

습식 에칭공정에서 노즐 형상에 따른 분무특성 분석을 통한 에칭특성의 향상에 관한 연구

정 지원* · 김 덕 줄†

(2004년 2월 11일 접수, 2004년 5월 14일 심사완료)

A Study on Improvement of Etching Characteristics by Spray Characteristics Analysis with Nozzle Geometries in Wet Etching Process

Ji-Won Jung and Duck-Jool Kim

Key Words: Wet Etching(습식에칭), Spray Characteristics(분무특성), Etching Factor(에칭계수), Swirler Angle(스웰러각), Swirl Chamber Aspect Ratio(스웰실 형상비)

Abstract

The objective of this work is to study the improvement of etching characteristics in wet etching process. The etching characteristics such as etching factor were investigated under different etching conditions and compared with the spray characteristics. The spray characteristics of nozzle with different geometries such as swirler angle and swirl chamber aspect ratio were analyzed by using PDA system to predict the effect of the spray characteristics on the etching factor. The swirler angles were 49.5°, 63° and 76.5°. The swirl chamber aspect ratios were 1.2, 1.6 and 2.0. It was found that the etching factor was correlated with the spray characteristics and also the smaller swirler angle, the larger etching factor became.

1. 서론

기호설명

- d_i : 액적 직경
- D : 에칭깊이
- D_{32} : 자우터 평균 직경(SMD)
- P_i : 분사 압력
- U_i : 액적의 축방향 속도
- W_1 : 패턴 설계폭
- W_2 : 횡방향 에칭폭
- Z : 선단거리

습식 에칭기술은 반도체, 통신, 광학, 전자부품, 초소형정밀기계 등의 분야에서 미세가공 기술로서 이용되고 있는 포토리소그래피 기술 중의 핵심기술로서 최근 제품의 초소형화, 고집적화, 고정세화를 요구하는 수요가 급증하면서 기술력 향상을 위해 다양한 연구⁽¹⁻⁵⁾가 진행되고 있는 실정이다.

습식 에칭기술은 생산성, 원가, 정밀도 면에서 유리한 점이 많으므로 향후에도 지속적으로 미세가공 기술로서 사용될 것이다. 이러한 습식에칭 기술로서 생산되는 제품의 품질 및 생산성에 영향을 주는 에칭특성을 좌우하는 주요인자로는 파이프의 배열 및 분사노즐의 배열, 노즐의 종류 등과 관련된 에칭시스템과 분사압력, 선단거리, 용도각도 및 속도 등과 관련된 분사조건 및 에칭

* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : djkim@pusan.ac.kr

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

용액의 비중, 온도, 점도, 조성 등이 있다. 따라서 에칭공정에서는 에칭시스템과 분사조건 및 에칭용액의 물성치에 따라 분사되는 분무액적들의 속도, 크기, 충격력 등의 분무특성은 다르게 나타나며 이는 미세가공 제품의 품질 및 생산성을 좌우하는 에칭특성에 영향을 미칠 것이라고 예상할 수 있다. 따라서 습식 에칭 기술력 향상을 위해서는 이러한 분무특성과 에칭특성의 상호 연관성에 대한 근본적인 이해 및 응용이 필요하다.

Allen⁽⁶⁾은 에칭시간과 선폭이 에칭 깊이에 미치는 영향 및 에칭시간과 선폭과 에칭용액의 조성이 에칭계수에 미치는 영향을 조사하였다. Visse 등⁽⁷⁾은 양면 비대칭 분무에칭이 고정세화에 미치는 영향을 조사하여 고정세화를 위해서는 높은 에칭계수와 비대칭 에칭이 필요하다는 것을 주장하였다. Ueda 등⁽⁸⁾은 염화 제2철 용액으로 분무 에칭시 에칭 운동학과 고정세화의 한계에 대해 조사하였으며 높은 에칭 계수와 확산 경계층 두께의 감소를 통해 고정세화가 가능하다고 주장하였다. 현재까지 습식 에칭 기술력 향상을 위한 연구는 에칭용액, 에칭시간, 선폭, 에칭방법 등의 에칭변수들이 에칭특성에 미치는 영향에 대해 주로 연구되었으나 분무에칭의 기본적인 현상을 이해하기에는 미흡한 단계에 있다.

