한국공작기계학회논문집 Vol.11 No.4 2002. 8.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

SOI웨이퍼의 마이크로가속도계 센서에 대한 열변형 유한요소해석

김옥삼*, 구본권+, 김일수++, 김인권+++, 박우철++++

(논문접수일 2002. 2. 1, 심사완료일 2002. 5. 3)

Finite Element Analysis of Thermal Deformations for Microaccelerometer Sensors using SOI Wafers

O. S. Kim*, B. K. Koo+, I. S. Kim++, I. K. Kim+++, W. C. Park++++

Abstract

Silicon on insulator(SOI) wafer is used in a variety of microsensor applications in which thermal deformations and other mechanical effects may dominate device performance. One of major problems associated with the manufacturing processes of the microaccelerometer based on the tunneling current concept is thermal deformations and thermal stresses. This paper deals with finite element analysis(FEA) of residual thermal deformations causing popping up, which are induced in micromaching processes of a microaccelerometer. The reason for this popping up phenomenon in manufacturing processes of microaccelerometer may be the bending of the whole wafer or it may come from the way the underetching occurs. We want to seek after the real cause of this popping up phenomenon and diminish this by changing manufacturing processes of microaccelerometer. In microaccelerometer manufacturing process, this paper intend to find thermal deformation change of the temperature distribution by tunnel gap and additional beams. The thermal behaviors analysis intend to use ANSYS V5.5.3.

Key Words : Silicon On Insulator Wafer(실리콘 절연 웨이퍼), Manufacturing Process(제조공정), Microaccelerometer Sensor(마이크로 가속도계 센서), Thermal Deformation(열변형), Finite Element Analysis(유한요소해석)

* 주저자, 여수대학교 기계·자동차공학부 (kos@yosu.ac.kr)
주소: 550-749 전남 여수시 둔덕동 산 96-1번지, Tel: 061-659-2976
+ 서울산업대학교 금형설계학과
++ 목포대학교 기계공학과
+++ 조선대학교 항공우주공학과
++++ 삼척대학교 자동차공학과

1. 서 론

최근 기술선진국의 자동차업계에서는 미소기전 집적시스템[1] (micro electro mechanical system, MEMS)기술을 기반으로 한 자동 전장기능 시스템(automotive electronics function system)을 개발하여, 국제시장에서 자사제품의 경쟁력 강화와 함께 부가가치 극대화를 도모하고 있다. 관심이 집중되고 있는 자동차 분야의 대표적인 전장기능시스템[2]들은 에어백, 전자식 엔진분사 제어시스템, 고성능 제동시스템(ABS) 및 전자식 현가장치 등을 들 수 있다. 이들 전장 기능시스템의 설계기능에 대한 성공적 실현을 위해, 자동차 운행 및 시스템동작 상태에 관한 신뢰성 높은 정보를 제공해 줄 수 있는 고성능 마이크로센서 개발[3]이 선결과제이다. 전장기능 시스템에 사용되는 센서는 일반계측용 센서와는 달리, 열악한 환경에서 설계된 기능에 대한 신뢰성을 유지하고 낮은 코스트로 생산하여야 한다. 마이크로가속도계 센서는 자동차의 현가장치, 에어백 및 네비게이터(navigator) 등에서 가속도 변화의 검출요소와 자동차의 조향장치에 의한 선회나 구동 시 진동제어를 위한 측정 용도[4]로 이용되고 있다. MEMS분야의 마이크로가속도계 센서의 연구는 1991년 미국 아날로그 다바이스사에서 집적 센싱 요소(interdigitated sensing element)의 에어백 가속도계의 개발을 성공으로 이끌었고, UC-Berkeley에 제작한 실리콘 PI-FET 가속도계의 상용화에 기여하였다.

