

미소가속도계 센서의 제조공정에서 잔류응력 해석

김 옥 삼*

Analysis of Residual Stresses at Manufacturing Processes for Microaccelerometer Sensors

O-S Kim*

Key words : Residual stress(잔류응력), Microaccelerometer sensors(미소가속도계 센서) Micromachining(마이크로머시닝), Tunnel gap(터널 갭), Equivalent stress(등가응력)

Abstract

The major problems associated with the manufacturing processes of the microaccelerometer based on the tunneling current concept is the residual stress. This paper deals with finite element analyses of residual stress causing pop up phenomenon which are induced in micromachining processes for a microaccelerometers sensor using silicon on insulator(SOI) wafer. After heating the tunnel gap up to 100° Cand get it through the cooling process and the additional beam up to 80° Cand get it through the cooling process. We learn the residual stress of each shape and compare the results with each other, after heating the tunnel gap up to 400° C during the Pt deposition process. The equivalent stresses produced during the heating process of focused ion beam(FIB) cut was also to be about 0.02~0.025Pa/° Cand cooling process the gradient of residual stresses of about $8.4 \times 10^2 \text{Pa}/\mu\text{m}$ still at cantilever beam and connected part of paddle. We want to seek after the real cause of this pop up phenomenon and diminish this by change manufacturing processes of microaccelerometer sensors.

1. 서 론

최근, 미세 물리량 검출을 위한 마이크로 센서¹⁾는 반도체 제작기술 혁신을 기반으로 소형화, 다 기능

화, 고성능화와 더불어 제작경비의 저렴화를 이룰 수 있다. 마이크로 센서를 생산하는 마이크로머시닝(micromachining)기술²⁾은 기계-전자요소의 동시제작을 통해, 기전(機電) 복합제품의 경량화 및

* 여수대학교 기계·자동차 공학부(원고접수일 : 2001년 1월)

고신뢰도를 확보할 수 있어 차세대를 위한 핵심산업 분야로 자리 매김하고 있다. 그리고 발전을 거듭하고 있는 MEMS³⁾(microelectromechanical system)분야에서 상업용 해석 패키지 코드는 대부분 유한요소법(finite element method, FEM)⁴⁾이나 경계요소법(boundary element method, BEM)⁵⁾ 등으로 이루어졌으나, 각종 응력 및 변형량 결과도출이 부분적으로 이루어져 실용적 접근은 아직 미흡하다. 또한 미소가속도계 센서의 제작 공정시, 검침부 역할을 하는 터널 갭(tunnel gap)에서 내부 잔류응력에 의한 돌출현상(pop up phenomenon)의 불량⁶⁾이 발생한다. 따라서 단결정 실리콘(single crystal silicon, SCS)의 절연 웨이퍼(wafer)를 재료로 하는 미소가속도계의 개발에, 적층막(depositing layer)과 열산화층(thermal oxide layer)의 기계적성질 및 잔류응력 거동 해석이 성능예측의 중요한 요건⁷⁾으로 작용하고 있다.

본 연구는 미소가속도계 센서의 제작공정에서 발생하는 온도분포와 열적 거동을 분석한 선행연구⁸⁾ 결과를 기초로, 내부의 응력을 FEM으로 해석함으로써, 마이크로머시닝 공정과 그 이후의 잔류응력을 정량적으로 평가하고자 한다. 구체적인 방법으로 가공조건에 따라 센서 패들(paddle)에 있는 터널 갭, 부가 비임(additional beam) 그리고 캔틸레버 비임(cantilever beam)에서 집속이온 비임(focused ion beam, FIB)가공과 백금(Pt)적층가공 후 발생하는, 폰 미세스(Von-Mises) 등가응력 구배 및 분포편차를 구하여 미소가속도계 최적설계의 기초자료를 마련하고자 한다.