따라서 본 연구에서는 에칭조건 변화에 따라 구한 에칭계수와 분사조건 변화에 따라 PDA (Phase Doppler Anemometer) 시스템을 사용하여 분석한 분무특성인 속도, 액적크기, 충격력의 상관관계를 분석하였다. 또한 노즐의 형상을 변화시켜 도출된 다양한 연구결과⁽⁹⁻¹²⁾를 참고로 자체 제작된 분사노즐의 분무특성을 분석하고 에칭특성을 예상함으로써 미세 가공 산업에서 습식 에칭기술의 근본적인 이해와 에칭 특성 향상에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 에칭특성 분석을 위한 실험 장치의 구성은 설계 시스템, 정면 및 코팅 시스템, 노광 시스템, 현상 시스템, 에칭 시스템, 박막 및 수세 시스템으로 구분된다.

Fig. 1은 분무특성 분석을 위한 실험 장치를 나타낸다. 실험장치의 구성은 분사 시스템, PDA 시

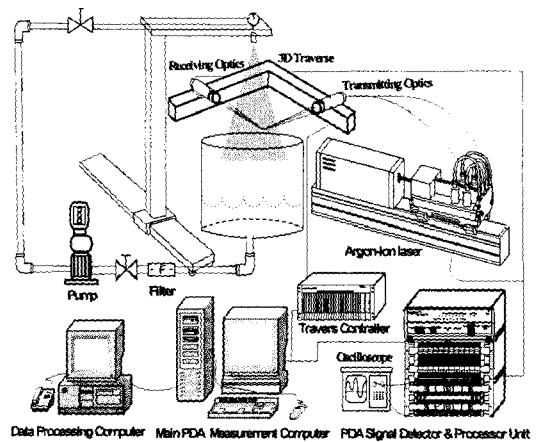


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up for spray characteristics analysis

스템으로 구성된다. 분사시스템은 분사노즐, 압력계, 레귤레이터, 대형수조, 정수필터, 분사압력 조절을 위한 밸브 등으로 구성되어 있으며 펌프와 대형 수조를 배관으로 연결하여 순환식으로 작동 유체를 공급하도록 설치하였다. PDA 시스템에서 레이저는 Ar-ion 레이저(최대출력 5W)가 사용되었고 실험시 사용출력은 2W로 하였으며 초점거리가 400mm인 송광부와 수광부, 신호처리기, 3차원 이송장치, 컴퓨터 등으로 이루어져 있다.

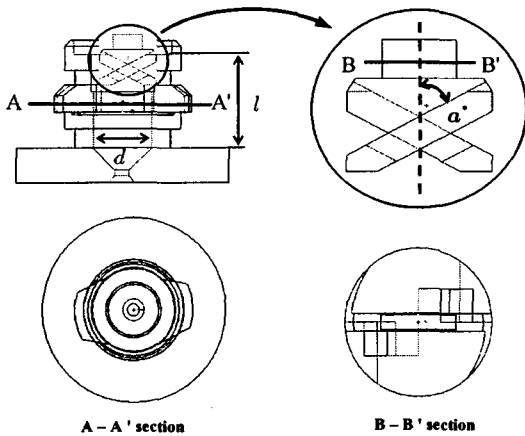
Fig. 2는 본 연구에 사용된 노즐과 스월러의 개략적인 형상을 나타내고 있다. 상부 그림은 전체적인 형상을 나타내고, 하부 그림은 단면도를 나타낸 그림이다.

노즐 제작시 재료로는 내피로성, 강인성, 내마모성 등의 우수한 특징을 지니고 있는 폴리 아세탈을 사용하였고 노즐은 밀링머신(NCHVN-85FO)으로 제작하였다.

Table 1은 본 연구에서 사용된 노즐의 제원을 나타내고 있다. 스월러각은 Fig. 2에 나타난 것처럼 노즐 중심축과 스월러의 유체 유입구가 이루는 각으로 정의하였고, 스월실 형상비는 스월실의 지름에 대한 길이의 비로 정의하였다.

