

유체의 물성치 변화가 압력스월노즐 분무의 속도와 입경에 미치는 영향

최윤철* · 손종원* · 차건중** · 김덕줄***

Effects of Different Fluid Properties on Velocity and Size of Droplets from Pressure-Swirl Nozzles

Youn-Chul Choi , Jong-Won Son, Keun-Jong Cha and Duck-Jool Kim

Key Words: SMD(자우타 평균입경, Sauter Mean Diameter), Pressure-Swirl Nozzle(압력식 와류형 노즐) PDA(위상 도플러 입자분석기, Phase Doppler Anemometer), Break Process(분열과정)

Abstract

Fluid properties which are most commonly used to evaluate spray atomization characteristics, are important because they affect velocity and size distribution of droplets. The purpose of this study was to incorporate the significant characteristics in atomization process of industrial etching spray and how each of them affects the design of precise pressure-swirl nozzles. The experiment was carried out with different viscosity and density of fluid. The macro characteristics of liquid spray, such as the spray angle and shape were captured by PMAS and the micro characteristics of liquid spray, such as droplet size and velocity were obtained by PDA. The mean velocity and SMD of droplets were measured along axial and radial direction. It was found that the higher viscosity and density resulted in the larger SMD and the lower mean velocity of droplets.

1. 서론

액체의 미립화는 분무건조, 분무냉각, 분무도장, 액체 연료의 분사장치, 그리고 농약 및 약품의 살포 등 산업 및 공학의 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히 활용 용도에 따라 각각 특성에 맞는 액체 분사 노즐이 사용되고 있다⁽¹⁾.

노즐의 기구학적 형상, 작동유체의 상태량 그리고 분사압력 등에 따라 분무의 입경과 속도, 분무각, 관통도, 공간분포 등과 같은 분무 특성이 달라지며, 이들은 곧 분무의 질을 결정하게 된다. 따라서 여러 분야에서 사용 목적에 적합한 분무 특성을 가진 분무를 형성시키기 위해 노즐의 분무

특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^(2~3) 또한 분사노즐은 노즐 형태에 따라 여러 가지의 종류가 있다. 이러한 종류 가운데 압력식 와류형 노즐은 공간적으로 넓은 분무각을 가지며 분사압력이 높을수록 분무관통도는 증대하고 액적의 크기는 작아지는 특징을 가지고 있다⁽⁴⁾. 따라서 압력식 와류형 노즐은 일반적으로 에칭, 살균, 도장, 냉각 등의 산업용 시스템에 많이 사용된다. 또한 와류형 분사노즐을 사용하는 일반적인 산업용 분무 시스템에서는 많은 양의 분사액체를 미립화 시키고 있으며, 특히 중공형의 분무형태를 형성하는 노즐과 저점성 유체(기름류) 및 물에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나^(5~8), 산업용 에칭 및 냉각 분무에서 주로 사용되는 풀콘형 분무형태를 형성하는 노즐과 고밀도 고점성유체를 사용했을 때의 분무특성에 대해서는 아직 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 산업용 분무 에칭에서 사용되는 압력식 스월노즐의 액막 분열과정에 영향

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계기술 연구소

*** 부산대학교 기계공학부

을 미치는 노즐의 기구학적 형상과 점도 및 밀도의 변화에 따른 이들의 영향을 PDA와 PMAS 장치를 이용해 규명하고자 한다. 이와같은 결과를 토대로 압력식 스윙노즐이 적용되는 각종 산업용기기의 구조 설계 및 고성능 노즐의 개발이 가능할 수 있는 기초 자료를 제공할 것으로 기대한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타낸다. 본 실험에 사용된 실험장치의 구성은 분사계, PDA시스템 및 가시화 장치로 구성된다. 분사계는 분사노즐, 펌프, 송풍기, 대형수조, 정수필터, 분사압 조절을 위한 밸브와 특히, 온도조절의 정확성을 얻기위해 냉동기 등으로 구성되어 있다. PDA 시스템은 레이저, 송광부, 수광부, 신호처리기, 3차원 이송장치, PC 등으로 이루어져 있다.

