

온도변화에 따른 MEMS 자이로스코프 패키지의 미소변형 측정

주진원^{a*} · 최용서^a · 좌성훈^b · 김종석^b · 정병길^b

¹충북대학교 기계공학부, ²삼성종합기술원 MEMS Lab.

Deformation Behavior of MEMS Gyroscope Package Subjected to Temperature Change

Jin-Won Joo^a, Yong-seo Choi^a, Sung-Hoon Choa^b, Jong-Seok Kim^b and Byung-Gil Jeong^b

^aDepartment of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-760

^bSamsung Advanced Institute of Technology, MEMS Lab.

초 록: MEMS 소자의 패키지는 일반적으로 패키징 과정에서 큰 온도변화를 받게 되는데, 이에 의한 패키지의 변형은 패키지 및 소자의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서는 진동형 MEMS 자이로스코프 센서의 패키지를 대상으로 하여, 온도변화로 인한 열변형 거동에 대한 광학실험과 해석을 수행하였다. 이를 위하여 실시간 모아레 간섭계를 이용하여 각 온도단계에서 변위분포를 나타내는 간섭무늬를 얻고, 그로부터 MEMS 패키지의 굽힘변형 거동 및 인장변형에 대한 해석을 수행하였다. MEMS 칩과 EMC 및 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 패키지는 125°C 이하에서는 전체적으로 아래로 볼록한 굽힘변형이 발생하였으며, 온도 140°C를 정점으로 그 이상의 온도에서는 반대의 굽힘변형이 발생하였다. MEMS의 주파수에 영향을 줄 수 있는 칩 자체의 수축변형률은 약 481×10^{-6} 로 측정되어서 MEMS 설계 시 이를 고려하여야 함을 알 수 있다

Abstract: In MEMS devices, packaging induced stress or stress induced structure deformation become increasing concerns since it directly affects the performance of the device. In this paper, deformation behavior of MEMS gyroscope package subjected to temperature change is investigated using high-sensitivity moiré interferometry. Using the real-time moiré setup, fringe patterns are recorded and analyzed at several temperatures. Temperature dependent analyses of warpages and extensions/contractions of the package are presented. Linear elastic behavior is documented in the temperature region of room temperature to 125°C. Analysis of the package reveals that global bending occurs due to the mismatch of thermal expansion coefficient between the chip, the molding compound and the PCB. Detailed global and local deformations of the package by temperature change are investigated, concerning the variation of natural frequency of MEMS gyro chip.

Keywords: Board Level Package, MEMS Gyroscope Package, Moiré Interferometry, Thermo-mechanical behavior

1. 서 론

최근에 반도체 칩과 MEMS (Micro Electro Mechan-

ical Systems) 칩과 같은 초소형 전자부품은 빠른 속도로 소형화, 고집적화가 이루어지고 있고, 앞으로 그 속도는 점점 빨라질 것으로 예상된다. 이

*Corresponding author
E-mail: jinwon@chungbuk.ac.kr

에 따라 칩을 보호하고 있는 패키지 및 연결부위의 기계적인 파손 및 신뢰성이 중요하게 해결해야 할 과제로 부각되고 있다. 이러한 전자 패키지는 서로 다른 열팽창계수와 탄성계수를 갖는 여러 가지의 재료로 구성되어 있다. 칩 주변 환경의 온도 변화가 발생하거나 칩에 전력이 공급되어 온도 변화가 생기면, 각각의 재료는 다른 비율로 변형하게 되어 그 사이에서 심한 열응력이 발생하게 된다.

자이로스코프는 선박과 항공기 등 이동체의 자세와 각속도를 검출하는 센서로 이용되어 왔으며, 최근에는 캠코더의 손떨림 보상, 차량 주행 안정화 장치 등에 활용되고 있다. 이와 함께 소형화와 가격 경쟁력에서 유리한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 진동형 자이로스코프의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다¹⁾. MEMS 패키지의 경우, 반도체 패키지에 비하여 패키징 시에 발생하는 잔류변형 및 열응력이 소자의 성능에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다²⁾. MEMS 소자의 패키지는 일반적으로 패키징 과정에서 큰 온도변화를 받게 되는데, 이에 의한 패키지의 변형은 패키지 및 소자의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 본 논문에서 대상으로 하는 자이로스코프 (gyroscope) 센서의 경우 패키지의 변형으로 인하여 MEMS 구조물의 공진 주파수가 변화되며, 이는 소자 성능의 저하를 초래한다³⁾. 따라서 신뢰성 있는 MEMS 패키지의 설계와 성능향상을 위해서는 온도변화로 인한 변형 거동에 대한 신뢰성 있는 측정방법이 선행되어야 한다.

미소전자부품의 변형을 측정하는 방법으로 최근에는 레이저를 사용하는 모아레 간섭계 기술⁴⁾이 개발되어 아주 높은 정밀도를 가지고 응용되고 있다. 모아레 간섭법은 정밀도가 대단히 높고 비접촉으로 전체영역의 변형 상태를 측정할 수 있으며 주위환경에 민감하지 않다는 장점을 가지고 있다. 이러한 특성으로 모아레 간섭법은 최근에 반도체 패키지와 같은 초소형 전자 부품들의 열변형 해석⁵⁻¹³⁾에 효과적으로 이용되어 왔다.

본 논문에서는 진동형 MEMS 자이로스코프 센서의 패키지를 대상으로 하여, 온도변화로 인한 열변형 거동에 대한 광학실험과 해석을 수행하였다. 이를 위하여 실시간 모아레 간섭계를 이용하여 각 온도단계에서 변위분포를 나타내는 간섭무늬를 얻고, 그로부터 MEMS 패키지의 굽힘변형

거동 및 인장변형에 대한 해석을 수행하였다.

