

## 가속도 센서용 파이렉스 유리의 미세가공

### Micromachining of Pyrex Glass for Accelerometer

김광현, 최영현, 최중순, 박동삼(인천대학교 기계공학과),  
유우식(인천대학교 산업공학과)

#### Abstract

The mechanical etching technique has recently been developed to a powder blasting technique for various materials, capable of producing micro structures larger than 100 $\mu$ m. This paper describes the performance of powder blasting technique in micromachining of pyrex for the accelerometer sensor and the effect of the number of nozzle scanning and the stand-off distance on the erosion depth.

**Key Words** : Powder Blasting(미립분사가공), Micromachining(미세가공), Accelerometer(가속도계), Pyrex(파이렉스 유리)

#### 1. 서론

최근 반도체나 센서 및 평판 디스플레이 등의 연구개발이 활발해짐에 따라 수십 혹은 수백 마이크로미터 단위의 구조물 성형을 위한 고정 밀도의 기계적 에칭기법이 연구되고 있는데 이중 파우더 블라스팅이 아주 효율적 방법으로 인식되기 시작했으며 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 이 방법은 반도체나 미세센서 및 평판 디스플레이 등의 분야에서 아주 유용한 공법으로 유리의 정밀 미세가공에 아주 효율적으로 사용될 수 있음이 밝혀지고 있다.

유리의 미세형상 가공에 관한 연구를 보면 미세 유체 칩(micro-fluidic chip)이나 미세 패터닝(micropatterning) 및 각종 미세센서 등의 가공

에 파우더 블라스팅을 응용 하였으며 PDP 나 LCD 등과 같은 분야의 미세가공에도 활발한 응용 연구가 진행되고 있다.

지금까지의 연구는 크게 파우더 블라스팅 시의 가공기구, 가공특성, 활용사례 및 마스크 재료특성에 관한 연구와 가공능력이나 분사조건의 영향 등 분사가공 특성에 관한 연구로 분류할 수 있다. 파우더 블라스팅을 이용한 적용사례 연구로서 유리를 이용하여 평판 디스플레이의 일종인 ZEUS 판넬을 성형하고자 하는 Lighthart 등<sup>[1]</sup>의 연구, 유체기기용 미세 유체채널(fluid channel)의 급속 성형을 위한 Kruusing 등<sup>[2]</sup>의 연구, 반도체나 전자제품 및 LCD 등에 대한 미세가공 적용 사례들을 소개한 伊澤<sup>[3]</sup>의 연구, 유리소재의 마이크로 칩 성형을 위한 Solignac 등<sup>[4]</sup>의 연구가 있다. 마스크 재료특성과 관련하여 포토레지스트 포일(foil)이나 구리 도금 등의 마스크 재료의 마멸특성에 대한 Wensink 등<sup>[5]</sup>의 연구가 있다. 이러한 연구들을 종합적으로 살펴보면 파우더 블라스팅이 최근 2~3 년 사이에 주목을 받고 있는 기술이기 때문에 연구내용 또한 거의 기초적 내용들을 다루고 있다.

본 연구에서는 취성이 강한 재료인 유리를 가공소재로 하고, 파우더 블라스팅을 적용하여 캔티 레버빔과 질량체를 가진 관성형 가속도센서를 개발하기 위한 기초 가공 실험을 수행하고자 하였다.

## 2. 파우더 블라스팅의 원리

파우더 블라스팅법은 고속의 공기나 가스를 사용하여 수 $\mu\text{m}$ ~수십 $\mu\text{m}$ 의 미립분사재들을 80-200 m/s 의 고속 고밀도로 시편에 충돌시켜 발생하는 미세크랙을 고속 고밀도로 시편에 충돌시켜 발생하는 미세크랙을 이용하여 가공을 하는 것으로 기계적 에칭(mechanical etching)의 한 가공법이다. Fig. 1 은 파우더 블라스팅의 기본 가공원리를 나타낸 것으로 피삭재가 마스크(mask)로 덮여있는 상태에서 노즐의 전후 혹은 좌우 이송에 의하여 가공이 이루어진다. 이때 피삭재는 마스크의 형태에 따라서 가공이 이루어지므로 복잡한 형상이나 아주 작은 형상도 쉽게 가공이 가능하다.

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 선택한다.

