

## Powder Blasting에 의한 유리의 미세 홈 가공시 노즐 주사횟수의 영향

김광현\* · 최종순\* · 박동삼†

(2001년 7월 27일 접수, 2002년 4월 23일 심사완료)

### Effect of Nozzle Scanning in Micro Grooving of Glass by Powder Blasting

Kwang Hyun Kim, Jong Sun Choi and Dong Sam Park

**Key Words :** Powder blasting(미립분사가공), Abrasive(분사재), Micro grooving(미세홈 가공), Nozzle scanning(노즐 주사), Masking process(마스킹 공정)

#### Abstract

The old technique of sandblasting which has been used for decoration of glass surface has recently been developed into a powder blasting technique for brittle materials such as glass, silicon and ceramics, capable of producing micro structures larger than 100 $\mu$  m. This paper describes the performance of powder blasting technique in micro-line grooving of glass and the effect of the number of nozzle scanning on the depth and width of line groove. Experimental results showed that increasing the no. of nozzle scanning resulted in the increase of depth and width in grooves. Increase of width which may cause several problems in the precision machining results from wear of mask film. Therefore, well-controlled masking process is the most important factor for micro machining of glass with accuracy.

#### 기호설명

- $E$  : 소재의 탄성계수
- $H$  : 경도
- $K_{Ic}$  : 소재의 파괴인성(fracture toughness)
- $Q$  : 가공률(erosion rate)
- $l_c$  : 측면크랙의 길이
- $d_c$  : 측면크랙의 깊이
- $\rho_s$  : 소재의 비질량(specific mass)
- $\rho_a$  : 분사재 입자의 비질량(specific mass)
- $v_p$  : 분사재 입자의 평균직경
- $v_f$  : 분사재 입자의 속도

#### 1. 서론

미립분사가공(micro abrasive jet machining or powder blasting)은 고압의 가스에 의하여 가속된 미소 입자들을 노즐로부터 고속으로 분사하여 입자들의 충격력에 의하여 재료를 가공하는 가공방법이다. 이와 유사한 가공방법으로서 샌드 블라스팅(sand blasting)이 오래 전부터 사용되어져 왔는데 주로 페인트나 스케일 및 비 제거 등의 표면세정이나 표면 다듬질 및 유리 장식품 가공 등의 비교적 저천 가공 용도로 사용되어져 왔다.

한편, 최근 반도체나 센서 및 평판 디스플레이 등의 연구개발이 활발해짐에 따라 수십 혹은 수백 마이크로미터 단위의 구조물 성형을 위한 고정밀도의 기계적 예칭기법이 연구되고 있는데 미립분사가공이 아주 효율적 방법으로 인식되기 시작했으며 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

\* 인천대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 인천대학교 기계공학과

E-mail : dspark@incheon.ac.kr

TEL : (032)770-8418 FAX : (032)770-8410

지금까지의 연구는 크게 미립분사가공 시의 가공기구, 가공특성, 활용사례 및 마스크 재료특성에 관한 연구로 분류할 수 있다. 가공기구와 관련하여 Slikkerveer 등,<sup>(1)</sup> Verma 등<sup>(2)</sup> 및 Seldon<sup>(3)</sup>의 연구가 있으며, 가공능률이나 분사조건의 영향 등 분사가공 특성에 관한 연구로는 廚川 등,<sup>(4)</sup> 北嶋 등,<sup>(5)</sup> Slikkerveer 등<sup>(6)</sup> 및 Wensink 등<sup>(7)</sup>의 연구가 있다. 미립분사가공을 이용한 적용사례 연구로서 유리를 이용하여 평판 디스플레이의 일종인 ZEUS 관낼을 성형하고자 하는 Lighthart 등<sup>(8)</sup>의 연구, 유체기공용 미세 유체채널(fluid channel)의 급속 성형을 위한 Kruusing 등<sup>(9)</sup>의 연구, 반도체나 전자제품 및 LCD 등에 대한 미세가공 적용 사례들을 소개한 伊澤<sup>(10)</sup>의 연구, 유리소재의 마이크로 칩 성형을 위한 Solignac 등<sup>(11)</sup>의 연구가 있다. 마스크 재료특성과 관련하여 포토레지스트 포일(foil)이나 구리 도금 등의 마스크 재료의 마멸특성에 대한 Wensink 등<sup>(12)</sup>의 연구가 있다. 이러한 연구들을 종합적으로 살펴보면 미립분사가공이 최근 2~3년 사이에 주목을 받고 있는 기술이기 때문에 연구내용 또한 거의 기초적 내용들을 다루고 있다.