종래의 매크로(macro)한 영역의 기계설계는 최적해나 만족해를 구하기 위해 설계자의 독창적인 아이디어, 과거 데이터의 유용 및 시작품 제작과 실험의 반복과정이 필연적으로 수반되었다. 그러나 마이크로(micro)한 영역은 첫째, 3차원의 복잡한 형상을 가진 마이크로구조체에 대하여 고정밀도의 정적 · 동적변형, 정전자장 및 전자 · 열의 연성효과(coupled effect) 등의 다양한 분야를 모두 규명한다는 것은 어려운 문제이다. 둘째, 중력장에서의 기계설계 및 제작에 필요한 데이터는 다양하지만, 마이크로 분야의 설계 및 제작실적은 거의 없어 과거 자료를 사용하기 곤란하다. 마지막으로 제작기술의 표준규격이 존재하지 않아, 시작품 및 실험 등을 시행착오법으로 반복해야 하기 때문에 개발코스트가 과중해지는 문제점들이 있다. 이상과 같은 상황에서 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어 기술의 비약적인 발달에 힘입어, 마이크로센서나 마이크로머신을 설계 및 생산분야는 컴퓨터를 이용한 모델링이나 시뮬레이션의 사용이 필수 불가결한 실정이다. 이 분야의 수치해석을 위한 상업용 패키지 코드로서는 유한요소법(finite element method, FEM)[5]과 경계요소법(boundary element method, BEM)[6] 등이 시도되고 있으나 잔류 열응력이나 열변형량 등의 결과도출은 아직 만족스럽게 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구의 마이크로가속도 센서는 실리콘 절연(silicon on insulator, SOI)웨이퍼로 제작되었고, 크기가 ㎛단위로 미세하기 때문에 일반적인 기계적 가공기술을 배제하였다. 마이크로가속도계 센서[7]는 반도체 소자를 만드는 마이크로머시닝(micromachining) 가공기법[8]으로 제작하기 때문에 생산공정에서 열에 의한 열응력과 열변형이 발생하고, 그 결과 검출요소인 터널 갭(tunnel gap)에서 돌출(popping up)과 같은 불량현상이 나타난다. 이러한 돌출 불량현상을 제거 또는 최소화시키기 위하여, 제작공정에서 열적거동을 유한요소법으로 해석하고 열응력과 열변형량을 정량적으로 규명하고자 한다.

2. 마이크로가속도계 센서의 제조공정

2.1 SOI웨이퍼 제조 및 마이크로머시닝 공정

반도체에 널리 사용되고 있는 실리콘 소자는 실리콘 기판(substrate) 위에 만들어지는데 비해, SOI웨이퍼는 주로 단결정 실리콘(single crystal silicon, SCS) 박막 위에 절연체로 S_iO_2 산화막을 형성한다. 마이크로머시닝 공정에는 SCS 기판 위에 막을 입히는 막형성과정, 그 표면에 마스크 패턴을 현상하고 인화하는 과정을 포함하는 마스크 패턴 복사과정이 있다. 그리고 복제된 패턴을 바탕으로 부식(etching)에 의해서 불필요한 부분을 제거하는 공정, 마지막으로 열처리나 다른 종류의 원자의 도핑(doping)과정을 반복한다.

마이크로머시닝을 위해 SOI웨이퍼에 부식가공을 하는 경우, 부식 대상의 기판이나 박막 표면에 포토레지스터(photoresister) 마스크 재료를 도포한다. 마스크 재료는 사용하는 부식액 혹은 부식가스(플라즈마)에 부식되기 어려운 물질을 선택한다. 부식은 등방성(isotropic)과 이방성(anisotropic)이 있는데, 등방성 부식은 마스크가 벗겨진 부분부터 같은 방향으로 진행되고, 이방성 부식은 마스크가 벗겨진 부분의 바로 아래부터 수직방향으로 부식이 이루어지는 가공기법이다. 부식에서 중요한 것은 벽면의 이방성과 부식되는 재료의 선택이며, 이것을 효과적으로 활용하면 SOI웨이퍼로부터 3차원 형상의 마이크로구조물을 얻을 수 있다.

