

# 온도변화에 따른 MEMS 자이로스코프 패키지의 변형측정

주진원<sup>†</sup>·최용서\*·좌성훈\*\*·송기무\*\*

## Deformation Behavior of MEMS Gyroscope Package Subjected to Temperature Change

Jin-Won Joo, Yong-seo Choi, Sung-Hoon Choa and C. M. Song

Key Words: Board Level Package (기판 실장 패키지), MEMS Gyroscope Package (MEMS 자이로스코프 패키지), Moiré Interferometry (모아레 간섭계), Thermomechanical behavior (열-기계 거동)

### 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.

### 1. 서 론

최근에 반도체 칩과 MEMS 칩과 같은 초소형 전자부품은 빠른 속도로 소형화, 고집적화가 이루어지고 있고, 앞으로도 그 속도는 점점 빨라질 것으로 예상된다. 이에 따라 칩을 보호하고 있는 패키지 및 연결부위의 기계적인 파손 및 신뢰성이 해결해야 할 과제로 부각되고 있다. 이러한 전자 패키지는 서로 다른 열팽창계수와 탄성계수를 갖는 여러 가지의 재료로 구성되어 있다. 칩

에 전력이 공급되어 온도변화가 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 가격경쟁력에서 유리한 MEMS 기술을 이용한 실리콘 진동형 자이로스코프의 연구 및 개발이 활발하게 진행되고 있다<sup>(1)</sup>. MEMS 패키지의 경우, 반도체 패키지에 비하여 패키징 시에 발생하는 잔류변형 및 열응력이 소자의 성능에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>(2)</sup>. 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 자

<sup>†</sup> 충북대학교 기계공학부

E-mail : jinwon@chungbuk.ac.kr

TEL : (043)261-2456 FAX : (043)263-2441

\* 충북대학교 대학원 기계공학과

\*\* 삼성종합기술원 MEMS Lab.

이로그코프(gyroscope) 센서의 경우 패키지의 변형으로 인하여 MEMS 구조물의 공진 주파수가 변화되며, 이는 소자 성능의 저하를 초래한다<sup>(3)</sup>. 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 기술<sup>(4)</sup>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 열변형해석<sup>(5-7)</sup>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 패키지

본 논문에서 대상으로 하는 진동형 MEMS 자이로스코프 센서의 패키지 구조는 Fig. 1과 같이 자이로스코프 칩(이하 “자이로 칩”)과 PCB 및 에폭시 몰딩 복합체(epoxy molding compound, EMC)로 구성되어 있다. 자이로 칩의 세부구조는 Fig. 2와 같다. SOI(Silicon-on-Insulator)웨이퍼를 이용하여 MEMS 구동 구조물을 만들고, 별도의 유리 웨이퍼에 동공을 형성시키면서 anodic bonding 과정을 통하여 진공 챔버에서 서로 접합하여 자이로 칩을 제작한다. 자이로 칩을 PCB에 접촉한 후 wire bonding하고 그 주위를 EMC로 패키징한다.

자이로 칩의 패키지를 제작할 때에는 높은 온도에서(175℃ 정도) EMC로 몰딩을 하고 120℃ 정도에서 안정시킨 후 상온으로 온도를 내리게 된다. 따라서 MEMS 패키지는 약 100℃의 온도감소로 인한 수축을 하게 된다. 패키지의 온도변화로 인하여 패키지 전체 및 자이로 칩 내부의 MEMS 구동 구조물의 변형을 초래하여 구동 구조물의 고유 주파수가 변하게 된다.

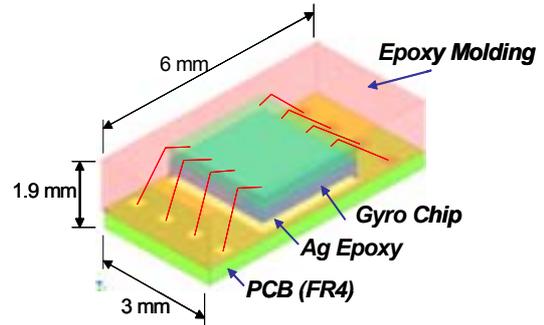


Fig. 1 Structure of MEMS gyroscope package

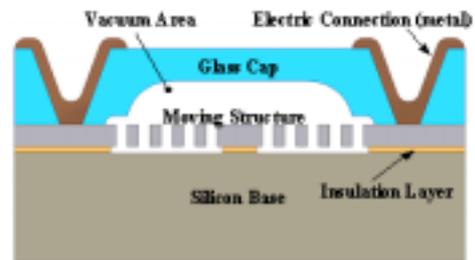


Fig. 2 Configuration of anodically bonded gyro chip

## 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 map형식의 간섭무늬로 나타내는 광학적인 실험방법<sup>(7)</sup>이다. 모아레 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통, 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접촉하여 시편과 함께 변형하도록 한다. 2축에 대한 변위 성분을 동시에 측정하기 위하여 서로 직각 방향으로 흠이나 있는 회절 격자를 사용한다.

