

# SOI웨이퍼를 이용한 마이크로가속도계 센서의 열응력해석( I )

## Analyses Thermal Stresses for Microaccelerometer Sensors using SOI Wafer( I )

김 옥 삼

O. S. Kim

**Key Words** : Thermal Stress Analyses(열응력 해석), Microaccelerometer(마이크로가속도계), Sensor(센서), Silicon On Insulator Wafer (실리콘 절연 웨이퍼), Electrostatic Force(정전기력)

**Abstract** : This paper deals with finite element analyses of residual stresses causing popping up which are induced in micromachining processes of a microaccelerometer sensors. The paddle of the microaccelerometer sensor is designed symmetric with respect to the direction of the beam. After heating the tunnel gap up to 100 degree and get it through the cooling process and the additional beam up to 80 degree and get it through the cooling process. We learn the thermal internal stresses of each shape and compare the results with each other, after heating the tunnel gap up to 400 degree during the Pt deposition process. Finally we find the optimal shape which is able to minimize the internal stresses of microaccelerometer sensor. We want to seek after the real cause of this pop up phenomenon and diminish this by change manufacturing processes of microaccelerometer sensor by electrostatic force.

### 1. 서 론

최근 반도체 제작기술 혁신과 직접회로 제작기술을 기반으로, 미세 물리량 감지를 위한 마이크로 센서(microsensor)와 감지신호의 처리를 위한 전자 회로를 하나의 칩(chip)으로 구현하고 있다. 마이크로 센서를 제작하는 MEMS (microelectromechanical system) 기술<sup>1)</sup>은 기계-전자요소의 동시제작을 통해 기전 복합제품의 소형화, 경량화 및 다기능화 등을 창출할 수 있다는 점에서 차세대를 위한 핵심기술<sup>2)</sup>로 주목받고 있다.

MEMS 분야의 마이크로가속도계 연구는 1991년 미국 Analog Device에서 interdigitated sensing element의 에어백 가속도계를 성공<sup>3)</sup>하였고, UC-Berkeley에 제작한 실리콘 PI-FET 가속도계 가 상용화<sup>4)</sup> 되었다.

그러나 이 분야의 수치해석을 위한 상업용 패키지 코드로서는 유한요소법(finite element method, FEM)과 경계요소법(boundary element method,

BEM) 등이 시도되고 있으나 각종 응력 및 변형량 등의 결과도출은 아직 만족스럽게 이루어지지 못하고 있는 실정<sup>5)</sup>이다.

본 연구는 정전기력을 검침력으로 하는 마이크로가속도계 센서의 제조과정에서 발생하는 내부 잔류 열응력 거동을 유한요소 기법으로 해석함으로써 최적한 제조조건 및 열응력 저감방안을 찾고자 한다. 구체적인 방법은 패들(paddle)의 터널갭(tunnel gap), 부가 비임(additional beam) 및 캔틸레버 비임(cantilever beam)부위의 잔류 열응력 분포를 해석함으로써, 제조과정에서 발생하는 불량현상인 돌출(popping up) 문제를 최소화시키고 민감도를 향상시키는 형상을 모색하려 한다.

### 2. 마이크로머시닝 가공기법

실리콘 절연(silicon on insulator, SOI) 웨이퍼로 제작하는 승용차용 마이크로가속도 센서의 연구개발에는 미소구조체의 설계과정에서 적층막(depositing layer)과 열산화층(thermal oxide layer)의 기계적·전기적 성질변화 및 잔류응력의 거동이 성능의 중요한 요건으로 작용<sup>6)</sup>한다. 또한 제조 과

접수일 : 2001년 2월 10일

김옥삼 : 여수대학교 기계·자동차공학부

정시 내부 잔류응력에 의한 터널갭의 돌출문제가 발생하므로 마이크로머시닝 가공공정을 면밀하게 검토할 필요가 있다.

