

액체의 물성치와 노즐의 형상 변화에 따른 압력스월 노즐의 분무 특성

최윤철* · 정지원* · 김덕줄†
(2001년 4월 30일 접수, 2001년 9월 28일 심사완료)

Characteristics of Spray from Pressure-Swirl Nozzle with Different Liquid Properties and Nozzle Geometries

Youn-Chul Choi, Ji-Won Jung, and Duck-Jool Kim

Key Words: Liquid Atomization(액체미립화), Phase Doppler Anemometer(PDA 위상 도플러 입자 분석기), Pressure-Swirl Nozzle(압력식 와류형 노즐), SMD(Sauter 평균입경), Breakup Process(분열과정), Particle Motion Analysis System(PMAS 입자 운동 분석기)

Abstract

The purpose of this study was to investigate the significant characteristics in atomization process of industrial etching spray for the design of precise pressure-swirl nozzles. The experiment was carried out with different viscosities and densities of the liquid. The macro characteristics of liquid spray, such as the spray angle and breakup process were captured by PMAS and the micro characteristics of liquid spray, such as droplet size and velocity measurements were obtained by PDA. The droplet axial and radial velocity and SMD were measured along axial and radial direction. The RMS of two velocities was measured along radial direction. It was found that the fluid with higher kinematic viscosity resulted in the larger SMD and the lower mean droplet velocity. And we could divide breakup processes into three regions that is atomization, non-dilution and dilution one in spray of pressure-swirl nozzle. The radial as well as axial velocity of droplet played an important role in the atomization process of higher kinematic viscosity fluid.

기호설명

D_{32}	: 액적의 Sauter 평균직경
P_i	: 분사압력
r	: 분무 액적을 측정된 반경방향 거리
U	: 액적의 축방향 속도
V	: 액적의 반경방향 속도
z	: 분무 액적을 측정된 축하방향 거리
ν	: 동점성계수
σ	: 표면장력

* 부산대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-Mail : djkim@hyowon.pusan.ac.kr

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

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.

노즐의 기구학적 형상, 작동유체의 상태량 그리고 분사압력 등에 따라 분무의 입경과 속도, 분무각, 관통도, 공간분포 등과 같은 분무 특성이 달라지며, 이들은 곧 분무 상태를 결정하게 된다.

따라서 여러 분야에서 사용 목적에 적합한 분무 특성을 가진 분무를 형성시키기 위해 노즐의 분무 특성에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다.^(1,2)

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.^(3,4) 따라서 압력식 와류형 노즐은 일반적으로 예칭, 살균, 도장, 냉각 등의 산업용 시스템에 많이 사용된다. 또한 와류형 분사노즐을 사용하는 일반적인 산업용 분무 시스템에서는 많은 양의 액체를 분사하여 미립화 시키고 있다. 특히 증공형의 분무형태를 형성하는 노즐과 저점성 유체(기름류) 및 물에 대한 연구는 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁹⁾ 그러나 산업용 예칭 및 냉각 분무에서 주로 사용되는 풀콘형 분무형태를 형성하는 노즐⁽¹⁰⁾과 고밀도 고점성 액체를 사용했을 때의 분무특성에 대한 연구는 아직 미흡한 단계에 있다.

따라서 본 연구에서는 산업용 분무 예칭에서 사용되는 압력식 스월노즐의 액막 형성과정에 영향을 미치는 노즐의 기구학적 형상과 사용 액체의 점도 및 밀도의 변화에 따른 이들의 영향을 Phase Doppler Anemometer(PDA)와 Particle Motion Analysis System(PMAS) 장치를 이용해 규명하고자 한다. 이 결과를 토대로 각종 산업용 기기에 사용되는 압력식 스월노즐의 설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 실험장치를 나타낸다. 실험에 사용된 장치의 구성은 분사계, PDA시스템 및 가시화 장치로 되어있다. 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. PDA시스템에서 레이저는 Ar-ion 레이저(최대출력 5W)가 사용되었고, 실험시 사용출력은 2W로 하였다. 또한 신호처리계의 고전압은 1000~1400V로 하였고, 밴드폭은 4~12MHz로 측정하였다. 분무의 가시화는 PMAS를 사용하였