국내의 경우 미립분사가공과 관련한 연구는 2000 년 박동삼 등<sup>(13,14)</sup>에 의하여 처음으로 소개되었으며 이에 대한 연구 개발이 절실히 요청되고 있다.

한편, 반도체나 LCD 및 센서 등의 부품에 유리가 많이 사용되고 있는데 이의 미세가공 기술이 중요한 과제가 되고 있다. 유리에 대한 미세가공 기법의 개요를 Table 1 에 나타내었는데<sup>(7)</sup> 예들들어 얇은 유리기관에 수만개의 미소구멍을 가공해야 할 경우 이들 구멍의 고속 대량 가공에는 미립분사가공이 가장 효율적으로 응용될 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서는 반도체나 유리 등 취성재료의 미세형상 가공을 목적으로 미립분사가공을 도입하여 미세 선형 홀을 에칭하는 기법을 개발하고자 한다. 이때 공정변수들인 분사압력, 분사재의 재질이나 입자크기 및 밀도, 노즐의 높이나 노즐 주사(scanning) 횟수 등이 형상의 정밀도나 성형 과정에 큰 영향을 미치게 되는데 본 연구에서는 그러한 공정변수들 중에서 노즐의 피가공물에 대한 주사 횟수가 성형형상에 미치는 영향을 분석하는데

Table 1 Glass micromachining techniques<sup>(7)</sup>

	Min. Feature size	Max. depth	Aspect ratio	Mask
Drilling	800 $\mu\text{m}$	>1 mm	10	No
Milling	500 $\mu\text{m}$	>1 mm	10	No
Laser	100 $\mu\text{m}$	>1 mm	25	No
Ultrasonic drilling	75 $\mu\text{m}$	>1 mm	10	No
Electrochemical discharge drilling	50 $\mu\text{m}$	>1 mm	15	No
Photosensitive glass	50 $\mu\text{m}$	>1 mm	20	Yes
Powder blasting	<50 $\mu\text{m}$	>1 mm	2.5	Yes
HF etching	1 $\mu\text{m}$	>1 mm	1	Yes
RIE etching	0.5 $\mu\text{m}$	10 $\mu\text{m}$	5	Yes

주안점을 두었다. 유리시편을 준비하는 과정에서 마스크 공정은 기존의 화학적 에칭용 마스크 공정을 응용하였으며 예비실험을 통하여 최적 조건을 선정하여 사용하였다.

## 2. 미립분사가공의 기본 기구

미립분사가공법은 고속의 공기나 가스에 의하여 가속된 수 $\mu\text{m}$ ~수십 $\mu\text{m}$ 의 미립분사재들이 80-200 m/s 의 고속 고밀도로 시편에 충돌되면서 미세가공을 하는 것으로 기계적 에칭(mechanical etching)의 한 가공법이다. Fig. 1은 기본 가공원리를 나타낸 것으로 피삭재가 마스크(mask)로 덮여있는 상태에서 노즐의 전후 혹은 좌우 이동에 의하여 가공이 이루어진다. 이때 피삭재는 마스크의 형태에 따라서 가공이 이루어지므로 복잡한 형상이나 아주 작은 형상도 쉽게 가공할 수 있다.

가공조건 변수로는 분사압력, 분사속도, 분사재의 재질과 크기, 분사재의 밀도, 노즐의 주사속도나 주사횟수 및 노즐과 피삭재 사이의 거리 등이 있으며 가공의 정밀도와 가공능률 향상을 위해서 적절한 조건을 선택하지 않으면 안된다.

또한, 이 가공법은 기본적으로 각각의 미립분사재의 충돌에 의한 미세취성가공이 집적된 형태이기 때문에 칩핑(chipping)이나 크랙(crack) 및 열발생이 적으므로 유리나 세라믹, 실리콘 및 수정 등 경취재료의 정밀 미세가공에 아주 적합한 가공방법이다.

한편, 미립분사가공의 가공기구 모델링을 위한

여 고체 비립자에 의한 충격과 경도시험시의 압입 사이의 유사성에 기초한 여러 해석적 모델이 제시되었으며 기본적으로는 Marshall 등<sup>(15)</sup>에 의하여 제안된 압입이론(indentation theory)을 응용하고 있다. Fig. 2와 같이 날카로운 인덴터 팁(indenter tip)의 압입시 팁 아래 부분에서 압축응력에 의하여 소성변형영역이 형성되는데 하중이 증가할수록 소성영역도 증가하여 결국에는 표면과 수직인 방향으로의 반경/중앙 크랙(radial/median crack)과 표면과 평행방향으로의 측면크랙(lateral crack)이 형성된다.

