

미립분사가공을 이용한 유리 소재의 가속도 센서 구조물 성형

박동삼[#], 강대규^{*}, 김정근^{*}

Fabrication of the Acceleration Sensor Body of Glass by Powder Blasting

Dong Sam Park[#], Dae Kyu Kang^{*}, Jeong Keun Kim^{*}

ABSTRACT

Acceleration sensors have widely been used in the various fields of industry. In recent years, micromechanical accelerometers have been developed and commercialized by the micromachining technique or MEMS technique. Typical structure of such sensors consist of a cantilever beam and a vibrating mass fabricated on Si wafers using etching. This study investigates the feasibility of powder blasting technique for microfabrication of sensor structures made of the pyrex glass alternating the existing Si based acceleration sensor. First, as preliminary experiment, effect of blasting pressure, mass flow rate of abrasive and no. of nozzle scanning on erosion depth of pyrex and soda lime glass is studied. Then the optimal blasting conditions are chosen for pyrex sensor. Structure dimensions of designed glass sensor are 2.9mm and 0.7mm for the cantilever beam length and width and 1.7mm for the side of square mass. Mask material is from aluminium sheet of 0.5mm in thickness. Machining results showed that tolerance errors of basic dimensions of glass sensor ranged from 3um in minimum to 20um in maximum. This results imply the powder blasting can be applied for micromachining of glass acceleration sensors alternating the exiting Si based sensors.

Key Words : Powder blasting(미립분사가공), Acceleration sensor(가속도 센서), Cantilever beam(외팔보), Pyrex glass(파이렉스 유리), Mask(마스크), Micromachining(미세가공)

1. 서론

최근 첨단기술로 주목받고 있는 실리콘 마이크로머시닝(micromachining) 기술을 기반으로, 고부가가치를 갖는 첨단제품의 극소화나 집적화를 위한 산업용 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. MEMS 기술의 산업화는 자동차나 항공우주 분야에서의 고성능 감

지센서 및 전장시스템 개발에서 시작되어 최근엔 광 및 무선통신 분야에서의 극소형 스위치나 분배기 응용제품 개발로 이어지고 있다.¹

특히, 그와 같은 기술의 주요 응용분야 중의 하나가 자동차 산업을 비롯한 산업의 각 분야에서 다양하게 사용되고 있는 가속도 센서이다. 지난 2000년 세계 시장에서 약 4,100만대의 자동차가 판매되었는데 여기에 가속도센서, 압력센서를 비롯한 각

접수일: 2004년 11월 1일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

교신저자: 인천대학교 기계공학과

E-mail: dspark@incheon.ac.kr Tel. (032) 770-8418

* 인천대학교 대학원 기계공학과

중 MEMS 센서가 사용되고 있으며, 에어백 장착 시스템에 들어가는 MEMS 가속도 센서는 지난해까지 나온 거의 모든 자동차에 채택된 것으로 나타났다.

가속도 센서 중에서도 현재 가장 많이 연구되고 있는 실리콘 가속도 센서는 실리콘의 기계적 성질이 우수하고 기존에 확립된 반도체 집적회로 공정 기술을 이용하므로 신뢰성과 양산성이 우수하며, 소자의 소형화, 경량화가 가능하다는 장점 때문에 최근까지 다양한 형태의 가속도 센서가 개발되어져 왔다.^{2,6} 또한, 보다 더 큰 질량체(mass)와 고세장비를 갖는 구조를 갖는 가속도계를 개발하기 위하여 습식 에칭이나 deep reactive ion etching(DRIE)이 도입되었으며 웨이퍼 본딩 기술과 DRIE를 조합하기도 하였다.^{7,8}

지금까지 발표된 실리콘 가속도 센서는 박막형성이 쉬운 다결정 실리콘을 표면미세가공(surface micromachining)으로 만든 용량형(capacitive type)과 단결정 실리콘위에 압저항 소자를 제작하고 기판미세가공(bulk micromachining)으로 박막 가공하여 만든 압저항형(piezoresistive type)으로 나눌 수 있다.