2.2 실험방법

에칭용액으로는 염화 제2철 용액이 사용되었으며 두께 150 μm의 니켈합금 동박판을 시편으로 사용하였다. 마스터 패턴은 설계 스페이스 선폭



(a) nozzle (b) swirler
Fig. 2 Configuration of nozzle and swirler

Table 1 Specification of nozzles

Nozzle	Swirler angle α (°)	Swirl chamber length l (mm)	Aspect ratio (l/d)	Swirl chamber diameter d (mm)
A1	49.5	13.2	1.2	11.0
A2	63			
A3	76.5			
B1	49.5	17.5	1.6	
B2	63			
B3	76.5			
C1	49.5	22.0	2.0	
C2	63			
C3	76.5			

이 20 μ m이고 160 μ m의 피치로 동일한 패턴군을 형성하도록 제작되었다. 분무에칭시 분사압력은 0.3 및 0.4MPa로 하였고 에칭용액의 온도는 50 $^{\circ}$ C로 하였으며 노즐팁으로부터 시편까지의 수직거리인 선단거리는 각각 150, 200, 250, 300mm로 하였다. 에칭이 끝난 시료의 에칭된 선폭과 깊이를 3차원 광학측정 장치를 사용하여 에칭계수를 구하였다.

분무특성 측정은 예비실험을 통해 분무의 대칭성을 확인하여 분무중심축을 기준으로 분무횡단면의 1/4 단면에 대해서 분무특성을 측정하였다. 또한 분무 축방향으로 150, 200, 250, 300mm의 횡단면에 대해 분무중심으로부터 반경방향으로 분무액적이 도달하는 위치까지 측정하였으며 분사압력은 0.3 및 0.4 MPa로 하였다. 액적의 크기는

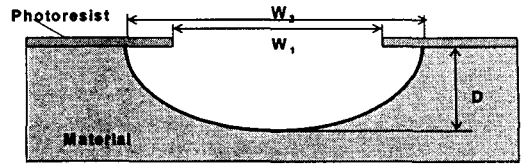


Fig. 3 Diagram of etched material

SMD(Sauter Mean Diameter)인 D_{32} 로 나타내었다. 작동유체는 상온수로서 실험동안 일정한 온도로 유지하여 사용하였으며, 측정값은 측정체적을 통과한 5000개 액적의 평균값으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 에칭계수와 분무특성의 상관관계

Fig. 3에 에칭계수의 개념을 설명하기 위하여 편면 에칭된 시료의 개략도를 나타내고 있다. 실제 에칭에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 코팅된 감광막이 현상되어 시료가 노출된 부분에만 에칭되는 것이 아니라 감광막이 코팅된 아래 부분까지 에칭용액이 침투하여 시료를 에칭하는 현상이 발생하는데, 이는 에칭공정에서 에칭이 진행되는 동안 시료의 깊이방향으로만 에칭이 진행되는 것이 아니라 시료의 깊이방향에 수직인 횡방향으로도 에칭이 진행되는 것을 의미하고 이러한 현상을 언더컷(undercut) 또는 사이드(side)에칭이라고 한다. 이러한 현상은 미세정밀 가공에서 구현하고자 하는 미세선폭 및 가공형상에 문제를 유발시킨다. 따라서 정밀가공을 위해서는 언더컷이 작을수록 바람직하다. 에칭계수는 정밀가공을 위한 척도가 되는 것으로 언더컷에 대한 에칭된 깊이를 나타내며 아래의 식으로 표현된다.⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} \text{Etching factor} &= \text{Etching depth} / \text{Undercut} \\ &= 2D/(W_2-W_1) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 D는 에칭깊이를 나타내며 W_1 은 패턴상에 설계된 폭이고 W_2 는 횡방향으로 에칭된 폭이다. 따라서 정밀 에칭을 위해서는 언더컷을 최소화 하여 에칭계수를 크게 하는 것이 반드시 필요하다고 할 수 있다.

Fig. 4는 산업용 스월노즐로 분사압력과 선단거리별로 시료의 편면에 대해서 에칭 했을 때 1/4

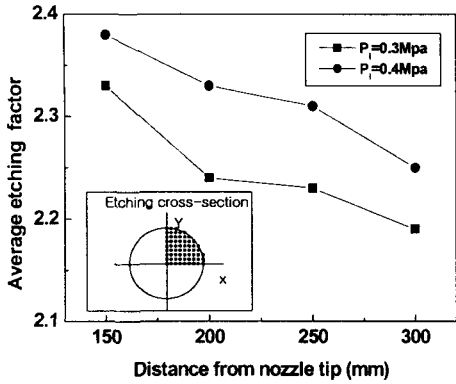


Fig. 4 Average etching factor at 1/4 cross section under different etching conditions