이때, 측면크랙은 분사가공시 소재의 제거에 영향을 미치는 요소가 된다. 반면에, 반경/중앙 크랙은 소재의 제거에는 거의 영향을 미치지 않으며 표면의 결함발생과 소재의 강도저하와 연관성을 갖는 것으로 알려져 있는데 가공깊이가 깊어질 경우 가공을 촉진하는 역할도 어느 정도 하게 된다. 한편, 미립분사재의 단위 무게당 제거되는 소재무게의 비로서 정의되는 가공률(erosion rate)Q는 가공과 관련되는 측면 크랙의 길이  $l_c$ 와 깊이  $d_c$ 를

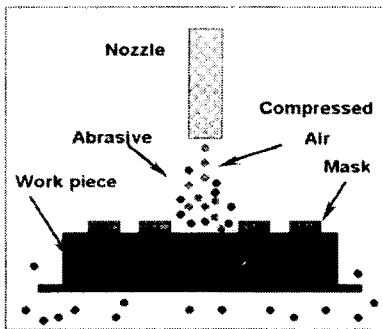


Fig. 1 A schematic impression of powder blasting

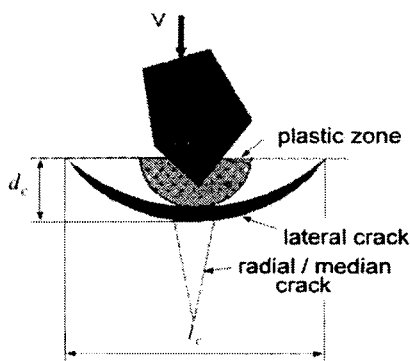


Fig. 2 The micro cracks in indentation process.

구하면 다음과 같이 표현된다.<sup>(11)</sup>

$$Q \propto \pi l_c^2 d_c \propto \frac{\rho_p E^{5/4}}{H^{17/12} K_c} \rho_p^{1/6} l_p^{1/2} V_p^{7/3}$$

가공률은 두 개의 파라미터군으로 구성된다는 것을 알 수 있는데 앞부분은 가공하고자 하는 소재에, 뒷부분은 가공공정 변수들에 영향을 받는 요소가 된다.

### 3. 실험방법

#### 3.1 시편제작

미립분사가공시 대부분은 가공물에 마스크를 입히는데 이 과정을 마스크링 공정(masking process)이라고 하고 이는 크게 라미네이팅(laminating), 노광(exposure) 및 현상(developing)의 3 공정으로 구성된다. Fig. 3은 시편준비를 위한 마스크링과 가공까지의 전 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

#### 3.1.1 가공시편의 재질 및 형상

미세홀을 형성시키기 위한 시편의 재질은 유리의 일종인 soda-lime 유리로 가공성이 비교적 우수

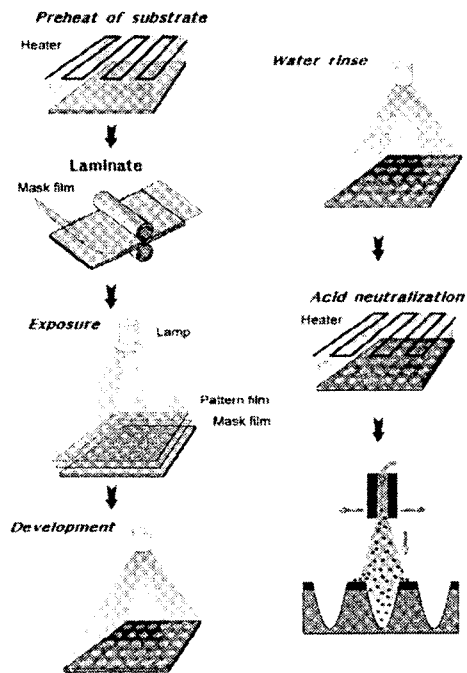


Fig. 3 Patterning process by powder blasting

한 재질이다.

또한, 가공 목표 형상은 선의 가공 폭은 각각  $50\mu\text{m}$ ,  $80\mu\text{m}$  및  $100\mu\text{m}$ 로, 선의 길이는  $1.6\text{mm}$ , 각 선의 피치 간격은  $0.4\text{mm}$ 로 하였다.