본 연구의 모델인 터널전류 원리를 이용한 마이크로가속도계 센서[9]의 대략적 형상 및 치수가 Fig. 1에 있고, 부식

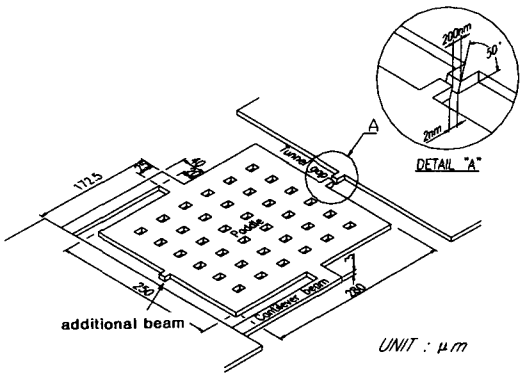


Fig. 1 Isometric view of microaccelerometer

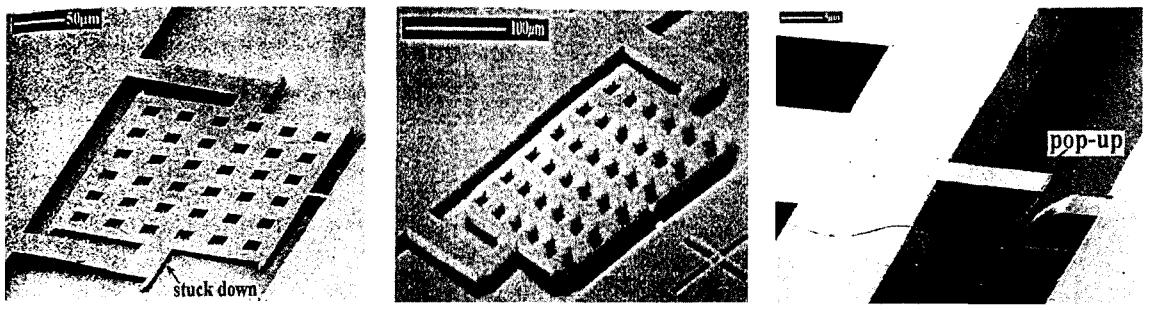
가공을 통하여 3차원의 마이크로구조물 형상이 만들어진다. 집속이온 빔(focus ion beam, FIB)[10]을 이용한 절삭가공에 의해서 터널 갭 부분이 약 200㎚ 간격으로 절단되며, 이 간격은 정전기력(static electric power)에 의해 마이크로가속도계 센서의 검출요소 기능을 한다. 센서의 제작에는 FIB 절삭가공 뿐만 아니라 박막성형, 이방성 및 등방성 부식기술 등의 MEMS의 마이크로머시닝 제조기법이 사용되었다.

2.2 마이크로가속도계의 작동원리

터널 갭과 패들(paddle)은 Fig. 1의 좌측 하단부에서 보는 바와 같이 외팔보(cantilever beam)에 의해 연결 및 고정되고 있다. 센서의 평판에 있는 36개의 작은 구멍은, 패들의 무게를 감소시켜 민감도를 증가시키는 동시에 전극(electrode)의 기능도 있다. 마이크로가속도 센서의 가속도 검출 원리는, 패들에 가속도 변화가 일어나면 패들과 기판 간격이 축소됨으로서 축전기내부의 전계강도와 전하량이 변화하여 정전기회로(circuit of electrostatic force)에 전류가 흘러 가속도의 변화량을 터널 갭에서 감지한다. 양자역학에서 에너지장벽을 극복하는 터널전류 효과를 검침력으로 이용하는 마이크로가속도계 센서는, 정전기력을 패들과 기판에 직접 작용시키고 있기 때문에 전계의 형상을 효과적으로 설계하면 패들 위치를 제어할 수 있다. 센서의 전체적인 형상을 대칭적으로 설계함으로써, 온도 변화시 열응력과 열변형이 최소화시킬 수 있으며 다른 축 방향의 감도를 저감할 수 있다.