얻어진 간섭무늬로부터 표면 위 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 차수이고  $f_s$ 는 변형전 회절격자의 주파수를 나타내고 있다. 일반적으로  $f_s=1200$

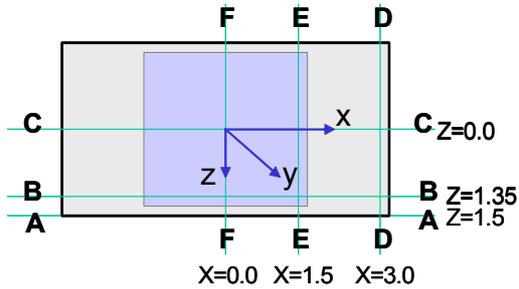


Fig. 3 Selected section of the MEMS package to be measured

lines/mm이므로 한 개의 간섭무늬 차이는 0.417  $\mu\text{m}$  의 변위를 나타낸다.

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. 모아래 간섭계를 이용하면 평면의 두 직교하는 변위를 측정할 수 있으므로, Fig. 3와 같이 위에서 아래로 x 방향, z 방향 각각 3면씩 6개의 단면을 선택하였다. 시편은 고속 다이아몬드 원형톱으로 절단하고 표면을 연마하여 아주 매끄럽게 하였다. 점도가 낮은 상온 에폭시 (Tra-Bond F114)를 이용하여 회절격자 몰드를 상온(25°C)에서 시편에 복제하여 1200 lines/mm의 주기를 가진 회절격자를 생성하였다.

3.3 실험장치 및 실시간 열하중 시험

본 논문의 측정에 사용된 모아래 간섭계 광학장치를 Fig. 4에 도식적으로 나타내었다. He-Ne 레이저에서 발생된 빛은 광섬유를 통하여 진행하고, 광섬유의 끝에 부착되어 있는 렌즈에 의해 퍼지게 된다. 구면의 곡면을 가지고 퍼진 빛은 6"의 포물면 거울(parabolic mirror)에서 반사된 후 평행광(collimated beam)으로 변화되어 진행한다. 진행된 평행광의 바깥부분은 특별히 제작된<sup>(10)</sup> 모아래 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.

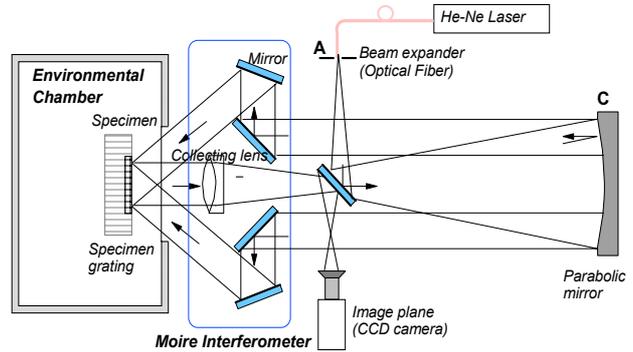


Fig.4 Schematic illustration of experimental setup with eight-mirror, four-beam moiré interferometer

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 강제회전을 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 영상처리장치를 이용하여 간섭무늬를 기록하였고 줌렌즈를 이용하여 영상을 확대하여 기록하였다. 온도에 따른 재료의 비선형 거동이나 소성변형이 발생할 가능성이 있으므로 첫 사이클에서는 10 0°C 까지 온도를 단계적으로 올렸다가 다시 상온으로 내렸고 두 번째 사이클에서는 125°C 까지 온도를 올렸다가 내리면서 간섭무늬를 기록하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 5는 A, B, C, D의 온도단계에서 기록된 간섭무늬를 보여주고 있다. 두 사이클 모두 상온으로 돌아왔을 때는 거의 변형이 없는 null field가 얻어졌으며, A와 B의 온도 단계에서 간섭