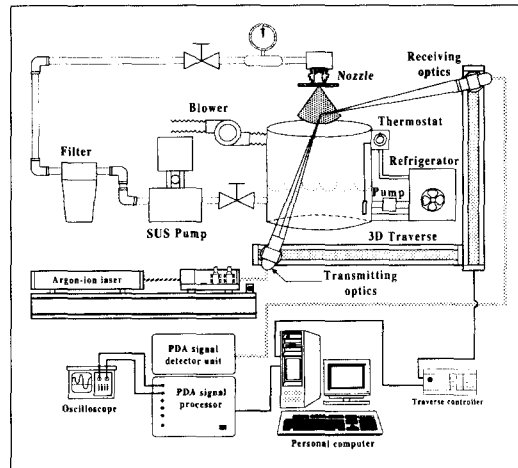


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

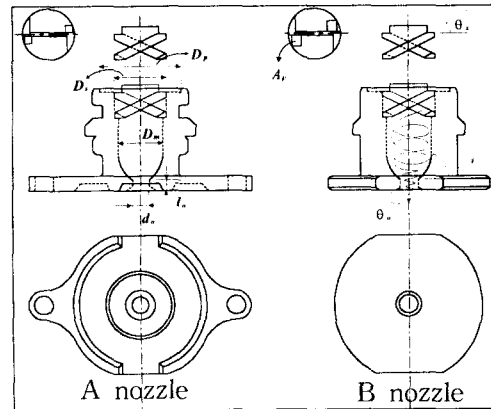


Fig. 2 Configuration of nozzles

다. CCD 카메라에 초점 105mm의 렌즈를 부착하고, 카메라와 측정영역 사이에 볼록렌즈(초점거리 600mm, 직경 135mm)를 사용하여 분무 이미지를 확대시킨 후, 프레임그래버를 거쳐 컴퓨터에서 이미지를 취득하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 두 노즐의 개략적인 형상을 나타내고 있으며, Table 1은 사용한 노즐의 오리피스와 스월러의 배인각을 나타내고 있다. 두 노즐은 압력식 스월노즐로서 오리피스 길이(l_0)는 서로 같고 직경(d_0)은 B노즐이 더 크며, 스월러의 날개 각도(θ_s)는 A노즐이 수직방향으로 더 기울어져 있다.

Table 1 Dimensions of nozzles

Dimensions		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 (°)	18.2	22.9

Table 2 Properties of test liquids

Fluids	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 N/m)	70.9	72.5	73.1	73.5
Compound(wt%) water/sugar /starch/salt, 298K	100/0 /0/0	72.7/18.2 /9/0	59/30 /3/8	50/30 /5/15

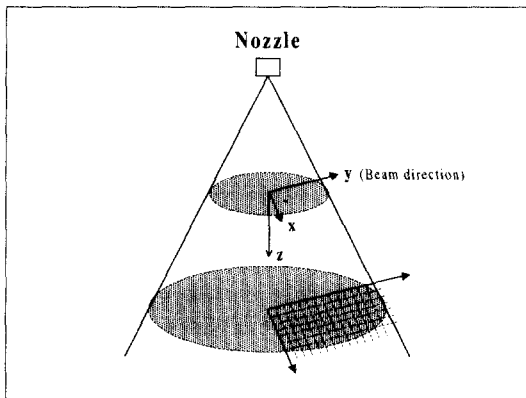


Fig. 3 Co-ordinates in measurement field

2.2 실험방법

Fig. 3은 본 실험에서 분무단면별 특성을 조사하기 위한 측정위치에서 x, y, 및 z 방향을 나타내고 있다. x, y 방향은 분무횡단면의 반경방향으로, 송

광부에서 발진되는 레이저광의 진행방향과 수직인 것을 x 방향, 평행인 것을 y 방향, z 방향은 분무 축방향이다. 측정위치의 표기는 노즐출구 선단의 중심점을 원점(x=0, y=0, z=0)으로 하는 좌표계이다. 예비실험을 통해 분무의 대칭성을 확인하였다. 측정 위치는 A, B 노즐 각각 z=170, 200mm에서 반경방향(x)으로 8mm 간격으로 분무가 분포하는 위치까지 측정하였다. 액적의 축방향 속도성분을 U, 반경 방향 속도성분을 V로 나타내었으며, 액적의 크기는 액적의 자유타 평균직경(D₃₂)으로 나타내었다. 실험 동안 액체의 온도는 298K로 일정하게 유지하였다.