2. MEMS 자이로스코프 센서 및 패키지

2.1 MEMS 자이로스코프 센서

본 연구에서 사용된 자이로스코프 센서는 진동형 MEMS 자이로스코프로써 그 대략적인 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 진동형 자이로스코프는 구동 스프링, 센싱 스프링과 매우 많은 수의 센싱 콤(comb) 및 구동 콤들로 이루어져 있으며, 정전기적인 힘에 의해 구조물을 특정 방향으로 진동시킨 상태에서 외부에서 각회전을 주었을 때, 진동과 회전방향의 직각방향에 나타나는 코리올리 힘(Coriolis force)을 검출하여 각회전의 정도를 측정하도록 되어 있다. 자이로스코프 구조물은 4 inch SOI (Silicon-on-Insulator) 웨이퍼를 이용하여 제작하며, 별도의 유리 웨이퍼에 동공(cavity)을 형성시킨 후, anodic bonding 과정을 통하여 진공 챔버에서 서로 접합함으로써 내부에 형성된 실리콘 구조물이 적절한 댄핑하에서 구동이 될 수 있도록 하였다. 접합이 완료된 후에는 웨이퍼를 진공 챔버에서 꺼내고, 다이싱 공정을 통하여 2.6 × 2.6 mm 크기의 개별칩으로 분리하였다. 본 논문에서는 웨이퍼에서 분리된 개별 자이로스코프 소자를 ‘자이로 칩’으로 칭하였으며, 자이로 칩의 세부 구조는 Fig. 2와 같다. 제작된 자이로 칩의 공진 주파수는 구동방향(x 방향)이 약 7 kHz이며 센싱방향(y 방

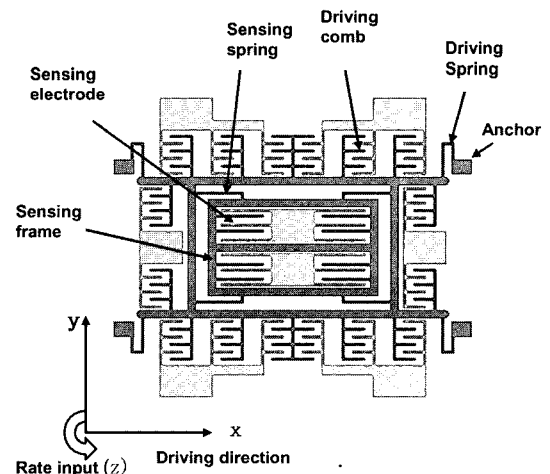


Fig. 1. Schematic diagram of vibratory MEMS gyroscope.

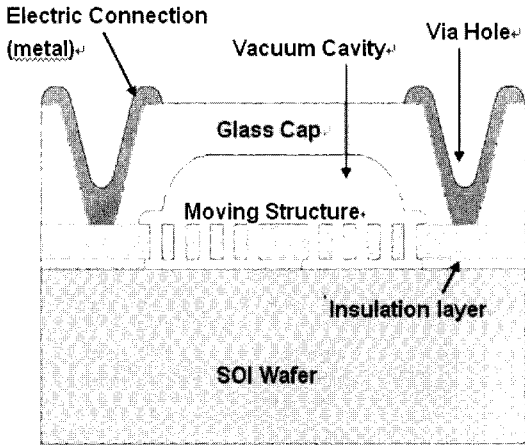


Fig. 2. Cross sectional view of MEMS gyroscope chip.

향)이 약 7.18 kHz이었다.

2.2. MEMS 자이로스코프 센서 패키지

본 논문에서 대상으로 하는 진동형 MEMS 자이로스코프 센서의 패키지는 Fig. 3과 같이 자이로 칩과 PCB 및 에폭시 몰딩 복합체(epoxy molding compound, EMC)로 구성되어 있다. 자이로 칩을 Ag 에폭시를 이용하여 PCB에 접착한 후 와이어 본딩(wire bonding)하고 그 주위를 EMC로 패키징한다.

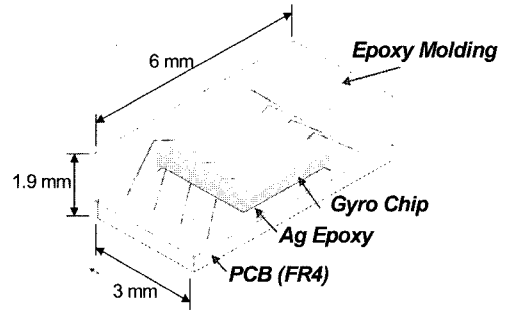


Fig. 3. Structure of MEMS gyroscope package.

자이로 칩을 패키징할 때에는 여러 공정을 거치지만, 그 중 온도변화에 의한 변형이 발생할 수 있는 공정을 Fig. 4에 나타내었다. MEMS 구조물이 제작된 실리콘 웨이퍼에 유리 웨이퍼를 460°C에서 anodic bonding에 의하여 접합시킨 후, 이를 상온까지 자연 냉각시킨다. 이와 같이 접합된 웨이퍼는 실리콘과 유리 웨이퍼의 온도에 따른 열팽창 계수 차이로 인하여 상온에서 굽힘변형이 발생된다. 이러한 굽힘변형은 4 inch 웨이퍼 전체에서 최대 약 130 μm 정도이나, 웨이퍼에서 각각의 개별 자이로 칩으로 절단하였을 때는 그보다 훨씬 작아져서 굽힘변형은 최대 0.1 μm 이하 되는 것으로 알려져 있다.