### 3.1.2 패턴 필름의 제작

실제 가공하고자 하는 형상대로 CAD 를 이용한 도면작업을 수행하고 이를 이용하여 후 공정에서 사용될 노광을 위한 패턴 필름을 제작하였다.

### 3.1.3 시편의 마스크

시편인 유리에 마스크 필름을 입히는 라미네이팅 공정은 상하 롤러 사이에 유리와 필름을 일정 속도로 공급하면서 적정 압력과 온도조건을 유지하면 최종적으로 유리에 마스크 필름이 균일하게 밀착이 된다. 이때 사용된 필름의 재질은 ORDYL 사의 드라이 필름의 일종인 BF400 계열이다.

라미네이팅이 완료된 상태에서 이미 제작된 패턴 필름을 이용하여 노광기에서 시편에 평행 UV 를 쬐이면 마스크 필름이 가공하고자 하는 부위만 부분적으로 감광이 되어 화학적, 기계적 성질이 변하게 된다.

노광이 끝난 후 적정온도에서 일정한 시간동안 약 알칼리 현상액에서 현상을 하면 최종적으로 가공하고자 하는 패턴이 마스크 필름상에 나타나게 된다.

이상의 마스크 공정은 국내의 마스크 전문회사의 도움을 받아 수행되었으며 마스크 공정에서 사용된 라미네이터는 한국의 Young Hwa 에서 제작한 YH-6300TCL 이며 노광기는 동 사의 YH-70908K 이다.

한편, Fig. 4는 패턴 설계 시  $80\mu\text{m}$  선폭을 갖는 시편에 대한 마스크 작업 후의 최종 형상을 보인 것으로 현상이 끝난 후 3종류 시편의 선 폭을 측정된 결과 각각  $60\mu\text{m}$ ,  $90\mu\text{m}$  및  $110\mu\text{m}$ 로 나타났는데 이는 노광 및 현상과정에서 목표치 폭보다 약  $10\mu\text{m}$  씩 증가한 것이다. 이러한 오차는 lithography 공정을 이용하는 제작법에서 공통적으로 나타나는 오차로 CAD 도면으로부터 패턴필름을 제작할 때 도면의 해상도 오차, 노광시 평형 UV를 사용하더라도 나타나는 빛의 산란에 기인하는 오차 및 빛의 산란에 의한 마스크 패턴 경계부에서의 과도 현상에 의한 오차 등에 기인한다고 판단된다.

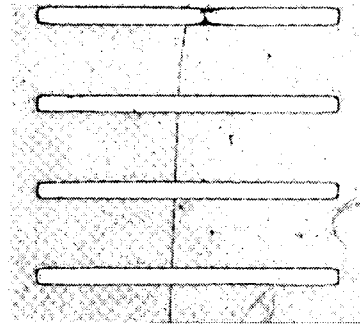


Fig. 4 Photograph of masking pattern (line width  $80\mu\text{m}$ )



Fig. 5 SEM photograph of abrasive WA800(X2000)

### 3.2 분사입자

본 실험에서 사용된 분사재는 고품위 미분 연마 재료로서 반도체나 정밀기계 부품, 세라믹, 자성재료 및 광학유리 등의 초정밀 가공이나 연삭, 연마, 랩핑 및 폴리싱에 사용되는 WA계통의  $\text{Al}_2\text{O}_3$  입자로 크기는 #800이다. Fig. 5는 실험에 사용된 분사입자의 SEM 사진을 나타낸 것으로 크기는 약  $18\sim 22\mu\text{m}$ 로 관찰되었다.

### 3.3 실험 조건 및 방법

모든 실험은 일본의 Sintobator 에서 제작된 MICROBLASTER (type MBI)을 사용하여 수행되었으며 분사노즐은 알루미늄 재질로 내경이  $8\text{mm}$  인 원통형상이다.

본 실험에서 사용된 분사가공 공정변수들은 Table 2 와 같이 설정하였으며 노즐 주사횟수를 5, 10, 15 및 20 회로 변화시키면서 각 선의 선폭 변화와 가공깊이를 정밀 측정하였다. 기타의 공정변수들은 일정한 상태로 유지하였다.

