

## 모아레 간섭계를 이용한 CBGA 패키지의 비선형 열변형 해석

주진원<sup>1</sup> · 한봉태<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충북 청주시 흥덕구 개신동 산48 충북대학교 기계공학부

### Non-linear Temperature Dependent Deformation Analysis of CBGA Package Assembly Using Moiré Interferometry

Jinwon Joo and Bongtae Han

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, 48 Gaeshin-dong, Heungdok-gu, Cheongju,  
Chungbuk, 361-763 Korea

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, University of Maryland, College Park, MD 20742

**초 록:** 고감도 모아레 간섭계를 이용하여 세라믹 ball grid array 패키지 결합체의 열-기계적 거동을 분석하였다. 한 온도 사이클의 선택된 몇 개의 온도 단계에서 모아레 간섭무늬를 기록하고 해석하였다. 패키지 결합체의 온도변화에 따른 전체적인 변형과 국부적인 변형거동을 정량적으로 나타내었고, 패키지의 굽힘변형과 맨 바깥쪽 솔더볼의 전단변형률에 대한 거동을 토의하였다. 높은 온도에서는 저온 융점 솔더의 응력완화로 인하여 심각한 비선형 거동이 발생되었으며, 솔더볼의 변형을 해석한 결과 높은 온도에서 저온융융 솔더부에 비탄성 변형이 축적되었음을 알 수 있었다.

**Abstract:** Thermo-mechanical behavior of a ceramic ball grid array (CBGA) package assembly are characterized by high sensitive moiré interferometry. Moiré fringe patterns are recorded and analyzed at various temperatures in a temperature cycle. Thermal-history dependent analyses of global and local deformations are presented, and bending deformation (warpage) of the package and shear strain in the rightmost solder ball are discussed. A significant non-linear global behavior is documented due to stress relaxation at high temperature. Analysis of the solder interconnections reveals that inelastic deformation accumulates on only eutectic solder fillet region at high temperatures.

**Keywords:** Moir Interferometry, CBGA Package, Solder Ball, Thermo-mechanical Behavior, Board-level Reliability

### 1. 서 론

최근에 반도체 칩은 빠른 속도로 고집적화가 이루어지고 있고, 앞으로도 그 속도는 점점 빨라질 것으로 예상된다. 이에 따라 칩을 보호하고 있는 반도체 패키지 및 연결부위의 기계적인 파손이 해결해야 할 중요한 과제로 부각되고 있다. 반도체 패키지는 서로 다른 열팽창계수와 탄성계수를 갖는 여러 가지의 재료로 구성되어 있다. 반도체 칩

에 전력이 공급되어 온도변화가 생기면 각각의 재료는 다른 비율로 변형하게 되어 그 사이에서 심한 열응력이 발생하게 된다. 더구나 반도체 칩은 주기적인 열하중을 받게 되므로, 집중된 열응력은 사이클이 진행될수록 파손의 큰 원인이 될 수 있다. 따라서 반도체 패키지의 설계기술을 발전시키고, 최대한의 성능과 신뢰성을 얻기 위해서는 온도변화에 대한 패키지 각 요소의 변형거동을 이해할 필요가 있다.

패키지의 신뢰성 평가를 위하여 이제까지 대부분은 온도 사이클의 조건을 받고 있는 BGA (ball grid array) 패키지의 피로 수명에 대한 연구<sup>1,2)</sup>가 수행되어 왔다. 이러한 연구에서는 정해진 최고온도와 최저온도 사이를 반복 시험하는 ATC (accelerated thermal cycling) 시험이 주로 수행되었다. 이 시험으로부터 결정되는 피로수명 횟수는 패키지 설계의 비교를 위해서는 유용하게 사용될 수 있으나, 파손에 이르는 각 패키지 재료의 열적·기계적 거동에는 제한된 정보만을 제공한다. 따라서, 전자 패키지의 정확한 변형 거동을 평가하기 위해서는 신뢰성 있는 실험적인 방법이 필요하다.