또한 실험에 사용한 용액의 특성은 Table 2에 나타내었다. 사용액체는 순수한 물(W₁₀₀)과 물에 염화나트륨과 설탕 및 액상 진분을 첨가해서 점도 및 밀도를 증가한 3가지의 용액들(W₇₃, W₅₉, W₅₀)을 사용하였고, 표면장력은 거의 일정하게 유지하였고, 분사압력은 0.5MPa로 하였다. 또한 동점성계수 측정을 위해서는 독일산 Ostwald 점도계 (Cannon-Fenske Routine Type)와 영국산 표준 디지털 점도계(Brookfield Programmable Rheometer DV-III)를 각각 사용하여 그 값을 서로 비교한 결과 일치함을 확인할 수 있었다. 표면장력 측정은 백금고리를 이용한 누이의 표면장력계(Du Nouys Tentionmeter, Model 3010)를 사용하였고, 밀도는 ALLA 표준밀도계를 사용하였다. 모든 물성치의 값은 10회 실험의 평균값으로 정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무의 가시화

Fig. 4(a), (b)는 PMAS를 이용하여 분사압력이 0.5MPa일 때 두 노즐의 점도에 따른 분무의 형상을 각각 가시화한 것이다.

순수한 물로 A노즐을 사용한 예비실험에서 분사압력이 0.1MPa에서 0.5MPa까지 0.1MPa씩 증가함에 따라 질량유량은 각각 3.24kg/min, 4.27kg/min, 5.58kg/min, 6.42kg/min, 7.16kg/min으로 일정하게 증가하고, 분무각도 증가하는 것을 볼 수 있었다. 0.6MPa, 0.7MPa에서는 각각 7.31kg/min, 7.42kg/min으로 0.5MPa에 비해 유량이 크게 증가하지 않았으며 또한 분무각도 거의 일정하게 나타났다. 따라서 0.5MPa를 임계분사압력으로 정하였다. 이 압력 이상에서는 입력에너지인 압력모멘텀이 내부 마찰에

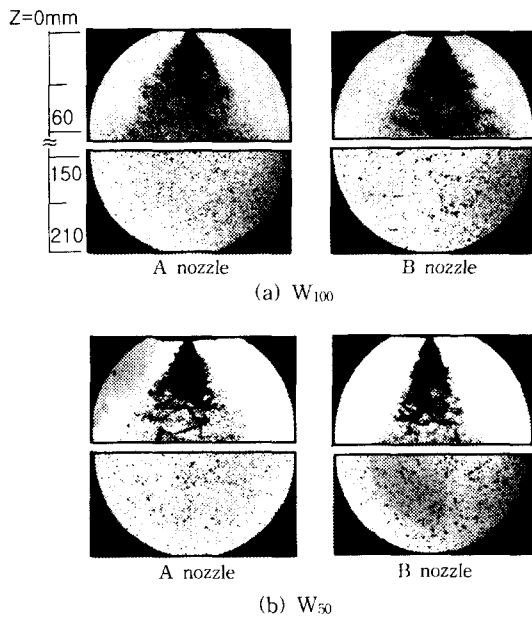


Fig. 4 Visualization of spray (P_i=0.5MPa)

너지 및 파동에너지를 손실로 인하여 출력에너지인 운동모멘텀의 상승에는 영향을 크게 미치지 않기 때문이다. (a)는 순수한 물(W₁₀₀)을 사용한 경우이고 (b)는 점도 및 밀도를 증가시킨 W₅₀의 혼합물의 분무 사진이다. 각각의 사진에서 윗부분은 노즐출구에서 분무축 아래방향으로 60mm까지에서의 분무형상이고, 아랫부분은 본실험에서 관심을 가지는 분무 하부영역, 즉 노즐출구에서 분무축 아래방향으로 150~210mm에서의 사진이다. (a)와 (b)그림에서 압력식 와류형 노즐의 분열특징인 노즐팁 근방에서 원추형의 액막이 형성되고, 이것이 회전하면서 점점 분무축 아래방향으로 퍼져 나가면서 얇은 막으로 발달하고, 점차 막이 찢어져 작은 액적들이 형성되는 것을 알 수 있다. (b)는 (a)와는 다르게 동점도 및 밀도가 증가한 경우로서 노즐출구 부근에서 분무각이 작아지고 분무가 밀집되는 것을 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 때문이다.