2.3 마이크로머시닝 공정의 돌출 불량현상

SOI웨이퍼로 만든 마이크로가속도계 센서에서 불량 현상은 크게 나누어 세 가지가 있다. 첫째는 Fig. 2의 (a)와 같이 건조시, 에칭액의 표면장력으로 인하여 패들이 기판에 붙어버리는 현상이다. 이 현상은 지지부분과 연결된 부가빔(additional beam)을 설치하고, 부식액의 건조공정에서 오븐에 열풍순환 시스템을 이용함으로써 해결될 수 있다. 두 번째 불량현상은 희생층 부식공정의 시간조절 오차로 인해 부식의 과다 또는 과소로 패들 형상이 명확하지 않게 만들어지는 현상으로 Fig. 2의 (b)와 같다. 이 현상은 부식액의 농도와 시간의 정확한 조절로 극복될 수 있다. 마지막으로 Fig. 2의 (c)에서 알 수 있듯이, 터널 갭에서 FIB을 이용한 절단시 잔류열변형으로 발생하는 돌출 불량현상이다. 본 연구는 다양한 불량현상 가운데 하나인 마이크로머시닝 공정에서 수직방향으로 일어나는 돌출 불량현상 원인을 정량적으로 규명하고자 한다.



(a) Stuck down paddle after wet etching **(b) Over-etching at corners** **(c) Paddle pops up after FIB cut at tunnel gap**

Fig. 2 Badness phenomenons for microaccelerometer sensor by SOI wafer

3. 유한요소 모델링과 해석과정

3.1 마이크로머시닝의 공정해석

마이크로가속도계 센서의 제작에서 사용하는 FIB 가공은, 고속으로 운동하는 전자가 물질에 충돌하였을 때 그 운동에너지가 열에너지로 변화하는 현상을 이용한 가공법으로 수십 eV~수백 keV의 에너지를 가진 불활성 이온을 고체 표면에 투사시킨다. 투사된 이온은 고체 원자와 충돌을 반복하면서 그 속에 침입해서 정류하거나, 고체 구성원자가 그 표면에서 진공중에 방출되는 이른바 스패터링(spattering) 현상을 일으킨다. 스패터링 현상은 고체표면을 원자·분자의 단위로 제거하는 공정이나 대향기판에 부착시키는 부착가공에 이용된다. 냉각공정은 마이크로가속도계 센서의 형상에 따른 열전달계수를 다르게 적용하여 온도분포의 거동과 열응력 및 열변형량을 유한요소법으로 해석하였다.

3.2 형상모델링 및 해석과정

SOI웨이퍼를 모재로 제작한 터널전류 원리의 마이크로가속도계 센서를, 유한개의 절점과 요소로 분할한 형상과 외팔보 지지대를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 절점과 요소의 갯수는 각각 1088개와 950개이다. Fig. 4에 시뮬레이션 과정을 보여 주고 있다.

유한요소 해석과정은 터널 갭과 부가 빔의 FIB 절단공정에서 잔류열응력과 열변형 문제로 해석[9]하였다. 유한요소 해석 상용코드인 ANSYS V5.5.3로 해석 모델을 형성할 때, 자동요소분할 기법을 사용하였으며 2차원 요소인 쉘 타입

Table 1 Mechanical properties of single crystal silicon(SCS)

Properties	Value	Unit
Density	2.33	g/cc
Heat capacity	0.18	cal/g℃(18~100℃)
Thermal conductivity	0.3	cal/sec㎝℃(20℃)
Young's modulus	1.9E10[12]	dynes/㎠
Poisson's ratio	0.3	
Heat expansion coefficient	2.33E10[-6]	/℃

(2-D shell type)을 이용하여 모델링 하였다. Table 1는 SCS 재료의 물성치[11]이며, 해석 프로그램에 입력하였다. 온도분포 해석에서는 밀도, 열전도계수, 비열이 사용되었고, 열응력해석에서는 탄성계수(Young's modulus), 포아송 비(Poisson's ratio), 열팽창계수 등의 물성치 등을 사용하였다.