2. 유한요소 모델링

2.1 미소가속도계 센서와 불량현상

전자(electron)가 자신이 가지고 있는 운동에너지 보다 높은 장벽을 투과하는, 터널 전류효과(tunneling current effect) 원리를 이용한 미소가속도계 센서의 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. 센서 평판에 있는 36개의 구멍은, 패들 무게를 감소시키고 민감도를 향상시키는 동시에 전극(electrode)의 기능도 있다. 형상을 대칭으로 설계하여 온도

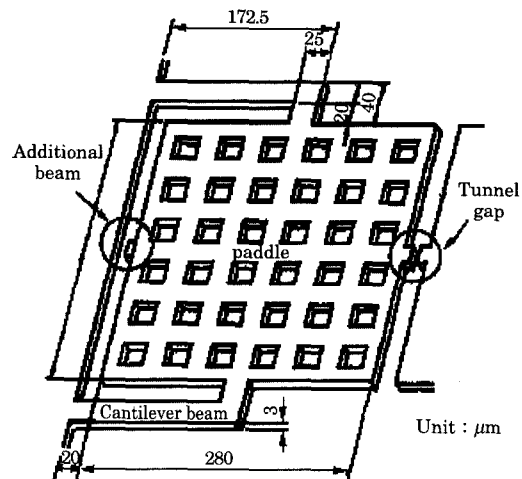


Fig. 1 Schematic view of microaccelerometer

Table 1 Mechanical properties of SCS (1.0.0) face.

| Properties | Value | Unit |
|------------------------|-------------|----------------------|
| Young's modulus | 134.2 | GPa |
| Poisson's ratio | 0.064~0.279 | |
| Shear modulus | 50 | GPa |
| Fracture toughness | 0.95 | MPa m ^{1/2} |
| Yield strength | 6.8~7.1 GPa | |
| Bulk modulus | 91.9 | GPa |
| Thermal line expansion | 2.6~4.7 | μK ⁻¹ |

변화시 열팽창의 차이로 인한 내부 응력과 탄소성 열변형⁹⁾을 최소화하였다. 패들 재질은 Table 1과 같은 기계적 성질을 가진 밀러지수(miller's index) {1.0.0}면의 SCS¹⁰⁾이고, 두께는 3μm, 기판과 패들의 극판 거리는 4μm이며 실리콘 절연(silicon on insulator, SOI)웨이퍼의 마이크로머시닝 가공공정으로 제작되었다.

미소가속도계의 제작기법은 SOI웨이퍼 기판(substrate)위에 막(layer)을 입히는 막형성 과정, 그 표면에 마스크 패턴을 현상·인화하는 마스크복제, 에칭(etching) 및 열처리 등의 마이크로머시닝 공정으로 이루어진다. FIB을 이용한 절단과 Pt을 적층하기 위한 가열공정은 Table 2와 같이 실시하였으며, 내부 잔류응력과 열변형에 기인한 돌출현상의 불량이 터널 갭에서 Fig. 2와 같이 발생하였다.

Table 2 Cyclic thermal loadings during micromachining processes.

| Process | Temperature (°C) | Duration (sec.) | Appliance | Working area | Note |
|-------------------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|----------------|
| Isotropic wet etching | 25 | About 1.3 | HF | Masking layer | Not considered |
| Anisotropic wet etching | 60 | About 2.5 | KOH oxide layer | Silicon | Not considered |
| FIB cutting | 80 | 2.0 | FIB beam | Additional | Considered |
| FIB cutting | 100 | 54 gap | FIB | Tunnel | Considered |
| Pt deposition | 400 | About 120 gap | CVD | Tunnel | Considered |