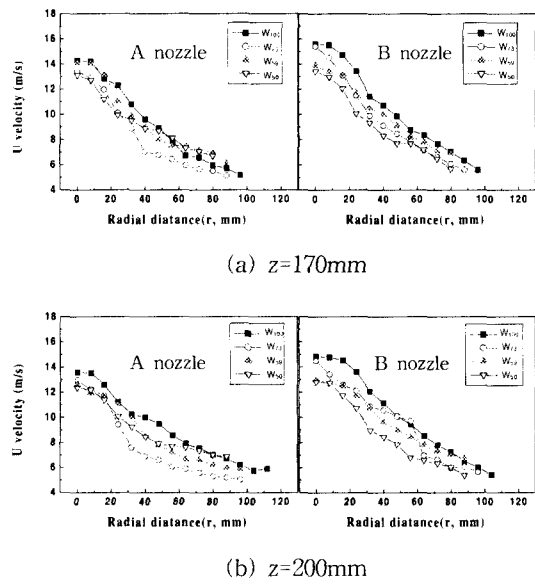


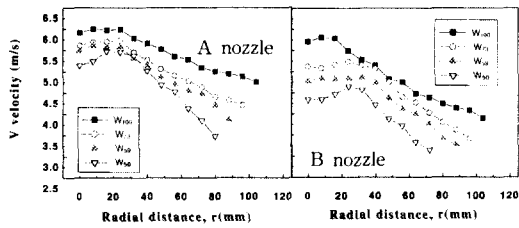
Fig. 5 Mean axial velocity with radial distance (P_i=0.5MPa)

3.2 분무의 액적속도

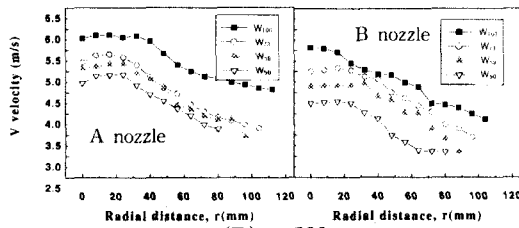
Fig. 5는 z=170mm 단면과 200mm 단면에서 액체의 물성치의 변화에 대하여 A, B노즐의 축방향 평균속도를 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. B노즐의 경우, 동점도가 증가함에 따라 축방향 평균속도는 차례로 감소하였다. 이것은 점도가 증가함에 따라 노즐내부의 벽면과의 마찰이 증가하기 때문이다. 그러나 A노즐의 경우는 B노즐과는 다소 다른 경향을 나타내고 있다. 이것은 선회기의 날개 각도의 영향으로 사료된다. 또한 A, B노즐에서 축방향 거리와 반경방향 거리가 증가할수록 축방향 평균속도가 감소하고 있다. 이것은 분무하류와 분무외각으로 갈수록 주위 공기의 저항 및 유입이 강하게 작용하는 것으로 사료된다. 두 노즐에 있어서는 B노즐이 A노즐 보다 각각의 물성치 및 거리별로 축방향 평균속도가 크게 나타났다. 이것은 B노즐의 스윙러 날개각도가 A노즐에 비해 수직방향으로 더욱 기울어져 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 6은 액체의 물성치의 변화에 대하여 분무 축 아래방향 z=170mm와 200mm에서 A, B노즐의 반경방향 평 값은 분무의 중심에서 분무 외각으로 액적들이 이동되는 것을 의미한다. 동점도가 증가함에 따라 반경방향의 거리에 따른 반경방향 평균속도는 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 축방향평균속도

와 마찬가지로 점도의 영향으로 마찰에 의한 모멘텀의 손실에 기인하는 것으로 사료된다. 분무축 아래방향의 거리가 증가함에 따라 반경방향 평균속도는 역시 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 (a)에서는 분무 중심부에서 반경방향 30mm 근방에서, (b)에서는 20mm 근방에서 가장 큰 반경방향 평균속도를 나타낸다. 이것은 노즐의 기구학적 특징에 기인한 것으로 나선형의 액주에서 액막 및 액적으로 분열되는 위치로서 이 영역에서 가장 큰 와류 모멘텀이 작용하는 것으로 사료된다. 또한 A노즐이 B노즐 보다 반경방향 평균속도가 약간 크게 나타나고, 이것은 A노즐의 스웰러 날개각도가 B노즐에 비해 수평으로 더 기울어져 있기 때문으로 사료된다.