최근에는 레이저를 사용하는 모아레 간섭계 기술<sup>3,4)</sup>이 개발되어 아주 높은 정밀도를 가지고 응용<sup>5,6)</sup>되고 있다. 모아레 간섭법은 정밀도가 대단히 높고 비접촉으로 전체영역의 변형 상태를 측정할 수 있으며 주위환경에 민감하지 않다는 장점을 가지고 있다. 이러한 특성으로 모아레 간섭법은 최근에 초소형 전자 부품들의 열변형해석<sup>7-10)</sup>에 효과적으로 이용되어 왔다.

본 논문에서는 높은 I/O (input/output) 개수의 반도체 패키지로 널리 쓰이고 있는 ceramic ball grid array (CBGA) 패키지를 대상으로 하여, 한 사이클의 온도변화로 인한 열변형 거동에 대한 광학실험과 해석을 수행하였다. 이를 위하여 실시간 모아레 간섭계를 이용하여 각 온도단계에서 변위분포를 나타내는 간섭무늬를 얻고, 그로부터 굽힘변형 거동 및 솔더볼의 변형률에 대한 해석을 수행하였다. 반도체 패키지는 온도가 변화할 때, 패키지 전체의 굽힘변형(warpage)과 솔더의 변형집중이 신뢰성에 큰 영향을 미치며, 특히 CBGA 패키지는 높은 온도에서 심한 비선형 변형을 보이므로 이에 대한 해석을 집중적으로 수행하였다.

## 2. 모아레 간섭법을 이용한 변형측정

모아레 간섭법은 빛의 회절과 간섭이라는 두 가지 성질을 주로 이용하여 평면 내에 정해진 2축(x, y)에 대한 변위 성분을 contour map 형식으로 나타내는 광학적인 실험방법이다. 모아레 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통 1200 lines/mm)의 회절격자(diffracton grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 변형하도록 한다. 이 회절격자는 주기적으로

언덕과 골이 나 있어 물결 모양의 단면을 가지고 있으며, 빛을 잘 반사시키기 위하여 표면에 고온의 금속(알루미늄) 미세분말을 증착(evaporation) 시켜 만든다. 2축에 대한 변위 성분을 동시에 측정하기 위하여 서로 직각 방향으로 흙이 나 있는 회절격자를 사용한다.

Fig. 1(a)와 같이 시편에 접합된 회절격자에 같은 광원으로부터 나누어진 두 개의 평행광이  $\pm\alpha$ 의 각도로 입사하도록 하여 각각에 대하여 회절된  $\beta_1$ 과  $\beta_1$ 이  $0^\circ$ 가 되도록  $\alpha$ 를 조정하면, 두 광선은 같은 방향으로 진행하여 위상차가 균일하게 되므로 간섭이 일어나지 않는다. 이러한 상태를 초기변위장(null field)이라 한다. 시편이 변형하여 시편 위에 부착된 회절격자의 주파수  $f_s$ 가 약간 변하게 되면 회절이론에 의하여 Fig. 1(b)와 같이  $\beta_1$ 과  $\beta_1$ 이  $0^\circ$ 가 아닌 각도  $\theta$ 를 갖게 된다. 이러한 두 광선은 간섭에 의하여 간섭무늬를 생겨나게 하며, 회절격자의 주파수가 더 크게 변하면  $\theta$ 가 커지며, 그에 따라 간섭무늬의 간격은 좁아지게 된다. 이러한 간섭무늬를 해석하면 재료 표면의 변형분포를 결정할 수 있다.

Fig. 1에서 설명한 변형측정원리는 한 방향의 변위를 측정하기 위한 것이다. 평면 내의 두 방향 변위  $U, V$ 를 동시에 측정하기 위해서는 Fig. 2와 같이 직교형으로 흙이 나 있는 회절격자를 시편에 접착하고 빛을 4방향으로 입사시키는 시스템을 구성하여야 한다. 이렇게 얻어지는 간섭무늬는 시편의 표면에서 x, y 방향의 변위에 대한 등변위곡

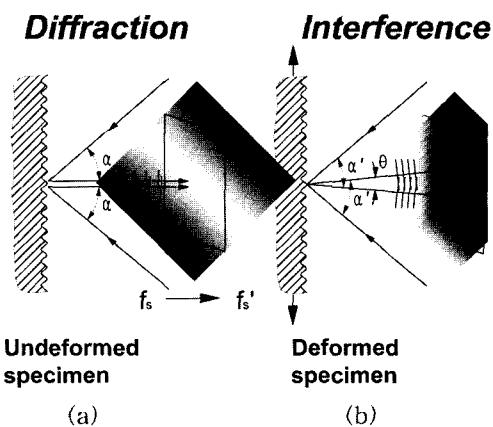


Fig. 1. Moir interferometry technique for the measurement of deformation.

