

무아래 간섭계를 이용한 WB-PBGA 패키지의 온도변화 및 굽힘하중에 대한 거동해석

주진원* · Bongtae Han*

(2001년 9월 5일 접수, 2002년 4월 3일 심사완료)

Thermo-mechanical and Flexural Analysis of WB-PBGA Package Using Moiré Interferometry

Jinwon Joo and Bongtae Han

Key Words: Moiré Interferometry(무아래 간섭계), WB-PBGA Package(WB-PBGA 패키지), Thermomechanical behavior(열-기계 거동), Flexural Deformation(굽힘 변형)

Abstract

Thermo-mechanical and flexural behavior of a wire-bond plastic ball grid array (WB-PBGA) package are characterized by high sensitive moiré interferometry. Moiré fringe patterns are recorded and analyzed for several bending loads and temperatures. At the temperature higher than 100°C, the inelastic deformation in solder balls become more dominant, so that the bending of the molding compound decreases while temperature increases. The deformation caused by thermally induced bending is compared with that caused by mechanical bending. The strain results show that the solder ball located at the edge of the chip has largest shear strain by the thermal load while the maximum average shear strain by the bending moment occurs in the end solder.

1. 서론

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 과제로 부각되고 있다. 반도체 패키지는 서로 다른 열팽창계수와 탄성계수를 갖는 여러 가지의 재료로 구성되어 있다. 반도체 칩에 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.

이와 더불어 휴대용 전자제품들이 급속하게 발전하면서 고밀도 칩과 두께가 얇은 패키지가 많이 개발되어 사용되고 있다. 이러한 휴대용 전자제품에서는 반복적인 작동으로 인하여 반도체 패키지 결합체에 굽힘하중이 가해지는 경우가 많고 이로 인해 파손이 일어날 수 있으므로, 열적 피로뿐 아니라 굽힘 피로에 대한 신뢰성 평가가 필요하다. 따라서 반도체 패키지의 설계기술을 발전시키고, 최대한의 성능과 신뢰성을 얻기 위해서는 열적, 기계적인 하중에 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 거동에 대한 연구^(1,2)가 수행되어 왔다. 이러한 연구에서는 정해진 최고 온도와 최저온도 사이를 반복 시험하는 ATC

* 객원설사, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail : jinwon@chungbuk.ac.kr
TEL : (043)261-2456 FAX : (043)263-2441
* Dept. of Mechanical Engineering,
Univ. of Maryland

(accelerated thermal cycling) 시험이 주로 수행되었다. 이 시험으로부터 결정되는 피로수명횟수는 패키지 설계의 비교를 위해서는 유용하게 사용될 수 있으나, 파손에 이르는 각 패키지 재료의 열적-기계적 거동에는 제한된 정보만을 제공한다. 열적 하중을 받고 있는 패키지의 응력과 변형률을 평가하여 패키지의 신뢰성을 예측하는데 유용요소법이 유용하게 이용될 수 있다.^(3,4) 유용요소법을 이용하면 복잡한 하중조건과 경계조건을 갖는 대부분의 전자 패키지를 해석할 수 있지만, 서로 다른 재료 사이의 특이해 (singularity) 문제, 납과 같은 재료의 비선형 거동 문제 등으로 인하여 경우에 따라서는 큰 오차를 나타낼 수 있다. 따라서, 전자 패키지의 정확한 변형 거동을 평가하기 위해서는 신뢰성 있는 실험적인 방법이 필요하다.

최근에는 레이저를 사용하는 무아래 간섭계 기술^(5,6)이 개발되어 아주 높은 정밀도를 가지고 응용^(7,8)되고 있다. 무아래 간섭법은 정밀도가 대단히 높고 비접촉으로 전체영역의 변형 상태를 측정할 수 있으며 주위환경에 민감하지 않다는 장점을 가지고 있다. 이러한 특성으로 무아래 간섭법은 최근에 초소형 전자 부품들의 열변형해석^(9,10) 굽힘해석⁽¹²⁾ 등에 효과적으로 이용되어 왔다.

본 논문에서는 높은 I/O 개수의 반도체 패키지로 널리 쓰이고 있는 wire-bond plastic ball grid array (WB-PBGA) 패키지를 대상으로 하여 열변형과 굽힘변형에 대한 실험과 해석을 수행하였다. 실시간 무아래 간섭계를 이용하여 각 온도단계 및 하중단계에서 변위분포를 나타내는 간섭무늬를 각각 얻고, 그로부터 굽힘변형 거동 및 솔더 볼(solder ball)의 변형률에 대한 해석을 비교하여 수행하였다.