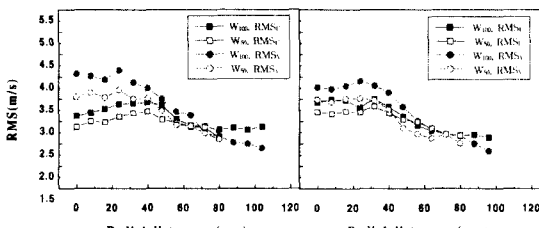


(a) z=170mm



(B) z=200mm

Fig. 6 Mean radial velocity with radial distance (P_i=0.5MPa)



(a) A nozzle (b) B nozzle

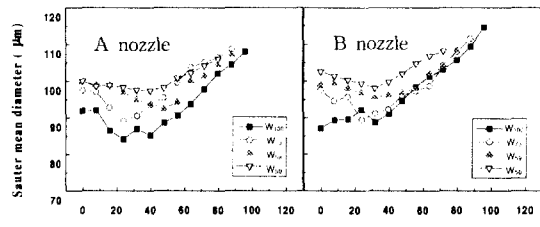
Fig. 7 RMS velocity with radial distance (P_i=0.5MPa, z=170mm)

Fig. 7은 z=170mm에서 W₁₀₀과 W₅₀을 사용했을 때 축방향 및 반경방향 RMS(root mean square) 속도값을 나타내고 있다. 두 노즐 모두 반경방향 RMS 속도가 축방향 RMS 속도 보다 분무 중심부에서 더욱 크게 나타났다. 또한, W₁₀₀이 W₅₀에 비해 축방향 및 반경방향 RMS 속도가 모두 크게 나타났다. 이것은 유체의 동점도가 증가할수록 액적들의 난류확산을 방해하는 힘이 크기 때문으로 사료된다.

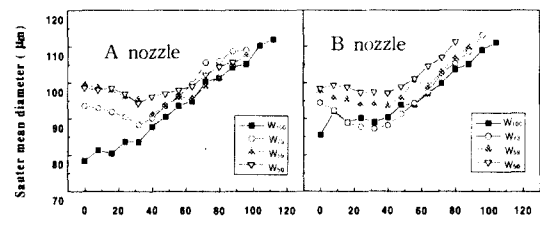
3.3 분무의 액적 크기

Fig. 8은 액체의 물성치의 변화에 대하여 분무축 아래방향 z=170mm, 200mm에서 A, B노즐의 액적크기를 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 액적의 크기는 체적 및 표면적에 가중치를 둔 SMD(Sauter Mean Diameter)로 나타내었다. 액적의 크기는 동점도가 증가할수록 증가하였다. 반경방향 30mm 근방에서 W₁₀₀을 제외하고는 액적의 크기가 가장 작았다. 이것은 앞에서 언급한 축방향 및 반경방향의 속도의 최대치가 유지하는 영역과 일치하였다. 분무축 아래방향으로의 거리가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고 있다.

분무외각으로 갈수록 액적 크기가 감소하다가 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 반경방향의 속도가 큰 분무중심축 근방에서 W₁₀₀를 제외한 혼



(a) z=170mm



(B) z=200mm

Fig. 8 SMD with radial distance (P_i=0.5MPa)