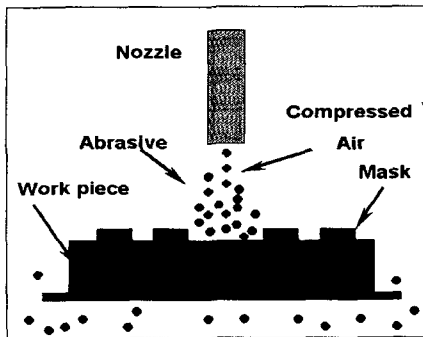


Fig.1 A schematic impression of powder blasting

## 3. 실험 장치 및 방법

### 3.1 시편

파우더 블라스팅을 이용하여 가속도용 미세센서의 구조를 제작하기 위하여 Pyrex 유리를 사용

하여 가공성을 평가하였다.

Pyrex 유리의 조성과 기계적 물성치는 Table 1에 간단하게 나타내었다.

Table 1 Properties of Pyrex

Composition (%)	
SiO <sub>2</sub>	81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	4
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13
Mechanical property	
Density	2.23[kg/m <sup>3</sup> ]
Young's modulus	9.5×10 <sup>6</sup> psi
Poisson's rate	0.27
Thermal expansion coefficient	32×10 <sup>-7</sup> [°C]

Pyrex의 특징은 alkali silicate 유리에 알카리 대신 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 약간 치환 첨가되면, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 망목형성체로 작용하기 때문에 유리의 망목구조는 강하게 되면서 전반적인 성질이 향상된다. 특히 화학적인 내구성을 저하시키는 알카리 이온들의 이동도가 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 도입으로 감소하여 유리의 화학적인 침식 저항이 상승한다. 또한 유리의 구조강화에 기인하여 열팽창계수가 감소하기 때문에 열충격에도 강하게 된다. 그러나 Na<sub>2</sub>O-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>계의 유리가 지니는 강한 상분리 경향 때문에 이를 억제하고자 소량의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 망목형성체로 첨가되며 이로써 유리의 열적·화학적·기계적 성질은 더욱 증진된다. 또한 실리콘과 열팽창 계수가 비슷하고 일정량의 나트륨과 칼륨등이 포함되어 있기 때문에 실리콘과 유리계면의 대전현상을 이용하여 접합을 용이하게 할 수 있다.

사용된 pyrex 유리의 두께는 500um이며 준비된 유리에 원하는 형상을 제작하기 위하여 마스크를 제작하였다. 마스크는 Polymer 재질의 필름 마스크와 구리나 알루미늄 스테인레스 등 연성재료를 이용한 금속 마스크가 있다. 필름 마스크는 정

밀하고 미세한 패턴을 제작할 수 있는 반면 가공 횟수가 증가할수록 필름의 마모가 심하여 치수오차에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 반해 금속마스크는 미세한 부품의 제작에는 불리하지만 타격에너지에 대한 저항력이 크기 때문에 많은 가공횟수에 대해 사용 가능하다. 이번 실험의 가공 특성상 타격에너지에 대해 저항력이 큰 금속마스크를 사용하였다.

센서의 제작에 사용된 도면과 마스크 패턴의 사진은 Fig. 2에 나타내었다. 질량체의 두께는 500um~550um이고, 보의 두께는 100um이다.

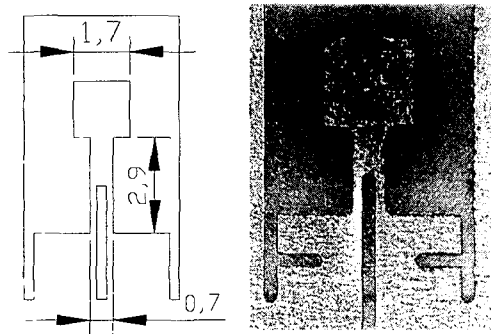


Fig. 2 Shape of metal mask

### 3.2 마스크 공정 및 가공 공정

우선 준비된 pyrex 유리의 윗면과 아랫면에 마스크를 고정하기 위하여 접착제를 사용하여 도포하였다. 사용된 접착제는 미국 M&I materials사의 Apiezon<sup>®</sup> wax seal이며 도포된 유리기판 윗면과 아랫면에 각각 제작된 마스크를 고정시켰다. 1차가공에 의해 윗면의 질량체 부분과 미세라인등 전체적인 형상이 가공되고, 2차가공에 의하여 100um 두께의 캔틸레버 보를 가공한다. 가공 후 접착제로 사용되었던 wax seal은 클로로포름으로 제거하였다. 이러한 공정을 Fig. 3에 간략하게 정리하여 나타내었다.