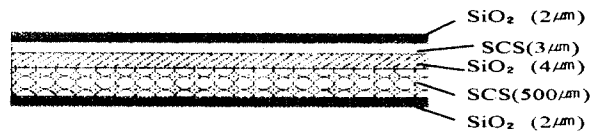
2.1 미소가속도계의 형상

전자가 자신이 가지고 있는 운동에너지보다 높은 장벽을 투과하는 터널 전류효과(tunnel current effect)의 원리를 이용한 마이크로가속도센서<sup>7)</sup>의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 센서의 평판에 있는 36 개의 구멍은 패들 무게의 감소와 민감도를 증가시키는 동시에 전극 기능도 있다. 패들의 재질은 밀리지수 {1,0,0}면의 실리콘 단결정(single crystal silicon, SCS)이고, 기판(substrate)과 패들의 거리는 4 μm이며 마이크로머시닝 가공방법으로 제작하였다.

2.2 마이크로머시닝

센서의 제작방법은 기판 위에 막을 입히는 막형성 과정과 그 표면에 마스크 패턴을 현상 및 마스크 패턴의 복제과정을 경유한다. 복제된 패턴을 바탕으로 부식에 의해서 불필요한 부분을 제거, 열처리나 원자의 도핑(doping) 등으로 개질과정을 반복한다. 가공공정에는 집속 이온비입(focused ion beam, FIB) 절삭가공, 박막성형, 이방성(anisotropic) 및 등방성(isotropic) 에칭기술 등의 MEMS 제작기법이 사용되어 졌다. Fig. 2의 (a)그림과 같이 SCS 웨이퍼 위에 이산화실리콘(SiO<sub>2</sub>) 막을 입힌 후 표면에 마스크 패턴을 현상 및 인화를 통한 기본형상을 스케치 하였다. 다음 공정에서 SOI 웨이퍼 위에 SCS 막을 입힌다. SCS 막과 SiO<sub>2</sub> 막은 Fig. 2의 (b)와 같이 선택적으로 이방성 부식을

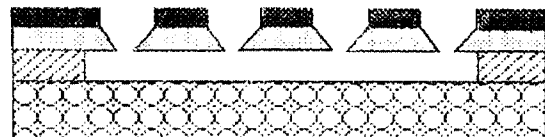
시켜 Fig. 1과 같이 형상을 창출한다. (c)그림은 언더에칭 (under etching)을 통하여 축전기 공간을 확보하는 것이며 마지막으로 부가 비입과 터널갭 부분은 FIB 절삭가공을 통해 (d)그림과 같이 제작<sup>8~10)</sup>하였다.



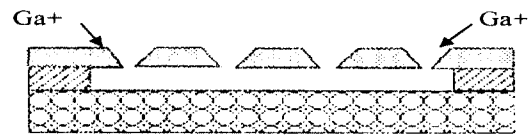
(a) Bonded SOI wafer with SiO<sub>2</sub> masking layer



(b) Patterning of masking layer and anisotropic SCS wet etching



(c) Underetching with oxide etching



(d) FIB milling of additional beam and oblique tunnel gap

Fig. 2 Fabrication steps for the microaccelerometer sensor

3. 유한요소 모델링

3.1 해석모델링

가속도계 패들 내부의 36 개 미소구멍의 크기는 가로 10 μm, 세로 7 μm 이며 두께는 3 μm 이다. 해석은 상용 유한요소 코드는 ANSYS v5.6.1를 사용하였다. 프로그램은 Fig. 3과 같이 전처리 과정(pre-processor)의 PREP7과 모델의 메쉬생성 및 재료의 물성치 입력부분이 있고 계산과정(solution process)에서는 하중 정의와 시간 경과에 따른 해의 변동상황을 수렴하였다. 그리고 후처리 과정(post-processor)에서는 POST1과 결과를 전달해