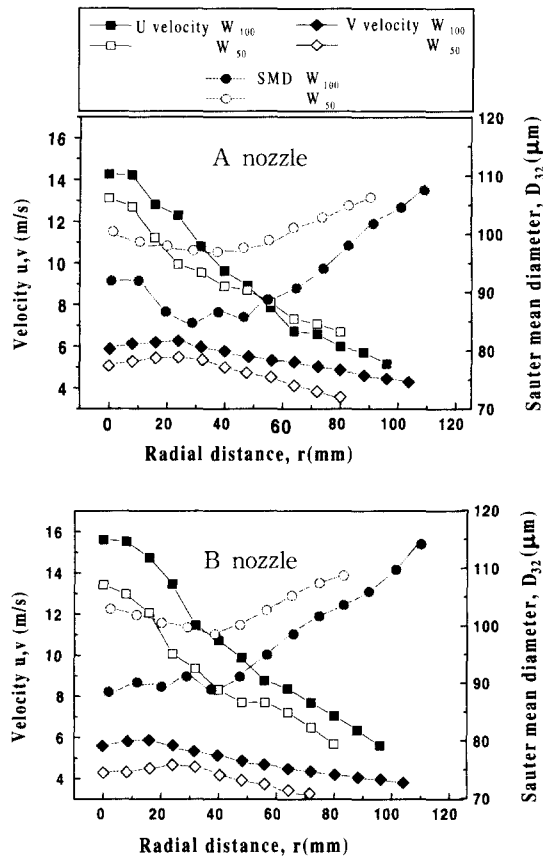


Fig. 9 SMD with relation to axial and radial velocity(Pi=0.5MPa, z=170mm)

함물의 SMD가 동점도의 영향으로 W₁₀₀ 보다 컸다.

3.4 액적의 크기와 속도의 상관관계

Fig. 9는 선단거리 170mm에서 W₁₀₀과 W₅₀을 사용했을 때의 축방향 및 반경방향 속도와 입경 크기를 나타낸 것이다. 평균입경은 분무 중심부(r=0mm)에서 반경방향으로 거리가 증가함에 따라 조금 감소하다가 다시 분무 외각으로 갈수록 증가하였다. 이것은 분무 중심부에서는 액적의 축방향 및 반경방향 속도가 분무외각에 비해 다소 크기 때문에 주위 공기와의 상대속도로 인하여 미립화가 촉진되기 때문이다. 또한 분무의 완전 중심부 보다는 약간 외곽 즉, r=30mm 전후에서 입경이 작았다. 이것은 이 영역에서 축방향 속도

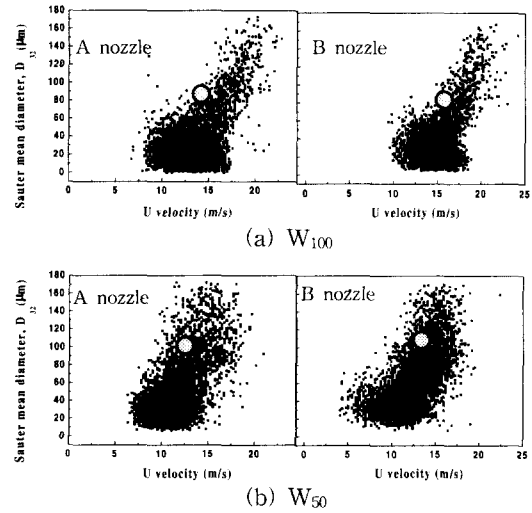


Fig. 10 Correlation of droplet size and axial velocity (Pi=0.5MPa, r=0mm, z=170mm)

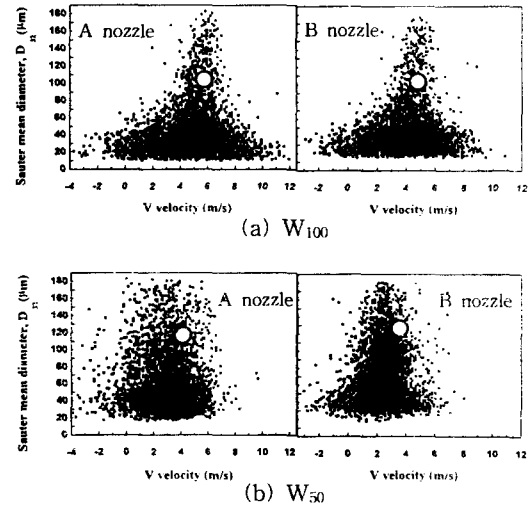


Fig. 11 Correlation of droplet size and radial velocity (Pi=0.5MPa, r=0mm, z=170mm)