### 3.3 실험 장치 및 조건

노즐의 분사각도는 재료가 취성재료라는 점을

고려하여 90°로 고정하였고, 노즐과 가공물간의 거리(stand-off distance)는 6cm와 10cm로 변화시켜 가공data를 수집하였다. 모든 실험은 일본의 Sintobator에서 제작된 MICROBLASTER (type MB1)을 사용하여 수행되었다. 노즐은 알루미늄 재질로 내경이 8mm인 원통형상이며 사용된 미립 분사재는 알루미늄의 일종인 WA#600이다. 분사재의 공급은 140g/min으로, 분사압력은 0.2MPa과 0.3MPa변화시켰다. 실험조건을 Table 2에 요약하여 나타내었다.

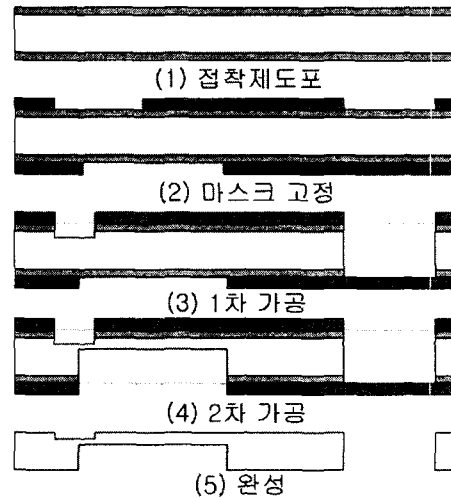


Fig. 3 Schematic process of the cantilever beam fabrication

Table 2 Experimental conditions

Powder material	WA #600
Impact angle (°)	90
Nozzle diameter (mm)	8
Scanning speed(mm/s)	50
Scanning path interval(mm)	5
Massflow rate of powder (g/min)	140
Blasting pressure(MPa)	0.2, 0.3
Stand-off distance(mm)	60, 100
Scanning times	5, 10, 15, 20, 25, 30

가공물을 균일하게 가공하기 위하여 Fig. 4와 같이 일정 피치로 이동하는 scanning방법을 사용하였다

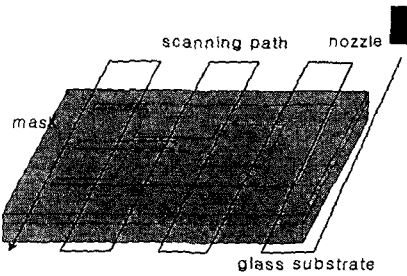


Fig. 4 Nozzle scanning path.

### 3.4 측정

각 조건에 대하여 부식율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 부식전의 원래 시편의 두께에 대해 부식후 가공된 면의 두께를 마이크로 미터를 이용하여 측정함으로써 부식량을 측정하였다. 또한 가공 후의 형상은 일본 HIROX사의 정밀 현미경 KH-1000 HI-SCOPE를 사용하였다. 미세한 홈부분의 깊이와 폭, 3차원 형상을 측정하기 위하여 미국 VEECO사의 3차원 미세형상 측정기인 NT-1000을 사용하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 부식조건에 대한 가공 깊이

우선 제작하고자 하는 3차원 형상을 가공하기 전 가공조건에 대한 데이터를 얻기 위하여 여러 가지 변수를 가지고 실험을 수행하였다. 분사가공에서 가장 중요한 변수는 입자가 가속되어 공작물에 타격되는 타격에너지의 값을 결정하는 요인인 입자의 속도이다. 따라서 입자의 속도를 결정하는 노즐의 높이와 입자를 가속시키는 분사압력 그리고 분사각도를 변화시키며 실험을 수행하였다.

부식량을 결정하는 요인 중 노즐과 가공물과의 거리에 대한 가공 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에 나타난 것과 같이 노즐의 높이가 낮을수록

가공량은 거의 직선적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 노즐의 높이가 낮아짐에 따라 가공물에 타격되는 입자의 속도가 크기 때문에 타격에너지는 높이가 낮을 때가 높을 때보다 크게 된다. 그러므로 크랙의 크기는 타격 에너지에 비례하기 때문에 노즐의 거리가 가까울수록 크랙의 크기는 증가하고 이로써 가공량도 더 커진다는 것을 알 수 있다.

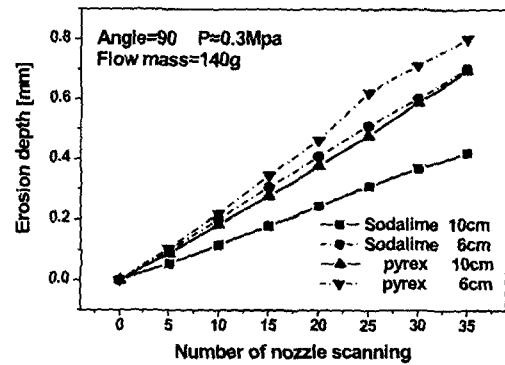


Fig. 5 Erosion depth with nozzle distance

또한, 압력의 변화에 따른 가공율에 대한 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 압력이 높아질수록 입자의 타격속도가 증가하기 때문에 타격 에너지는 증가되고 이에 따라 크랙의 크기가 커짐으로써 가공량도 증가한다는 것을 알 수 있다.