분사계는 펌프와 대형수조를 배관으로 연결하여 순환식으로 작동유체인 물을 공급하도록 설치하였으며 균일한 액적으로 측정하기 위하여 펌프와 노즐사이에 정수필터를 설치하였다. PDA시스템에서 레이저는 Ar-ion 레이저(최대출력 5W)가 사용되었고, 실험시 사용출력은 2W로 하였다. 또한 신호처리계의 고전압은 1000~1400V로 하였고, 밴드폭은 4~12MHz로 측정하였다.

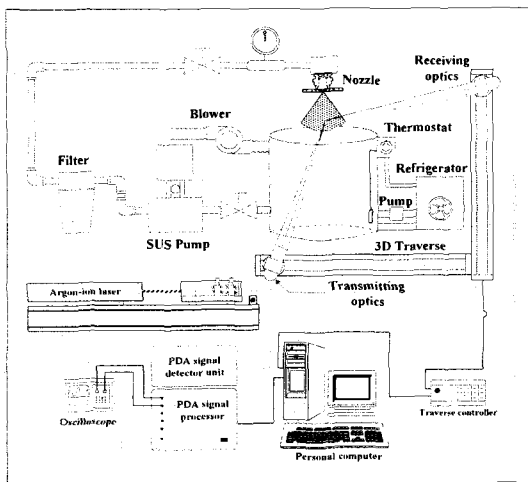


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

Table 1 Dimensions of nozzles

Type		A	B
Orifice	length, l_o (mm)	3	3
	length / diameter, l_o/d_o (-)	1.25	1.1
Swirler	vane angle, θ_s ($^\circ$)	18.2	22.9

가시화 장치는 PMAS(Particle Motion Analysis System, V-tek, Mx-II)를 사용하였다. 즉 CCD 카메라에 초점 105mm의 렌즈를 부착하고, 카메라와 측정영역 사이에 볼록렌즈(초점 600mm, 직경 135mm)를 사용하여 분무 이미지를 확대시킨 후, 프레임그래버를 거쳐 컴퓨터에서 이미지를 취득하였다.

Fig. 2은 본 연구에 사용된 두 노즐의 개략적인 형상과 사진을 나타내고 있으며, Table 1은 사용된 노즐의 오리피스와 스윙각을 나타내고 있다. 즉, 두 노즐은 압력식 스윙노즐로서 오리피스 길이(l_o)는 서로 같고 직경(d_o)은 B노즐이 더 크며, 오리피스 출구의 홈의 각도는 A노즐이 더 크다. 또한 스윙러의 날개 각도(θ_s)는 B노즐이 수직방향으로 더욱 기울어져 있고 유입구 면적은 B노즐이 더 크며 오리피스로 진입하는 각도는 A노즐이 더 크다.

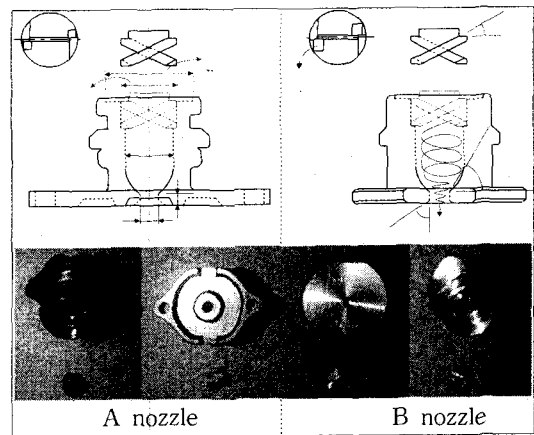


Fig. 2 Configuration and photograph of nozzles

Table 2 Properties of test fluids

Fluids Properties	W ₁₀₀	W ₇₃	W ₅₉	W ₅₀
Density ρ (Kg/m ³)	998	1105	1210	1300
Kinematic Viscosity ν (10 ⁻⁶ m ² /s)	0.85	2.51	5.1	7.52
Surface Tension σ (10 ⁻³ kg/s ²)	70.9	72.5	73.1	73.5
Compound(wt%) Water/Sugar /Starch/Salt, 25°C	100/0 /0/0	72.7/18.2 /9/0	59/30 /3/8	50/30 /5/15