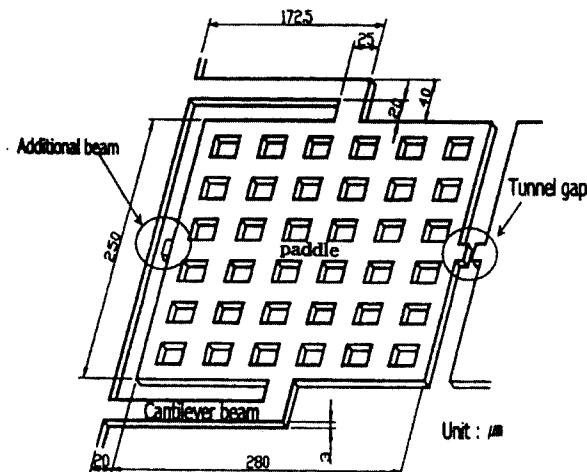


Fig. 1 Schematic view of microaccelerometer

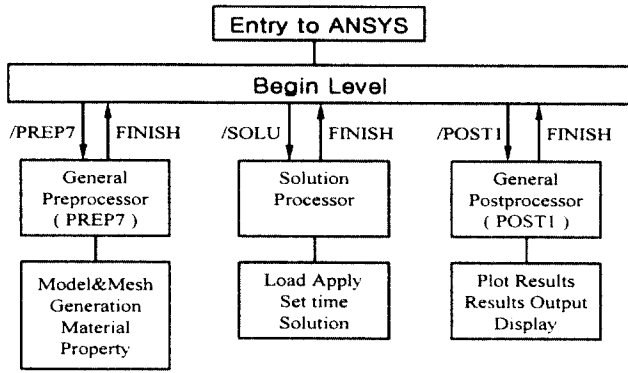


Fig. 3 Flow Chart of Analysis Processes

주는 과정으로 구성되어 있다.

메쉬 생성 후 절점(node)수는 979 개, 요소(element)수는 846 개이며 터널갭 부분, 부가 비임 부분에 많은 변화가 예견되어 세밀하게 모두 자유 메쉬(free mesh)로 분할하였다. shell 57 요소형태를 이용하여 온도구배를 구하기 위한 열전달 해석을 하였고, SCS의 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 The SCS((1.0.0.)) material properties

Properties	Value	Unit
Density	2.33	g/cc
Heat Transfer Coefficient	$0.39 \times 10^{-1}$	kcal/ $\mu\text{ms}^2$
Heat Capacity	0.18	cal/g $^{\circ}\text{C}$ (18~100 $^{\circ}\text{C}$ )
Convection	0.3	cal/sec $\text{cm}^{\circ}\text{C}$ (20 $^{\circ}\text{C}$ )
Young's modulus	$1.9 \times 10^{12}$	dynes/cm $^2$
Poisson's ratio	0.3	
Heat Expansion	$2.33 \times 10^{-6}$	/ $^{\circ}\text{C}$

### 3.2 해석과정

선처리 과정에서 모델링 한 후 계산과정에서 절점과 요소에 대한 시간변화에 따른 온도분포를 확인하고 후처리 과정에서는 열변형에 대한 데이터와 열응력 거동을 해석하였다. 열응력 분포를 확인하기 위해서는 다시 선처리 과정으로 복귀하여 요소형태 shell 63으로 전환하였다. 열적거동의 해석은 Fig. 4와 같이 터널갭을 FIB 가공하기 위한 1차 가열(1st heating)이 100 $^{\circ}\text{C}$ 까지 이루어지며 부가 비임을 가공하기 위한 2차 가열(2nd heating)공정에서 80 $^{\circ}\text{C}$ 까지 온도가 상승한다. 마지막으로 터널갭의 접촉능력을 향상시키기 위해 접촉부 전극