에칭 횡단면의 각 측정지점의 에칭계수를 산술 평균한 값을 나타내고 있다. 에칭 계수 평균값은 분사압력이 높은 경우에 크게 나타나고, 선단거리가 증가할수록 감소하였다. 이러한 현상은 높은 분사압력의 경우와 선단거리가 짧은 단면에서 노즐에서 분사되는 에칭용액의 분열된 액적들의 운동량이 크기 때문에 시료의 횡단면에 미치는 에칭효과가 커지고 이것은 에칭 된 후의 에칭용액이 좀 더 원활한 유동으로 인해 빨리 새로운 에칭용액으로 대체되어 횡방향 에칭보다는 수직 방향의 에칭을 촉진시키기 때문으로 사료된다. 또한 에칭이 진행되는 동안 처음에는 수직 방향으로만 에칭이 진행되다가 일정시간 후에는 횡방향으로 에칭이 진행되는데 분사압력이 높고 선단거리가 감소할수록 에칭시간이 감소하게 되므로 횡방향으로의 에칭시간이 감소하게 되고 따라서 언더컷이 줄어들어 에칭계수가 증가하는 것으로 사료된다. 이것은 Allen⁽⁶⁾이 제안한 에칭시간이 짧을수록 큰 에칭계수를 얻을 수 있다는 것과 일치하는 것이었다.

이상으로 보아 분무 에칭조건에 따라 에칭계수가 증감한다는 것을 알 수 있으며 이러한 분무 에칭조건에 따라서는 분무액적들의 특성인 유속, 액적크기, 충격력이 차이가 나게 되므로 에칭계수는 이러한 분무특성과 상관관계를 가질 것으로 사료된다.

Fig. 5는 선단거리와 분사압력에 따른 1/4분무 횡단면의 축방향 속도분포와 각 측정지점의 축방향 속도를 산술 평균한 값을 나타내고 있다. 분

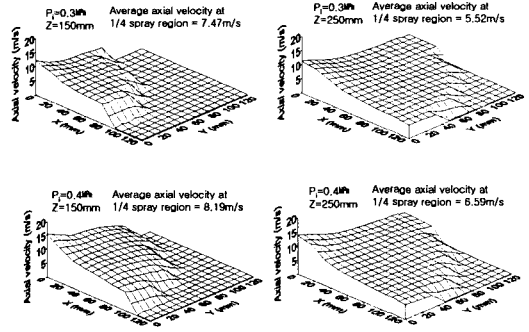


Fig. 5 Axial velocity distribution and average axial velocity at 1/4 cross section under different spray conditions

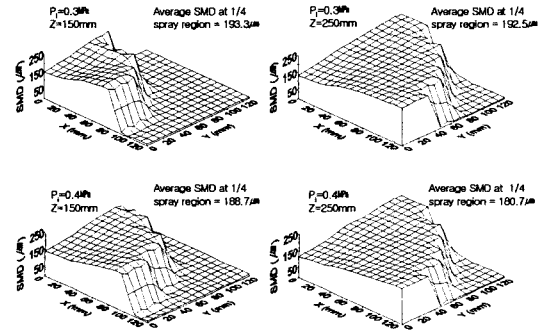


Fig. 6 SMD distribution and average SMD at 1/4 cross section under different spray conditions

사압력이 높은 경우와 선단거리가 짧은 단면에서 축방향 속도 평균값이 크게 나타나며 분무중심에서 분무외각으로 갈수록 축방향 속도가 감소하는 경향이 나타난다. 이것은 분무액적의 운동량이 분사압력이 높고 선단거리가 짧을수록 증가하며 분무중심에서 분무외각으로 갈수록 주위공기의 저항 및 유입으로 분무액적들의 축방향 운동량이 감소되기 때문으로 사료된다.