2.2 실험방법

측정위치는 A, B 노즐 각각 분무축 하방향(z) 170, 200mm에서 반경방향(r)으로 8mm 간격으로 분무가 분포하는 위치까지 측정하였다. 액적의 축방향 속도성분을 U, 반경방향 속도성분을 V로 나타내었으며, 액적의 크기는 액적의 자우타 평균직경(D₃₂)으로 나타내었다.

또한 실험에 사용한 용액의 특성은 Table 2에 나타내었다. 작동유체는 순수물(W₁₀₀)과 물에 염화나트륨과 설탕 및 액상 전분을 첨가해서 점도 및 밀도를 증가한 3가지의 용액들(W₇₃, W₅₉, W₅₀)을 사용하였고, 표면장력은 거의 일정하게 유지하였으며 분사압력은 5kgf/cm²로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무의 가시화

Fig. 3 (a), (b)는 입자영상분석기(PMAS)를 이용하여 분사압력이 5kgf/cm²일 때, 두 노즐의 점도에 따른 분무의 형상을 각각 가시화한 것이다.

예비실험을 통해서 분사압력이 2kgf/cm²에서 4kgf/cm²로 증가함에 따라 분무각이 증가하고, 분무되는 액체의 밀집 정도는 약하게 되며, 어느 분사압력 이상에서부터는 분무각이 일정하게 되었는데 이것을 임계 분사압력이라고 하고, 본 실험에서는 5kgf/cm²이었고, 이 압력에서 본 실험을 수행하

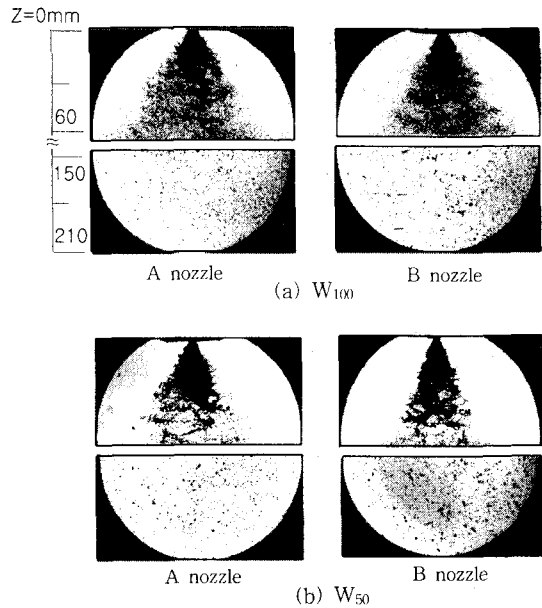
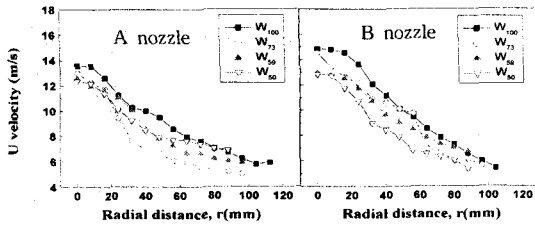


Fig. 3 Visualization of spray
(P₁=5kgf/cm², T=25°C)