Fig. 2 Paddle pop up after FIB cut at tunnel gap

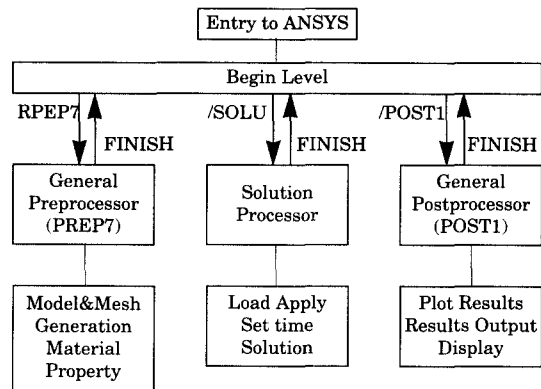


Fig. 3 Flow chart of analysis processes

2.2 미소가속도계 센서의 모델링과 해석과정

미소가속도계 패들의 구멍 크기는 가로 $10\mu\text{m}$, 세로 $7\mu\text{m}$ 이며 두께는 $3\mu\text{m}$ 이다. 해석에 이용된 상용 FEM 해석코드는 ANSYS V5.3.3이며, 프로그램 구성은 Fig. 3과 같이 PREP7과 모델의 메쉬 생성 및 재료의 물성치 입력모듈이 선처리 과정(pre-processor)이 있다. 수렴오차 이내 해를 구하는 솔루션(solution)과정에서, 하중 정의와 시간 경과에 따른 해석 결과의 변동상황을 2차원 비정상 문제로 계산하였다. 그리고 해석결과를 보여주는 후처리 과정(post-processor)은, 사용자의 이해를 효과적으로 돕기 위한 출력모듈(module)인 POST1로 구성되어 있다.

선처리 과정에서 모델링한 후 솔루션 과정에서 절점(node)과 요소(element)의 시간변화에 따른 온도구배 거동을 확인한 후, 선처리 과정으로 피드백(feed back)하며 솔루션 과정에서 등가 잔류응

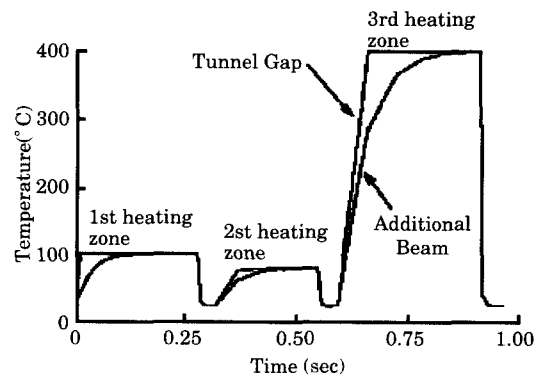


Fig. 4 Time history heating and cooling processes

력 분포의 데이터로 활용하였다. 해석에 사용한 절점은 979개, 요소는 846개이며 터널 갭, 캔틸레버 비임에서 정확한 변화양상을 분석하기 위하여 세밀하게 분할하였고, 요소생성 양식은 자유 메쉬(free mesh)이다. 터널 갭을 FIB가공하는 1차 가열(1st heating zone)은 100°C , 부가 비임 절단을

위한 2차 가열(2nd heating zone)은 80°C, 마지막으로 터널 잭의 접촉성을 향상시킬 목적으로 위해 백금을 적층시키는 3차 가열(3rd heating zone)공정에서는 400°C까지 온도가 상승하는 3개의 가열과 냉각구간이 Fig. 4와 같이 존재하며, 열적 공정에 필요한 전체시간은 0.93초이다.

3. 해석결과 및 고찰

터널 잭과 부가 비임의 FIB 절단가공 그리고 Pt 적층 가공시 가열이 완료된 후, 미소가속도계 캔틸레버 비임(A-A')에 대한 등가응력(이하 응력이라고 함) 거동을 Fig. 5에 나타냈다. 1차 가열공정(-◆-)인 터널 잭의 FIB 절삭 가공시, 캔틸레버 비임의 구속부위(x=0μm)에서 6.56×10⁴Pa, 중간지점(x=120μm)에서 8.98×10³Pa, 그리고 패들과 접속부위(x=170μm)에서 3.38×10³Pa 정도의 응력이 분포하고 있었다. 부가 비임을 FIB 절단하는 2차 가열공정(-■-)은, 구속부위에 2.61×10⁴Pa, 중간지점은 7.12×10³Pa, 그리고 패들과 접속부위에서 1.75×10³Pa 크기의 응력이 작용하였다. Pt적층을 위해 400°C정도까지 가열하는 3차가열(-▲-)의 경우 구속부위에 1.78×10⁶Pa, 중간지점에서 5.49×10⁵Pa, 마지막으로 패들과 접속부위에서 1.19×10⁴Pa정도 내부응력이 존재하였다. 따라서 가열온도가 상승함에 따라 발생하는 응력도 증가하는 양상을 보여주는데, 가열온도 1°C 상승시 캔틸레버의 구속부위에서는 475Pa, 중간지점은 14Pa 그리고 패들과 접속부위는 32Pa 정도의 응력이 생성되고 있으므로 캔틸레버 비임의