선을 나타낸다.

얻어진 간섭무늬로부터 표면 위 각 점에서의 상대적 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  $f_s = 1200$  lines/mm이므로 한 개의 간섭무늬 차이는 0.417  $\mu\text{m}$ 의 변위 차이를 나타낸다.

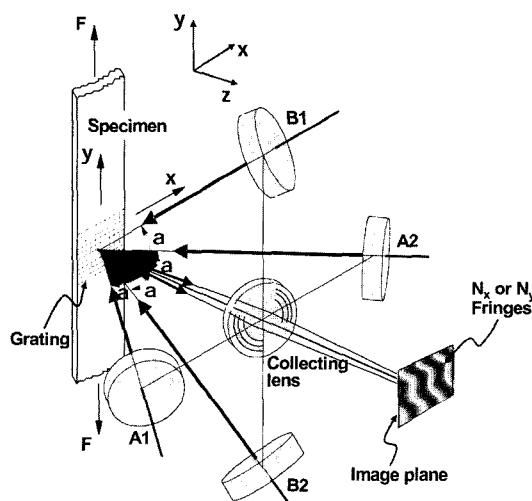
평면내의 변형률을 계산하여야 할 때에는 기본적으로는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{1}{2f_s} \left[ \frac{\partial N_x}{\partial x} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y} = \frac{1}{2f_s} \left[ \frac{\partial N_y}{\partial y} \right]$$

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

간섭무늬 차수의 편미분 값을 구하기 위하여는



**Fig. 2.** Implementation of moire interferometry for the measurement of two-dimensional displacement.

다음 식과 같은 증분개념을 도입하여 해석한다.

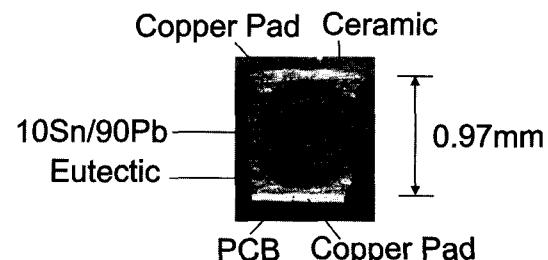
$$\frac{\partial N_x}{\partial x} \simeq \frac{\Delta N_x}{\Delta X/M} \quad (3)$$

여기서  $\Delta X$ 는 기록된 간섭무늬 사이의  $x$  방향 거리,  $M$ 은 영상확대비를 나타낸다.

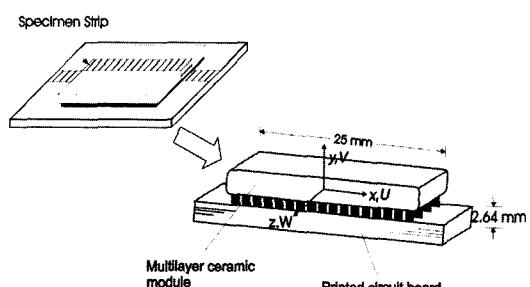
### 3. 실험방법

본 논문에서 대상으로 하는 반도체 패키지는 361개( $19 \times 19$ )의 I/O를 가진 한 변 25 mm의 CBGA 패키지다. CBGA 패키지는 대부분 세라믹 모듈로 이루어져 있으며, 이 패키지는 솔더볼로 FR-4 PCB에 연결되어 있다. 솔더 연결부는 Fig. 3(a)와 같이 고용점 솔더볼(90%Pb-10%Sn)과 저용점 공정솔더필렛(eutectic solder fillet, 63%Sn-37%Pb)으로 구성되어 있으며, 높이가 0.97 mm, 가장 큰 직경은 0.89 mm인 구형이고, 솔더 볼 중심선 사이의 간격은 1.27 mm이다.