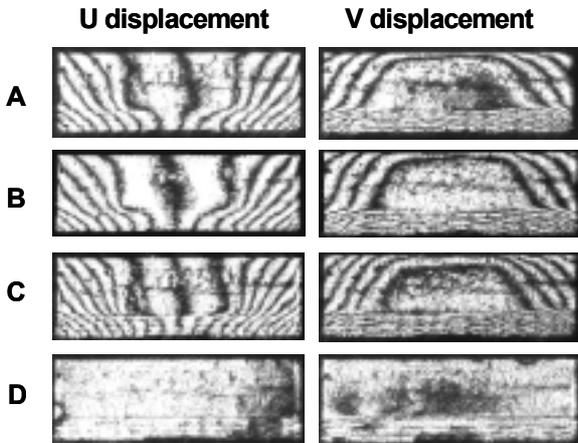


Fig. 5 Representative fringe patterns of the gyro MEMS package

무늬는 거의 일치하여서 적어도 125°C까지는 비선형 거동이나 소성변형은 발생하지 않은 것을 알 수 있다. Fig. 6은 온도에 따른 칩의 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 변형하였음을 알 수 있다.

Fig. 7은 온도가 125°C ( $\Delta T=105^\circ\text{C}$ )일 때에 Fig. 3에서 표시한 6개의 단면에 대한 간섭무늬를 보여주고 있다. 각 지점에서 U 변위 (길이방향)를 보면 실리콘 디어나 유리가 있는 부분에는 변위가 대단히 작고 EMC가 있는 부분은 변위가 크며, PCB가 있는 부분은 변위가 대단히 커서 열팽창 계수에 따른 열팽창 변형의 차이를 볼 수 있다.

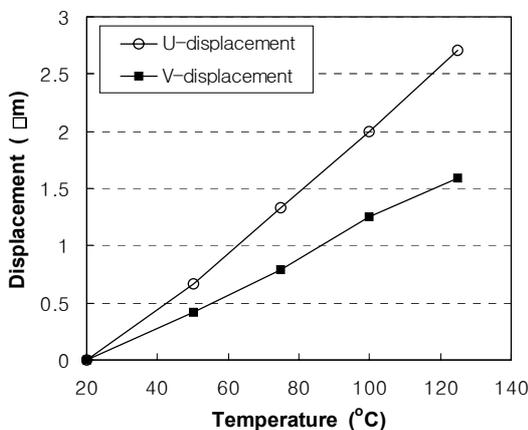


Fig. 6 Horizontal and vertical displacements according to the temperature

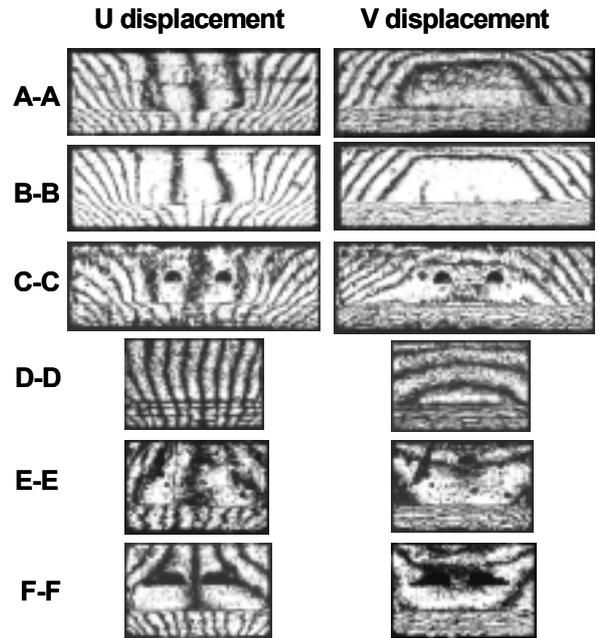


Fig. 7 Fringe patterns on the selected cross sections at the temperature of 125°C

Fig. 7의 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 아래로 볼록한 굽힘변형 (warping)이 일어났음을 알 수 있다.

V 변위를 나타내는 간섭무늬를 분석해 보면 굽힘변위를 정량적으로 구할 수 있다. 칩이 있는 부분에는 높은 강성으로 인하여 변형이 거의 일어나지 않았고, EMC가 있는 부분에는 변위가 크게 나타남을 알 수 있다. V 변위에서 PCB 부분에 많은 간섭무늬가 생긴 것은 PCB의 면의 방향(y 방향)의 열팽창계수가 대단히 크기 때문이고, 면내 방향의 열팽창계수는 EMC의 열팽창계수와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 20°C를 기준으로 온도가 125°C일 때, 긴 쪽 단면(x-y 단면)의 칩 중간부분을 따라서 발생하는 굽힘변형 (V 변위)의 분포를 보여주고 있다. 중간부분( $z=0\text{ mm}$ )의 굽힘변형이 바깥부분( $z=1.5\text{ mm}$ )의 굽힘변형 보다 크게 나타났으나, 큰 차이는 없었다. 실리콘 칩이 있는 부분에는 PCB와의 큰 열팽창계수의 차이로 인하여 굽힘이 일어났으나, 칩이 있는 부분에는 열팽창계수에 큰 차이가 없으므로 굽힘이 일어나기 보다는 거의 직선적으로 변화하였다. 온도가 125°C일 때 최대 굽힘변

위는 중간부분에서 약 1.7  $\mu\text{m}$  정도, 바깥부분에서는 약 1.3  $\mu\text{m}$  발생하였다.