Fig. 6은 선단거리와 분사압력에 따른 1/4분무 횡단면의 SMD 분포와 각 측정지점의 SMD를 산술 평균한 값을 나타내고 있다. 분사압력이 높은 경우와 선단거리가 긴 단면에서 SMD 평균값이 작게 나타나며 분무중심에서 분무외각으로 갈수록 SMD가 증가하는 경향이 나타난다. 이것은 액적들이 분무중심에서는 빠른 속도로 낙하하기 때문에 주위 공기와의 상대속도가 커지고 액적들 상호간의 충돌로 인한 분열 때문에 미립화가 축

진되며 분무외각에서는 상대적으로 분무중심보다 작은 상대속도와 액적들간의 상호작용에 의한 합체현상이 발생하기 때문에 SMD가 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 선단거리와 분사압력에 따른 1/4분무 횡단면의 충격력 분포와 각 측정지점의 충격력을 산술 평균한 값을 나타내고 있다. 충격력은 액적을 구형이라 가정했을 때 액적크기를 이용하여 구한 액적의 질량에 축방향 속도를 곱하여 샘플링 시간으로 나눈 값으로 정의하였으며 아래의 식으로 표현된다.

$$\text{Impact force} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi}{6} d_i^3 \rho U_i}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 액적밀도, d_i 는 액적 직경, U_i 는 액적 축방향 속도, Δt 는 샘플링 시간을 나타낸다. 분사압력이 높은 경우와 선단거리가 짧은 단면에서 충격력 평균값이 크게 나타나며 분무중심에서 분무외각으로 갈수록 충격력이 감소하는 경향이 나타난다. 이것은 분사압력이 높고 선단거리가 짧은 경우와 분무중심에서 상대적으로 축방향 속도가 크고 또한 액적의 수밀도가 커서 단위 시간당 측정체적을 통과하는 액적의 개수인 액적 취득율이 증가하여 샘플링시간이 감소하기 때문으로 사료된다. 이상을 종합하여 볼 때 에칭특성인 에칭계수와 분무특성과의 관계를 분석하면 에칭계수는 분사압력이 높고 노즐팁으로부터의 선

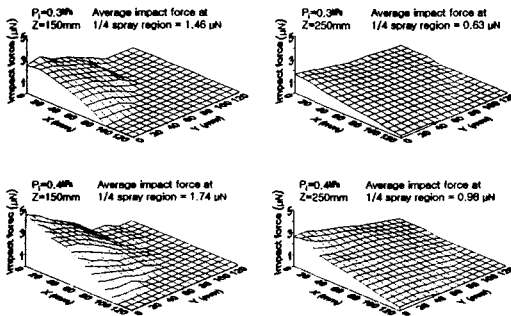


Fig. 7 Impact force distribution and average impact force at 1/4 cross section under different spray conditions

단거리가 짧을수록 높게 나타나며 이러한 경우의 분무특성은 횡단면의 축방향 속도 및 충격력의 평균값이 크게 나타나는 양의 상관관계를 가지고 있는 것으로 확인되었다. 또한 실제 에칭 용액과 상온수와의 유체의 물성치 면에서 차이가 있으므로 상온수로 분무특성을 측정한 결과를 에칭특성과 연관시키는 것은 정확한 상관관계를 도출하기가 어렵다고 사료되나 Jung 등⁽³⁾의 연구에 따르면 실제 에칭용액의 점도와 밀도에 근접한 유사유체로 분무특성을 측정한 결과 상온수에 비해 각각의 측정지점에서 축방향 속도는 작고 액적 크기는 큰 경향이었으나 분무반경방향으로의 분무특성 경향성이 거의 유사하였으므로 상온수로 측정된 분무특성으로 에칭특성과의 상관관계를 분석하였다. 따라서 분무특성은 에칭특성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있으며 에칭계수를 증대시킬 수 있는 분사조건 선정 및 노즐을 개발하는 것이 필요하다고 할 수 있다.

3.2 노즐형상변화에 따른 분무특성

3.2.1 스월러각에 따른 분무특성

Fig. 8은 A1, A2 및 A3 노즐에 대해 분사압력이 0.4 MPa일 때 분무형상 및 분열과정을 대표적으로 가시화한 것이다. A3 노즐의 분무각이 큰 것으로 보아 스월러각이 클수록 분무각이 증가한다는 것을 알 수 있었다. 이것은 노즐내부의 스월러각이 클수록 분무액적의 반경방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다.