Fig. 4와 같이 패키지 결합체(package assembly, 패키지 + 솔더볼 + PCB)로부터, 비대칭의 영향을



**Fig. 3.** Cross-section of the solder interconnection.



**Fig. 4.** Schematic diagram of specimen geometry with relevant dimensions of sectioned CBGA package assembly.

제거하기 위하여 중간의 5줄의 솔더볼을 포함하는 시편을 절단해 내고, 솔더볼들의 직경이 가장 크게 되도록 표면을 연마하여 아주 매끄럽게 하였다. 점도가 낮은 상온 에폭시(Tra-Bond F114)를 이용하여 회절격자 몰드를 상온( $25^{\circ}\text{C}$ )에서 시편에 복제하여 1200 lines/mm의 주기를 가진 회절격자를 생성하였다. 회절격자가 복제된 패키지 복합체 시편에 대하여 상온에서 모아래 간섭계를 정렬하여 간섭무늬가 가능한 없어진 초기 변위장을 얻어내었다.

시편에 온도변화를 주기 위하여 대류방식의 가열과 냉각을 할 수 있는 온도 챔버를 사용하였다. 이 챔버는 진동을 유발할 수 있으므로 광학장치와 시편과의 상대운동을 방지하기 위하여 모든 광학장치와 CCD 카메라가 일체화된 모아래 간섭계 장치 (PEMI-II, Photo mechanics사)를 사용하고 시편을 고정한 받침대와 간섭계를 챔버 벽을 통해 한 몸체로 연결하였다. 시편의 온도는 열전대를 이용하여 측정하고, 원하는 온도로 빨리 접근하는 동시에 그 온도를 넘지 않도록 챔버의 온도를 컴퓨터 프로그램에 의하여 제어하였다.

시편을 챔버 안에서 고정시킨 후 거울들을 정렬

하고 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 x 방향 변위 U와 y 방향 변위 V를 나타내는 간섭무늬를 얻어내었다. CCD 카메라와 영상처리장치를 이용하여 간섭무늬를 기록하였고 필요에 따라 줌렌즈를 이용하여 영상을 확대하여 기록하였다. 시편의 온도는 1 사이클을 단계적으로 (상온 $\rightarrow 55^{\circ}\text{C} \rightarrow 75^{\circ}\text{C} \rightarrow 100^{\circ}\text{C} \rightarrow 55^{\circ}\text{C} \rightarrow 25^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C} \rightarrow -20^{\circ}\text{C}$  상온)으로 주었으며, 온도를 올릴 때는  $7.25^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 온도를 내릴 때는  $14.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 온도를 변화시켰다. 각 온도단계에서 온도의 안정화와 간섭무늬의 기록을 위하여 5분 동안 온도를 유지시켰다.

#### 4. 실험결과 및 토의

각 온도단계에서 기록한 간섭무늬 중 대표적인 5 단계에서 기록한 U, V 변위에 대한 간섭무늬를 Fig. 5에 나타내었다. 간섭무늬에서 이웃하는 두 무늬사이의 간격은  $0.417 \mu\text{m}/\text{m}$ 의 변위를 나타낸다.  $75^{\circ}\text{C}$ 의 U 변위 간섭무늬에서 보는 것과 같이