4. 연구결과 및 고찰

마이크로머시닝의 FIB공정에서 마이크로가속도계 터널 갭과 패들 중심부의 온도증가 거동을 Fig. 5에 나타냈다. 터널 갭 부분을 상온에서 FIB가공하여, 패들 전체가 100℃에 도달하는 시간과 온도양상을 나타낸 것이 (a)그림이다. 가열이 완료되는 시간은 2.8×10-5초이며 90℃에 도달하는데 소요하는 시간은 1.6×10^{-7}초이다. 가열개시부터 최고온도 90%에 해당온도까지 구간에서는 급속도로 온도가 증가하였으나, 이후 소요시간 구역에서는 보다 완만하게 온도가

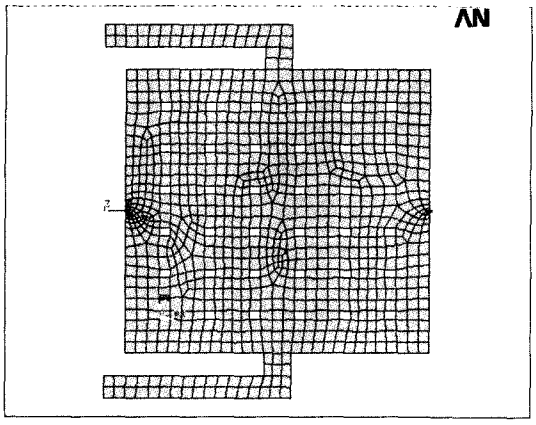


Fig. 3 Finite element model for SOI wafer

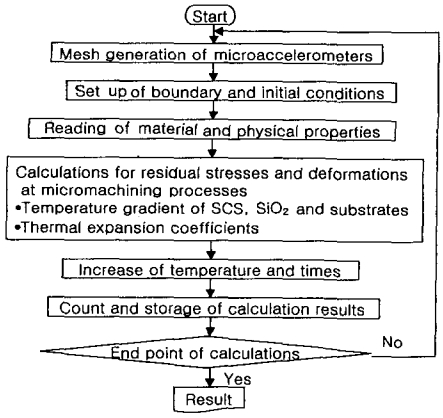
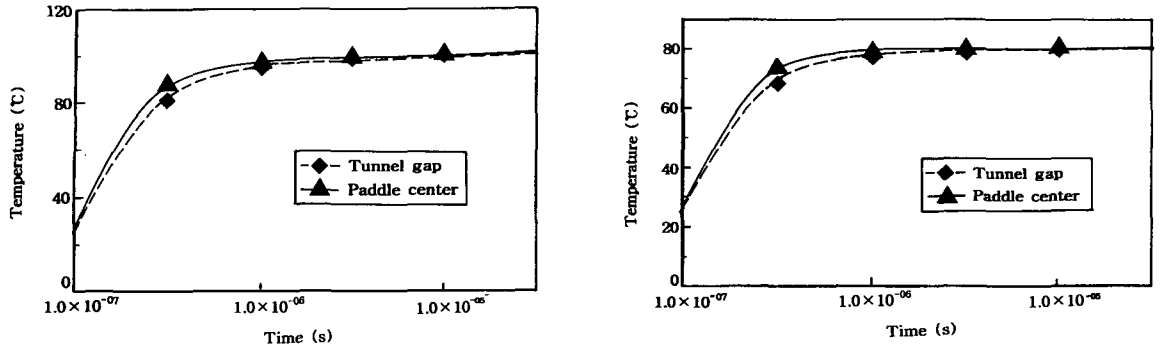
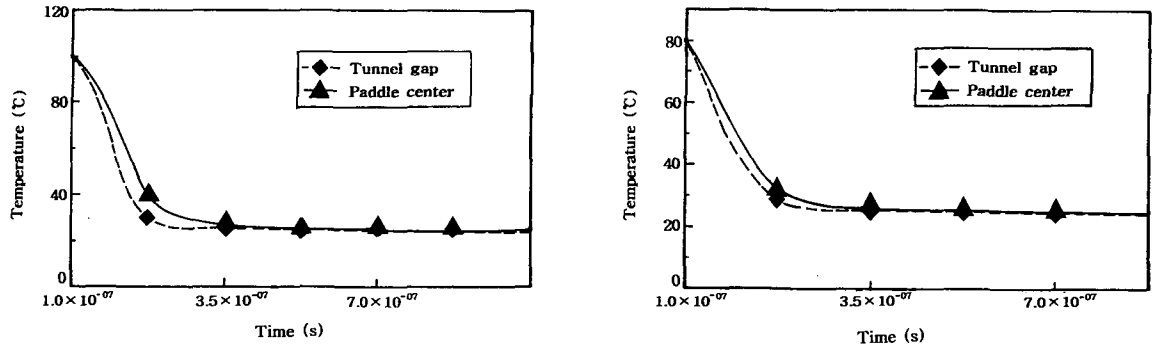