는 다소 감소되었으나 반경방향 속도는 증가되었기 때문이다. 특히, 기존의 압력식 단공노즐에 스윌러를 장착한 스윌노즐로서 축방향 속도 성분과 함께 반경방향 속도 성분도 중요한 분열인자로 작용하는 것을 알 수 있다. 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 특성 즉, 스웰러의 날개 각도가 A 노즐이 B 노즐 보다 수평방향으로 기울어졌기 때문이다. 또한 한점도가 증가함에 따라 두 노즐의 속도 성분이 A 노즐에 비해 B 노즐이 더 크게 감소하였다. 이것은 노즐의 내부에서 생성된 운동에너지가 오리피스로 들어오는 노즐의 모양, 즉 오리피스로 접어드는 각도에 따라 많은 마찰 저항을 받기 때문이다.

Fig. 10은 분무축 아래방향으로의 거리 170mm에서 W_{100} 과 W_{50} 을 사용했을 때의 축방향 속도에 따른 입경분포를 분무 중심부에서 측정하였다. 두 노즐 모두 W_{100} 이 W_{50} 에 비해 고속의 작은 액적이 많이 분포하였다. 또한 W_{50} 에서 B노즐이 A노즐에 비해 고속의 큰 액적이 많이 나타났다.

Fig. 11은 분무축 아래방향으로의 거리 170mm에서 W_{100} 과 W_{50} 을 사용했을 때의 반경방향 속도에 따른 입경분포를 분무 중심부에서 측정하였다. 두 노즐 모두 W_{100} 이 W_{50} 에 비해 고속의 작은 액적이 많은 것을 볼 수 있었고, 또한 속도 분포도 넓게 나타났으며, 이러한 경향은 A노즐이 B노즐에 비해 더 두드러지는 것을 볼 수 있었다. 그림 가운데에 표시된 \bigcirc 는 Fig. 9에서 나타난 $r=0$ 에서의 속도와 SMD의 평균값이다.

3.5 축 아래방향 거리에 따른 분무 특성

Fig. 12은 분무축 아래방향의 거리에 따른 축방향 및 반경방향 속도와 SMD분포를 순수한 물과 고점도인 W_{50} 을 작동액체로 하고 A, B 두 노즐을 대상으로 반경방향으로 강한 스웰영역인 분무 중심으로부터 40mm 까지 u , v , SMD의 평균값을 측정하였다.

분무축 아래방향의 거리에 따라 다음과 같이 3영역으로 나누어서 각 영역에서의 측정된 양들간의 상호관계를 조사하였다.

축 아래방향의 거리가 증가하여 200mm까지 두 노즐과 두 용액 모두 u 와 v 속도가 현저하게 감소하였다. 또한 SMD도 크게 작아지는 것으로 보아 분열이 활발한 영역으로 분열 영역(atomization region)으로 분류하였다. 두 노즐을 비교하면 B 노즐이 A 노즐 보다 u 속도가 크고 특히 분무 하단부에서는 그 차이가 크게 나타

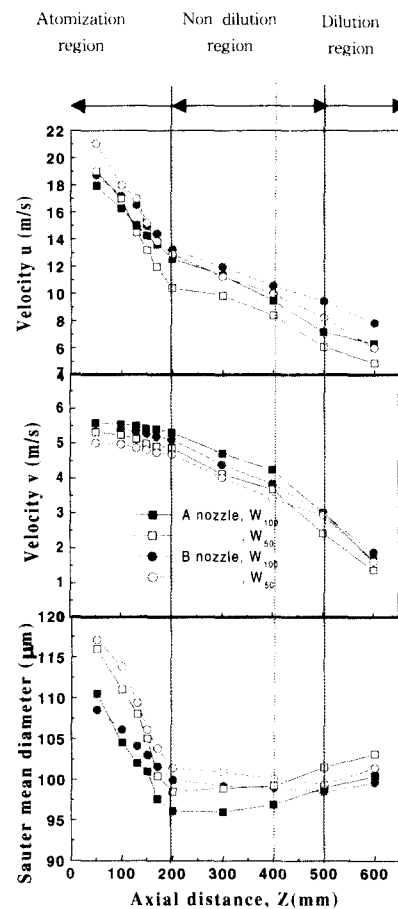


Fig. 12 Axial velocity, radial velocity and SMD with axial distance ($P_f=0.5\text{MPa}$)

났다. v 속도는 노즐 A가 컸으며 이 영역에서 크게 변하지 않았다. 이것은 노즐의 기구학적 특성상 B노즐이 스웰러의 날개각도가 수직방향으로 치우쳐 있기 때문이다.