한편, 기존의 가공기법은 기본적으로 실리콘 웨이퍼를 에칭하여 형상을 제작하나, 최근 초기 투자 비용이나 가공비용 및 소재의 가격 등을 고려하여 일반 유리를 이용하여 가속도 센서를 제작하고자 하는 연구도 시도되고 있는데^{9,11} 감도(sensitivity)는 실리콘 가속도 센서보다 여전히 낮게 나오고 있어 다양한 형태의 가속도 센서 구조물 성형에 대한 본격적인 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 센서의 소재로 일반 유리 외에 실리콘과 기계적 특성이 비슷한 파이렉스 유리를 사용하고, 기존의 화학적 에칭 방법 대신 기계적 에칭법의 일종인 미립분사가공^{12,13}을 이용하여 가속도 센서의 핵심 구조물인 질량체와 질량체를 지지하는 외팔보를 가공하고자 하였다. 이를 위하여 미립분사재의 분사압력, 분당 분사량 및 노즐 주사 회수 등의 분사조건을 변화시키며 일반 유리와 파이렉스 유리에 대한 가공특성을 규명하였으며, 가속도 센서 성형을 위한 유리 소재의 최종 선정 및 최적의 분사가공조건을 구하였다. 또한, 금속 마스크(metal mask)를 사용하여 분사가공 후 성형된 센서 구조물의 형상오차를 분석하였으며 이러한 결과들을 바탕으로 기존의 반도체 가속도 센서보다 저렴하고도 높은 생산성을 지닌 가속도 센서의 개발 가능성을 검토하였다.

2. 압저항형 가속도계의 기본원리

현재 연구 중에 있는 가속도계는 압전형, 정전용량형, 압저항형 가속도계가 있는데 본 연구에서 가공하고자 한 압저항형 가속도 센서의 기본구조를 Fig. 1에 나타내었다.

이 센서는 외팔보에 매달려 있는 진동 질량체의 형태를 가지며 압저항 효과를 내는 재료는 확산층으로서 기계적 구조물인 외팔보에 증착된다.

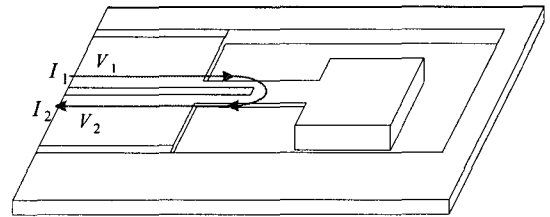


Fig. 1 Schematic view of an accelerometer

이때, 가속도와 보의 힘은 압전저항과 스트레인 게이지 막의 저항값을 측정함으로써 검출된다. 일반적으로 이 두개의 효과는 보의 힘에 의한 길이의 변화가 저항(R)의 변화로 변환되어 신호로써 검출되며, 다음과 같은 관계가 있다.⁹

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}$$

여기서, $\Delta l/l$ 은 주어진 응력에 대한 압저항 재료막의 길이변화율이며 K는 게이지 계수이다. 저항 변화 검출을 위하여 백금(Pt)막과 같은 금속의 얇은 필름을 사용할 때 게이지 계수는 약 2이며 압전저항용 다결정 실리콘막일 경우 K값은 100~200이다.

Fig. 1에서 전류를 I1에서 I2로 가해질 때 전압변화는 V1과 V2사이에서 측정되며 이를 이용하여 가속도를 구할 수 있다.

3. 유리의 미립분사가공시 가공성

일반 판유리로 사용되는 소다 석회 유리와 현재 센서의 패키징에 사용되고 있는 붕규산염 유리 계열의 파이렉스 유리의 기계적 성질을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 이들을 대상으로 알루미늄 계열의 WA #600 미립분사재를 사용하여 가공시 가공성을 비교하였으며 Fig. 2는 분사압력이 유리

의 가공깊이에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 노즐의 주사횟수가 증가할수록 가공깊이는 선형적으로 증가하며, 파이렉스 유리의 경우 35회의 주사횟수에 대해 분사압력이 0.3MPa일 경우 가공깊이는 약 0.8mm로 0.2MPa일 때의 약 0.4mm에 비하여 거의 2배 정도 가공성이 좋은 것을 볼 수 있다. 이는 분사압력이 클수록 가공입자를 가속시키는 힘이 커지며 가공입자의 운동에너지는 속도제곱에 비례하여 커지므로 분사압력이 높을수록 가공량이 증가하게 된다고 판단된다.