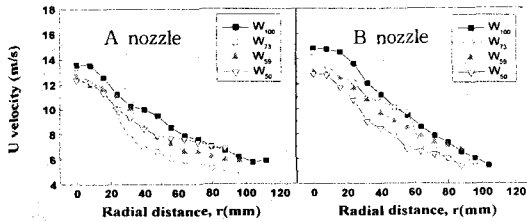
였다. (a)는 순수물을 사용한 경우이고 (b)는 점도 및 밀도를 증가시킨 W₅₀의 혼합물의 분무 사진이다. 각각의 사진에서 윗부분은 노즐출구에서 분무축하방향으로 60mm까지에서의 분무형상이고, 아랫부분은 본실험에서 관심을 가지는 분무 하부영역, 즉 노즐출구에서 분무축하방향으로 150~210mm에서의 사진이다. 그림에서 압력식 와류형 노즐의 분열특징인 노즐팁 근방에서 원추형의 액막이 형성되고, 이것이 회전하면서 점점 분무축하방향으로 퍼져 나가면서 얇은 막으로 발달하고, 점차 막이 찢어져 작은 액적들이 형성되는 것을 알 수 있다. (a)와 비교해서 (b)는 동점도 및 밀도가 증가한 경우로서 노즐출구 부근에서 분무각이 작아지고 분무가 밀집되는 것을 잘 볼 수 있다. 분무가 발달한 하단부에서도 분무상류의 영향을 받아 동점도 및 밀도가 증가함에 따라 더욱더 큰 액적이 분포하고 있다. 또한 각각의 동점도 및 밀도에 있어서 A노즐이 B노즐에 비해 분무각이 크고 미립화도 양호하게 나타난다. 이것은 선회기에 부착된 날개의 각도가 다르기 때문으로 사료된다.

3.2 분무의 액적속도

Fig. 4은 유체의 물성치의 변화에 대하여 A, B노즐을 (a)170mm와 (b)200mm 단면에서의 측



(a) $z=170\text{mm}$

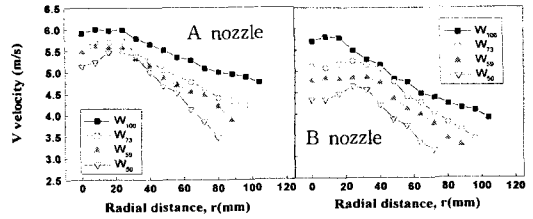


(b) $z=200\text{mm}$

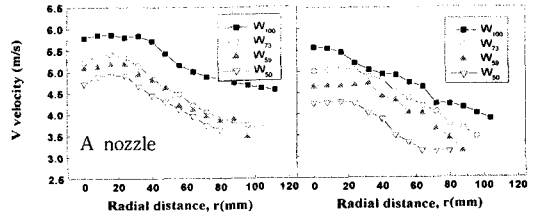
Fig. 4 Mean axial velocity with radial distance
($P_1=5\text{kgf/cm}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

방향 평균속도를 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. B노즐의 경우, 동점도가 증가함에 따라 축방향 평균속도는 감소하였다. 이것은 점도가 증가함에 따라 노즐내부의 벽면과의 마찰이 증가하게 되어 이것은 유체가 가지는 초기 모멘텀이 감소하기 때문이다. 그러나 A노즐의 경우는 B노즐보다는 그러한 영향이 비교적 적었다. 이것은 선회기의 날개각도의 영향으로 사료된다. 또한 축방향 거리와 반경방향 거리가 증가할수록 축방향 평균속도가 감소하고 있다. 이것은 분무하류와 분무외각으로 갈수록 주위 공기의 저항 및 유입이 강하게 작용하는 것으로 사료된다. 두 노즐에 있어서는 B노즐이 A노즐 보다 각각의 물성치 및 거리별로 축방향 평균속도가 크게 나타나고 이것은 B노즐의 스윌러 날개각도가 A노즐에 비해 수직방향으로 더욱 기울어져 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 5은 유체의 물성치의 변화에 대하여 분무 축방향 (a)170mm와 (b)200mm에서 A, B노즐의 반경방향 평균속도를 나타낸 것이다. 동점도가 증가함에 따라 반경방향의 거리에 따른 반경방향 평균속도는 감소하는 것을 알 수 있다. 분무 축방향의 거리가 증가함에 따라 반경방향 평균속도는 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 (a)에서는 분무 중심부에서 반경방향 30mm근방에서, (b)에서는 20mm근방에서 가장 큰 반경방향 평균속도를