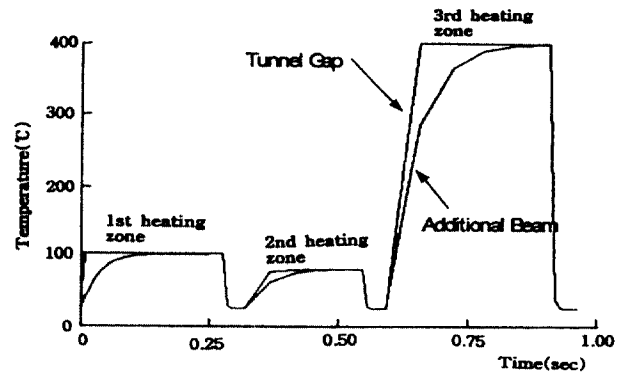


Fig. 4 Time history heating processes

에 백금을 적층하는 공정에서는 400 $^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였다.

### 3.3 열응력해석의 정식화

열응력 해석문제의 유한요소 정식화 과정은 변위 함수와 관련된 변형률뿐만 아니라 온도변화에 따른 내부 물체력에 있다. 이를 위하여 초기항복이 일어난 후 전체변형률 증분은 강성 및 소성변형률 증분의 합과 열수축에 의한 변형률 증분의 합으로 나타낼 수 있다. 즉

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^t \quad (1)$$

식과 같이 되고 여기서 탄성변형률 증분  $d\epsilon_{ij}^e$ 는 Hooke의 법칙으로부터

$$d\epsilon_{ij}^e = \frac{1}{2G} \left( d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} d\sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

식이 된다. 한편 열수축의 변형률 증분  $d\epsilon_{ij}^t$ 는

$$d\epsilon_{ij}^t = \alpha \cdot dT \quad (3)$$

식이며 여기서  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $dT$ 는 기준상태부터 온도차이를 의미한다. 따라서 소성변형률 증분  $d\epsilon_{ij}^p$ 는

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4)$$

식으로 표시할 수 있으며 여기서  $\left( \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \right)$ 는 항복곡면상의 수직성분 벡터이므로  $F=0$ 일 때  $df$ 의 값에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

- $df > 0$      부하상태 (loading)
- $df = 0$      중립상태 (neutral loading)
- $df < 0$      제하상태 (unloading)

$$H = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}_p} \quad (13)$$

이상과 같은 방법에 의하여 전 변형률 증분  $d\epsilon_{ij}$  를 나타내면

$$d\epsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left( d\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} d\sigma_{kk} \delta_{ij} \right) + d\lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} + dT \cdot \alpha \quad (5)$$

식이 되며 이 식을 행렬로 표시하면

$$\{d\epsilon\} = [D]^{-1}\{d\sigma\} + d\lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} + \{d\epsilon_0\} \quad (6)$$

식과 같다. 여기서  $[D]$ 는 강성행렬이고 축대칭 문제의 경우는

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} (1-\nu) & & & & \text{sym} \\ \nu & (1-\nu) & & & \\ 0 & 0 & \frac{1}{2(1-\nu)} & & \\ \nu & \nu & 0 & (1-\nu) & \end{bmatrix} \quad (7)$$

식이며 응력과 변형률의 관계식은

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}]\{d\epsilon\} - \{d\epsilon^T\} \quad (8)$$

식으로 성립한다. 단, 여기서  $[D_{ep}]$ 는 탄소성 행렬로써

$$[D_{ep}] = [D] - \{d_D\}\{d_D\}^T / A + \{a\}^T [D] \{a\} \quad (9)$$

$$\{d_D\} = [D]\{a\} \quad (10)$$

식이며 본 연구에서는

$$\{J_2\} = k(K) \quad (11)$$

인 Von-Mises의 항복조건식을 이용하였다. 식(9) 중  $A$ 는 가공경화 법칙으로부터

$$A = H' \quad (12)$$

식과 같고 여기서  $H'$ 은

식으로부터 구할 수 있다. 여기서  $\bar{\sigma}$ ,  $\bar{\epsilon}_p$  는 각각 상당응력 (equivalent stress)과 상당 소성변형률 (equivalent plastic strain)을 나타낸다. 물체가 내부응력  $\sigma$ , 물체력(body force)  $b$ , 외력  $F$ 에 의하여 평형상태를 유지하고 있을 때 가상일의 원리 (principle of virtual work)를 적용하면 다음 식이 얻어 진다.