한편, 마스크 상태와 홈 가공 후의 전체적인 형

상분석을 위하여 공구현미경(Leica)을 사용하였다. 공구현미경에 CCD 카메라를 부착하여 관찰된 형상은 Data translation 사의 DT3153 화상처리보드를 통하여 PC 에 입력되며 이를 이용하여 형상 및 크기들을 분석하였다. 또한, 형상의 정밀측정을 위하여 광학식 3 차원 형상측정기(WYKO NT-2000)를, 형상분석을 위한 프로그램은 WYKO Vision 32 를 사용하였다. SEM 사진은 JEOL JSM- 5200 scanning micro scope 를 이용하여 촬영하였다.

Fig. 6은 미립분사가공을 위한 장치 및 시편장착 모습을 나타낸 사진으로 가공은 고속 고압의 분사재로 인하여 두껍이 닫힌 상태에서 수행된다.

#### 4. 실험 및 결과분석

##### 4.1 가공형상분석

시편에 가공된 선형 홈의 형상을 35배로 확대하여 촬영한 SEM 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림은 원래 50 $\mu$ m을 목표로 했으나 마스크킹 작업 후 최종적으로 폭이 60 $\mu$ m로 나타난 시편에 대하여 노즐을 15 회 주사했을 때의 가공 후 형상으로, 기타 시편에 대한 결과도 유사한 형태로 나타났다.

Table 2 Parameters for powder blasting

Nozzle diameter	8mm
Nozzle X speed	50mm/s
Nozzle Y speed	100mm/s
X pitch	5mm/s
Nozzle height	100mm/s
Number of scanning	5, 10, 15, 20

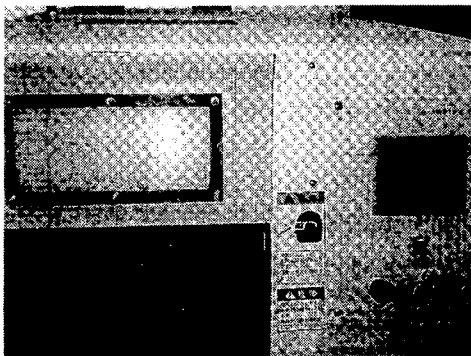


Fig. 6 A photograph of experimental setups

한편, Fig. 7의 가공 형상에 대하여 WYKO NT-2000 과 WYKO Vision32 를 이용한 3 차원 정밀형상 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8 (a)는 3 차원 형상을, (b)는 선형 홈의 단면 형상을 나타낸 것으로 이들 그림에서 전체적 단면형상은 거의 U자형을 이루고 있음을 알 수 있다.

가공 후의 크기를 살펴보면 원래 마스크킹 후 60 $\mu$ m었던 선의 폭이 가공 후 약 100 $\mu$ m 전후로 나타났는데 이러한 폭의 증가는 마스크킹 필름의 마멸에 기인하여 나타나는 것으로 판단된다. 최대 가공깊이는 약 90 $\mu$ m 전후로 나타났다.

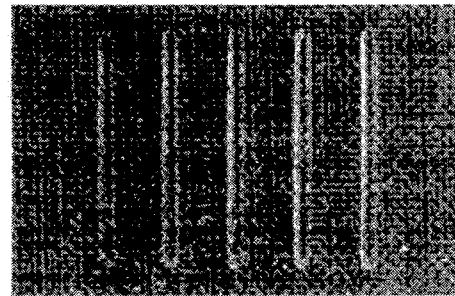
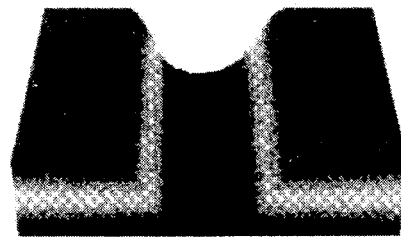
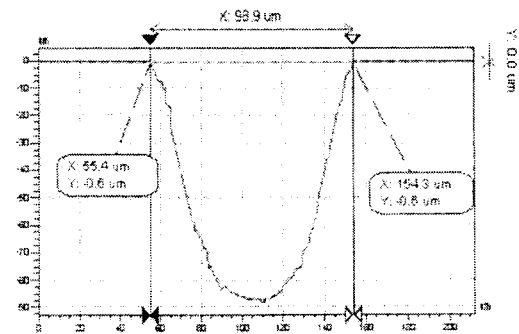


Fig. 7 SEM Photograph of line groove (X35)



(a) 3 dimensional view



(b) Cross-section of groove

Fig. 8 Micro groove shape and cross-section

이러한 실험결과로부터 문제가 될 수 있는 것은 원래 가공목표 폭이 50 $\mu\text{m}$ 임을 고려할 때 마스크링 공정에서 약 10 $\mu\text{m}$ , 분사가공시에 약 40 $\mu\text{m}$  정도의 가공오차가 나타난다는 점이다. 따라서, 목표 형상 치에 대하여 마스크링 공정에서 이를 고려한 마스크링 작업과 분사가공 공정에서의 적절한 가공조건 선정이 아주 중요하다는 것을 의미한다. 이러한 가공정변수 선정은 보다 다양한 실험을 통한 데이터베이스 구축의 필요성과 중요성을 의미한다.