Table 1 Properties of a pyrex glass

Chemical compositions(%)		Mechanical properties	
SiO ₂	81	Specific gravity	2.23
Al ₂ O ₃	2	V	0.2
Na ₂ O/K ₂ O	4	H [GPa]	6.3
CaO	-	K _{IC} [MPa m ^{1/2}]	0.77
B ₂ O ₃	13	E [kg/m ²]	6.3E10

Table 2 Properties of a soda lime glass

Chemical compositions(%)		Mechanical properties	
SiO ₂	70-74	Specific gravity	2.5
Al ₂ O ₃	1.0-2.0	V	0.25
Na ₂ O/K ₂ O	13-15	H [GPa]	8.7
CaO	7-12	K _{IC} [MPa m ^{1/2}]	0.75
B ₂ O ₃	-	E [kg/m ²]	7.5E10

Fig. 3은 분당 입자 분사량을 90g과 140g으로 변화시키면서 가공깊이를 본 그림으로 분사입자의 양이 증가하게 되면 타격되는 분사입자의 양이 증가하기 때문에 가공성은 더 좋아진다. 즉, 분사입자의 양이 많아진다면 같은 타격 구역 안에 들어가는 입자의 양이 증가하게 되고 이는 결국 크랙의 발생을 촉진시키므로 가공성은 좋아진다고 판단된다.

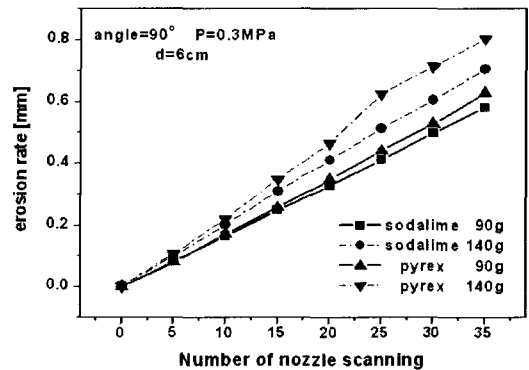


Fig. 3 Effect of mass flow rate of abrasive

Fig. 4는 노즐의 주사회수 증가에 따른 유리의 가공성을 비교한 그림인데 Fig. 2와 Fig. 3의 결과와 더불어 고려하면 파이렉스 유리의 가공깊이는 5회 노즐 주사당 80~100um 정도로 거의 일정하게 증가하고 있다. 이러한 결과는 파이렉스 유리가 소다석회 유리보다 경도와 취성이 더 큰데 기인하며, 취성재료 가공에 적합한 미립분사공법의 특성을 잘 설명하고 있다.

