SMD



(b) Drop diameter distribution



(c) Weber number

Fig. 5 Twin spray characteristics with swirler angle (Pi=0.4MPa, Z=150mm, Aspect ratio=1.6)

스윙러각이 감소할수록 축방향 속도는 증가하고 SMD는 증가하였다.

Fig. 5(b)는 스윙러각 변화에 따른 입경분포를 Rosin-Rammler 곡선을 사용하여 나타내었다. 스윙러각이 클수록 입경분포곡선의 기울기가 크고 입경이 고른 범위에 분포하고 있다.

Fig. 5(c)는 스윙러각 변화에 따른 분무반경방향으로의 웨버수의 변화를 나타낸 것이다. 스윙러각이 작을수록 웨버수가 크게 나타났고 분열이 더 활발히 일어나는 것으로 사료된다. 또한 단일분무와 비교하여 전체적으로 웨버수가 큰값을 가지는데 이것은 개별의 단일분무가 분사되면서 중첩영역내에서 단일분무 액적들이 서로 충돌하여 상대유속차 및 입경차이에 의해 분열이 활발히 일어났기 때문으로 사료된다.

3.3 스윙실의 형상 변화

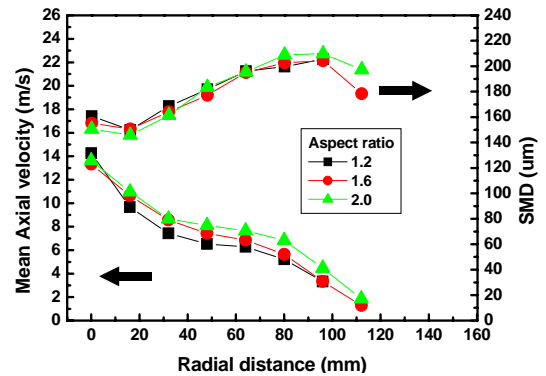
3.3.1 단일분무

Fig. 6(a)는 분사압력이 0.4MPa, 선단거리가 150 mm, 스윙러각이 63° 일 때 단일분무에서 노즐내 스윙실 형상비 변화에 따른 반경방향으로의 축방향 속도와 SMD변화를 나타낸 것이다.

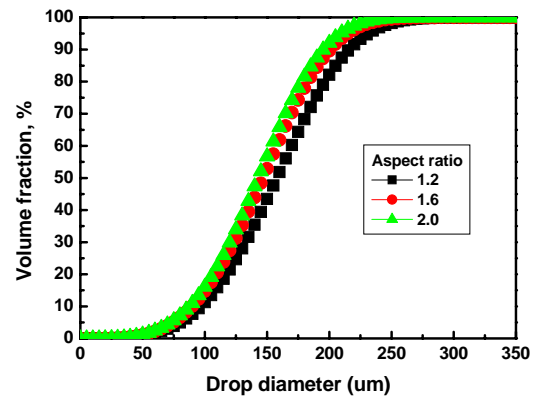
스윙실 형상비 변화에 따른 축방향 속도는 스윙실 형상비가 큰 노즐이 조금 크게 나타났다.

스윙실 형상비 변화에 따른 SMD변화는 일정한 경향을 나타내지 않았으나 Fig. 6(b)에서 스윙실 형상비가 커질수록 Rosin-Rammler 분포곡선의 기울기가 커져 액적의 입경이 작은 크기에서 고르게 분포하고 있음을 알 수 있다. 이것은 스윙실 길이 가 길수록 유체의 스윙실 내부 체류시간이 길어져 스윙실 내부에 접하는 유동 단면적이 늘어나 마찰력의 증가를 가져와 액적크기가 작아지는 것으로 사료된다.

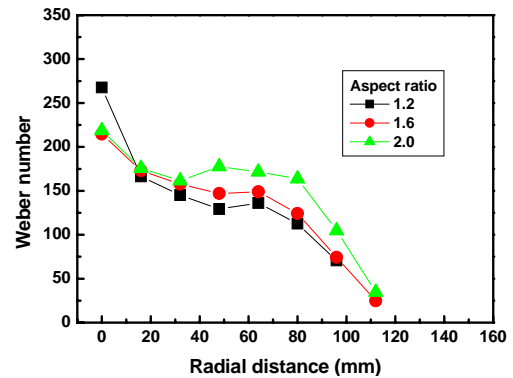
Fig. 6(c)는 웨버수 변화를 나타낸 것이다. 스윙실 형상비가 1.2일 때 웨버수는 70~270정도이고 2.0일 때는 30~230정도이다. 하지만 중심을 제외하고는 스윙실 형상비가 작을수록 웨버수가 작은 것을 알 수 있다. 이것은 스윙실 형상비가 작을수록 분무폭이 감소하여 분무중심의 모멘텀이 분무외곽까지 미치는 영향이 줄어들어 반경방향으로 나갈수록 축방향 평균속도도 작아져 액적들 상호간의 분열현상이 적게 발생하는 것으로 사료된다.



