

# 노즐의 내부형상 및 스윌러 베인각의 변화가 선단거리에 따른 분무특성에 미치는 영향

## Effect of Internal Geometry and Swirler Vane Angle of Nozzle on Spray Characteristics with Distance from Nozzle Tip

정 홍 철\*, 최 경 민\*\*, 김 덕 줄\*\*

H. C. Jeong, G. M. Choi, D. J. Kim

### Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of swirler vane angle and the aspect ratio of swirl chamber of nozzle on the characteristics of single 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 vane angle. It was also shown that the axial velocity and SMD were decreased with increasing the aspect ratio of swirl chamber. The effect of swirler vane angle on the spray characteristics was greater than the aspect ratio of swirl chamber for single spray.

주요기술용어 : Swirler vane angle(스윌러각), Swirl chamber aspect ratio(스윌실 형상비), PDA (위상도플러 입자분석기), SMD(자우터 평균 직경)

### 기호설명

$D_{32}$	: 자우터 평균 직경(SMD). ( $\mu\text{m}$ )
$d$	: 스윌실 직경 ( $\text{mm}$ )
$l$	: 스윌실 길이 ( $\text{mm}$ )
$l/d$	: 스윌실 형상비
$P_1$	: 분사압력 (MPa)
$r$	: 측정 반경방향 위치 ( $\text{mm}$ )
$\bar{U}$	: 축방향 속도 (m/s)
$Z$	: 선단거리 ( $\text{mm}$ )
$\alpha$	: 스윌러 베인각 ( $^\circ$ )

\* 부산대학교 기계공학과 대학원

\*\* 부산대학교 기계공학부, 기계기술연구소

### 1. 서론

현대 사회에서 액체의 분무는 다양한 산업 및 기술 분야에서 응용되고 있다. 특히 미세가공 공정, 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 전자부품 제조공정 등의 산업용 분무시스템에 널리 이용된다. 이에 따라 산업용 분무시스템 최적화를 위해 압력식 스윌

노즐의 분무특성에 관한 연구<sup>(1~7)</sup>가 활발히 진행되고 있다.

Jung 등<sup>(8)</sup>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<sup>(9~11)</sup>은 미세가공 시스템에서 분무특성이 에칭특성에 미치는 영향을 연구하여 에칭특성과 분무특성이 상호 연관성을 가진다고 분석하였다.

Yule 등<sup>(12)</sup>은 고압분사에서 압력식 스월노즐의 성능을 유출계수(discharge coefficient,  $C_d$ )와 분무각, 액적크기 등을 측정하여 조사하였다. 유입구 면적이 작아질수록 평균액적크기는 작아지고 일반적으로 분사압력이 증가하면 평균액적크기가 작아졌으며, 또한 출구 오리피스 지름이 감소하고 출구 오리피스와 스월실의 길이가 증가함에 따라서 분출계수가 상당히 증가함을 보고하였다. Iciek<sup>(13)</sup>은 실험을 통해서 노즐의 스월실 길이를 스월실 직경으로 나눈 형상비가 2보다 작고 모서리가 날카로운 노즐의 경우에는 이력현상(履歷現象)이 나타났음을 보고하였는데, 이는 짧은 노즐의 경우 액체 분류가 오리피스의 내벽에 완전히 접하지 않은 상태에서 분사되기 때문인 것으로 결론지었다. Choi 등<sup>(14)</sup>은 액체의 물성치와 노즐의 형상 변화에 따른 압력식 스월 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.

이러한 연구들은 단일분무에 대하여 스월실 형상비에 주안점을 두고 있으나 스월러 베인각을 동시에 고려한 연구는 아직 미흡한 단계에 있다.

따라서 본 연구에서는 노즐의 기하학적인 형상인 노즐 내 스월러 베인각과 스월실 형상비를 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 등으로 이루어져 있다. PDA시스템에서 레이저는 Argon-ion 레이저가 사용되었고 실험시 사용출력은 2W로 하였으며 초점거리는 송광부와 수광부 모두 400mm로 하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 Full Cone type의 압력식 스월노즐과 스월러의 형상 및 3차원 모델링을 나타낸 그림이다. 노즐 제작시 재료로는 가공의 용이함을 위해 금속을 대신해 내피로성, 강인성, 내마모성 등의 우수한 특징을 지니고 있는 폴리아세탈을 사용하였고 노즐은 밀링머신(NCHVN-85FO)을 이용하여 제작하였다. Table 1은 본 연구에 사용된 노즐의 스월실의 형상비와 스월러 베인각을 나타내고 있다. 스월실의 직경(d)은 11.0mm이고 스월실 길