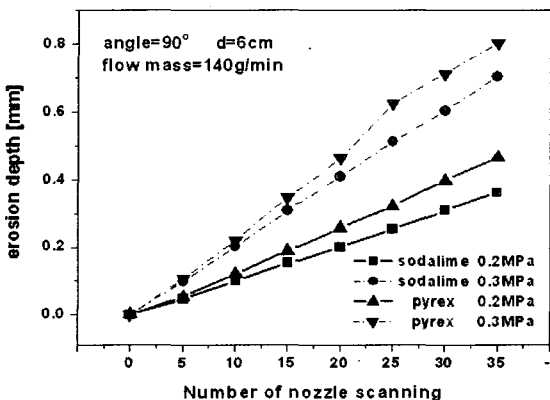


Fig. 2 Effect of blasting pressure on erosion depth

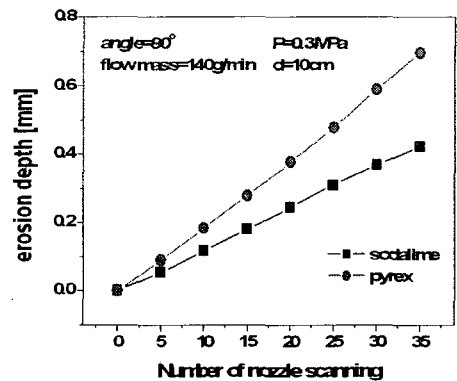


Fig. 4 Erosion depth in pyrex & soda lime glass

이상의 실험결과들은 유리를 이용한 가속도 센서의 제작시 파이렉스 유리가 제작 용이성과 생산성에서 우수함을 나타내고 있어 본 연구에서는 가속도 센서의 재료로 파이렉스 유리를 선정하였다.

4. 가속도 센서의 구조물 설계

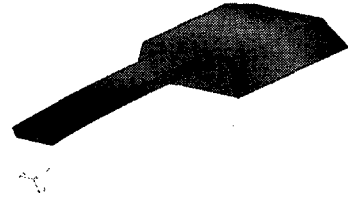


Fig. 5 Modal analysis of cantilever beam

4.1 가속도 센서 구조물의 형상설계

전형적인 가속도 센서 구조물의 치수는 외팔보의 길이가 2~4mm이며 정사각 질량체의 한변의 길이는 1.5~2.5mm이다. 질량체의 두께는 0.550mm내외이며, 외팔보의 두께는 관성력에 대한 변위를 최대화하기 위하여 즉, 센서의 감도를 높이기 위하여 전체 구조의 두께보다 얇게 하여 약 0.1~0.2mm 정도로 한다. 이러한 구조물의 형상을 사용할 경우 1~4KHz의 공진주파수를 갖게 된다.⁹

본 연구에서는 가속도 센서의 질량체의 형상은 1.7×1.7×0.6mm, 외팔보의 형상은 2.9×0.7×0.2mm로 설계하였으며, 전기적 배선을 위한 외팔보 하단부의 미세채널의 길이는 1.5mm, 폭은 0.3mm, 깊이는 0.06mm로 하였다.

4.2 가속도 센서 구조물의 재질

시편은 국내 엘지 이화학 제작소에서 제작한 두께 0.6mm의 파이렉스 유리인 봉규산염 유리이며 성분비와 기계적 물성치를 Table 1에 나타내었다.

4.3 설계 형상에 대한 고유진동수 해석

설계된 외팔보 구조물에 대해 구조해석 프로그램인 EMRC사의 NISAI를 이용하여 고유진동수를 분석하였다. 미립분사가공시 실제 가공단면의 형상은 가공 특성상 정확한 수직면 가공이 불가능하여 20° 내외의 측벽 경사가 발생하므로 이를 고려하여 Fig. 5와 같이 모델링을 수행하였으며 모델해석 결과 제 1 고유진동수는 2681.2Hz로 나타났다.

5. 마스크의 제작 및 마스크킹

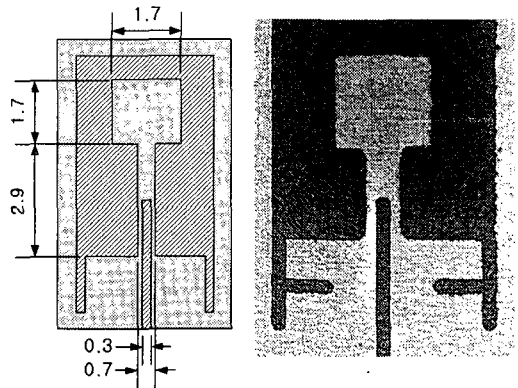
5.1 금속 마스크의 설계 및 제작

마스크의 재질은 반도체 공정을 활용하는 폴리머 마스크와 구리나 알루미늄 및 스텐레스 강 등의 금속박판을 사용하는 금속 마스크가 있는데 본 연구에서는 센서가공 공정을 단순화 시킬 수 있는 금속마스크를 사용하였다.