4.2 노즐 주사 횟수의 영향

Fig. 9는 노즐의 주사횟수가 가공된 선형 홈의 폭과 깊이에 미치는 영향을 나타낸 것으로 각 그림의 아래 그림은 Fig. 8(b)의 단면형상으로부터 유추하여 작성한 것이다. Fig. 9(a)는 원래 노광 후 선의 폭이 60 $\mu\text{m}$ 인 시편에 대한 실험결과로 노즐의 주사횟수가 증가할수록 홈 폭과 깊이가 증가하는 현상을 보여주고 있는데 특히 가공깊이는 주사 횟수에 거의 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 홈의 폭은 노즐 주사횟수가 증가함에 따라 2 차 함수적으로 증가하고 있다. 이러한 경향은 모든 시편에 대해서도 거의 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있었는데 이와 같은 폭의 급격한 증가 요인은 마스크가 계속적으로 분사제로부터 충격력

을 받는데 따른 마스크 필름의 소성변형에 의한 가공경화, 마스크 필름의 계속적 마멸에 의한 두께의 급격한 감소 및 유리와 마스크 필름과의 접착력 저하 등에 기인된다고 판단된다.

20회 주사 후의 최종 형상을 살펴보면 가공깊이는 패턴 선 폭이 증가함에 따라 약 123 $\mu\text{m}$ , 160 $\mu\text{m}$ , 185 $\mu\text{m}$ 으로 나타났고 가공 폭의 증가량은 패턴 선 폭의 크기에 관계없이 거의 70 $\mu\text{m}$ 씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 선폭이 증가할수록 동일 주사횟수에 대해서도 가공깊이 증가량이 어느 정도 커지고 있음을 알 수 있는데 이는 가공하고자 하는 홈의 폭이 작을수록 Wensink<sup>(1)</sup>가 언급한 홈의 측벽에 대한 입자의 충돌각도가 작아짐에 따라 나타나는 "blast lag" 효과에 의한 것으로 판단된다.

가공 폭의 증가율은 Fig. 9 에서 가공 폭의 그래프에 대한 기울기로부터 추정할 수 있는데 마스크링 상태의 홈 폭이 작아질수록 가공폭의 초기 증가율은 크게 나타나고 있다. 반면에 최종적인 폭의 증가량은 일정하게 나타나 폭의 증가는 전적으로 주사횟수 증가에 따라 나타나는 마스크 필름의 마멸에 기인한다는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 lithography 를 이용한 마스크링 공정에서 선 혹은 원의 패턴 폭이 작으면 작을수록 정확한 마스크링을