Fig. 4 Analysis procedure for residual stress and deformations of microaccelerometer



(a) FIB cutting process at tunnel gap (25℃ → 100℃) (b) FIB cutting process at additional beam (25℃ → 80℃)

Fig. 5 Heating curves of the microaccelerometer by FIB cutting processes



(a) FIB cutting process at tunnel gap (100℃ → 25℃) (b) FIB cutting process at additional beam (80℃ → 25℃)

Fig. 6 Cooling curves of the microaccelerometer by FIB cutting processes

상승하였다. 따라서 가열개시 1.0×10^{-6}초 이전에 형성되는 급격한 온도 구배로 인하여 열팽창의 우려가 존재한다. 부가 빔 부분을 가열하여 패들 전체가 80℃가 되는 시간과 온도의 관계를 나타낸 것이 (b)이며, 패들 전체가 80℃가 되는데 소요된 시간은 2.4×10^{-5} 초이고 전체적인 경향은 (a) 그림과 유사하다.

FIB공정이 종료된 이후, 진공상태의 냉각공정에서 각 부위에 대한 시간경과에 따른 온도분포를 보여주는 것이 Fig. 6이다. 그 가운데 (a)그림은, 패들 전체가 100℃까지 가열된 후에 진공 중에서 상온(25℃)까지 냉각시킬 때 소요되는 시간과 온도의 관계를 나타낸 것이다. 냉각이 완료되는 시간은 3.5×10^{-7}초이다. 패들의 100℃가열 소요시간과, 상온으로 냉각하는데 걸리는 시간을 비교해 보았을 때, 냉각 소요시간이 12%정도 적다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 마이크로가속도계 형상이 면적과 두께를 비교해 보았을 때, 상대적으로 면적이 넓어 냉각이 빠르게 일어나기 때문으로 사료된다. 패들을 80℃로 가열한 후에 진공에서 상온으로 냉각을 시켰을 때, 소요되는 시간을 나타낸 것이 (b)그림이다. 패들 전체가 25℃가 되는데 걸리는 시간은 대략 3.2×10^{-7}초이다.

Fig. 7은 100℃까지 가열 완료된 상태에서, 마이크로가속도계 센서의 열팽창 변형량을 나타낸 것이다. 외팔보 끝부분을 중심으로 방사형으로 변형량이 확대되고 있다. 패들에서는 부가 빔 부분보다 터널 갭에서 변형량이 점차로 커져 돌출 불량현상을 유발할 수 있을 것으로 보인다. 터널 갭에서 최대 열팽창은 0.06㎛정도가 이루어지고 있는데 이것은 돌출불량 현상의 여러 요인 가운데 하나라고 생각된다. 아울러 FIB 가열공정에서 1℃가 증가할 때 0.8×10^{-3}㎛정