이와 같이 제작된 MEMS 칩은 약 130°C 정도에

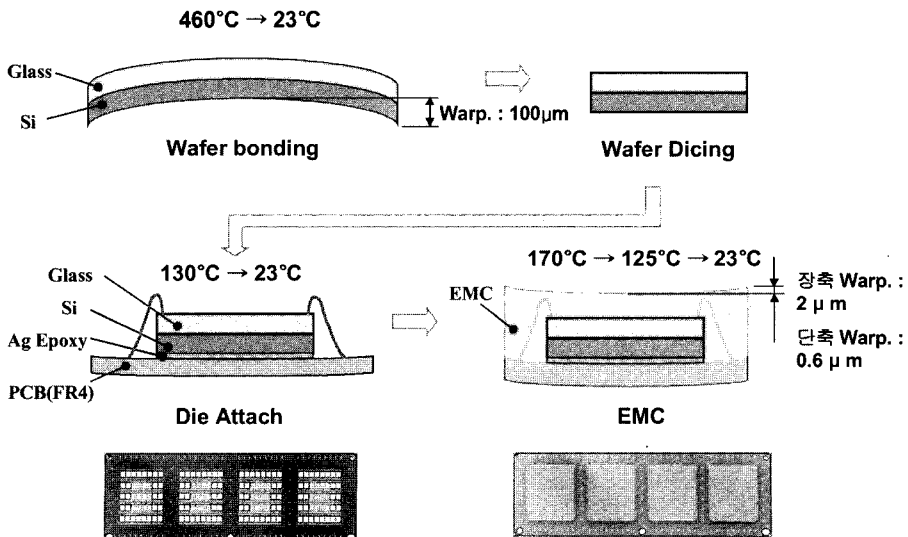


Fig. 4. Packaging process of MEMS gyroscope packages.

서 FR4 재질의 PCB에 Ag 에폭시로 접합 연결되며 와이어 본딩 후에는 이를 패키지로 제작하기 위해서 175°C 정도의 높은 온도에서 EMC로 몰딩을 하고 125°C 정도에서 안정시킨 후 상온으로 온도를 내리게 된다. 이 과정에서 MEMS 패키지는 전체적으로는 화학적, 기계적 수축변형을 하게 되며, 구성 재료의 열팽창계수 차이로 인하여 전체적인 굽힘변형과 국부적인 응력집중이 발생된다. 또한 사용 중에도 MEMS 패키지는 주기적인 온도변화를 받게 되므로 이러한 응력집중은 결국은 패키지를 파손에 이르게 하여 제품의 신뢰성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 패키지의 온도변화는 자이로 칩 내부의 MEMS 구동 구조물의 변형을 초래하여 구동 구조물의 고유 주파수가 변하게 되므로 센서로서 원하는 성능을 얻을 수 없게 된다. 더욱이 자이로 칩의 구동주파수가 결정되면 실질적으로 주파수 변화에 따른 조정 및 보상이 불가능하기 때문에 제작 공정 중에 발생하는 주파수 변화를 최소화 시켜야 할 필요가 있다. 따라서 신뢰성 있는 MEMS 패키지의 설계와 성능향상을 위해서는 온도변화로 인한 패키지의 변형 거동에 대한 측정이 선행되어야 한다. 실제로 10개의 자이로 칩을 EMC 몰딩하였을 때 발생하는 주파수 변화량을 관찰한 결과, EMC 몰딩을 하였을 경우 센싱 방향의 주파수가 평균적으로 약 80 Hz 감소하였으며, 반면에 구동방향으로는 약 2 Hz가 증가하였다. 제작된 자이로 칩의 성능 시험을 한 결과, 주파수의 변화량이 20 Hz를 넘는 경우 감도 및 위상 지연 등의 성능에 많은 영향을 미쳐서 수율 저하의 주요 원인이 되고 있음이 판명되었다.

3. 실험방법

3.1 모아레 간섭법

모아레 간섭법은 빛의 회절(diffraction)과 간섭(interference)이라는 두 가지 성질을 주로 이용하여 평면 내에 정해진 2축(x, y)에 대한 변위 성분을 contour map 형식의 간섭무늬로 나타내는 광학적인 실험방법⁷⁾이다. 모아레 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통, 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 변형하도록 한다. 2축에 대한 변위 성분을 동시에 측정하기 위하여 서로 직각 방향으로 홈이 나 있는 회

절 격자를 사용한다.

얻어지는 간섭무늬들은 시편의 표면에서 각각 x 방향의 변위 U와 y 방향의 변위 V에 대한 등변위 곡선을 나타낸다. 평면의 각 점에서의 변위는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$U(x, y) = \frac{1}{2f_s} N_x(x, y) \quad (1)$$

$$V(x, y) = \frac{1}{2f_s} N_y(x, y)$$

여기서 $N_x(x, y)$ 와 $N_y(x, y)$ 는 위치에 따라 분포하는 간섭무늬의 차수이다. 보통의 경우에 $f_s = 1200$ lines/mm이므로 인접한 간섭무늬 사이는 $0.417 \mu\text{m}$ 의 변위 차이를 나타낸다.

평면내의 변형률을 계산하여야 할 때에는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_x}{\Delta x} \right]$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_y}{\Delta y} \right] \quad (2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_y}{\Delta x} + \frac{\Delta N_x}{\Delta y} \right]$$

3.2 시편준비

본 논문에서 대상으로 하는 자이로 MEMS 패키지는 긴 변 6 mm, 짧은 변 3 mm, 높이 1.9 mm의 직육면체 모양을 하고 있다. 모아레 간섭계를 이용하면 평면의 두 직교하는 변위를 측정할 수 있으므로, Fig. 5와 같이 위에서 아래로 x 방향, z 방향 각각 3면씩 6개의 단면을 선택하였다. 시편은 고속 다이아몬드 원형톱으로 절단하고 표면을 연

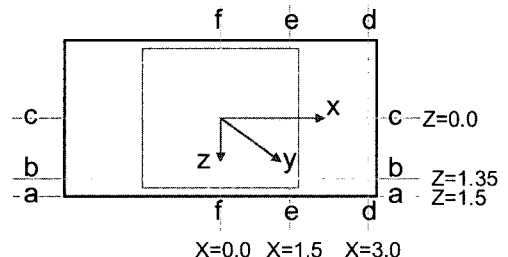


Fig. 5. Selected section of the MEMS package to be measured.