$$\{dF\} + \int_V [M]^T \{db\} dV = \int_V [B]^T \{d\sigma\} dV \quad (14)$$

식(8)을 위의 식(14)에 대입하면

$$\{dF\} + \int_V [M]^T \{db\} dV = \int_V [B]^T [D_{ep}] (d\epsilon - d\epsilon_0) dV \quad (15)$$

식 또는

$$[K]\{d\delta\} = \{dF\} + \{dF_b\} + \{dF_{\epsilon_0}\} \quad (16)$$

식을 도출하여 해석이 이용하였다. 여기서 물체력에 의한 절점력인  $\{dF_b\}$ , 열하중에 의한 등가절점력인  $\{dF_{\epsilon_0}\}$ 와 강성행렬  $[K]$ 는 다음과 같다.

$$\{dF_b\} = \int_V [M]^T \{db\} dV \quad (17)$$

$$\{dF_{\epsilon_0}\} = \int_V [B]^T [D_{ep}] \{d\epsilon_0\} dV \quad (18)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [D_{ep}] [B] dV \quad (19)$$

$$[B]^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{N_i}{r} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial r} & 0 \end{bmatrix}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (20)$$

$$\{d\epsilon_0\}^T = \{ a dT \ a dT \ 0 \ a dT \} \quad (21)$$

#### 4. 해석결과 및 고찰

포토레지스터(photo resistor)를 통한 마이크로가속도계의 형상을 제작한 후 FIB를 이용한 터널접

과 부가비임의 절단과 백금적층 공정에서 발생하는 열이 영향을 미치는 내부 열응력을 해석하였다. 캔틸레버 비임과 패들의 각 부위를 가열 및 냉각하는 공정에서 시간경과에 대한 열응력 변화가 발생함을 확인하였다.

#### 4.1 캔틸레버 비임 부분

Fig. 5은 캔틸레버 비임(A-A')에서의 1차 가열(◆표시)을 100 °C까지 가열 하였을때 구속부위(x=0μm)에서  $3.6 \times 10^4$  Pa, 중간지점(x=100μm)에서는  $7.0 \times 10^2$  Pa, 패들의 노치부위(x=170μm)에서는  $2.4 \times 10^3$  Pa정도의 열응력이 작용한다. 80°C까지 온도가 상승하는 2차 가열(■표시)에는 구속부위(x=0 μm)에서  $2.6 \times 10^4$  Pa, 중간지점(x=100μm)에서  $5.1 \times 10^2$  Pa, 패들의 노치부위(x=170μm)에서는  $1.8 \times 10^3$  Pa정도 열응력이 나타나고 있다. 3차 가열(▲표시)에는 구속부위(x=0μm)에  $1.8 \times 10^3$  Pa, 중간지점(x=100μm)에서는  $3.5 \times 10^3$  Pa, 패들의 노치부위(x=170μm)에서는  $1.2 \times 10^4$  Pa정도 열응력이 분포하고 있다. 이 그림에서는 전반적인 경향은 캔틸레버를 구속하는 부위에서 최대의 잔류 열응력이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

상온까지 냉각한 공정에서 캔틸레버 비임(A-A') 부분에 작용하는 열응력 분포를 나타내는 Fig. 6은 구속부위(x=0μm)에서  $3.8 \times 10^3$  Pa 정도로 가장 크게 작용되며 나머지 부분에서는 미세하다. 따라서 캔틸레버의 구속부위에 대한 응력집중화 현상이 발견되므로 응력이완을 위한 후속조치가 요망된다. 이 그림에서 나타내는 열응력의 수치들은 3차에 걸친 가열 후 상온까지 냉각 완료상황에서의 평균치를 의미한다.