(a) $z=170\text{mm}$



(b) $z=200\text{mm}$

Fig. 5 Mean radial velocity with radial distance
($P_1=5\text{kgf/cm}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

나타낸다. 이것은 노즐의 기구학적 특징에 기인한 것으로 나선형의 액주에서 액막 및 액적으로 분열되는 것으로서 이 영역에서 가장 큰 와류 모멘텀이 작용하는 것으로 사료된다. 또한 A노즐이 B노즐 보다 반경방향 평균속도가 크게 나타나고, 이것은 A노즐의 스윌러 날개각도가 B노즐에 비해 수평으로 더욱 기울어져 있기 때문으로 사료된다.

3.3 분무의 액적 크기

Fig. 6은 유체의 물성치의 변화에 대하여 분무 축방향 (a)170mm, (b)200mm에서 A, B노즐의 액적크기를 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 액적의 크기는 SMD(Sauter Mean Diameter)로 나타내었다. 액적의 크기는 동점도가 증가할수록 증가하였다. 반경방향 20mm 근방에서 W_{100} 을 제외하고는 액적의 크기가 가장 작았다. 이것은 앞에서 언급한 축방향 및 반경방향의 속도의 최대치가 유지하는 영역과 일치하였다. 분무 축방향으로의 거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 분무외각으로 갈수록 액적 크기가 증가하고 있지만 분무 중심부의 약간 외각에서 액적이 가장 작은 것을 볼 수 있다. 특히 반경방향의 속도가 큰 분무중심축 근방에서 W_{100} 이외의 혼합물은 동점도의 영향으로 W_{100} 보다 액적이 컸다.

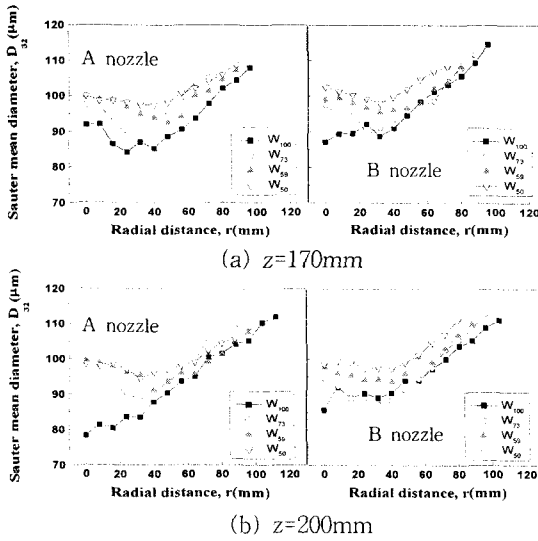


Fig. 6 SMD with radial distance ($P_1=5\text{kg/cm}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

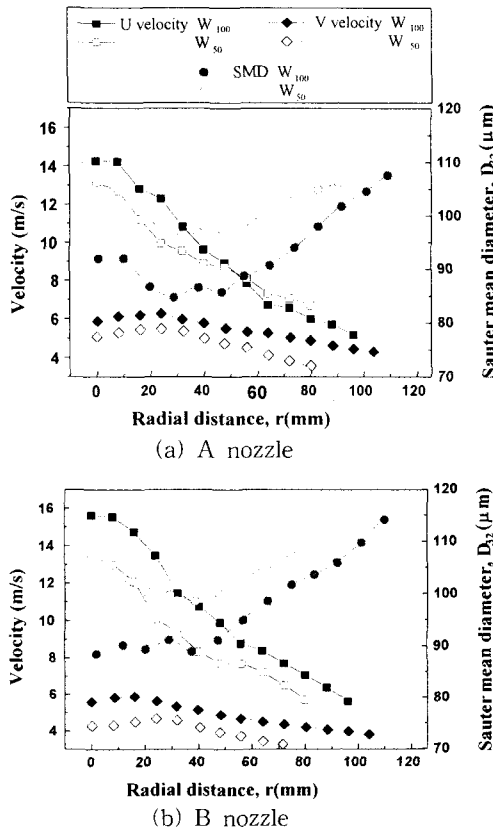


Fig. 7 SMD with relation to axial and radial velocity ($P_1=5\text{kg/cm}^2$, $z=170\text{mm}$, $T=25^\circ\text{C}$)