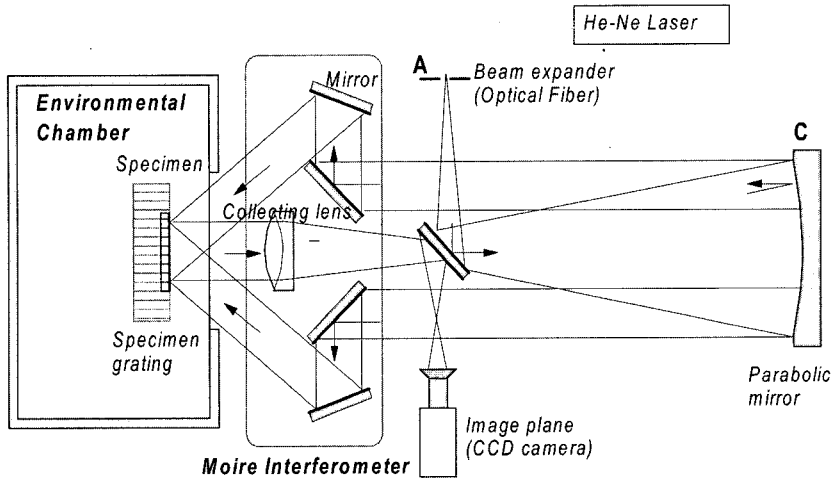


Fig. 6. Schematic illustration of experimental setup with eight-mirror, four-beam moiré interferometer.

마하여 아주 매끄럽게 하였다. 점도가 낮은 상온 에폭시(Tra-Bond F114)를 이용하여 회절격자 물드를 상온(23°C)에서 시편에 복제하여 직각 방향 각각 1200 lines/mm의 주기를 가진 회절격자를 생성하였다.

3.3 실험장치 및 실시간 열하중 시험

본 논문의 측정에 사용된 모아레 간섭계 광학 장치를 Fig. 6에 도식적으로 나타내었다. 10 mW의 He-Ne 레이저에서 발생된 빛은 광섬유를 통하여 진행하고, 광섬유의 끝에서 퍼지게 된다. 구면의 파면을 가지고 퍼진 빛은 6"의 포물면 거울(parabolic mirror)에서 반사된 후 평행광(collimated beam)으로 변화되어 진행한다. 진행된 평행광의 바깥부분은 특별히 제작된 모아레 간섭계의 안쪽 4개의 거울에서 반사되어 바깥쪽 거울로 진행하며, 바깥쪽 거울에서 반사된 각각의 평행광은 회절격자가 부착된 시편의 표면에 상하좌우 4 방향에서 입사각 49.4°를 가지고 입사하게 된다. 시편에서 회절되어 간섭을 일으킨 간섭무늬 영상은 집광렌즈(collecting lens)를 통하여 CCD 카메라로 진행하게 된다.

시편에 온도변화를 주기 위하여 대류방식의 가열과 냉각을 할 수 있는 온도 chamber를 사용하였다. 이 chamber는 진동을 유발할 수 있으므로 광학장치와 시편과의 상대운동을 방지하기 위하여 시편을 고정한 받침대와 간섭계를 chamber 벽을

통해 한 몸체로 연결하였다. 시편의 온도는 열전대를 이용하여 측정하고, 원하는 온도로 빨리 접근하는 동시에 그 온도를 넘지 않도록 chamber의 온도를 컴퓨터 프로그램에 의하여 제어하였다.

시편을 chamber 안에서 고정시킨 후 거울들을 정렬하고 간섭계 전체에 강체회전을 주어 시편과 간섭계의 방향을 일치시켰다. 이렇게 하여 간섭무늬가 가능한 없어진 초기 변위장 (null field)을 얻고 이 때부터 온도 변화를 주어 각 온도단계에서 간섭무늬를 얻어내었다. CCD 카메라와 영상처리 장치를 이용하여 간섭무늬를 기록하였고 줌렌즈를 이용하여 영상을 확대하여 기록하였다. 온도에 따른 재료의 비선형 거동이나 소성변형이 발생할 가능성이 있으므로 Fig. 7과 같이 첫 사이클에서는 100°C 까지 온도를 단계적으로 올렸다가 다시 상

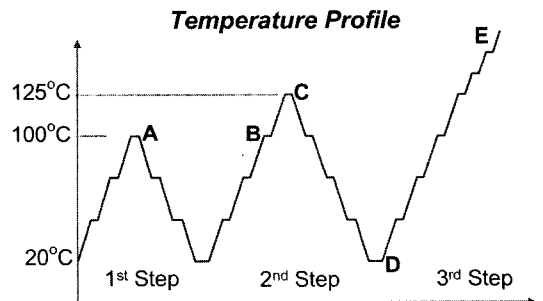


Fig. 7. Temperature excursion of the experiment.

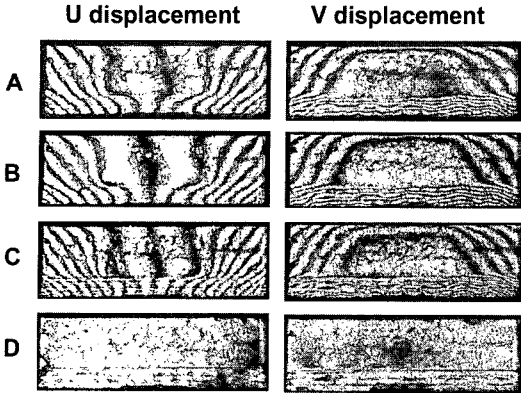


Fig. 8. Representative fringe patterns of the gyro MEMS package.