#### 4.2 패들의 하단부

패들의 밑 부분(B-B')에서 각 가열단계의 열응력 거동을 나타내는 Fig. 7은 1차 가열(◆표시)공정에서 부가 비임 부분(x=0μm)은 1.4 Pa, 캔틸레버 비임(x=140μm)에서는  $1.2 \times 10^3$  Pa, 턴널갭 부위(x=280μm)에서는  $6.7 \times 10^1$  Pa정도의 비교적 구배가 심한 열응력 거동 양상을 나타내고 있다. 2차 가열(■표시)공정에서도 부가 비임 부분(x=0μm)에서는 1.0 Pa, 캔틸레버 비임(x=140μm)에서는  $7.5 \times 10^2$  Pa, 그리고 턴널갭 부위(x=280μm)에서는  $5.0 \times 10^1$  Pa정도 열응력이 작용하고 있다. 백금의 적층을 위한 3차 가열(▲표시) 공정에서는 부가 비임 부분(x=0μm)에서 7.1 Pa, 캔틸레버 비임(x=140μm)에서는  $5.2 \times 10^3$  Pa, 턴널갭 부위(x=280μm)에서 3.3

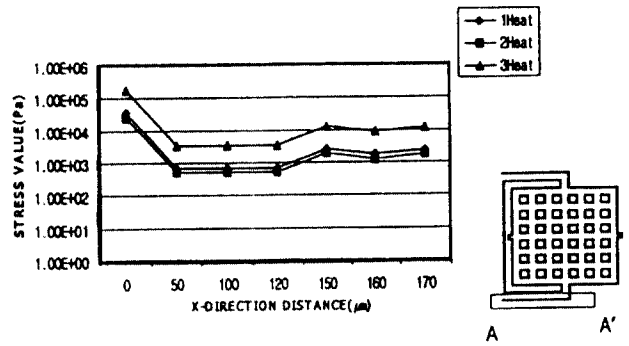


Fig. 5 Stresses of cantilever beam A-A' part after each heating stage

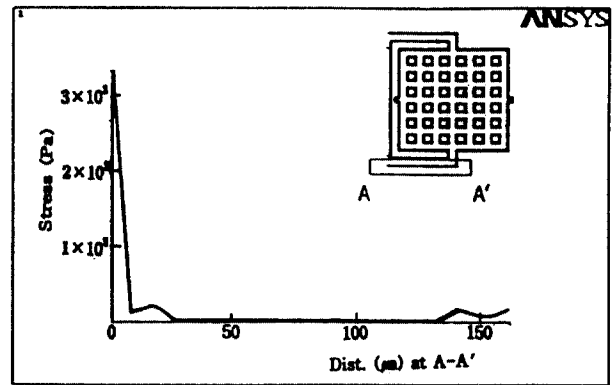


Fig. 6 Stress of cantilever beam A-A' part

Pa정도의 열응력 크기가 계산되어 졌다. 그러므로 자유단으로 구성되어 있는 부가 비임과 턴널갭 부위는 비교적 작은 응력이 발생하고 패들의 중심부인 캔틸레버와 연결부의 응력이 상승하는 M자형상과 유사한 모습의 응력 거동을 나타내고 있다.

3차에 걸친 가열공정이 이루어지고 냉각이 종료된 후 패들의 아래부분(B-B')에 대한 평균 열응력 거동을 나타낸 그림이 Fig. 8이며 140 μm를 기준으로 거의 대칭형상을 나타낸다. 캔틸레버 비임과 패들의 접속지점에서 열응력이 가장 크게 발생하며 접속지점 중간에는 급속히 감소하는 양상을 보여 주므로 이 부분에서 응력구배가 급격한 경사를 형성하고 있다.