3.4 액적의 크기와 속도의 상관관계

Fig. 7은 선단거리 170mm에서 순수물과 W_{50} 을 사용했을 때의 축방향 및 반경방향 속도와 입경크기(SMD)를 나타낸 것이다. 평균입경은 분무 중심부($r=0\text{mm}$)에서 반경방향으로 거리가 증가함에 따라 조금 감소하다가 다시 분무 외각으로 갈수록 증가하였다. 또한 분무의 완전 중심부 보다는 약간 외곽 즉, $r=30\text{mm}$ 전후에서 입경 작았다. 이것은 이 영역에서 축방향 속도는 다소 감소되었으나 반경방향 속도는 증가되었기 때문으로 사료된다. A 노즐과 B 노즐의 축방향 및 반경방향 속도 성분을 비교해 보면, 축방향 속도는 B 노즐이 크고, 반경방향 속도는 A 노즐이 다소 크게 나타났었다. 이것은 노즐의 기구학적 특징으로 즉, 스윌러의 날개 각도가 A 노즐이 B 노즐 보다 수평방향으로 기울어졌기 때문이다. 또한 점도가 증가함에 따라 두 노즐의 속도 성분이 A 노즐에 비해 B 노즐이 더 크게 감소하였다.

3.5 축하방향 거리에 따른 분무 특성

Fig. 8은 분무 축하방향의 거리에 따른 축방향 및 반경방향 속도와 SMD분포를 순수물과 고점도인 W_{50} 을 작동유체로 하고 A, B 노즐을 대상으로 반경방향으로 강한 스윌영역인 분무 중심으로부터 40mm 까지 각 성분의 평균값을 측정하였다.

(a)는 분무 축하방향의 거리에 따른 축방향 속도로서 축하방향의 거리가 증가함에 따라 두 노즐 모두 속도가 감소하고, 특히 미립화 영역에서 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 B 노즐이 A 노즐 보다 속도가 크고, 분무 하단부에서는 그 차이가 크게 나타난다..

(b)는 분무 축하방향의 거리에 따른 반경방향 속도로서 분무 축하방향의 거리가 증가함에 따라 두 노즐 모두 미립화 영역까지는 속도가 일정하다가 비회석 영역에서는 일정하게 감소하고, 회석 영역에서는 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 A 노즐이 B 노즐 보다 전체적으로 크게 나타나고 분무 하단부에서는 작아지는 것을 볼 수 있다.

(c)는 분무 축하방향 거리에 따른 SMD 분포로서 축하방향의 거리가 증가함에 따라 감소하는 미립화 영역, 완만하게 감소하는 비회석 영역, 오히려 조금씩 증가하는 회석 영역으로 나눌 수 있다.