온도로 내렸고, 두 번째 사이클에서는 125°C까지 온도를 단계적으로 올렸다가 다시 상온으로 내렸다. 그 다음에는 그 이상의 고온에서 MEMS 패키지의 변형 거동을 알아보기 위하여 간섭무늬를 판별할 수 있을 때까지 온도를 올렸다. 150°C 이상의 온도에서는 회절격자 몰드의 유변형으로 인하여 간섭무늬를 얻을 수 없었다.

4. 결과 및 토의

Fig. 8은 Fig. 7의 A, B, C, D 온도단계에서 기록된 간섭무늬를 보여주고 있다. 두 사이클 모두 상온으로 돌아왔을 때는 거의 변형이 없는 null field가 얻어졌으며 A와 B의 온도 단계에서 간섭무늬는 거의 일치하여서 적어도 125°C까지는 비선형 거동이나 소성변형이 거의 발생하지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 9는 두 번째 온도 사이클에서 온도에 따른 칩 중간선 오른쪽 끝 ($x=3\text{ mm}$, $y=1\text{ mm}$) 지점의 U 변위 (팽창 변위)와 V 변위 (굽힘 변위)를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 상온에서 125°C까지는 거의 선형적으로 변형하였고 125°C에서 U 변위는 약 2.71 μm , V 변위는 1.56 μm 의 값을 나타내었으며 온도를 낮추었을 때에도 같은 온도에서 거의 같은 변위 값을 보였다.

Fig. 10은 온도가 125°C ($\Delta T=102^\circ\text{C}$)일 때에 Fig. 5에서 표시한 6개의 단면에서 측정된 간섭무늬를 보여주고 있다. 각 지점에서 U 변위(길이방향 변위)를 보면 실리콘 웨이퍼나 유리가 있는 부분(즉 자이로 칩)에는 변위가 대단히 작고 EMC가 있는

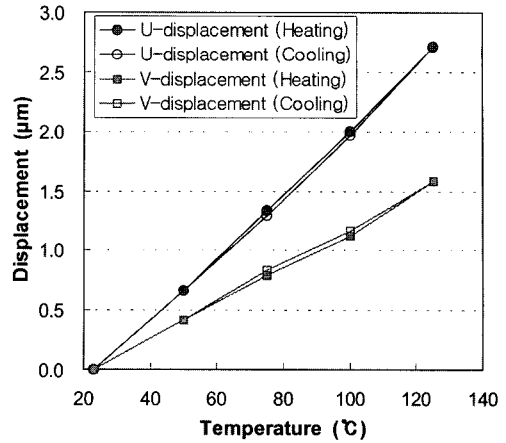


Fig. 9. Horizontal and vertical displacements according to the temperature.

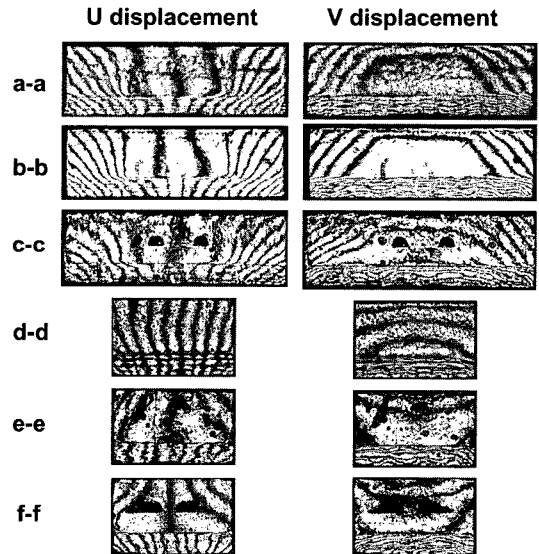


Fig. 10. Fringe patterns on the selected cross sections at the temperature of 125°C.

부분은 변위가 크며, PCB가 있는 부분은 변위가 대단히 커서 각 재료의 열팽창계수에 따른 변형의 차이를 볼 수 있다. Fig. 10의 a-a, b-b, c-c 단면의 U 변위 간섭무늬에서 보는 바와 같이 칩이 위치하는 윗 부분은 간격이 넓고 PCB가 있는 아랫 부분은 간격이 좁아 전체적인 인장변형과 함께 아래로 볼록한 굽힘변형(warping)이 일어났음을 알 수 있다. V 변위를 나타내는 간섭무늬를 분석해 보면 이러한 굽힘변위를 정량적으로 구할 수 있다. 칩이 있는 부분에는 낮은 열팽창계수와 높은 강성으로

인하여 변형이 거의 일어나지 않았고, EMC가 있는 부분에는 변위가 크게 발생하였음을 알 수 있다. V 변위에서 PCB 부분에 많은 간섭무늬가 생긴 것은 PCB의 면의 방향(y 방향)의 열팽창계수가 면내방향에 비해 대단히 크기 때문이고, 면내 방향의 열팽창계수는 EMC의 열팽창계수와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 23°C를 기준으로 온도가 125°C일 때, 긴 쪽 단면(x-y 단면)의 칩 중간부분을 따라서 발생하는 굽힘변위(V 변위)의 분포를 보여주고 있다. 중간부분(c-c 단면)의 굽힘변위가 바깥부분(b-b 단면)의 굽힘변위 보다 작게 나타났으나, 큰 차이는 없었다. 실리콘 칩이 있는 부분에는 PCB와의 큰 열팽창계수의 차이로 인하여 굽힘이 일어났

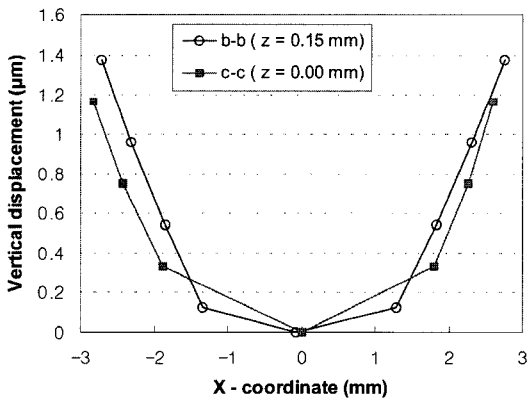


Fig. 11. Distributions of vertical displacement on the longer surfaces at the temperature of 125°C.