#### 4.3 패들의 중앙부

Fig. 9는 패들 중앙(C-C')에서 1차 가열(◆표시)공정의 경우 열응력이 캔틸레버 비임(x=0, 330μm)에서는  $5.3 \times 10^3$  Pa, 패들의 중앙부위(x= 165μm)는  $9.8 \times 10^1$  Pa 정도 발생하였다. 2차 가열(■표시)시에는 캔틸레버 비임(x=0, 330μm)에서는  $3.9 \times 10^3$

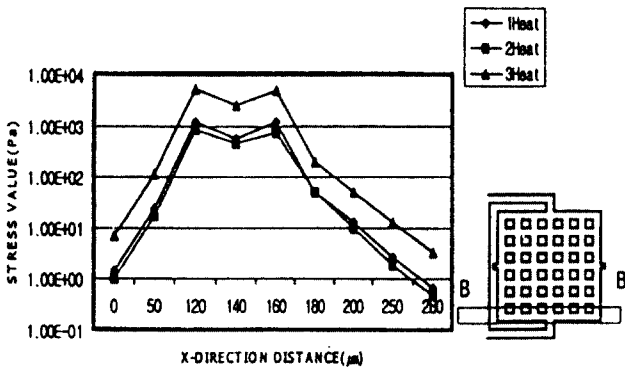


Fig. 7 Stress of paddle B-B' part after each heating

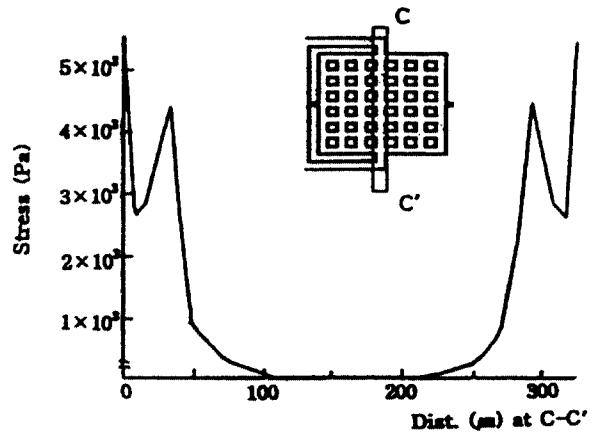


Fig. 10 Stress of paddle center C-C' part

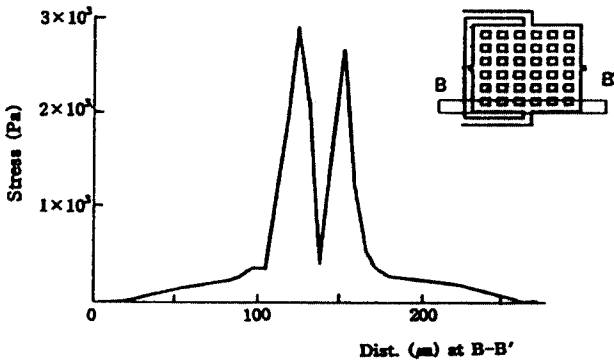


Fig. 8 Stress of paddle B-B' part

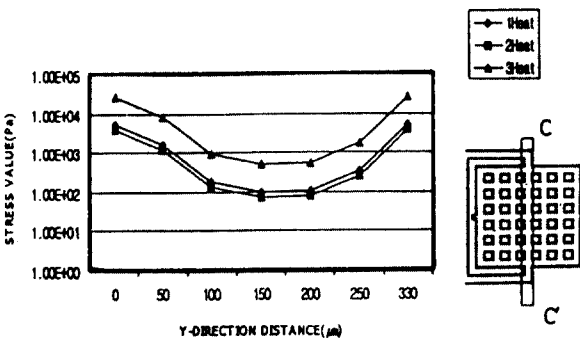


Fig. 9 Stress of paddle center C-C' part after each heating

Pa, 패들의 중앙부위( $x=165\mu\text{m}$ )에서는  $7.2 \times 10^1$  Pa 정도 크기의 열응력이 형성되어 졌다. 3차 가열( $\blacktriangle$  표시)공정에서는 캔틸레버 비임( $x=0, 330\mu\text{m}$ )에서  $2.7 \times 10^1$  Pa, 패들의 중앙부위( $x=165\mu\text{m}$ )에서  $4.9 \times 10^2$  Pa이며 맞은편과 U자형상의 대칭모양을 이루고 있으므로 향후 C-C'축을 중심으로 열변형이 발생할 우려가 많을 것으로 예측된다.