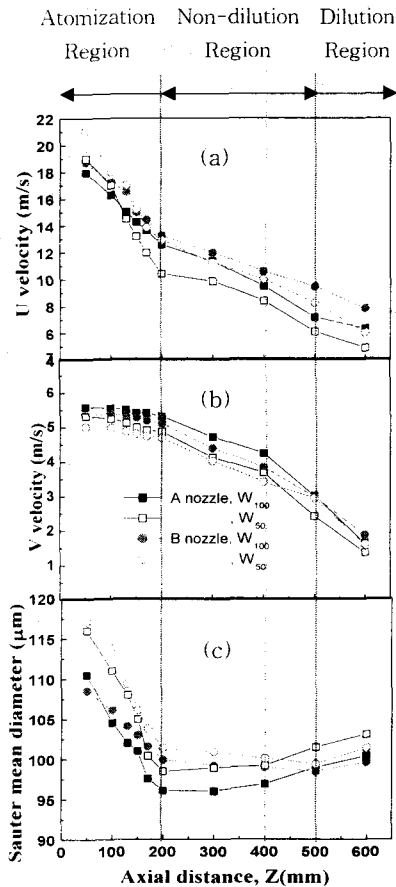


Fig. 8 Axial velocity and Radial one and SMD with axial distance ($P_1=5\text{kg/cm}^2$, $T=25^\circ\text{C}$)

4. 결론

압력스윙노즐을 이용하여 분무형상 가시화하고 유체의 점도와 밀도를 변화시켜 분무특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 액적의 축방향 속도는 동점도가 증가함에 따라 감소하고, 반경방향 및 축방향의 거리가 증가함에 따라 감소 하였다. 또한 B 노즐이 A 노즐에 비해 크게 나타났다.

(2) 액적의 반경방향 속도는 동점도가 증가함에 따라 감소하였고, 축방향의 거리가 증가할수록 최대속도의 위치가 분무 외곽으로 점차 이동하였다. 또한 A 노즐이 B 노즐에 비해 크게 나타났다.

(3) 순수물을 제외한 혼합물의 액적의 SMD 크기는 동점도가 증가함에 따라 증가하였고, 분무중

심이 외각 보다 작게 나타났다.

(4) 액적의 SMD와 축방향 및 반경방향 속도의 상관에 있어서는 축방향 속도 및 반경방향 속도의 최대치는 각각 분무중심부와 약간 외곽영역($r=20\sim 40\text{mm}$)에서 나타났으며, 그 때의 SMD는 분무중심부의 약간 외곽영역에서 가장 작게 나타났다.

(5) 위의 결과에 따라 압력식 스윙노즐의 분무는 크게 3가지(미립화, 비회석, 회석) 영역으로 나눌 수 있었으며, 강한 와류를 형성시키는 A 노즐이 반경방향으로 미립화 영역이 넓게 분포하고 축방향 속도성분이 강한 B 노즐은 분무 축 하방향으로 미립화 영역이 더 넓게 분포하였다.

참고문헌

- (1) Lefebvre, A. H., 1989, "Atomization and Spray", Hemisphere publishing Co.
- (2) Bates, C. J. and Jolly, A. J., 1997, "Phase Doppler Measurement on a Pressurised Spray Nozzle Using Scattering Angles of 72° and 150° ", *ICLASS-97*
- (3) Evers, L. W., 1994, "Characteristics of the Transient Spray from a High Pressure Swirl Injector", *SAE Paper*, No. 940188.
- (4) Zhao, F., Yoo, J., Liu, Y. and Lai, M., 1996, "Spray Dynamics of High Pressure Fuel Injectors for DI Gasoline Engines", *SAE Paper*, No. 961925.
- (5) Dombrowski, N. and Hasson, D., 1969, "The Flow Characteristics of Swirl Spray Pressure Nozzles with Viscosity Liquid", *AIChE Journal*, IS, pp. 604~611.
- (6) 송시홍, 이상용, 1994, "Y-Jet노즐을 통한 저점도 액체의 유량 및 입경예측에 관한 연구", 대한기계학회 논문집(B), 제 12호, pp. 3377~3385.
- (7) 이상용, 김인구, 조한권, 1989, "와류 분무 노즐에 의해 형성되는 액적들의 균일도에 액체의 점도가 미치는 영향", 대한기계학회 논문집(B), 제 3호, pp. 538~546.
- (8) Tasi, S.C. and Viers, B., 1992, "Airblast Atomization of Viscous Newtonian Liquids using Twin-fluid Jet Atomizers of Various Designs", *Trans, ASME Journal, Fluids Engineering*, Vol. 114, pp. 113~118.