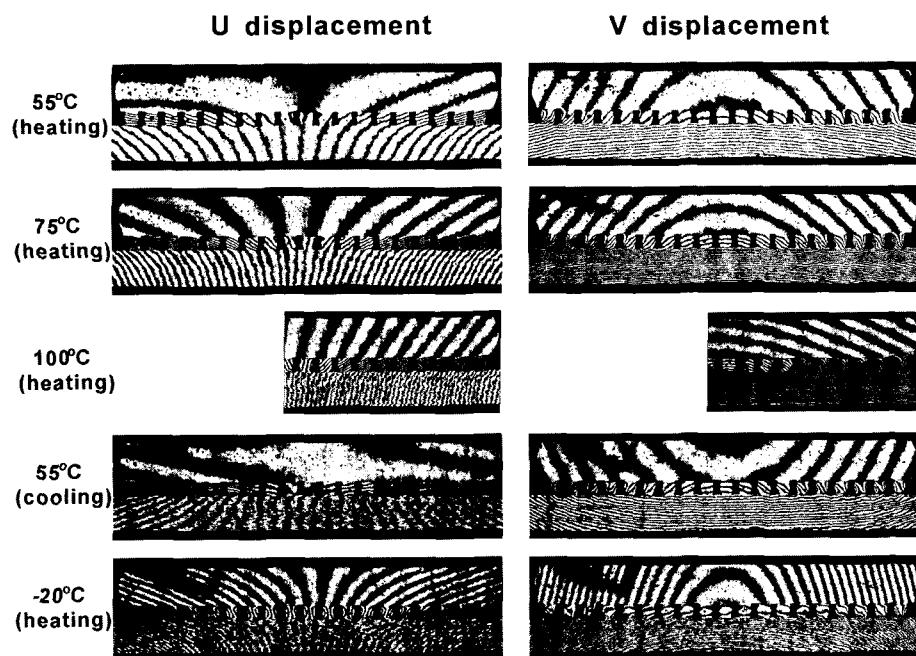


Fig. 5. Fringe patterns of the CBGA package assembly by temperature change.

열팽창에 의하여 x 방향으로의 인장변형률이 발생된 것을 볼 수 있다. 열팽창계수가 낮은 세라믹 모듈 부분에는 작은 변형률이 발생되었고 열팽창 계수가 큰 PCB 부분에는 큰 변형률이 발생되었으며, 이 차이로 인하여 솔더볼의 위, 아래 경계면 사이에 U 변위의 차이가 크게 발생되었다. 이것은 솔더볼이 상당한 전단변형률을 받고 있음을 의미하며, 중심으로부터의 거리(DNP, Distance from neutral point)가 커질수록, 즉 바깥쪽의 솔더볼으로 갈수록 이 전단변형률이 커짐을 볼 수 있다.

V 변위를 나타내는 간섭무늬에서는 상하방향의 열팽창과 함께 길이방향으로 굽힘변형이 일어나고 있음을 볼 수 있다. 온도가 증가할 때와 온도가 감소할 때, 같은 온도 55°C의 변형거동이 다른 것은 CBGA 패키지 결합체가 온도에 따른 비선형 거동을 하고 있음을 의미한다. -20°C에서의 간섭무늬는 100°C에서의 간섭무늬와 비슷한 모양으로 보이나, 실제적으로는 패키지가 전체적으로 수축하였으며, 따라서 반대방향의 굽힘변형이 발생함을 나타낸다.

Fig. 6은 V 변위 간섭무늬에서 세라믹 모듈의 중심선을 따라 얻어낸 굽힘변위(수직방향 변위) 분포를 보여주고 있다. 굽힘변위는 오른쪽 절반 부분만 해석하였다. 온도가 55°C로 증가하였을 때는 세라믹 모듈보다 PCB가 더 많이 팽창하므로 위로 굽어지는(↑) 현상을 보인다. 온도가 75°C가 될 때 까지는 온도가 증가함에 따라 굽힘변형이 증가하

지만, 온도가 더 증가하여 100°C가 되면 오히려 굽힘변형이 감소하는 현상을 보인다. 패키지 결합체를 냉각시킬 때에는 100°C 때의 변형을 기준으로 반대방향으로 굽어지는(↑) 현상을 보여서 다시 상온으로 돌아왔을 때에도 상당한 양의 굽힘변형이 남았다.

Fig. 7은 세라믹 모듈과 PCB 오른쪽 끝의 중심점에 대한 최대 굽힘변위를 나타내고 있다. 그럼에 나타난 굽힘변위의 비선형 거동은 75°C 이상에서 나타나는 솔더볼의 크립현상 때문이다. 75°C 이상의 높은 온도에서는 솔더볼에 대단히 큰 비탄성 변형이 발생하며 이로 인해 세라믹 모듈과 PCB 사이의 결합력이 완화되기 때문에 굽힘 변형이 감소하게 된다. 실제로 100°C에서 시간이 충분히 경과하면 세라믹 모듈과 PCB는 독립적으로 팽창하게 되며 굽힘변형은 거의 사라지게 된다. 온도가 내려갈 때에는 이러한 현상이 사라지므로 굽힘변위는 Fig. 7과 같이 100°C 때의 변형을 기준으로 반대방향으로 거의 선형적으로 변화하게 되어, 한 온도 사이클이 지나고 상온으로 되돌아 왔을 때에도 세라믹 모듈은 약 1.6 μm, PCB는 약 2.1 μm의 잔류변형이 남게 되었다.