냉각이 종료된 이후 패들의 중앙부(C-C')의 열

응력 분포를 나타낸 것이 Fig. 10이다. 그림에서 알 수 있듯이 턴넬갭과 부가 비임을 연결하는 선상을 기준으로 대칭형상의 크기를 갖고 있으며 캔틸레버 비임의 최외각 부분에서  $5.67 \times 10^3$  Pa 크기의 열응력이 작용하지만 내부에는 거의 존재하지 않았다.

### 5. 결 론

정전기력을 검침력으로 이용하는 마이크로가속도계 센서의 제조공정 변화에 따른 열응력 차이가 있음을 알 수 있었고 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

- 1) 패들의 캔틸레버 비임을 구속하는 부위에서 최대의 잔류 열응력이 발생하는 응력 집중 현상이 발견되므로 응력이완을 위한 후속조치가 요망된다.
- 2) 자유단으로 구성되어 있는 부가 비임과 턴넬갭 부위는 비교적 작은 응력이 발생하고, 패들의 중심부인 캔틸레버와 연결부의 응력이 상승하여 M자형상의 열응력 거동을 나타낸다.
- 3) 상온까지 냉각이 종료된 후 패들의 아래부분에 대한 평균 열응력 거동은 캔틸레버 비임과 패들의 접속지점에서 가장 크게 발생하였다.
- 4) 패들 중앙에서는 거의 U자의 대칭형상을 취하므로 열변형이 발생할 우려가 많을 것으로 예측된다.

### 참고문헌

1. J. Bryzek, "Impact of MEMS Technology on Society", Sensors and Actuators, A56, pp. 1~ 9, 1996

2. 조영호, “미소 기계-전자 집적시스템 응용과 실제”, 대한기계학회지, 제32권, 제7호, pp. 588~603, 1992
3. K. W. Lee and K. D. Wise, “SENSIM : A Simulation Program for Solid-State Pressure sensors”, IEEE Transactions on Electron Devices, ED-29, pp. 34~41, 1982
4. K. Nabors, S. Kim, J. White and S. Senturia “Fast Cap User’s Guide”, Research Laboratory of Electronics, MIT, Cambridge, USA, 1992
5. O. S. Kim, S. Yoshimura and G. Yagawa, “Finite Element Analyses of Residual Stress Causing Popping up of Microaccelerometer Based on Tunneling Current Concept”, International Conference on Materials and Mechanics’97, D0-5A, Tokyo International Forum, Tokyo, Japan, pp. 125~130, 1997
6. C. J. Wilson, A. Ormeggi and M. Narbutovskih, “Fracture Testing of Silicon Micro Cantilever Beams,” J. Appl. Phys, Vol. 79, No. 5, pp. 2386~2393, 1996
7. 김옥삼, “정전기력을 이용한 마이크로 가속도 센서 축전기부의 주울발열에 의한 온도분포 해석”, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제7호, pp. 1348~1355, 1998
8. 김옥삼, “턴넬링 전류효과를 이용한 마이크가속도 센서의 축전기부 해석”, 한국동력기계공학회지, 제3권 제4호, pp. 57~62, 1999
9. 김옥삼, 조의일, 박우철, 정진오, “미소 가속도계 센서의 주울발열 해석”, 대한기계학회, 1998년 춘계 학술대회 논문집 A권, pp. 672~677, 1998
10. 황규영, 김옥삼, “미소가속도계 센서의 패블리케이션 공정에서 온도해석” 한국동력기계공학회, 99 추계 학술대회 논문집, pp. 234~238, 1999