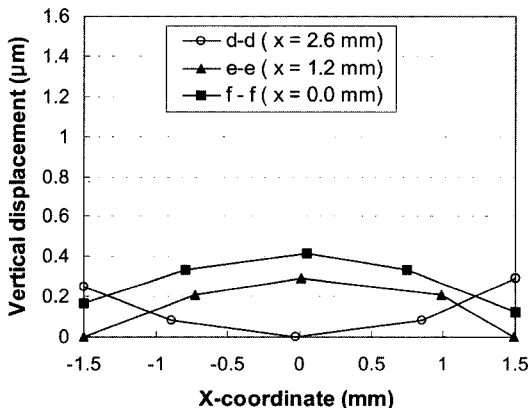


Fig. 12. Distributions of vertical displacement on the shorter surfaces at T = 125°C.

나, 칩의 바깥부분, 즉 EMC가 있는 부분에는 PCB와 열팽창계수에 큰 차이가 없으므로 굽힘이 일어나기보다는 거의 직선적으로 회전하였다. 온도가 125°C일 때 최대 굽힘변위는 중간부분에서 약 1.3 µm, 바깥부분에서는 약 1.7 µm 정도 발생하였다.

Fig. 12는 온도가 125°C일 때, 짧은 쪽 단면(y-z 단면)의 칩 중간부분을 따라서 발생하는 굽힘변형(V 변위)의 분포를 보여주고 있다. 굽힘변위의 크기는 긴 쪽 단면 보다 상당히 작게 나타났으며, 칩이 있는 중간 부분(e-e 단면, f-f 단면)에는 반대방향(위로 볼록)의 굽힘이 발생되었다. 이것은 칩과 PCB를 접착하는 Ag 에폭시의 접착력이 고온에서 감소함으로 인해 PCB와의 결합이 약해졌기 때문이다. Fig. 13은 125°C일 때 패키지의 윗면이 변형된 모습을 보여주고 있다. 이 꼭면은 몇 개의 지점에서 측정된 V 변위로부터 근사하여 얻어진 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 긴 방향으로 굽힘이 주로 일어났으며 짧은 방향으로 일부에서 반대방향의 작은 굽힘이 일어났다.

Fig. 14는 긴 쪽의 중앙 단면(z=0 mm)에서 칩 가장자리 부분의 수직선(x=1.2 mm)과 패키지 가장자리 부분의 수직선(x=2.6 mm)를 따라서 분포하는 수평방향 변위(U 변위) 분포를 보여주고 있다. 굽힘변형으로 인하여 PCB 쪽으로 갈수록 큰 변위가 발생되었다. 패키지의 가장자리 부분에서는 U 변위가 연속적으로 분포하였으나, 칩 가장자리 부분에서는 PCB와 칩과의 경계에 있는 Ag 에폭시 부근에서 U 변위의 차이가 커서 에폭시의 전단변형률이 대단히 크거나, 미끄러짐이 일어났음을 보여

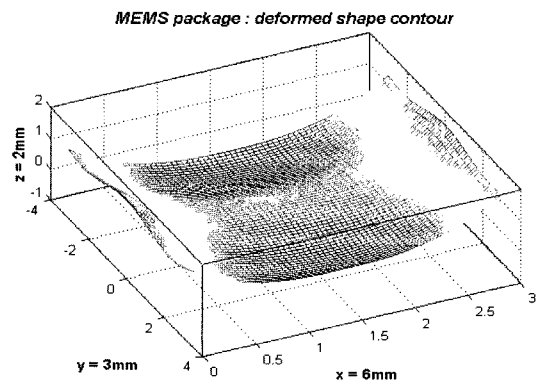


Fig. 13. Warpage of upper surface of the gyro MEMS at T = 125°C.

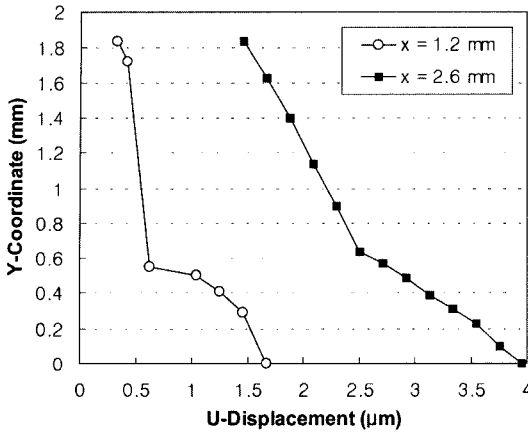


Fig. 14. Distributions of horizontal displacement on the longer section c-c at T=125°C.

준다. 그러나 이러한 불연속은 온도가 상온으로 돌아오면 원상 복구되어 없어진다. PCB와 자이로 칩 간에 발생하는 미끄러짐은 신호의 불안정 및 성능에 치명적인 영향을 미칠 수 있기 때문에 온도의 변화에 따르는 미끄러짐이 최소가 되도록 설계되어야 한다.

Fig. 15는 짧은 쪽의 단면에서 가장자리의 수직 선을 따라 분포하는 수평방향 변위의 분포를 보여주고 있다. EMC만 있는 단면 d-d에서는 변위가 연속적으로 분포하였으나, 칩이 있는 중간 부분의 단면에서는 경계부분에서 큰 불연속을 보였다. Ag 에폭시 부근에서 일어나는 U 변위의 차이는

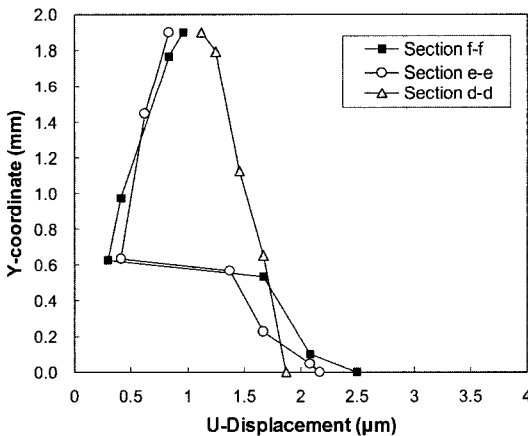


Fig. 15. Distributions of horizontal displacement on the shorter sections at T=125°C.