Fig. 9는 분사압력이 0.4 MPa이고 선단거리가 200 mm일 때 노즐내부의 스월러각 변화에 따른 축방향 속도와 SMD를 스월실 형상비 별로 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 각 노즐들에 있어서 축방향 속도의 전체적인 경향은 분무중심부에서 최대값을 가지고 분무외각으로 갈수록 축

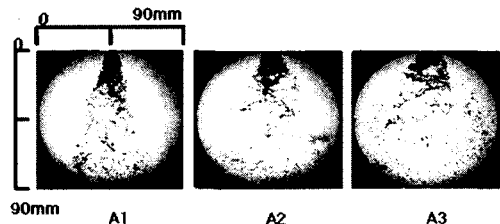
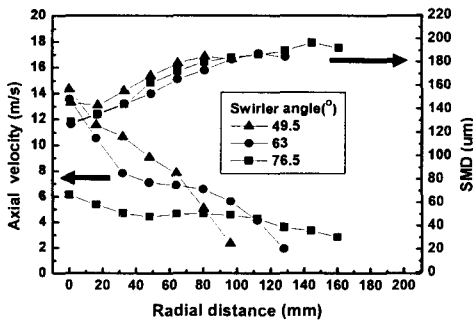


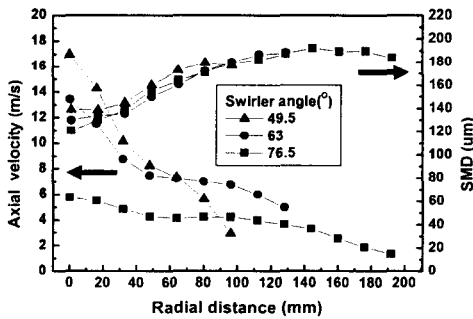
Fig. 8 Visualization of spray at P1=0.4 MPa

방향 속도가 감소하는 경향이였다. 또한 스윌러 각이 감소할수록 축방향 속도가 증가하는 경향이였고, 이것은 노즐내부의 스윌러각이 작을수록 분무액적의 축방향 모멘텀이 증가하기 때문으로 사료된다. 각각의 스윌실 형상비별로 스윌러각이

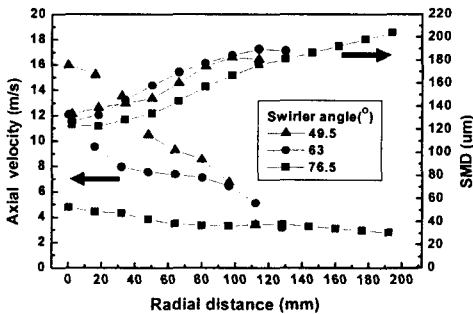
76.5°인 경우에는 전체적으로 축방향 속도의 값은 작지만 분무중심과 분무외각의 축방향 속도 차이가 작음을 알 수 있었다. 이는 노즐내부의 스윌러각이 클수록 분무액적의 반경방향 모멘텀이 증가하기 때문에 분무중심과 분무외곽의 축방향 평균속도의 차이가 상대적으로 적게 발생하기 때문으로 사료된다. 전체적인 SMD경향은 분무중심부에서 SMD가 작고 분무외각으로 갈수록 SMD가 증가하는 경향이다. 또한 각각의 스윌실 형상비별로 스윌러각에 따른 SMD차이는 일정한 경향을 나타내지 않았으며 SMD의 차이도 거의 나타나지 않아 스윌러각의 변화는 SMD에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.



(a) $l/d = 1.2$



(b) $l/d = 1.6$



(c) $l/d = 2.0$

Fig. 9 Axial velocity and SMD distribution with swirler angle at $Z=200\text{mm}$ and $P_f=0.4\text{ MPa}$

Fig. 10은 분사압력이 0.4 MPa이고 선단거리가 200 mm에서 노즐내부의 스윌러각 변화에 따른 충격력을 스윌실 형상비가 1.6일 때 반경방향 거리에 따라 나타낸 것이다. 충격력은 분무중심부에서 분무외각으로 갈수록 감소하는 경향이였다. 또한 스윌러각이 76.5°인 경우에 충격력이 가장 작게 나타나며 분무중심과 분무외각의 충격력이 균일한 경향을 나타내고 있다. 반대로 스윌러각이 49.5°인 경우에 충격력이 가장 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 전술한 에칭특성과 분무특성의 상관관계에서 충격력이 큰 경우에 에칭계수가 높게 나타나는 경향으로 보아 노즐 내부의 스윌러각을 작게 하여 충격력을 높이는 노즐을 설계, 제작 한다면 에칭계수를 향상시킬 수 있는 방안이 될 것으로 예상된다.