한편, 가속도 센서의 구조물 설계형상에서 센서의 민감도를 높이기 위하여 외팔보 부위의 단면을 지엽적으로 얇게 가공해야만 하는데 이를 위하여 2개의 마스크가 필요하다. 즉, 외팔보와 진동 질량체의 평면 형상을 보호하기 위한 마스크와, 외팔보의 얇은 단면을 지엽적으로 얇게 2차 가공할 때 단순히 그 단면부만 마스크 소재로부터 제거한 4각 구멍이 뚫린 형태의 마스크가 필요하다.

Fig. 6의 마스크는 외팔보와 이로 지지된 진동 질량체의 패턴이 될 유리기판을 선택적으로 보호하기 위해 사용된 것으로 앞에서 설명한 첫번째 금속 마스크의 설계 형상을 나타낸 것이다. Fig. 6(b)는 (a)의 빗금친 부분만을 NC 와이어 방전가공을 이용하여 제거해 낸 마스크의 실제 사진으로 어둡게 나타난 부분은 마스크 소재가 제거된 부분이다. 중앙 하단부 채널은 센서 소재의 표면에 미리 증착되어 있는 압저항 효과를 내는 재료를 분사가공으로 제거하기 위해 300um폭으로 만들어져 있다.

마스크는 분사가공의 특성을 고려하여 연성재질인 두께 0.5mm의 알루미늄 박판을 사용하였다.



(a) mask design (b) mask by wire-EDM

Fig. 6 Design & shape of the metal mask

5.2 마스크 공정

제작된 마스크를 가공하고자 하는 가속도 센서의 재료에 고정하는 공정을 Fig. 7에 나타내었다.

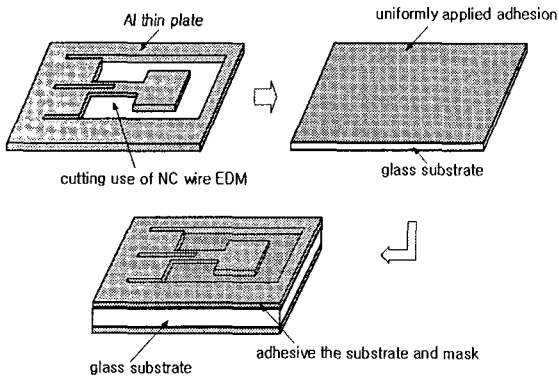


Fig. 7 Masking process

마스크를 고정하기 위하여 접착제인 M&I material사의 왁스 실(wax seal)을 사용하였는데 이 접착제는 왁스 형태로 초기에는 고체 상태이나 약 60° C 로 가열되면 젤리와 같은 상태로 변하므로 이를 시편의 표면위에 균일하게 도포한 후 제작된 마스크를 접착하였다. 마스크와 접촉되지 않는 부분의 접착제는 분사가공 도중 입자에 의하여 쉽게 제거되며 공작물과 마스크 사이에 접착되어 있는 접착제는 클로로포름(chloroform)을 사용하여 화학적 방법으로 제거하였다.

6. 분사가공장치 및 가공조건

6.1 센서 구조물 가공의 전체 공정

센서 구조물의 성형을 위한 전체 공정 흐름을 Fig. 8에 도식적으로 나타내었다. 우선 NC 와이어 방전가공으로 상하 양면의 메탈 마스크를 각각 제작하고 이를 센서 구조물이 될 시편의 상하면에 접착하는 과정인 마스크링 공정을 마친 후 미립분사가공을 수행하게 된다. 분사가공은 2단계로 이루어지는데 그림 (d)는 첫 단계로 전체 구조물을 평면적으로 성형해 내는 과정이며 (e)는 시편을 뒤집어 외팔보의 특정 영역을 더 얇게 가공하는 과정이다. 분사가공을 마치고 나면 세척공정을 통하여 마스크와 공작물의 접착에 사용된 접착제를 제거하는 공정으로 가속도 센서의 구조물 성형이 완성된다.