짧은 쪽 단면에서는 대단히 커져서, 칩과 PCB가 거의 제한을 받지 않고 독립적으로 변형함을 볼 수 있다. 이러한 이유로 짧은 방향의 굽힘변형은 대단히 작게 발생하였으며, PCB를 제외한 패키지 부분에서는 반대방향의 굽힘변위가 약간 발생하였다. 따라서 전체적으로 굽힘변형은 긴 쪽으로만 일어나는 거동을 보였다.

Fig. 16은 긴 쪽의 중앙 단면(z=0 mm)에서 125°C로 온도가 상승하였을 때 발생한 인장변형률의 분포를 보여주고 있다. 이것은 Fig. 10의 간섭무늬와 식(2)에 의해 계산된 값이다. 인장변형률은 각 재료의 팽창과 굽힘변형의 중첩으로 인하여 PCB 부분, 칩 부분, EMC 부분의 순으로 크게 발생하였으며 칩이 있는 부분은 다른 부분보다 작게 발생되었다. 평균 인장변형률은 패키지 윗 표면, 칩 중간 부분, 패키지 아랫 표면을 따라서 각각 556×10^{-6} , 779×10^{-6} , 1146×10^{-6} 로 계산되었다. 또한 MEMS의 주파수에 영향을 줄 수 있는 칩 부분만의 평균 변형률은 약 481×10^{-6} 로 계산되었으며, 이것은 MEMS 구조물의 주파수 등에 영향을 미치므로 설계 시에는 이에 해당하는 수축변형률을 고려하여야 함을 알 수 있다.

앞에서 기술한 굽힘변형 및 팽창변형은 상온을 기준으로 온도가 상승하였을 때의 변형을 나타내고 있다. 자이로 MEMS 패키지를 제작할 때에는 높은 온도에서 (175°C 정도) EMC로 몰딩을 하고 125°C 정도에서 안정시킨 후 상온으로 온도를 내리게 된다. 온도에 따라 패키지 변형을 추측하여

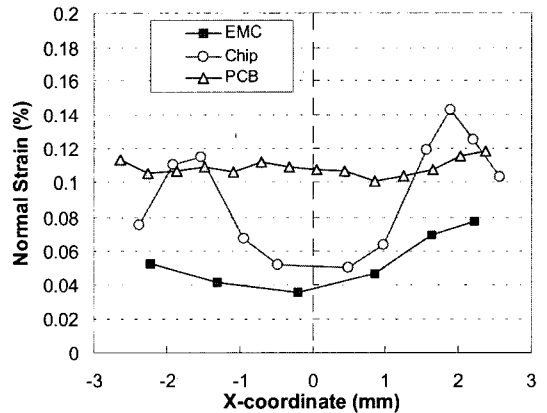


Fig. 16. Normal strain distributions on the longer section c-c.

보면 175°C에서 125°C 사이에서는 cure shrinkage 또는 chemical shrinkage라고 하는 EMC의 수축현상이 비선형적으로 급격하게 발생된다. 실제로 cure shrinkage로 인한 수축량은 체적의 0.15~0.6%까지 발생하며, 이때 발생하는 응력 및 변형은 열팽창계수의 차이로 인한 응력 및 변형량과 유사한 크기로 보고되고 있다¹⁴⁾. 한편 125°C에서 상온까지는 열팽창계수의 차이로 인한 선형적인 변형이 발생된다. 이와 같은 큰 온도변화에 따른 패키지의 열변형 상태를 예측하기 위하여 상온으로부터 간섭무늬를 판별할 수 있을 때까지 온도를 높이고 간섭무늬를 기록하였다. Fig. 17은 150°C의 온도까지의 간섭무늬에서 계산된 패키지 윗면의 최대 수직변위 차이(warpage)를 보여주고 있다. 아래로 볼록한 수직변위의 차이는 온도가 125°C에 도달할 때까지는 온도에 따라 거의 선형적으로 증가하다가, 이 이상의 온도에서는 증가율이 작아져서 140°C가 지나면 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 140°C에서의 최대 수직변위 차이는 1.71 μm로 측정되었다. 이 온도에서는 EMC가 점성이 강한 액체상태를 가지게 되므로 열팽창계수가 약 $40 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 대단히 커지게 된다. 따라서 Fig. 18과 같이 온도가 증가함에 따라 급격하게 반대방향(위로 볼록)의 굽힘이 발생할 것으로 예상된다. 패키지 몰딩과정에서의 변형을 해석하기 위해서는 고온에서의 변형을 반대로 이용하면 된다. 즉, 몰딩 후 상온에서는 같은 크기의 반대(위로 볼록) 굽힘

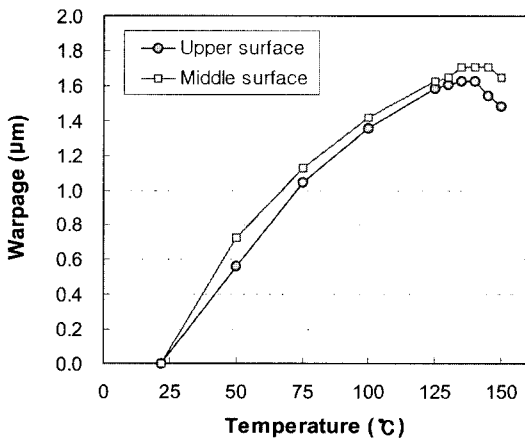


Fig. 17. Maximum warpage of the MEMS package according to temperature.