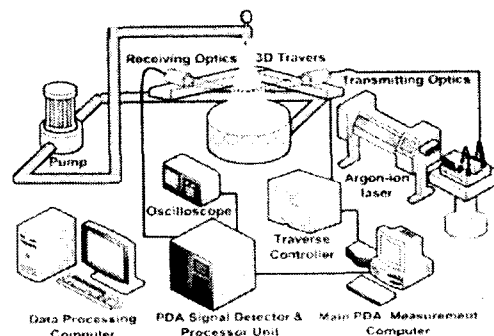


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

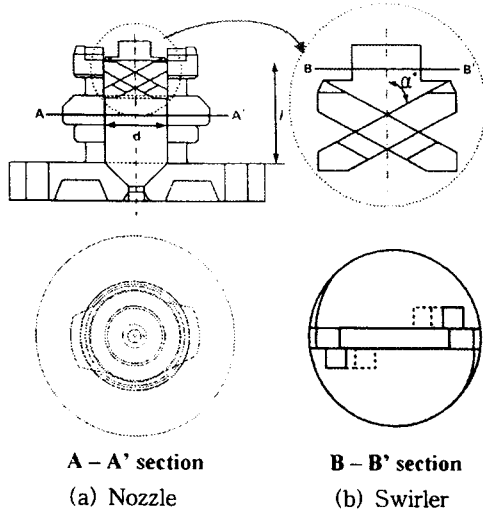


Fig. 2 Configuration of nozzle and swirler

이(1)는 13.2, 17.5 및 22.0mm이다. 스윌러 베인 각( $\alpha$ )은 노즐의 수직중심축과 스윌러면이 이루는 각도이다. 본 연구에서 스윌러 베인각의 선정은 스윌실의 출구부의 수축각(63°)에 대하여 0.8, 1.0, 1.2배인 50°, 63° 및 76°로 설계하였다. 스윌러 베인각이 50°이하면 스윌실 형상비가 1.2인 경우에 스윌실 내부에 스윌러가 취부될 수 없다는 것과 76° 이상이면 스윌러의 베인 부분이 서로 접촉된다는 것을 고려하여 설정하였다.

2.2 실험방법

본 실험에서 사용한 작동유체는 상온의 수돗물을 사용하였고, 예비실험을 통해 분무의 대

Table 1 Specification of nozzles

Nozzle	Aspect ratio (l/d)	Swirler angle $\alpha$ (°)	
A	1.2	1	50
		2	63
		3	76
	1.6	4	50
		5	63
		6	76
	2.0	7	50
		8	63
		9	76

칭성을 확인하여 횡단면에 대해서 PDA시스템으로 액적의 크기와 속도를 측정하였다. 분사압력은 0.4MPa, 선단거리는 분무 축방향에서 150, 200, 250mm의 단면에 대해 반경방향으로 분무가 존재하는 외곽영역까지 측정하였다. 분무특성의 측정값은 측정체적을 통과하는 액적 5000개의 평균값으로 하였다. 측정된 분무특성은 액적의 축방향 평균속도와 자우터 평균입경(Sauter Mean Diameter, SMD)로 나타내었다. 분무각은 분무 시의 가시화 사진분석과 패턴데이터를 통해 유량이 수집되어지는 영역을 비교 분석하여 구하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 분무의 거시적 특성

Fig. 3은 분사압력 0.4MPa일 때, 스윌러 베인각과 스윌실 형상비 변화에 따른 분무형상을 가시화한 것이다. 스윌러 베인각이 커질수록 분무각은 각각 42°, 54°, 68°로 증가하였다. 이것은 노즐내부의 스윌러 베인각이 커질수록 분무액적의 반경방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다. 또한 스윌실 형상비가 커질수록 분무각은 58°, 54°, 50°로 감소하였다. 이것은 스윌실 형상비가 커질수록 액체가 스윌실 내부에 체류하는 시간이 길어져 노즐 내부에서 유동박리-재부착 등에 의한 불안정한 난류 현상이 줄어들고 발달된 안정한 유동 형태의 액체가 분출되기 때문으로 사료된다.