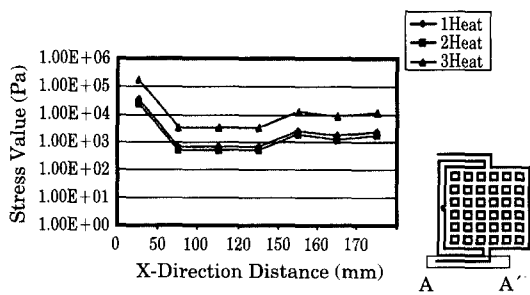


Fig. 5 Equivalent stresses of cantilever beam A-A' part after each heating processes

구속부위에 대한 응력 완화방안이 강구되어야 할 것으로 사료된다.

냉각개시 0.93초가 경과하여 실온상태로 환원된 이후, 미소가속도계의 캔틸레버 비임부분(A-A')에 대한 등가 잔류응력 분포를 나타낸 것이 Fig. 6이다. 구속부위(x=0μm)에서 3.4×10³Pa의 최대 응력을 보여주며 x=10μm에서는 0.1×10²Pa까지 소멸된다. 이 위치의 응력구배는 1μm당 3.3×10²Pa로 형성되었으나 캔틸레버와 패들 접촉부의 잔류응력은 미미하였다. 즉 잔류응력 집중현상은 Fig. 5의 결과와 부합하여 패들 길이 10μm이내에서 급격히 발생하므로, 이 부위에 대한 강도평가 작업이 정확하게 이루어져야 하고, 더불어 최적설계를 통한 강도보완 과정도 필요하다.

제조과정에서 가열공정이 이루어질 때, 미소가속도계 패들의 밑 부분(B-B')에서 등가응력 거동을 나타낸 그림이 Fig. 7이다. 터널 잭의 FIB가공공정인 1차가열(-◆-)시 부가 비임(x=0μm)에서 1.42Pa, 캔틸레버 비임(x=140μm)에서 8.79×

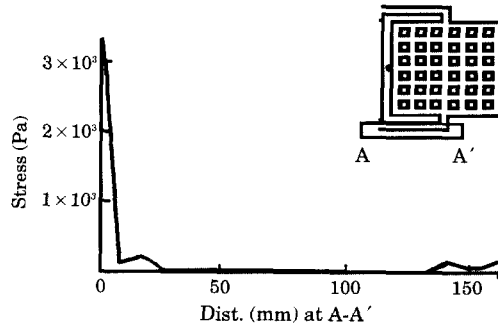


Fig. 6 Residual stress of cantilever beam A-A' part

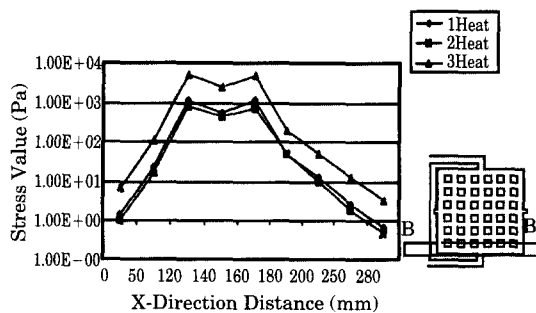


Fig. 7 Equivalent stresses of paddle B-B' part after each heating processes

102Pa, 터널 갭 부위(x=280μm)에서 8.66×10^{-1} Pa정도 등가응력이 잔존하고 있다. 80°C 가열공정인 2차가열(—■—)에서 응력은, 부가 비임에서 1.04Pa, 캔틸레버 비임에서 7.51×10^2 Pa, 그리고 터널 갭에서 6.89×10^{-1} Pa정도였다. 백금 적층공정인 3차가열(—▲—) 공정에서, 부가 비임에서 8.10Pa, 캔틸레버 비임에서 3.5×10^3 Pa, 터널갭 부위에서 5.33Pa정도가 발생하여, 산모양의 응력 분포 거동을 보여주는데 이것은 캔틸레버 접속부가 구속되어 그 부분의 응력이 증가했기 때문으로 사료된다.