Fig. 9는 20 $^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로 온도가 125 $^{\circ}\text{C}$ 일 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(x=0, 1.5 mm)에는 반대방향(위로 볼록)의 굽힘이 발생되었다. Fig. 10은 125 $^{\circ}\text{C}$ 일 때 패키지의 윗면이 변형된 모습을 보여주고 있다. 이 곡면은 측정된 몇 개의 V 변위로부터 2차원 근사하여 얻어진 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 긴 방향으로 굽힘이 주로 일어났으며 짧은 방향으로는 일부분에서 반대방향의 작은 굽힘이 일어났다.

Fig. 11은 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 부분에는 U 변위가 연속적으로 변화하였으나, 칩 가장자리 부분에서는 PCB와 칩과의 경계에 있는 Ag 에폭시 부근에서 U 변위의 차이가 커서 에폭시의 전단변형률이 대단히 크거나, 미끄러짐이 일어났음을 보여준다. 그러나 이러한 불연속은 온도가 상온으로 돌아오면 원상 복구되어 없어진다.

Ag 에폭시 부근에서 일어나는 U 변위의 차이는 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.

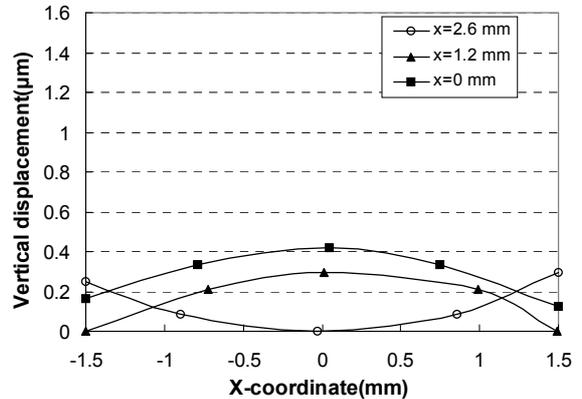


Fig. 9 Distributions of vertical displacement on the shorter surfaces at T = 125 $^{\circ}\text{C}$

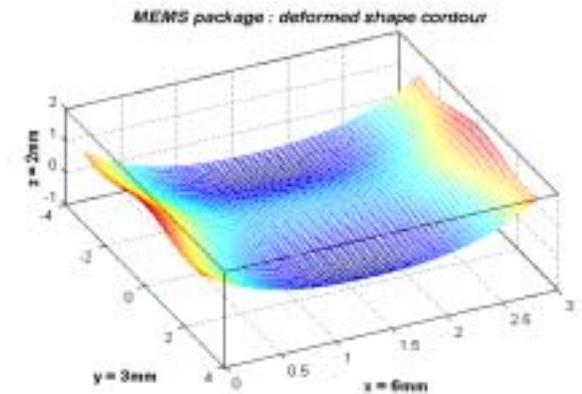


Fig. 10 Warpage of upper surface of the gyro MEMS at T = 125 $^{\circ}\text{C}$

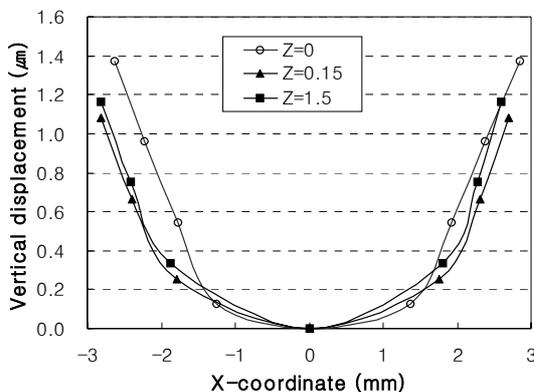


Fig. 8 Distributions of vertical displacement on the longer surfaces at the temperature of 125 $^{\circ}\text{C}$