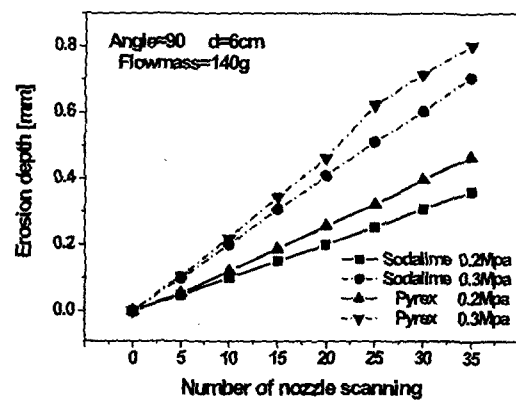


Fig. 6 Erosion depth with blasting pressure

각도에 변화를 주어 가공하였을 경우 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 각도가 증가할수록 점진적으로 증가한다는 것을 알 수 있는데 그 증가 경향을 보면 60° 부터는 뚜렷한 증가세를 보이나 80° 에 이르르면 거의 일정한 상태를 유지하며 수직으로 분사할 때 제거율이 가장 크게 나타나고 있다.

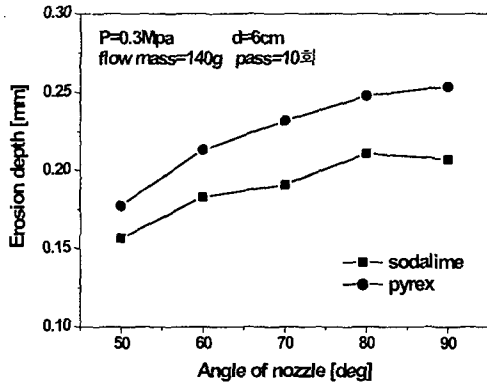


Fig. 7 Erosion depth with nozzle angle

기존의 연구들에서 보면 측면 크랙의 길이는 접촉력(contact force)에 비례하는데<sup>9, 10)</sup> 분사각도가 커질수록 수직방향으로의 접촉력이 커지므로 측면 크랙의 크기가 커짐에 따라 제거율이 증가하게 되는 것으로 판단된다. 또다른 원인은 소성영역의 최대깊이와 비슷한 측면 크랙의 깊이는 대체적으로 공작물의 경도나 분사재의 투사속도, 투사반경이나 밀도에 크게 영향을 받는데<sup>9)</sup> 분사각이 커질수록 투사밀도가 증가하므로 측면 크랙의 깊이가 커지게 된다. 따라서, 측면 크랙의 길이와 깊이가 증가하는 제거율을 높이게 된다. 또한, 노즐의 주사횟수가 증가함에 따라 무게 제거율은 거의 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 부식된 3차원 형상

위의 실험결과를 기반으로 최적의 가공조건을 선정하여 가속도계용의 3차원 형상을 가공하였다. 노즐의 높이를 10cm, 분사압력은 0.3MPa, 분사재

는 약 140g/min으로 고정하였으며 가공 횟수는 최고 30회에서 최소 5회까지 가공하였다.

가공된 유리 시편의 사진을 Fig. 8에 나타내었다.

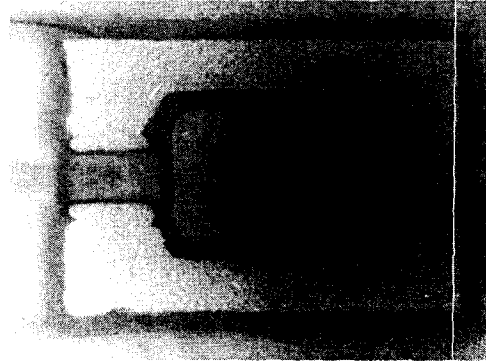


Fig. 8 Photograph of catilever beam and mass

그림에서 보는 바와 같이 가공된 형상과 제작하고자 했던 마스크와의 형상이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 대부분의 형상은 어느정도 균일하나 질량체 부분의 형상은 어느 정도 불균일한 형태로 나타나고 있다. 이것은 마스크와 유리의 접촉시 접착제가 균일하게 도포되지 않고 형상 주변에 조금 엉겨 있기 때문에 가공시 접착제가 약간의 마스크 역할을 하여 가공의 깊이가 조금 차이가 나타났다고 판단된다. 또한, 구조물의 아래쪽으로 내려갈수록 경사가 지는 것을 볼 수 있는데 이것은 본 가공의 특성상 분사되는 각도에 대해 약 15~20°정도 경사가 생기기 때문이다.