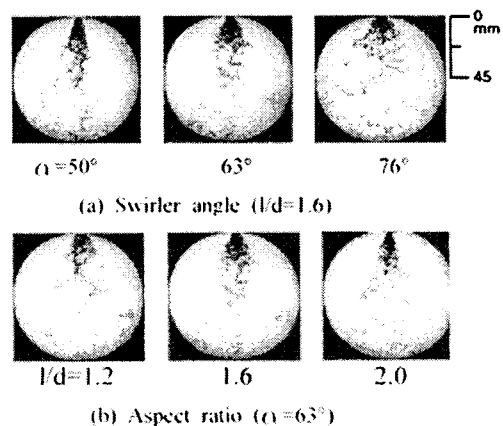
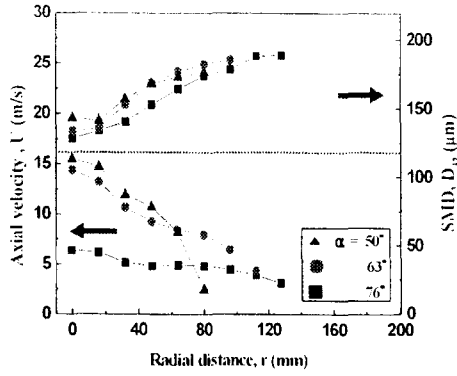
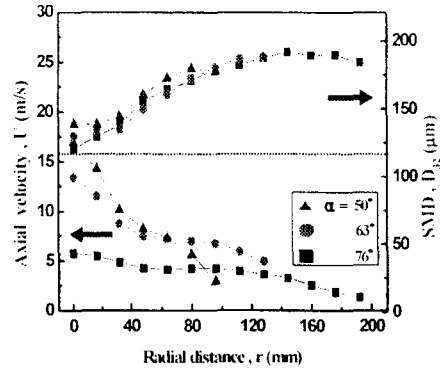


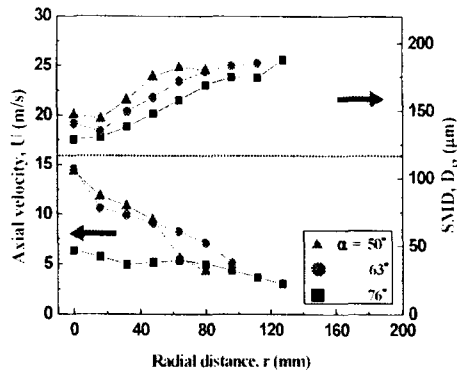
Fig. 3 Visualization of spray at  $P_i=0.4MPa$



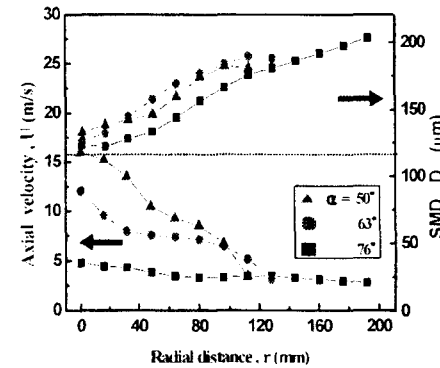
(a)  $l_s/d_s = 1.2$



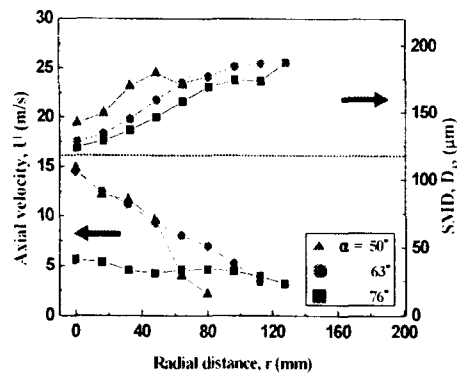
(a)  $l_s/d_s = 1.2$



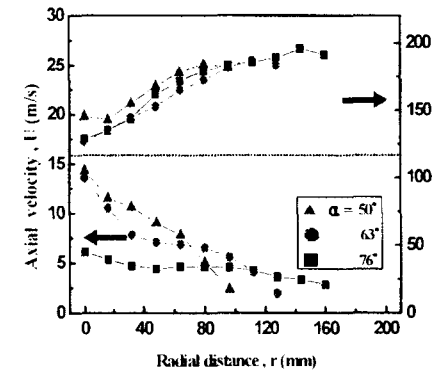
(b)  $l_s/d_s = 1.6$



(b)  $l_s/d_s = 1.6$



(c)  $l_s/d_s = 2.0$



(c)  $l_s/d_s = 2.0$

Fig. 4 Axial velocity and SMD of single spray with swirler angles at  $z=150\text{mm}$  and  $P_1=0.4\text{MPa}$

Fig. 5 Axial velocity and SMD of single spray with swirler angles at  $z=200\text{mm}$  and  $P_1=0.4\text{MPa}$