3.2.2 스윌실 형상비에 따른 분무특성

Fig. 11은 분사압력이 0.4 MPa이고 선단거리가

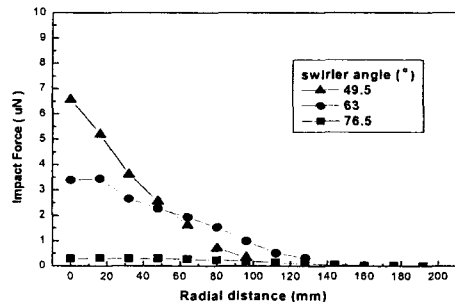
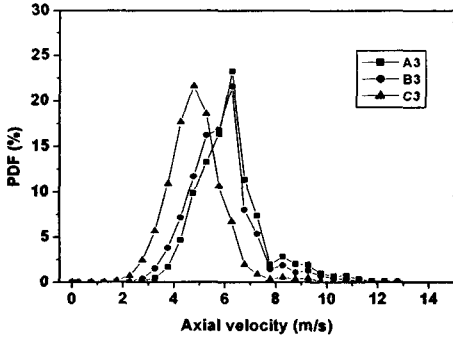
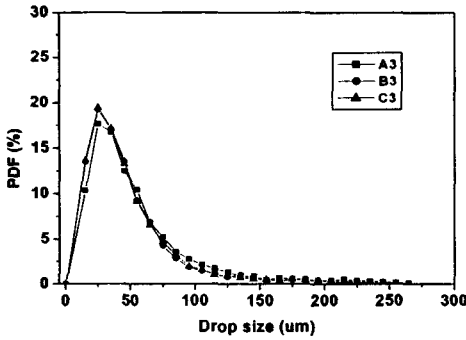


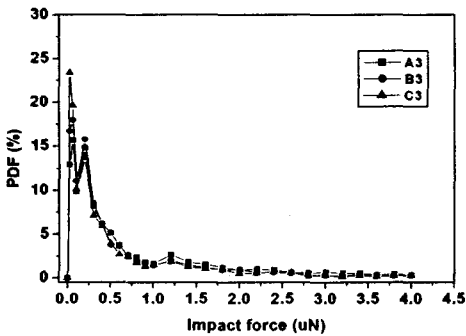
Fig. 10 Impact force distribution with swirler angle at aspect ratio=1.6, $Z=200\text{mm}$ and $P_f=0.4\text{ MPa}$



(a) Axial velocity



(b) Drop size



(c) Impact force

Fig. 11 Probability density function of axial velocity, drop size and impact force with aspect ratio at Z=200mm and Pi=0.4MPa

형상비가 다른 A3, B3 및 C3노즐에 대해서 축방향 속도와 액적의 크기 및 충격력을 구간별 확률 밀도함수(PDF)로 나타낸 것이다. Fig. 11의 (a)에서 축방향 속도는 스월실 형상비가 작은 노즐의 경우에 축방향 속도가 큰 범위에 분포하는 액적들의 확률이 높고 작은 범위에 분포하는 액적들의 확률이 낮은 경향으로서 스월실 형상비가 큰 노즐에 비해 축방향 속도가 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 11의 (b)에서 액적크기는 산술평균직경인 D_{10} 으로 나타내었으며, 축방향 속도 분포에 비해 상대적으로 노즐별로 차이가 분명하지 않으나 스월실 형상비가 작은 노즐의 경우에 액적크기가 큰 범위에 분포하는 액적들의 확률이 높고 작은 범위에 분포하는 액적들의 확률이 낮은 경향으로서 스월실 형상비가 큰 노즐에 비해 액적크기가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 스월실 길이가 짧아질수록 유체의 스월실 내부 체류시간이 짧아져 스월실 내부에서 발생하는 교란의 감소로 축방향 속도와 액적크기가 크게 나타나는 것으로 사료된다. Fig. 11의 (c)에서 충격력도 액적크기와 유사하게 노즐별로 차이가 분명하지 않다는 것을 확인할 수 있다. 전술한 스월러각 변화에 따른 분무특성은 스월러각이 크고 작음에 따라 분무특성에 확연한 차이가 나타나는데 비해 스월실 형상비 변화에 따른 분무특성은 상대적으로 미소한 차이를 보이는 것으로 보아 스월실 형상비 변화를 통한 에칭계수의 향상 면에서는 큰 효과가 없을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 분사조건에 따른 에칭특성과 분무특성의 상관관계를 분석하고 노즐 내부의 스월러각과 스월실 형상비 변화에 따른 분무특성을 분석하여 에칭특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 에칭계수는 분사압력이 높고 선단거리가 짧을수록 높게 나타나며 이러한 경우의 분무특성은 분무 횡단면의 축방향 속도 및 충격력의 평균값이 크게 나타나는 경향으로 에칭계수와 양의 상관관계를 나타내었다.