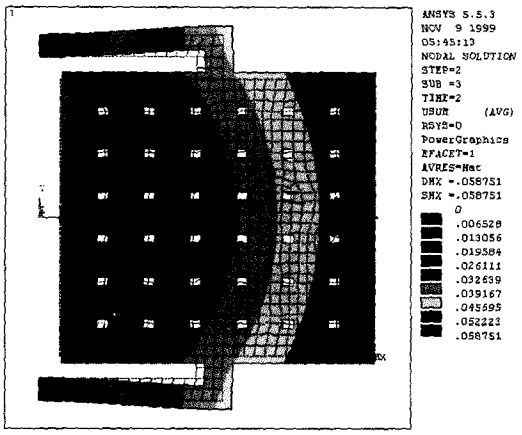


Fig. 7 Contours plot of thermal expansion distributions after heating processes

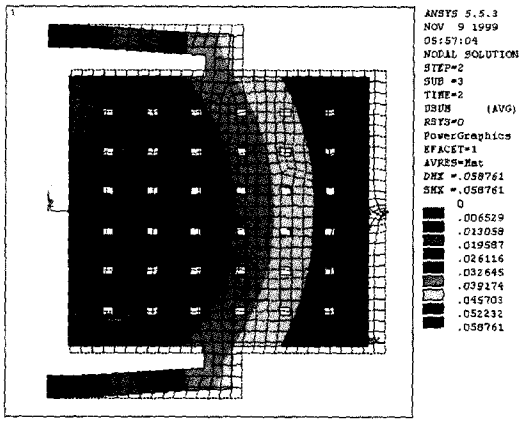


Fig. 8 Contours plot of thermal contraction distributions after cooling processes

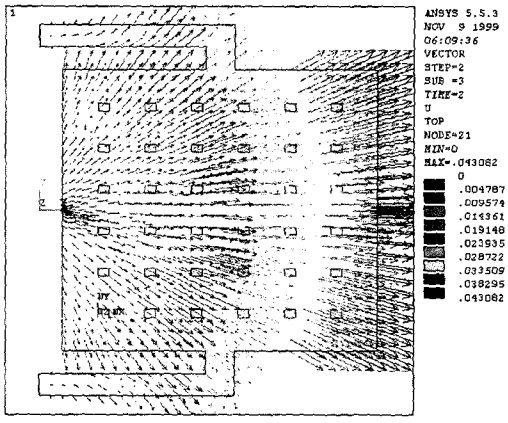


Fig. 9 Vector plot for thermal expansion after heating process

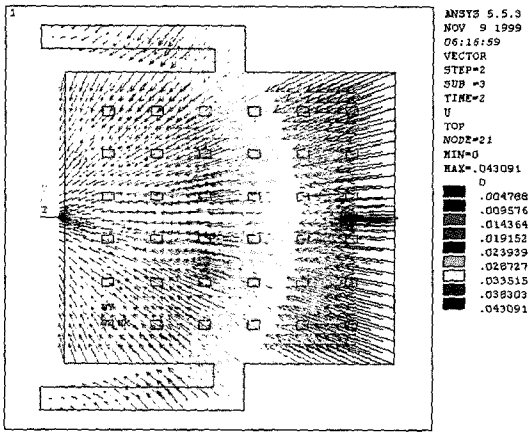


Fig. 10 Vector plot for thermal contraction after cooling process

도의 열팽창이 예측된다.

패들을 가열한 후에 상온까지 냉각을 시켰을 때 패들과 변형량을 나타낸 Fig. 8은, 외팔보의 끝단이 구속되어 외팔보의 기초 부분에는 변형량이 없다. 그리고 전체적인 형상도 초기 패들 형상의 크기보다는 작아졌다는 것과, 동시에 미세한 수축 변형량도 존재한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 부가 빔 부분을 80℃까지 가열한 후 패들 전체의 열팽창 변형량을 벡터 형상으로 나타낸 것이다. 패들 중심부에서 바깥쪽으로 벡터가 발산되는 것을 알 수 있고, 형상은 기본형상보다 커졌다. 수평방향 대칭축을 중심으로 터널 갭을 향하는 벡터는 직선이지만, 모서리부분과 외팔보와 연결되는 부위에서 벡터양상은 방사형을 취하고 있으므로 향후 FIB공정이 완료된 이후 열변형이 유발될 가능성이 많다.