3.2 분무의 미시적 특성

Fig. 4에서 Fig. 6까지는 분사압력 0.4MPa일 때 각각 선단거리가 150, 200, 250mm일 때, 스윌러 베인각에 따른 단일분무의 축방향 평균속도와

SMD를 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 축방향 평균속도의 전체적인 경향은 분무중심부에서 최대값을 가지고 분무외각으로 갈수록 감소하는 경향이였다. 또한 스윌러 베인각이 작을수록 최외각 지점을 제외하고는 축방향 평

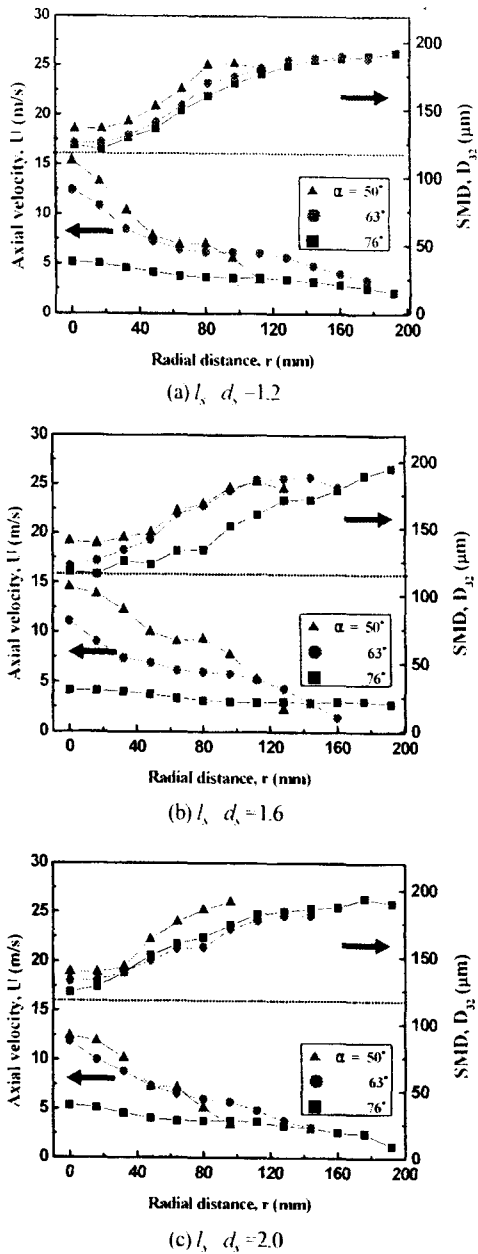


Fig. 6 Axial velocity and SMD of single spray with swirler angles at  $z=250\text{mm}$  and  $P_i=0.4\text{MPa}$

균속도가 큰 경향이였다. 이것은 노즐 내부의 스월러 베인각이 작을수록 분무액적의 축방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다. 스월러 베인각이 76°인 경우에는 전체적으로 축방향 평균속도의 값은 작지만 분무중심과 분무외각

의 축방향 속도 차이가 작음을 알 수 있다. 이것은 노즐 내부의 스월러 베인각이 클수록 분무액적의 반경방향 모멘텀이 증가하기 때문에 분무중심과 분무외각의 축방향 평균속도의 차이가 상대적으로 적게 발생하기 때문으로 사료된다. 또한 선단거리가 증가할수록 축방향 평균속도는 감소하는 경향이였다. 전체적인 SMD 경향은 분무중심부에서 SMD가 작고 분무외각으로 갈수록 SMD가 증가하는 경향이였다. 또한 스월러 베인각이 증가할수록 SMD는 감소하였다. 이것은 노즐내부의 기하학적인 형상에 의한 요인으로 액체가 노즐외부로 분출시 스월러 베인각이 클 경우 반경방향의 모멘텀이 증가하여 SMD가 작아지는 것으로 사료된다. 스월실 형상비에 따라서는 확연히 차이가 드러나지 않았다.