(2) 노즐 내부의 스월러각이 작을수록 분무각은 감소하였고 축방향 속도 및 충격력이 증가하였으며 SMD는 스월러각에 대한 영향이 비교적 작았

200mm인 경우에 스월러각이 76.5°이고 스월실

다.

(3) 노즐 내부의 스월리각을 작게 하여 충격력을 높이는 노즐을 설계, 제작 한다면 에칭계수를 향상시킬 수 있는 방안이 될 것으로 예상된다.

(4) 스월실 형상비 변화에 따른 분무특성은 상대적으로 미소한 차이를 나타내므로 스월실 형상비 변화를 통한 에칭계수의 향상 면에서는 큰 효과가 없을 것으로 예상된다.

(5) 에칭특성과 분무특성은 상호 연관성을 가지며 실제 산업현장에서 미세가공을 위해서는 에칭계수를 증대시킬 수 있는 분사조건 및 노즐을 개발하는 것이 필요하다.

참고문헌

- (1) Sundaram, K. B., Sah, R. E., Baumann, H., Balachandran, K. and Todi, R. M., 2003, "Wet Etching Studies of Silicon Nitride Thin Films Deposited by Electron Cyclotron Resonance Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition," *Microelectronic engineering*, Vol. 70, pp. 109~114.
- (2) Geissler, M., Schmid, H., Michel, B. and Delamarche, E., 2003, "Selective Wet Etching of Microcontact Printed Cu Substrates with Control Over the Etch Profile," *Microelectronic engineering*, Vol. 67, pp. 326~332.
- (3) Jung, J. W. and Kim, D. J., 2004, "A Study on Effect of Spray Characteristics on Etching Characteristics in Micro Fabrication System," *Transactions of the KSME B*, Vol. 28, No. 1, pp. 109~117.
- (4) Kim, M. and Lee, J. K., 1995, "A Study on the Single-Side Photo Etching of Stainless Steel Plate Etched Ferric Chloride Etchant," *J. Corros. Sci. Soc. of Korea*, Vol. 24, No. 4, pp. 239~249.
- (5) Yoon, D. S., Lee, G. W. and Park, C. H., 2000, "Studies on the Ferric Chloride Etching of Shadow Masks," *Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers*, Vol. 38, No. 3, pp. 393~397.
- (6) Allen, D. M., 1986, "The Principles and Practice of Photochemical Machining and Photo-etching," *Adam Hilger*, Bristol.
- (7) Visser, A. and Buhler, M., 2001, "Theoretical and Practical Aspects of the Miniaturization of Lead Frames by Double Sided Asymmetrical Spray Etching," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 115, pp. 108~113.
- (8) Ueda, R., Toki, S., Tanizaki, Y., Sugiura, T. and Asakura, S., 1994, "Principles of Photoetching in the Fabrication of Fine-Pitch Lead Frames," *Metal finishing*, Vol. 92, No. 1, pp. 29~31.
- (9) 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," *Transactions of the KSME B*, Vol. 25, No. 12, pp. 1813~1820.
- (10) Yule, A. J., 1996, "Swirl Atomizers Operating at High Water Pressure," *International journal of mechanical sciences*, Vol. 38, No. 8, pp. 981~1000.
- (11) Lopez, B., Soucemarianadin, A. and Attane, P., 1999, "Break-up of Continuous Liquid Jets: Effect of Nozzle Geometry," *Journal of Imaging Science and Technology*, Vol. 43, No. 2, pp. 145~152.
- (12) Im, K. S., Kim, H. and Lai, M. C., 2001, "Parametric Study of the Swirler/Venturi Spray Injectors," *Journal of propulsion and power*, Vol. 17, No. 3, pp. 717~727.