(a) Mean axial velocity and SMD



(b) Drop diameter distribution



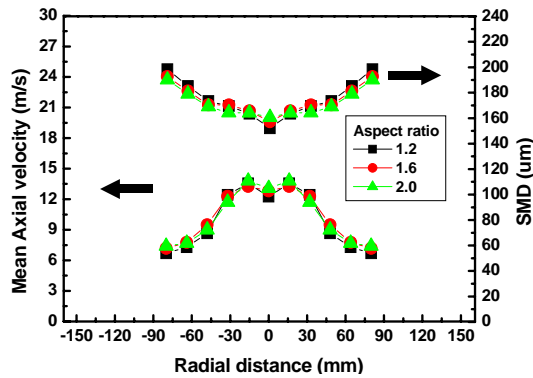
(c) Weber number

Fig. 6 Single spray characteristics with swirler angle ($P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, Swirler angle=63°)

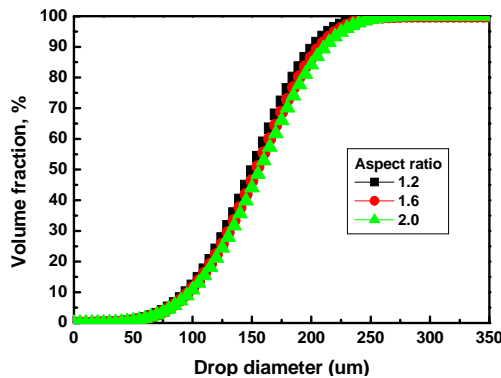
3.3.2 이중분무

Fig. 7는 단일분무와 같은 조건으로 이중분무에서 노즐내 스윙실 형상비 변화에 따른 반경방향으로의 축방향 속도와 SMD, Rosin-Rammler 분포곡선, 웨버수를 나타낸 것이다. 이중분무에서는 스윙실 형상비 변화에 따른 분무특성들은 일정한 경향을 나타내지 않았으며 차이도 거의 나타나지

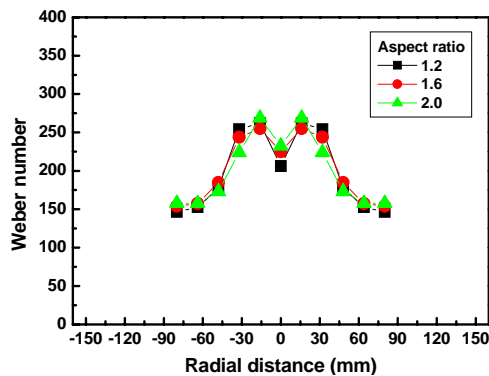
않아 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 이것은 단일분무에서 나타난 작은 차이들이 이중분무의 중첩영역내에서 역적들이 서로 충돌, 합착 등의 현상을 일으키며 고른 분포를 나타냈기 때문으로 사료된다.



(a) Mean axial velocity and SMD



(b) Drop diameter distribution



(c) Weber number

Fig. 7 Twin spray characteristics with swirler angle ($P_i=0.4\text{MPa}$, $Z=150\text{mm}$, Swirler angle= 63°)

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 형상비는 뚜렷한 영향을 미치지 못했다.

(2) 스윌러각이 작을수록 축방향 속도와 SMD는 큰 경향이였다. 또한 스윌러각이 커질수록 역적은 입경이 작은 범위에서 고르게 분포하고 있었고 스윌러각이 49.5° 일 때 분열이 가장 활발히 발생했다.

(3) 스윌실 형상비가 클때 분무중심에서 축방향 속도는 다소 낮고 SMD변화에는 일정한 경향을 보이지 않았다. 스윌실 형상비가 클수록 역적의 입경은 작은범위에 고르게 분포했고 분열이 활발히 일어났다.

(4) 스윌러각 변화에 따른 이중분무에서는 단일분무와 유사한 경향을 나타냈으며 스윌실 형상비에 따른 이중분무에서는 단일분무와 달리 형상비 변화에 관계없이 고른 분포를 나타내었다.

참고문헌

1. Elkoth, M. M., Rafat, N. M., and Hanna, M. A., 1978, "The Influence of Swirl Atomizer Geometry on the Atomization Performance", *Proceedings of the 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, Tokyo, pp109-115
2. Yule, A. J., 1996, "Swirl Atomizers Operating at High Water Pressure", *International journal of mechanical sciences*, Vol. 38, No. 8, pp981-1000
3. Widger, I. R., 1993, "Improvement of High Pressure Water Sprays Used for Coal Dust Extraction in Mine Safety". PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, UMIST, Manchester, England, Nov
4. Im, K-S., 2001, "Parametric Study of the Swirler/Venturi Spray Injectors", *Journal of propulsion and power*, Vol. 17, No. 3, pp717-727
5. Choi, Y. C., Jung, J. W., Kim, D. C., 2001, "Characteristics of Spray from Pressure-Swirl Nozzle with Different Liquid Properties and Nozzle Geometries", *Trans. KSME B*, Vol. 25, No 12, pp1813-1820