미세 채널 부분의 사진은 Fig. 9에 나타내었다.



Fig. 9 Photograph of the microchannel

Fig. 9의 미세한 홈 부분은 전기적인 배선을 위하여 사용하였기 때문에 도금된 부분을 제거하기 위하여 낮은 깊이로 가공하였다. 미세 채널 부분을 좀 더 자세하게 관찰하기 위하여 3차원 형상 측정기를 이용하여 관찰한 모습을 Fig. 10에 나타내었다.

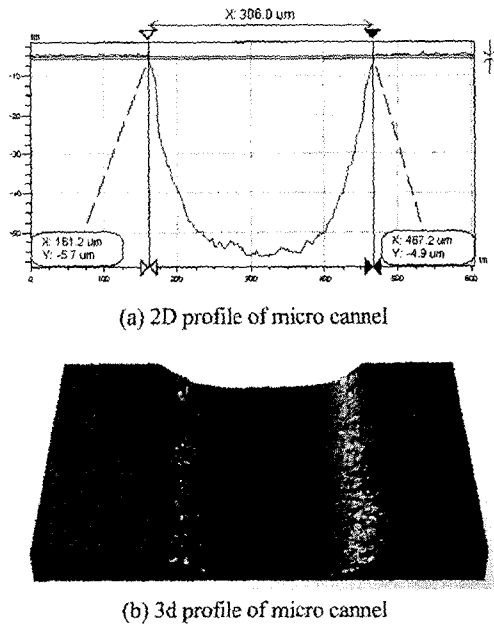


Fig. 10 Configuration profile of micro channel

## 5. 결론

파우더 블라스팅을 이용하여 캔티레버빔과 질량체를 가진 유리소재의 판성형 가속도센서를 개발하기 위한 기초 가공 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

- (1) 유리의 부식량은 입자의 타격에너지를 증가시킬 수 있는 중요한 요소인 타격속도를 증가 시킴으로써 증가 시킬 수 있었다.
- (2) 유리의 부식량은 유리가 취성재료이므로 분사 각도가 90°일 때가 50°일 때 보다 부식량은 더 큰 것을 볼 수 있었다. 이는 분사각도가 수직일 때 가공 집중도가 낮은 각도로 가공할 때 보다 크기 때문에 타격에너지가 더 크기 때문이다.

또한, 각도가 낮으면 유리 표면에서 크랙을 발생시키지 못하고 되튀기는 입자가 많기 때문에 부식량이 감소한다.

- (3) 3차원 미세구조물의 성형 후 가공면이 수직으로 가공되지 않고 15°~20°정도 경사가 나타났다.
- (4) 유리를 소재로 하는 미세형상의 가속도계를 파우더 블라스팅을 이용하여 가공할 수 있음을 알 수 있었다.

## References

- [1] Ligthart 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, p. 475~499.
- [2] 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, p. 870~878.
- [3] 伊澤守康, 2000, "噴射加工の動向と應用," 砥粒加工學術誌, Vol. 44, No.1, p. 11~14.
- [4] Solignac D., Sayah A., Constantin S., Freitag R., Gijis M.A.M., 2001, "Powder Blasting for the Realisation of Microchips for Bio-Analytic Applications," Sensor and Actuators A 3003, p. 1~6.
- [5] Henk Wensink, Henri V Jansen, J W Berenschot, Miko C Elwenspo, 2000, "Mask materials for powder blasting," J. Micromech. Microeng., 10, p. 175~180.
- [6] Henk Wensink, Berenschot U.W., Henri V. Jan seu, Miko C. Elwenspoek, 2000, "High Resolution Powder Blast Micromaching," Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Sustenus (MEMS) 2000, p. 769~774.
- [7] 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), p. 561~566.
- [8] P.J. Slikkerveer, P.C.P. Bouten, F.H. in Veld, H. Scholten, "Erosion and damage by sharp particles", Wear, 217, pp. 237-250, 1998.
- [9] A.G. Evans, M.E. Gulden, M. Rosenblatt, "Impact Damage in Brittle Materials in the Elastic-plastic Response Regime", Proc. R. Soc. London A 361, pp.343-365, 1978.
- [10] A.P.Verma, G.K.Lal, "A Theoretical Study of Erosion Phenomenon in Abrasive Jet Machining", Transactions of the ASME, Vol. 118, pp. 564-570., Nov. 1996.