모듈과 PCB의 열팽창계수차이로 인한 수평변위 차이는 솔더볼에 전단변형을 발생하게 한다. Fig. 8은 전단변형이 가장 크게 발생하는 가장 오른쪽 솔더볼의 중심 수직선을 따라서 변화하는 수평방향 변위 U의 분포를 보여주고 있다. 온도가 55°C일 때는 변위가 직선적으로 분포하여서 거의

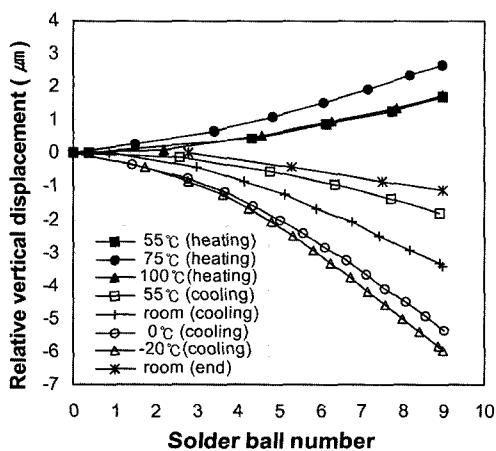


Fig. 6. Bending displacements distributions along the middle line of the ceramic module by temperature change.

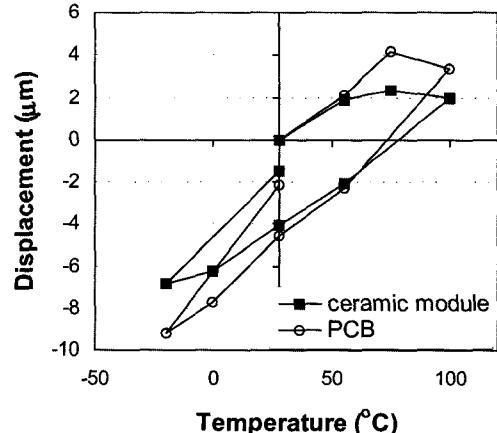


Fig. 7. Tip vertical displacement according to the temperature.

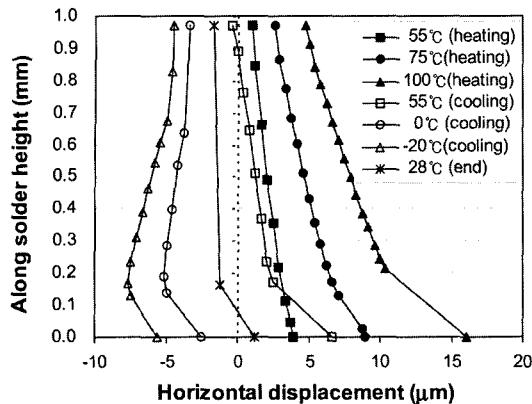


Fig. 8. Horizontal displacements of the rightmost solder interconnection determined along the vertical centerline.

균일한 전단변형률이 발생된 것을 볼 수 있다. 그러나 온도가 75°C 이상이 되면 전단 변형이 점점 커질 뿐만 아니라, 공정솔더필렛 부분의 변위가 급격하게 증가되어서 항복이 일어나는 현상을 볼 수 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 원인은 저온 용융 솔더는 고온 용융 솔더에 비해 낮은 온도에

서 용융이 일어나며, 이에 따라 온도가 일정 온도 이상으로 올라가면 낮은 강성과 높은 크립율을 보이기 때문이다.