약 200mm에서 400mm 사이에서는 축방향 속도의 변화는 분열영역보다 크지 않으나, 반경방향의 속도가 다소 크게 감소되었고, SMD는 거의 일정한 영역을 분열 및 합체가 동시에 일어나는 영역으로 분류하여 분열 및 합체영역(Non-dilution region)으로 분류하였다.

400mm 이상의 영역에서는 반경방향의 속도는 계속해서 현저하게 감소하고 SMD가 커지는 영

역을 액적거리 합체가 일어나는 영역으로 분류하여 합체영역(dilution region)으로 분류하였다.

이 영역에서의 v 의 변화가 큰 것은 압력식 스웰노즐의 경우에는 분무된 액체가 스웰의 모멘텀에 의해서 나선형으로 감싸면서 주위 공기를 유입하고 이들 공기와의 마찰 및 저항에 의해서 미립화가 촉진되는데 이영역에서는 이러한 작용이 완화되고 또한 공기유입에 의한 분열보다는 액적간의 합체현상이 두드러지기 때문에 사료된다.

4. 결론

압력스웰노즐을 이용하여 분무형상을 가시화하고 액체의 점도와 밀도를 변화시켜 분무특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

(2) 액적의 반경방향 속도는 동점도가 증가함에 따라 감소하였고, 축방향으로 갈수록 최대속도의 위치가 분무 외각으로 점차 이동하였다. 또한 A 노즐이 B 노즐에 비해 크게 나타났다.

(3) 순수한 물을 제외한 혼합물의 액적의 SMD는 동점도가 증가함에 따라 증가하였고, 반경방향의 거리 약 30mm 근방에서 가장 작았다.

(4) 액적의 SMD와 축방향 속도의 상관에 있어서는 동점도가 증가함에 따라 저속의 큰 액적이 많은 것을 볼 수 있었다. 또 액적의 SMD와 반경방향 속도의 상관에 있어서는 동점도가 증가함에 따라 저속의 큰 액적이 많은 것을 볼 수 있었고, 속도분포는 좁게 나타났다.

(5) 위의 결과에 따라 압력식 스웰노즐의 분무는 크게 세영역(분열, 분열 및 합체, 합체)으로 나눌 수 있었으며, 강한 와류를 형성시키는 A노즐이 반경방향으로 미립화 영역이 넓게 분포하고 축방향 속도성분이 강한 B 노즐은 분무축 아래 방향으로 미립화 영역이 더 넓게 분포하였다.

참고문헌

- (1) 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*, pp. 910~917.
- (2) 최동석, 김덕줄, 고장권, 1998, "와류형 고압인젝터의 초기분무의 분열과도 현상," *대한기계학회논문집(B)*, 제22권, 제8호, pp. 1132~1140.
- (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., 1997, "Characteristics of Gasoline Direct Injection Spray," *ILASS-America*, pp. 514~521.
- (5) 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.
- (6) Dombrowski, N. and Hasson, D., 1969, "The Flow Characteristics of Swirl Spray Pressure Nozzles with Viscosity Liquid," *AIChE Journal*, pp. 604~611.
- (7) 송시홍, 이상용, 1994, "Y-Jet노즐을 통한 저점도 액체의 유량 및 입경예측에 관한 연구," *대한기계학회논문집(B)*, 제12호, pp. 3377~3385.
- (8) 이상용, 김인구, 조한권, 1989, "와류 분무 노즐에 의해 형성되는 액적들의 균일도에 액체의 점도가 미치는 영향," *대한기계학회 논문집(B)*, 제 3호, pp. 538~546.
- (9) 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.
- (10) 정지원, 차건중, 김덕줄, 2000, "이중분무의 중첩영역과 단일분무에서 액적의 거동 특성," *대한기계학회논문집(B)*, 제24권, 제10호, pp. 1300~1380.