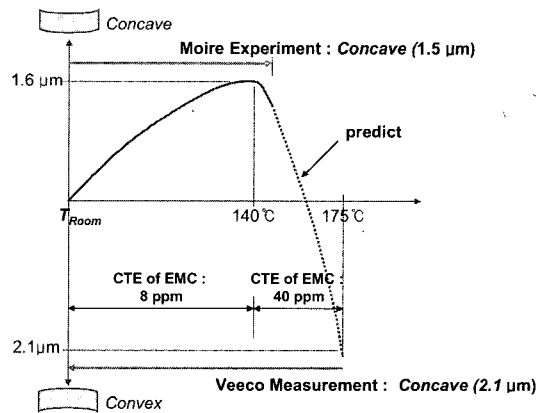


Fig. 18. Warpage mechanism of MEMS gyroscope package with variation of temperature.

변형이 발생하며, 수평방향으로는 같은 양만큼 수축이 일어난다. 실제로 상온에서의 굽힘변형을 광학적인 방법인 Veeco 측정기를 이용하여 측정해 본 결과, 아래로 볼록한 약 2.1 μm의 warpage가 측정되었으며, 모아레 간섭법을 이용하여 측정 및 예측한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 실시간 모아레 간섭계를 이용하여 자이로 MEMS 패키지의 온도변화에 대한 거동을 해석하였고 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 125°C까지는 비선형 거동이나 소성변형은 발생하지 않았으나 125°C 이상의 온도에서는 EMC 재료의 상태변화로 인하여 매우 큰 비선형 거동을 보였다.

(2) MEMS 칩과 EMC 및 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 패키지는 125°C 이하에서는 전체적으로 아래로 볼록한 굽힘변형이 발생하였으며, 온도 140°C를 정점으로 그 이상의 온도에서는 반대의 굽힘변형이 발생하였다.

(3) 칩 가장자리 부분에서는 PCB와 칩과의 경계에 있는 Ag 에폭시 부근에서 U 변위의 차이가 커서 에폭시의 전단변형률이 대단히 크거나, 미끄러짐이 일어났음을 보여주었다. 짧은 쪽 단면에서는 이 차이가 상당히 커져서, 칩과 PCB가 거의 제한을 받지 않고 변형함을 볼 수 있다. 이러한 이유로

전체적으로 굽힘변형은 긴 쪽으로만 일어나는 거동을 보였다

(4) MEMS의 주파수에 영향을 줄 수 있는 칩 자체의 평균 변형률은 약 481×10^{-6} 로 측정되어서 MEMS 설계 시 이에 해당하는 수축변형률을 고려하여야 함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단의 2003년도 목적기초 연구사업 지역대학 우수과학자 지원연구(과제번호 R05-2003-000-12386-0)와 삼성종합기술원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Y. S. Oh, B. L. Lee, S. S. Baek, H. S. Kim, J. G. Kim, S. J. Kang and C. M. Song, "A tunable vibratory microgyroscope", *Sensors and Actuators A*, 64, 51 (1998).
2. J. Hammond, A. McNeil, R. August, and D. Koury, "Inertial transducer design for manufacturability and performance at Motorola", 12th Inter'l Conf. on Solid State Sensors, Boston, June, 85(2003).
3. R. Liu, B. Paden and K. Turner, "MEMS resonators that are robust to process-induced feature with variation", 2001 IEEE Inter'l Frequency Control Sympo. and PDA Exhibition, 556(2001).
4. D. Post, B. Han and P. Ifju, *High Sensitivity Moiré : Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Springer-Verlag, New York(1994).
5. Y. Guo, C. K. Lim, W. T. Chen, W.T. and C. G. Woychik, "Solder Ball Connect (SBC) Assemblies Under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moiré Interferometry and Its Interpretation", *IBM J. Res. Develop.*, 37, 635 (1993).
6. B. Han, "Recent Advancements of Moire and Microscopic Moiré Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices", *Experimental Mechanics*, 38(4), 278(1998).
7. J. W. Joo and B. T. Han, "Thermo-mechanical and Flexural Analysis of WB-PBGA Package Using Moiré Interferometry", *Trans. of the KSME, A*, 26(7), 1302(2002).
8. E. A. Stout, N. R. Sottos and A. F. Skipor, "Mechanical Characterization of Plastic Ball Grid Array Package Flexure Using Moiré Interferometry", *IEEE Trans. on Advanced Packaging*, 23(4), 637(2000).
9. B. Han, Z. Wu and S. Cho, "Measurement of Thermal Expansion Coefficient of Flexible Substrate by Moiré Interferometry", *Experimental Techniques*, 25(3), 22 (2001).
10. S. -M. Cho, S. Y. Cho and B. Han, "Observing Real-Time Thermal Deformations in Electronic Packaging", *Experimental Techniques*, 26(3), 25(2002).
11. J. Joo and B. Han, "Non-linear temperature Dependent Deformation Analysis of CBGA Package Assembly Using Moiré Interferometry", *J. Microelectron. Packag.*, 10(4), 1(2003).
12. J. Joo and S. Cho, "Evaluation of thermal Deformation Model for BGA Packages Using Moiré Interferometry", *KSME International Journal*, 18(2), 230(2004).
13. B. Han, S.-M. Cho, J. Joo, "Temperature Dependent Deformation Analysis of Ceramic Ball Grid Array Package Assembly Under Accelerated Thermal Cycling Condition", *Journal of Electronic Packaging, Trans. of the ASME*, 126(March), 41 (2004).
14. G. Kelly, C. Lyden, W. Lawton, J. Barret, A. Saoui, J. Exposito, F. Lamourelle, "Accurate Prediction of PQFP warpage", *Proc. IEEE Electronic Component & Technology Conference*, 102 (1994).