온도가 55°C로 내려왔을 때에는 솔더볼 부분은 온도를 올릴 때와 거의 비슷한 수평방향 변위를 보이지만 솔더필렛 부분은 변형이 거의 회복되지 않는다. 온도가 0°C 이하로 내려가면 예상할 수 있는 대로 솔더볼 부분은 반대방향의 수평 변위를 보이지만 저온용융 공정솔더필렛 부분은 변위방향이 바뀌지 않는다. 결과적으로 두 부분의 솔더는 반대방향의 전단변형률을 보이면서 변형하게 된다. 결국 한 온도사이클이 경과하여 상온으로 돌아온 후에도 솔더필렛 부분에 영구변형이 남게 된다. 이와 같은 온도 사이클에 대한 솔더볼의 변형 거동을 도시적으로 Fig. 9에 나타내었다.

BGA와 같이 높은 I/O 개수를 가진 반도체 패키지 결합체가 기계적 하중이나 열하중을 받을 때 파손의 가장 큰 원인이 되는 것은 모듈과 PCB를 연결하는 솔더 연결부의 응력집중이다. 그 중에서 솔더볼의 전단변형률은 BGA 패키지 결합체에서 가장 흔히 발생하는 파손의 원인이 된다. Fig. 10은 솔더볼을 고온용융 솔더볼부와 저온용융 솔더

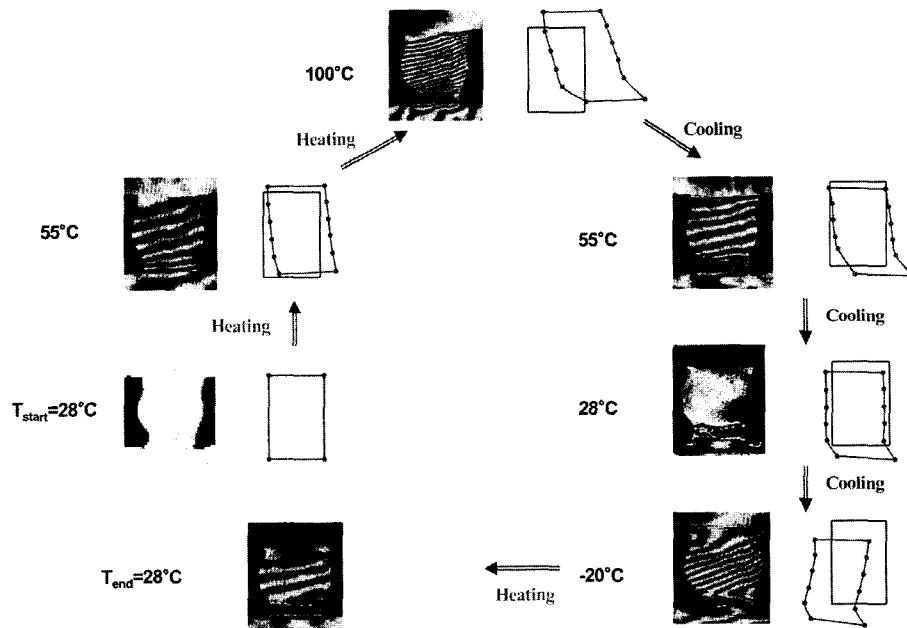


Fig. 9. Schematics of solder interconnection deformation according to temperature change.

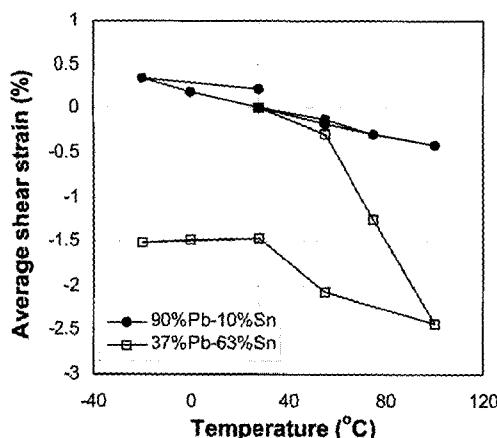


Fig. 10. Average shear strain history of the CBGA solder interconnections.