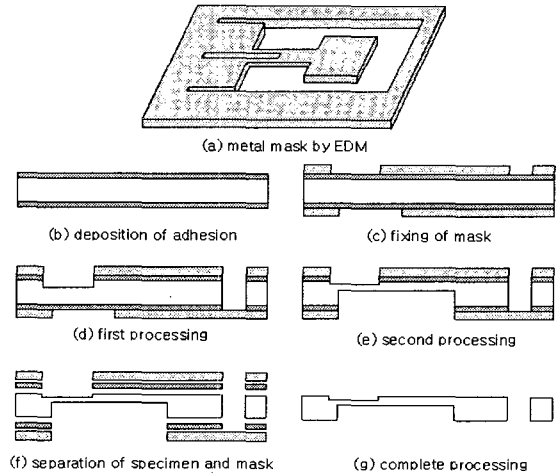


Fig. 8 Process flow for sensor fabrication

6.2 분사가공 장치

실험에서 사용된 미립분사가공기는 일본에서 제작된 Microblaster (Sintoblator, MB-1)이며 노즐의 직경은 8mm로 세라믹으로 제작되었다.

6.3 분사가공 조건

센서의 핵심 구조물인 외팔보와 질량체를 가공하기 전에 최적의 분사가공조건을 선정하기 위하여 여러가지 가공조건을 변화시키며 예비 실험을 수행하였는데 부식율에 가장 큰 영향을 미치는 미립 분사재의 운동에너지를 변화시키기 위하여 분사재의 속도와 분사재의 양을 변화시키며 실험을 수행하였다. 이러한 예비실험들에 의하여 최적의 가공조건을 결정하고 이를 이용하여 가속도 센서의 기계적 구조물인 외팔보와 질량체를 가공하였다. 예비실험을 통하여 선정된 최적 미립분사가공조건은 Table 3과 같은데 노즐의 분사거리는 전반적인 균일 분사를 위하여 10cm로 하였다.

6.4 가공형상 측정 및 방법

가공후의 전체적인 형상분석을 위해 정밀 공구 현미경(Sony, High Scope KH100)을 사용하였으며 가공된 시편의 치수오차와 3차원 형상을 분석하고 가공된 부분의 표면거칠기 값(Ra)을 측정하기 위하여 비접촉 광학식 3차원 형상측정기(Veeco, WYKO NT-1000)를 사용하였다. 가공시편의 형상 측정시 정확성을 높이기 위해 항온항습실에서 측정을 하였으며 측정은 4회 실시하여 평균값을 구하였다.

Table 3 Optimal blasting conditions

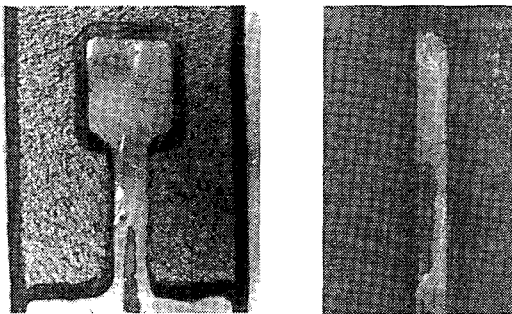
blasting pressure	0.3Mpa
nozzle height	10cm
Incidence angle	90
mass flow rate	140g/min
abrasive	WA #600
nozzle speed (X)	50mm/s
nozzle speed (Y)	100mm/s

7. 실험결과 및 분석

7.1 구조물의 형상 분석

외팔보와 진동 질량체를 가공하기 위하여 2단계로 분사가공을 수행하였다. 1차 가공에서는 시편의 평면 형상에서 질량체와 외팔보가 아닌 부분을 전체적으로 제거하는데 센서 소재의 두께가 0.6mm이므로 이 이상의 가공깊이를 관통 가공하기 위하여 노즐 주사횟수를 30회로 하였다. 외팔보의 얇은 부분을 지엽적으로 가공하는 2차 분사가공에서는 전체 두께 0.6mm 중 0.2mm 만을 남기고 0.4mm를 가공하기 위해 20회를 분사하였다.