냉각이 완료된 이후 미소가속도계 패들 아래부분(B-B')의 잔류응력 거동을 나타낸 Fig. 8은, 자유단으로 작용한 x=0μm와 280μm의 패들 양끝 부위에서 응력이 존재하지 않았다. 그러나 캔틸레버 비임과 패들의 접속부(x=125μm~155μm)에서 $2.9 \sim 2.61 \times 10^3$ Pa, x=138μm에서 0.35×10^3 Pa의 잔류응력이 나타나고, 응력구배는 1μm당 8.4×10^2 Pa이다. 이때 응력은 SOI웨이퍼 항복강도(6.8~7.1GPa) 이내이므로 파손의 위험성은 배제할 수 있으며, 캔틸레버 비임과 패들의 접속 지점에서 급속히 감소한 후 반등하여 전반적으로는 M자 형상을 보여준다.

Fig. 9는 미소가속도계 패들의 횡방향 중앙부(C-C')에서, 가열 공정별로 패들 위치에 따른 등가응력 양상을 나타낸 것이다. 터널 갭 절단을 위한 FIB가공의 1차가열(—◆—)시 발생하는 응력이 캔틸레버 비임 접속부(y=0μm)에서 7.32×10^3 Pa, 패들의 중앙부(y=165μm)에서 1.1×10^2 Pa 정도를 나타내고 있다. 그리고 부가 비임 절

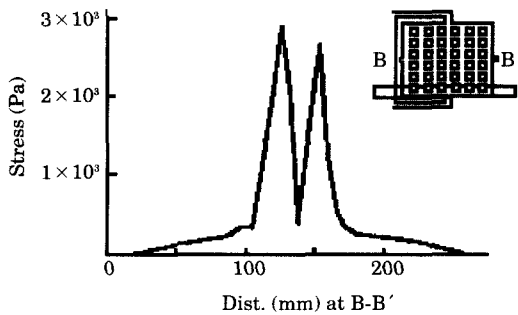


Fig. 8 Residual stress of paddle B-B' part

삭 가공을 위한 FIB작업의 2차가열(—■—)은 캔틸레버 접속부에서 4.9×10^3 Pa, 패들 중앙부에서 9.7×10^4 Pa의 응력이 작용하고 있다. Pt 적층을 위한 3차가열(—▲—)은 캔틸레버 접속부에서 4.66×10^4 Pa, 패들 중앙부에서 7.90×10^2 Pa이며, 터널갭과 부가 비임을 연결하는 선상에서 대칭모양의 등가응력 분포양상을 보여준다. 또한 3차 가열공정을 기준으로 평가하였을 때, 1차 가열공정 결과 발생하는 잔류응력은 $5.84 \sim 7.14 \times 10^0$ Pa 정도 적었고, 2차 가열 공정 이후에는 $6.64 \sim 8.42 \times 10^0$ Pa 가량 부족한 응력 발생거동을 나타냈다. 이 결과는 가열온도 1°C당 평균 0.02~0.025Pa정도 내부 등가응력이 발생하는 것으로 유추할 수 있는데, SCS 성분의 SOI 웨이퍼 마이크로머시닝 공정시 참고할 수 있을 것이다.

냉각이 완료된 이후, 미소가속도계 패들의 중앙부(C-C')의 잔류응력 분포를 나타내는 Fig. 10은

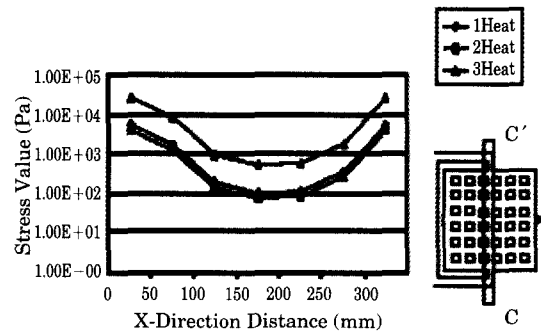


Fig. 9 Equivalent stresses of paddle center C-C' part after each heating processes