필렛부로 나누어 온도에 따른 각각의 평균 전단변형률 변화를 보여주고 있다. Fig. 5의 간섭무늬에서 솔더필렛부의 간섭무늬는 너무 집중되어 명확히 볼 수 없지만 위, 아래부분의 간섭무늬 차수를 결정하면 평균변형률을 계산할 수 있다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 고온용융 솔더볼 부의 변형률은 온도에 따라 거의 선형적으로 변하지만, 저온용융 솔더필렛부는 온도가 올라감에 따라 급격하게 증가하다가 온도가 내려갈 때에는 거의 변화가 없었고, 상온으로 돌아온 후에도 상당한 크기의 영구변형률이 발생되었다. 100°C에서의 솔더필렛의 평균전단변형률은 솔더볼의 변형률보다 약 6배 정도 크게 발생되었다. 이와 같이 저온용융 솔더부의 소성변형은 패키지 결합체 전체의 비선형 거동을 발생시키는 주요 원인이 됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 실시간 모아래 간섭계를 이용하여 CBGA 패키지의 온도변화에 대한 변형거동을 해석하였고 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 패키지 결합체의 온도가 변화하면 세라믹 모듈과 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 전체적인 굽힘변형이 발생하며, 이러한 굽힘변형은 높은 온도에서 발생하는 솔더 연결부의 응력완화로 인하여 상당한 비선형을 보인다.

(2) 75°C 이상의 높은 온도에서 저온용융 공정 솔더필렛부는 큰 비선형 소성변형과 크립현상을 보이며, 온도가 낮아지면 이런 현상이 없어져서 온도에 대해 선형적으로 변형하므로 한 온도사이클이 경과하면 상당한 영구변형이 남는다.

(3) 온도변화로 인하여 솔더볼에는 전단변형률이 발생하며, 이 변형률은 패키지의 중심에서 먼 솔더볼일수록 커지고, 저온용융부에서는 상당히 큰 전단변형률이 발생한다.

(4) 솔더 연결부에 남는 영구변형은 온도 사이클이 진행될수록 계속 축적되어 패키지 결합체 파손의 직접적인 원인이 되며, 본 논문의 결과는 ATC 시험의 온도조건을 결정하는데 유용하게 사용될 수 있다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- R. Darveaux and A. Mawer, "Thermal and Power Cycle Limit of Plastic Ball Grid Array (PBGA) Assemblies", Proc. Surface Mount Int. Conf., pp. 315-326(1995).
- A. F. Skipor, S. V. Harren and J. Botsis, "On the Constitutive Response of 63/37 Sn/Pb Eutectic Solder", ASME. J. Eng. Mater. Technol., 11., pp. 1-11(1996).
- D. Post, B. Han and P. Ifju, "High Sensitivity Moiré: Experiential Analysis for Mechanics and Materials", Springer-Verlag, New York(1994).
- J. W. Joo, S. E. Choi and D. I. Shin, "Deformation Analysis of Composite-Patched Concrete Using Moiré Interferometry", Transactions of the KSME, A, 26(1), pp. 160-170(2001).
- D. Post, J. D. Wood, B. Han, V. J. Parks and F. P. Gerstle, Jr, "Thermal Stresses in a Bimaterial Joint : An Experimental Analysis", J. Applied Mechanics, Trans. ASME, 61, pp. 192-198(1992).
- Y. Guo, D. Post and B. Han, "Thick Composites in Compression: An Experimental Study of Micro-mechanical Behavior and Smeared Engineering Properties", J. Composite Material, 26(13), pp. 1930-1944(1992).

7. Y. Guo, C. K. Lim, W. T. Chen and C. G. Woychik, "Solder Ball Connect (SBC) Assemblies Under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moir Interferometry, and Its Interpretation", IBM J. Research Development, 37, pp. 635-648(1993).
8. B. Han and Y. Guo, "Thermal Deformation Analysis of Various Electronic Packaging Products by Moir and Microscopic Moir Interferometry", J. Electronic Packaging, Trans. ASME, 117, pp. 185-191(1995).
9. B. Han, "Recent Advancements of Moire and Microscopic Moir Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices", Experimental Mechanics, 38(4), pp. 278-288(1998).
10. J. W. Joo, S. E. Chai and D. I. Shin, "Thermo-mechanical and Flexural Analysis of WB-PBGA Package Using Moir Interferometry", Transactions of the KSME, A, 26(7), pp. 1302-1308(2002).