가공 후 형상을 관찰한 결과 Fig. 9와 같이 나타났다. 가공된 형상을 보면 원래 제작하고자 했던 마스크의 형상과 거의 일치하고 있다. 그러나, 외팔보나 질량체의 형상은 모서리 부분의 직진도가 떨어지는데 이는 불균일하게 도포된 접착체가 가공시 약간의 마스크 역할을 하였기 때문이라고 판단된다. 또한, 가공 경계면의 단면부를 보면 아래쪽으로 갈수록 폭이 넓어지고 있는데 이는 분사가공이 수직단면을 얻기가 어렵다는 기본 특성에 기인한다.



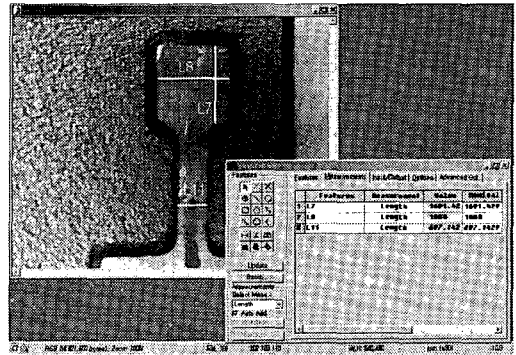
(a) top view

(b) side view

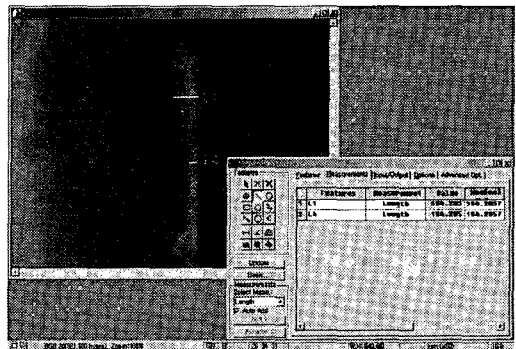
Fig. 9 Fabricated cantilever beam & mass

7.2 구조물의 형상 치수에 대한 분석

Fig. 10은 가공 후 구조물의 전체적인 형상에 대한 가공오차를 분석하기 위하여 특정 5개 위치에서 설계치와 실제 가공 후의 치수를 측정된 결과를 나타낸 것으로 형상오차는 약 9~20um로 설계치인 마스크의 치수와 거의 일치함을 알 수 있는데 이러한 가공결과는 금속 마스크를 사용했기 때문이다.



(a) top view



(b) side view

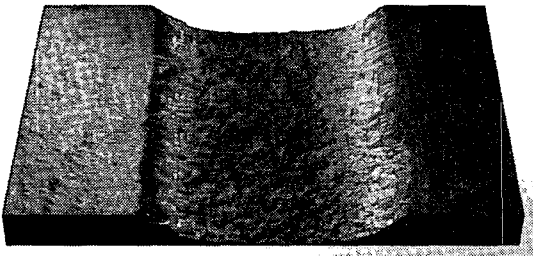
location	design	machined	error
L7	1700	1691	9
L8	1700	1680	20
L11	700	697	3
L1	600	594	6
L4	200	194	6

(c) machining error(um)

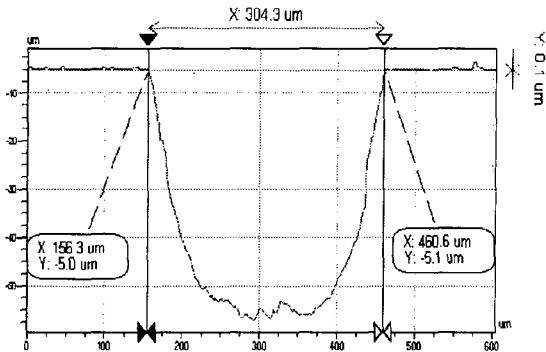
Fig. 10 Error estimation of fabricated sensor

7.3 미세 채널의 형상 치수에 대한 분석

전기적인 배선을 위하여 가공된 중앙 하단부 미세 채널의 형상을 WYKO NT-1000를 이용하여 측정된 채널의 3차원적 형상과 단면형상을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 채널의 폭은 약 4um 정도의 오차가 나타났으며, 채널의 깊이는 3회의 노즐 주사로 약 60um정도까지 가공되었다. 채널의 표면거칠기 Ra는 0.5~0.6um으로 나타났다.