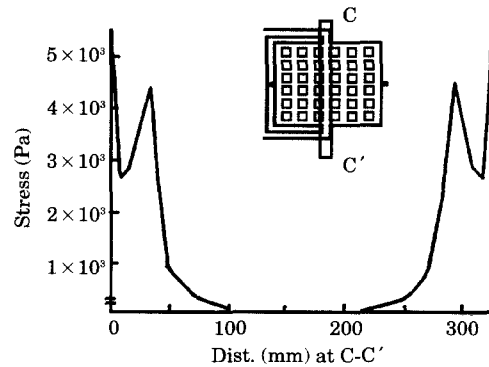


Fig. 10 Residual stress of paddle center C-C' part

U자 모양의 대칭형상을 나타낸다. 잔류응력이 캔틸레버 비임 접속부분에서 가장 크며, 양쪽 패들 중앙부에서는 작용되지 않는다는 것을 알 수 있다. $x=7\mu\text{m}$ 와 $310\mu\text{m}$ 에서 일시적으로 응력이 감소하는 모습은, 캔틸레버 비임 접속부가 기억(γ)자 형상으로 변화하면서 작용면적이 부분적으로 증가하여 상대적으로 응력이 감소하였기 때문으로 사료된다.

4. 결 론

양자역학적 영역에 작용하는 정전기력을 검출력으로 이용하는 미소가속도계 센서의 제작공정에서, 각각 가열온도에 따라 내부의 등가응력이 차이가 있음을 확인하였다. SOI웨이퍼를 재료로 이용한 미소가속도계 센서의 개발시 제조공정의 가열온도 1°C 당 평균 $0.02\sim 0.025\text{Pa}$ 정도 내부 등가응력이 발생하는 것으로 해석되었으며, 이것은 제작공정의 가열온도가 상승함에 따라 발생 응력이 더불어 증가함을 의미하고 있었다. 캔틸레버에서 응력 집중현상은 $10\mu\text{m}$ 이내에서 급격히 발생하므로 이 부위에 대한 강도 평가가 면밀하게 이루어져야 하며, 패들 양쪽 부위는 잔류응력이 존재하지 않았다. 또한 캔틸레버 비임과 패들의 접속부 부근에서 응력구배는 $1\mu\text{m}$ 당 $8.4\times 10^2\text{Pa}$ 정도이나 SOI웨이퍼의 항복강도 이내이므로 파손의 위험성은 배제할 수 있고, 가열 및 냉각속도에 따라 변화하는 내부 응력 및 잔류응력을 해석하는 후속 연구가 필요하다.

참고문헌

(1) 김옥삼, "정전기력을 이용한 마이크로가속도 센서 축전기부의 주울 발열에 의한 온도 분포해석", 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제7호, pp. 1348~1355, 1998

(2) C. J. Kim, "Micromachining Technologies of MEMS", Journal of KSME, Vol. 33, No. 6, pp. 499~514, 1993

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

(4) K. Nabors, S. Kim, J. White, and S. Senturia, "FastCap User325s Guid, Research Laboratory of Electronics," MIT, Cambridge, USA, 1992

(5) K. W. Lee, and K. D. Wise, "SENSIM : A Simulation Program for Solid-State Pressure sensors," IEE Transactions on Electron devices, ED-29, pp. 34~41, 1982

(6) 김옥삼, "마이크로가속도계의 열응력에 대한 유한요소 해석", 한국박용기관학회 2000년 춘계학술대회 논문집, pp. M100~104, 2000

(7) 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 Conference on Forum, Tokyo, Japan. pp. 125~130, 1997

(8) O. S. Kim, "A Study on the Thermal Behavior in Microaccelerometer Manufacturing Processes", KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1126~1134, 1998

(9) J. C. Wilson and K. Patricia, "A Fracture Testing of Bulk Silicon Microcantilever Beams Subjected to a Side Load", Vol. 68, pp. 5840~5844, 1996

(10) 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

저 자 소 개



김옥삼(金錕三)

1985년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1987년 동 대학원 석사(기계공학). 1991년 동 대학원 박사(기계공학). 1992년~현재, 여수대학교 기계·자동차공학부 부교수. 1996~1997 일본 도쿄대학 연구교수.