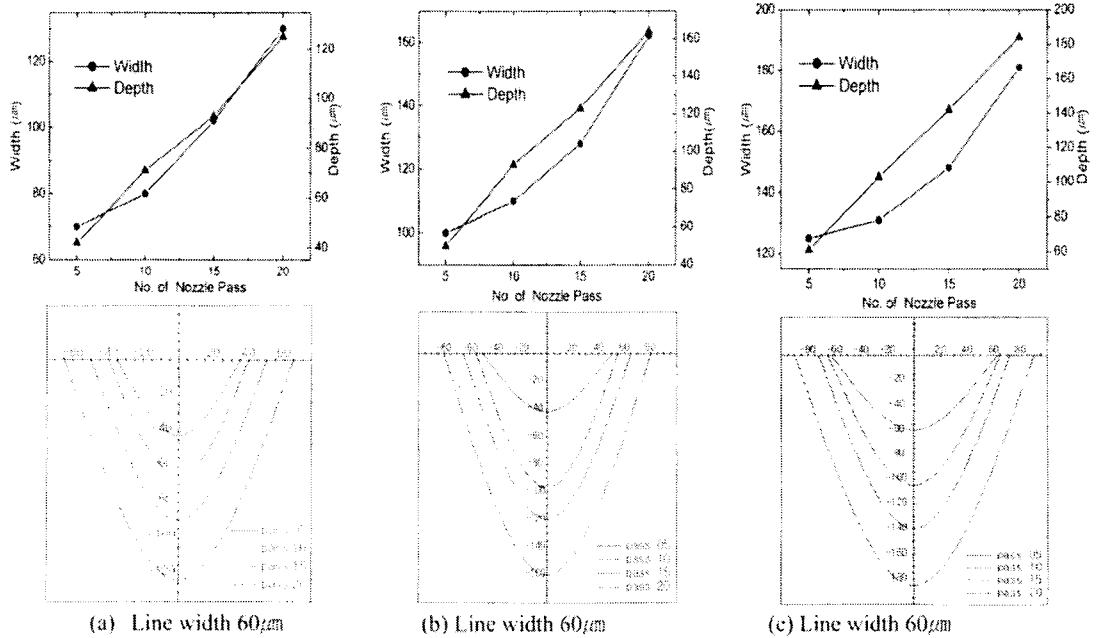


Fig. 9 Effect of no. of nozzle scanning on groove shape

하기 어렵다. 정밀한 노광을 위하여 본 연구에서는 평행 UV 를 사용하였으나 미소 패턴일수록 빛의 산란 등에 의한 피할 수 없는 오차 요인으로 인하여 마스크킹 작업시 필요로 하는 선 폭의 외부까지 노광이 미소하나마 이루어져 이 부분까지 현상이 이루어지게 되는데 실제 분사가공시 필름의 초기 마모가 필름 경계부에서 급격히 촉진된대 따라 초기 선 폭의 급격한 증가가 발생하는 것으로 판단된다.

이상의 결과로부터, 미세가공시 가공깊이를 깊게 하기 위해서는 노즐 주사횟수를 증가시키면 되나 나타나는 문제점으로는 홈의 폭도 크게 증가한다는 것이다. 이러한 폭의 증가는 기본적으로 미립분사에 의한 마스크킹 필름의 마멸에 기인하는 것으로 일정 폭을 유지하면서 깊은 홈이나 구멍가공을 위해서는 입자분사에 대한 마멸 저항력이 큰 마스크킹 필름을 사용해야 된다는 것을 의미한다.

또한, 이상의 실험결과 나타난 폭의 증가를 고려하여 패턴 설계 때부터 패턴의 형상을 작게 만든다면 목표치 폭을 갖는 형상을 정확히 가공할 수 있을 것이다. 즉, 예를 들어 폭이 120 $\mu\text{m}$ 인 선을 가공하고자 할 때는 Fig. 9(a)에서 보듯이 초기 패턴 설계를 60 $\mu\text{m}$ 로(현상 후 폭 증가를 고려하면 50 $\mu\text{m}$ ) 하고 18회 정도 노즐을 주사하면 폭이 120 $\mu\text{m}$ 인 선을 가공할 수 있게 될 것이다. 만약 처음부터 패턴 설계를 120 $\mu\text{m}$ 으로 한다면 아주 큰 가공오차가 일어나게 되는데 이러한 현상을 피하기 위해서는 많은 실험결과와 축적이 필요하다.

## 5. 결론

미립분사가공을 이용한 유리의 미세 선형 홈의 가공시 노즐의 주사횟수가 가공형상에 미치는 영향을 실험적으로 규명한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 미립분사가공을 시편의 마스크킹 공정시 시편의 설계패턴 폭에 대한 현상 후의 최종 패턴 폭은 설계패턴 폭의 크기와 상관없이 약 10 $\mu\text{m}$ 의 형상오차가 발생하였다.

(2) 가공된 선형 홈의 형상은 전체적으로 U자형으로 나타났으며 원래 목표로 했던 가공 폭보다 커지는 경향을 보였다. 20회 주사 후의 최종 형상

을 살펴보면 가공깊이는 패턴 선 폭이 증가함에 따라 약 123 $\mu\text{m}$ , 160 $\mu\text{m}$ , 185 $\mu\text{m}$ 으로 나타났고 가공 폭의 증가량은 패턴 선폭의 크기에 관계없이 거의 70 $\mu\text{m}$ 씩 증가하였다.

(3) 노즐의 주사횟수가 증가할수록 가공깊이는 주사횟수에 거의 비례하여 증가하나 홈의 폭은 주사횟수 증가에 따라 거의 2차 함수적으로 증가하였다.