(a) 3 dimensional view of channel



(b) Cross section of channel

Fig. 11 Profile of micro channel

8. 결론

압저항형 가속도계의 구조물에 해당되는 외팔보와 질량체의 미립분사가공을 위하여 일반 유리 및 파이렉스 유리의 가공특성을 규명하고 이를 바탕으로 파이렉스 유리 구조물을 성형하였다. 이를 위하여 가속도 센서의 형상과 동일한 치수를 갖는 알미늄 소재의 금속 마스크를 설계 제작하였으며 파이렉스 유리에의 마스크링이 용이함을 알 수 있었

다. 또한, 분사실험 결과 원래 설계했던 외팔보와 진동 질량체의 치수 형상을 거의 오차 없이 가공할 수 있음을 알았는데 이는 금속 마스크를 사용했기 때문이나 경계부나 채널부의 진직도 개선을 위해서는 마스크링 방법에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

이와 같은 연구 결과를 통하여 기존의 가속도 센서 제작 방법인 실리콘 마이크로머시닝 방법을 대체하여 파이렉스 유리를 소재로 하여 미립분사가공으로 성형할 수 있음을 보였으며 이러한 결과들로부터 생산성이 높으면서도 경제적인 가속도 센서 제작에의 가능성이 충분히 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)의 지역대학우 수과학자 지원사업(과제번호 : R05 - 2002 - 000 - 00421 - 0)에 의한 연구의 일부이며 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, Young Ho, "Silicon Micromachining Technology and Industrial MEMS Applications," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 7, pp.52-58, 2000.
2. Roylance, L. M. and Angell, J. B., "A batch-fabricated silicon accelerometer," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-26, pp.1887-1896, 1979.
3. Schmidt, M. A. and Howe, R. T., "Silicon resonant microsensors," Ceramic Eng. Science Proc., Vol. 8, No. 9-10, pp. 1911-1917, 1987.
4. Rudilf, E., Jornod, A., Bergqvist, J. and Leuthold, H., "Precision accelerometers with μg resolution," Sens. Actuators A, Phys., Vol. 21, No. 1-3, pp. 297-302, 1990.
5. Matsumoto, Y. and Esashi, M., "Integrated silicon capacitive accelerometer with PLL servo technique," Sens. Actuators A, Phys., Vol. 39, No. 1, pp. 209-217, 1993.
6. Kuehnel, W. and Sherman, S., "A surface micromachined silicon accelerometer with on-chip detection circuitry," Sens. Actuators A, Phys., Vol. 45, No. 1, pp. 7-16, 1994.

7. Parameswaran, L., Hsu, C. H. and Schmidt, M. A., "IC process compatibility of sealed cavity sensors," in Proc. Transducers, pp. 625-628. 1997.
8. Driehuizen, van B. P., Maluf, N. I., Opris, I. E. and Kovacs, A. G. T., "Force-balanced accelerometer with mg resolution, fabricated using silicon fusion bonding and deep reactive ion etching," in Proc. Transducers, pp. 1229-1230. 1997.
9. Belloy, E., Sayah, A. and Gijs, M. A. M., "Micromachining of Glass Inertial Sensors," Journal of MICROELECTROCHEMICAL SYSTEMS, Vol. 11, No. 1, pp. 85-90, 2002.
10. Belloy, E., Thurre, S., Walckiers, E., Sayah, A. and Gijs, M. A. M., "The introduction of powder blasting for sensor and microsystem applications," Sensors and Actuators 84, pp. 330-337, 2000.
11. Belloy, E., Sayah, A. and Gijs, M. A. M., "Powder blasting for three-dimensional microstructuring of glass," Sensors and Actuators 86, pp. 231-237, 2000.
12. Park, D. S., Seo, T. I., "Machinability in Oblique Powder Blasting of Glas," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 28-34, 2004.
13. Park, K. H., Oh, Y. T., Park, D. S., "Mechanical Etching of Micro Pocket by Powder Blasting," J. of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 219-226, 2002.