외팔보 부분을 구속한 후 냉각을 시켰을 때, 열수축 변형량을 벡터로 나타낸 것이 Fig. 10이다. 가열했을 때와 비슷한 구조로 보이지만, 외팔보 지지대 부분을 중심으로 안쪽으로 벡터 방향이 향해 있다는 것과 본래의 형상보다 작아졌다는 것 알 수 있다. 아울러 패들과 외팔보의 접속부에서 변형량 벡터가 크게 발생하므로, 이곳에서 잔류 열응력과 변형량이 집중될 것으로 예측할 수 있다.

5. 결 론

터널전류 효과를 검침력으로 이용하는 SCS의 마이크로 가속도계 센서의 제작공정에서 발생하는 잔류열응력 및 열변형을 돌출 불량현상의 여러 가지 원인 가운데 하나로 설정하고, 유한요소법으로 해석한 결과를 얻었다.

(1) FIB공정의 가열개시로부터 최고온도 90%에 해당온도까지 구간에서는 1.0×10^{-1}초 동안 44℃가 증가하였으나, 이후 구역에서는 7.5℃정도 밖에 증가하지 않았으므로 온도 구배로 인한 열응력과 열팽창이 우려된다.
(2) 냉각공정에서 국부적으로 과냉각 현상이 나타난 것은 패들에 존재하는 36개의 구멍에서 열전달 거동이 활발하게 나타났기 때문이며, 유한요소 해석과정에서 면밀한 열전달 계수의 적용이 필요하다.
(3) 마이크로가속도계 센서의 외팔보의 모서리 부분에서 방사형으로 변형량이 확대되는 것은, 부가 빔 부분보다는 터널 갭 부분에서 변형량이 점차로 확대되어 돌출 불량현상을 유발할 가능성이 확대된다는 것을 알 수 있다.

향후 정량적인 물성치들의 온도 의존성들을 고려한 해석적 수법의 후속 연구가 필요하다고 생각한다.

참 고 문 헌

(1) J. Bryzek, "Impact of MEMS Technology on Society", Sensors and Actuators, A56, pp. 1～9, 1996.
(2) 조영호, "미소 기계-전자 집적시스템의 응용과 실제", 대한기계학회지, 제32권, 제7호, pp. 588～603. 1992.
(3) O. S. Kim, S. Yoshimura and G. Yagawa, "Analyses of Joule Heat and Stresses for Microaccelerometer Based on a Tunneling Current Concept", JSME Centennial Grand Congress, The 10th Computational Mechanics Conference, No. 97-7, pp. 59～60, 1997.
(4) O. S. Kim, "A Study on the Thermal Behavior in Microaccelerometer manufacturing Processes", KSME International Journal, Vol. 12, No. 6, pp. 1126～1134, 1998.
(5) J. R. Gilbert et al, "Implementation of a MEMCAD System for Electrostatic and Mechanical Analysis of Complex Structures from Mask Descriptions", Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderadale, pp. 207, 1993.
(6) S. Crary, O. Juma and Y. Zhang, "Software Tools for Designers of Sensor and Actuator CAE Systems", IEEE Solid-state Sensors and Actuators (Transducers '91), San Francisco, CA, USA, pp. 498, 1991.
(7) 김옥삼, "터널전류 효과를 이용한 미소가속도계의 마이크로머시닝 공정에서 온도분포 해석", 한국공작기계학회지, 제9권, 제5호, pp. 105～111, 2000.
(8) 김창진, "MEMS에서의 마이크로 가공기술", 대한기계학회지, 제33권, 제6호, pp. 515～522, 1993.
(9) 金鈺三, 吉村忍, 矢川元基, "トンネル電流原理に基づくマイクロ加速度センサ-のジュ-ル發熱および應力解析, 日本機械學會計算力學部門, 第10回計算力學講演會," No. 97-7, O. S. 7-3, pp. 59～60, 1997.
(10) R. J. Young, "Micro-machining using a Focused Ion Beam." Vacuum, Vol. 44, pp. 353, 1993.
(11) K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Materials", Proc. of IEEE., Vol. 70, No. 5, pp. 420, 1992.