(4) 마스크킹 상태에서의 선 폭이 커질수록 동일 주사횟수에 대한 홈의 가공깊이가 증가하는 경향을 보였으나 홈 폭의 절대적 증가량은 줄어들었는데 이는 "blast lag" 효과와 미세 패턴에 대한 마스크킹 공정의 어려움에 어느 정도 기인한다.

한편, 미립분사가공을 이용하여 목표치 형상을 정확하게 가공하기 위해서는 공정 변수들이 가공형상에 미치는 영향에 대한 데이터 베이스 구축과 마스크 필름의 마멸기구에 대한 규명이 전제되어야 하는데 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2001년도 인천대학교 학술연구 조성비 지원에 의하여 수행되었음

## 참고문헌

- (1) Slikerveer, P.J., Bouten P.C.P., Veld F.H. and Scholten H., 1998, "Erosion and Damage by Sharp Particles," *Wear*, 217, pp. 237~250.
- (2) Verma, A.P. and Lal, G.K., 1996, "A Theoretical Study of Erosion Phenomenon in Abrasive Jet Machining," *Transactions of the ASME*, Vol. 118, pp. 564~570.
- (3) Sheldon, G.L., 1970, "Similarities and Differences in the Erosion Behavior of Materials," *Trans. of the ASME, Journal of Basic Engineering*, pp. 619~626.
- (4) Tsunemoto KURIYAGAWA, Norio YOSHIDA and Katsuo SYOJI, 1998, "Machining Characteristics of Abrasive Jet Machining", *Journal of JSPE*, Vol. 54, No. 6, pp. 881~885.
- (5) Koichi TITAJIMA, Masataka NONAKA and Moriyasu IZAWA, 2000, "Basic Study on the Dry

- Abrasive Machining (The 2<sup>nd</sup> Report)," *Proceedings of the JSPE Spring Annual Meeting*, p. 238.
- (6) Slikkerveer, P.J., Bouten, P.C.P. and de Haas, F.C.M., 2000, "High Quality Mechanical Etching of Brittle Materials by Powder Blasting," *Sensors and Actuators* 85, pp. 296~303.
- (7) Henk, Wensink, Berenshot, U.W., Henri, V. Jan seu, Miko C. Elwenspoek, 2000, "High Resolution Powder Blast Micromachining," *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Sustenus (MEMS) 2000*, pp. 769~774.
- (8) Lighthart, H.J., Slikkerveer, P.J., Verd, F.H. In't and Swinkels, P.H.W., Zonneveld M.H., 1996, "Glass and Glass Machining in Zeus Panels," *Philips J. Res.*, Vol. 50, No. 3/4, pp. 475~499.
- (9) Arvi, Kruusing, Seppo, Leppavuori, Abtti, Uusimaki, Matti, Uusimaki., 1999, "Rapid Pototyping of Silicon Structures by Aid of Laser and Abrasive-Jet Machining," *Part of the Symposium on Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS*, Paris, France, SPIE, Vol. 3680, pp. 870~878.
- (10) Moriyasu IZAWA, 2000, "The Trend and Application of the Abrasive Jet Machining," *Journal of the Society of Grinding Engineers*, Vol. 44, No. 1, pp. 11~14.
- (11) Solignac, D., Sayah, A., Constantin, S., Freitag ,R., Gijs, M.A.M., 2001, "Powder Blasting for the Realisation of Microchips for Bio-Analytic Applications," *Sensor and Actuators A 3003*, pp. 1~6.
- (12) Henk, Wensink, Henri, V Jansen, J W, B.erenshot, Miko C Elwenspo, 2000, "Mask Materials for Powder Blasting," *J. Micromech. Microeng.*, 10, pp. 175~180.
- (13) Choi, J.S., Park, K.H. and Park, D.S., 2000, "Micro Groove Cutting of Glass Using Abrasive Jet Machining," *Proceedings of the KSPE Fall Annual Meeting*, pp. 963~966.
- (14) Park, K.H., Kim, K.H., Choi, J.S. and Park, D.S., 2001, "Effect of the Number of Nozzle Scanning in Micro-Line Grooving of Glass by Powder Blasting," *Proceedings of the KSMTE Spring Annual Meeting*, pp. 294~299.
- (15) Marshall, D.B., Lawn, B.R., Evans, A.G., 1982, "Elastic/plastic Indentation Damage in Ceramics:the Lateral Crack System," *J. Am. Ceram. Soc.* 65 (11), pp. 561~566.