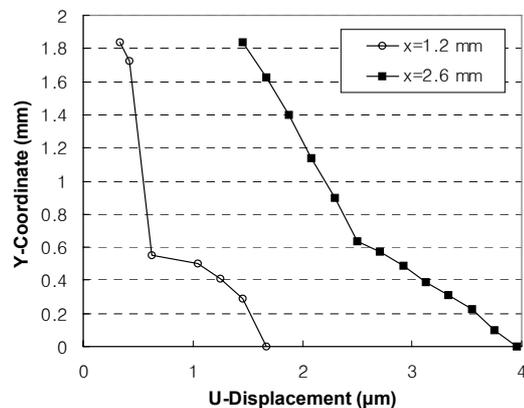


Fig. 11 Distributions of horizontal displacement on the longer surface at T =125 $^{\circ}\text{C}$

앞에서 기술한 굽힘변형 및 팽창변형은 상온을 기준으로 온도가 상승하였을 때의 변형을 나타내고 있다. 자이로 MEMS 패키지를 제작할 때에는 높은 온도에서(175℃ 정도) EMC로 몰딩을 하고 120℃ 정도에서 안정시킨 후 상온으로 온도를 내리게 되므로 약 100℃의 온도 감소로 인한 수축을 하게 된다. 앞에서 기술한 바와 같이 125℃까지의 온도에서는 온도에 대하여 선형적으로 변형이 일어났으므로 패키지 몰딩과정에서의 변형을 해석하기 위해서는 125℃에서의 변형을 반대로 이용하면 된다. 즉, 몰딩 후 상온에서는 같은 크기의 반대(위로 볼록) 굽힘변형이 발생하며, 수평방향으로는 같은 양만큼 수축이 일어난다.

상온에서 125℃로 온도가 상승하였을 때, 긴쪽 방향의 중앙부분에서 발생한 평균 인장변형률은 패키지 윗 표면, 칩 중간 부분, 패키지 아랫 표면을 따라서 각각  $556 \times 10^{-6}$ ,  $779 \times 10^{-6}$ ,  $1146 \times 10^{-6}$ 로 계산되었다. 또한 MEMS의 주파수에 영향을 줄 수 있는 칩 부분만의 평균 변형률은 약  $481 \times 10^{-6}$ 로 계산되어서 MEM 설계 시에는 이에 해당하는 수축변형률을 고려하여야 함을 알 수 있다.

## 결 론

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

(1) 125℃까지는 비선형 거동이나 소성변형은 발생하지 않았다.

(2) MEMS 칩과 EMC 및 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 패키지는 전체적으로 아래로 볼록한 굽힘변형이 발생하였으며, 온도가 125℃일 때 최대 굽힘변위는 중간부분에서 약 1.7  $\mu\text{m}$  정도, 바깥부분에서는 약 1.3  $\mu\text{m}$  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  $481 \times 10^{-6}$ 로 계산되어서 MEM 설계시 이에 해당하는 수축변형률을 고려하여야 함을 알 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단의 2000년도 목적기초 연구사업 지역대학 우수과학자 지원연구(과제번호 R05-2000-000-00304-0)와 삼성종합기술원의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Oh, Y.S., Lee, B.L., Baek, S.S., Kim, H.S., Kim, J.G., Kang, S.J., and Song C.M., 1998, "A tunable vibratory microgyroscope", *Sensors and Actuators*, A, 64, pp.51 ~ 56.
- (2) Hammond, J., McNeil, A., August, R., Koury, D., 2003, "Inertial transducer design for manufacturability and performance at Motorola," 12<sup>th</sup> Inter'l Conf. on Solid State Sensors, Boston, June, pp.85 ~ 90.
- (3) Liu, R., Paden, B., Turner, K., 2001, "MEMS resonators that are robust to process-induced feature with variation", 2001 IEEE Inter'l Frequency Control Sympo. and PDA Exhibition, pp.556 ~ 563.
- (4) Post, D., Han, B. and Ifju, P., High Sensitivity Moiré : Experiental Analysis for Mechanics and Materials, Springer-Verlag, New York.
- (5) Guo, Y., Lim, C.K., Chen, W.T. and Woychik, C.G., 1993, "Solder Ball Connect (SBC) Assemblies Under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moiré Interferometry, and Its Interpretation," *IBM J. Research Development*, Vol. 37, pp. 635 ~ 648.
- (6) Han, B., 1998, "Recent Advancements of Moire and Microscopic MoiréInterferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices," *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.4, pp.278 ~ 288.
- (7) Joo, J. W. and Han, B. T., 2002, "Thermo-mechanical and Flexural Analysis of WB-PBGA Package Using Moiré Interferometry," *Transactions of the KSME*, A, Vol.26, No.7, pp.1302 ~ 1308.