Fig. 7은 분사압력 0.4MPa, 선단거리 150mm, 스월러 베인각 63°일 때, 스월실 형상비에 따른 단일분무의 축방향 평균속도와 액적 크기를 구간별 확률밀도함수로 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 축방향 속도의 경우로서, 스월실 형상비가 작은 경우에 축방향 속도가 큰 범위에 분포하는 액적들의 확률이 높고 작은 범위에 분포하는 액적들의 확률이 낮은 경향으로서, 스월실 형상비가 큰 경우에 비해 축방향 속도가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 스월실 길이가 길수록 유체의 스월실 내부 체류시간이 길어져 스월실 내부에 접하는 유동 단면적이 늘어나 마찰력의 증가 때문에 액적의 축방향 속도가 감소되는 것으로 사료된다. Fig. 7(b)는 액적크기의 경우로서 산술평균직경인  $D_{10}$ 으로 나타내었으며, 축방향 속도 분포에 비해 상대적으로 스월실 형상비에 따른 차이는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 전체적으로 액적크기가 큰 영역에 분포하는 액적들의 확률분포가 낮고 작은 영역에 분포하는 액적들의 확률분포가 높은 경향으로 나타났다. 큰 차이를 보이지는 않으나 스월실 형상비가 큰 경우에 액적크기가 작은 영역에 분포하는 액적들의 확률분포가 조금 더 높은 것으로 나타나 존재하는 액적의 크기가 작다는 것을 알 수 있다. 이것은 스월실 길이가 길어질수록 유체의 스월실 내부 체류시간이 길

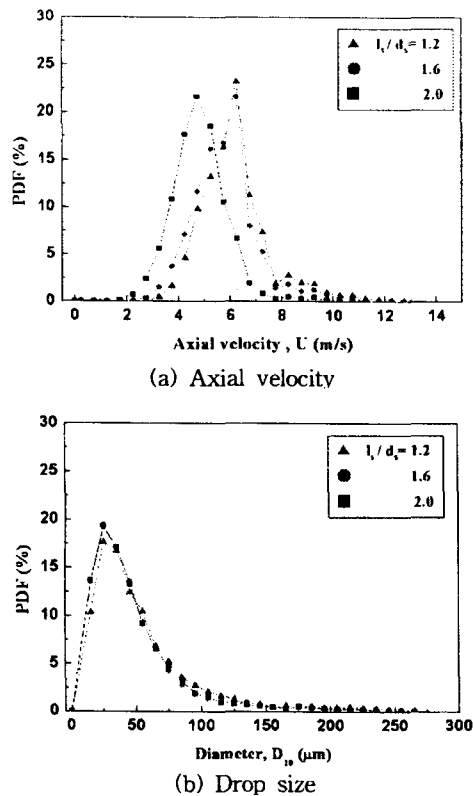


Fig. 7 Probability density function for spray characteristics with swirl-chamber aspect ratio at  $\alpha=63^\circ$ ,  $Z=150\text{mm}$  and  $P_1=0.4\text{MPa}$

어져 마찰에 의한 난류정도의 증가로 인한 영향으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서 스윌러 베인각과 스윌실 형상비 변화에 따른 노즐을 사용하여 분무형상을 가시화하고 분무특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 스윌러 베인각이 증가할수록 분무각이 증가하는 경향이었으며 스윌실 형상비가 커질수록 분무각은 감소하였다.
- (2) 스윌러 베인각이 증가할수록 축방향 평균 속도와 SMD는 감소하였다.
- (3) 스윌실 형상비가 증가할수록 축방향 평균 속도와 액적크기는 감소하였다. 하지만 스윌실

형상비 변화는 분무특성에 큰 영향을 미치지 않았다.

#### 참고문헌

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

8. 정지원, 차건종, 김덕줄, "이중분무의 중첩영역과 단일분무에서 액적의 거동 특성" 대한기계학회논문집 B권, 제24권, 제10호, pp. 1300~1308, 2000.
9. 정지원, 김덕줄, "미세 가공 시스템에서 분무특성이 에칭특성에 미치는 영향에 관한 연구", 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제1호, pp. 109~117, 2004.
10. 정지원, 김영진, 김덕줄, "이중분무에서 분무특성과 에칭특성의 상호상관", 대한기계학회논문집 B권, 제28권, 제4호, pp. 449~455, 2004.
11. 정지원, 김덕줄, "습식 에칭공정에서 노즐형상에 따른 분무특성분석을 통한 에칭특성의 향상에 관한 연구", Trans. of the KSME (B), Vol. 28, No. 7, pp. 842~849, 2004.
12. Yule, A. J. and Widger, I. R., "Swirl Atomizers Operating at High Water Pressure," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 38, No. 8, pp. 981~1000, 1996.
13. Iciek, J., "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, 1982.
14. 최윤철, 정지원, 김덕줄, "액체의 물성치와 노즐의 형상 변화에 따른 압력스웰 노즐의 분무특성", 대한기계학회논문집 B권, 제25권, 제12호, pp. 1813~1820, 2001.