2. 무아래 간섭법

무아래 간섭법 (Moiré interferometry method)은 빛의 회절과 간섭이라는 두 가지 성질을 주로 이용하여, 평면 내에서 정해진 2축에 대한 변위성분을 나타내는 간섭무늬를 얻어내는 광학적인 실험방법이다. 이 방법에서는 아주 작은 간격 (보통 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 움직이도록 한다. 이와 같은 회절격자에 빛이 입사되면 그보다 작

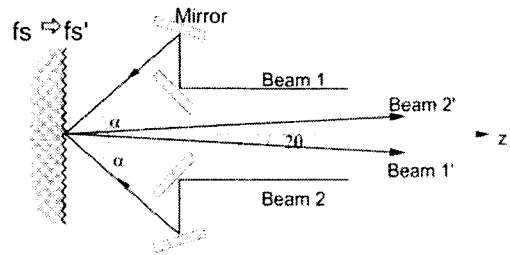


Fig. 1 Schematic diagram of an interferometer for moiré interferometry

은 강도를 가지는 여러 개의 빛으로 나누어져 반사되며, 그 나누어진 빛은 정해진 윗한개의 각도를 가지고 진행하는 회절현상이 일어난다.

한 빛에서 나누어진 간섭성이 있는 두 개의 빛에 경로차이가 생기면 이것들은 간섭무늬를 만들게 된다. 시편에 집합된 회절격자에 같은 광원으로 부터 나누어진 두 개의 평행광이 Fig. 1과 같이 $\pm \alpha$ 의 각도로 입사되도록 하여 각각에 대하여 회절된 빛이 시편 표면의 법선방향으로 진행하도록 α 를 조정하면 두 광선은 같은 방향으로 진행하므로 간섭이 일어나지 않는다. 여기서, He-Ne 레이저의 파장이 632.8 nm이고, 회절격자의 주파수가 1200 lines/mm인 경우에 α 는 49.4°가 된다. 시편이 변형하여 시편 위에 부착된 회절격자의 주파수 f 가 변하게 되면 회절되는 빛은 Fig. 1과 같이 2θ 의 각도를 가지고 진행하게 된다. 이러한 두 광선은 간섭무늬를 생겨나게 하며, 회절격자의 주파수가 더 크게 변하면 θ 가 커지며 그에 따라 간섭무늬의 간격은 좁아지게 된다.

Fig. 1에서 설명한 변형측정원리는 x 방향의 변위 U를 측정하기 위한 것이다. 평면 내의 두 방향 변위 U, V를 동시에 측정하기 위해서는 직교형으로 홈이 나 있는 회절격자를 시편에 접착하고 빛을 4방향에서 입사시키는 시스템을 구성하여야 한다.

이렇게 얻어지는 간섭무늬들은 시편의 표면에서 각각 변위 U와 V에 대한 등변위곡선을 나타낸다. 평면의 각 점에서의 변위는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$U(x, y) = \frac{1}{2f_x} N_x(x, y) \tag{1}$$

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

여기서 $N_x(x, y)$ 와 $N_y(x, y)$ 는 위치에 따라 분포하

는 간섭무늬의 파수이다. 보통의 경우에 $f=1200$ lines/mm이므로 인접한 간섭무늬 사이는 $0.417 \mu\text{m}$ 의 변위 차이를 나타낸다.

평면내의 변형률을 계산하여야 할 때에는 다음 식을 이용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial U}{\partial x} \approx \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_x}{\Delta x} \right] \\ \epsilon_y &= \frac{\partial V}{\partial y} \approx \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_y}{\Delta y} \right] \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y} \approx \frac{1}{2f_s} \left[\frac{\Delta N_x}{\Delta x} + \frac{\Delta N_y}{\Delta y} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

3. 실험방법

3.1 시편준비

본 실험에서 대상으로 하는 반도체 패키지는 225개(15×15)의 I/O를 가진 한 변 27 mm의 WB-PBGA이다. 반도체 패키지는 Fig. 2와 같이 반도체 칩, plastic molding compound 및 유기 기질(organic substrate)로 구성되어 있으며, 이 패키지는 저온 솔더 볼(eutectic solder ball)로 FR-4 PCB에 연결되어 있다. 솔더 볼은 높이 0.75 mm, 가장 큰 직경 1.10 mm인 구형이며 솔더 볼 중심선 사이의 간격은 1.5 mm이다.

패키지 결합체 (package assembly, 반도체 패키지+solder ball+PCB)를 칩이 나타나는 단면을 따라서 절단하고, 솔더 볼의 직경이 가장 크게 되도록 표면을 연마하여 아주 매끄럽게 하였다. 접도가 낮은 에폭시를 이용하여 회절격자 물드를 상온(20°C)에서 시편에 복제하여 1200 lines/mm의 주기를 가진 회절격자를 생성하였다.

3.2 실시간 열하중 시험

시편에 온도변화를 주기 위하여 대류방식의 가열과 냉각을 할 수 있는 온도 chamber를 사용하였다. 이 chamber는 진동을 유발할 수 있으므로

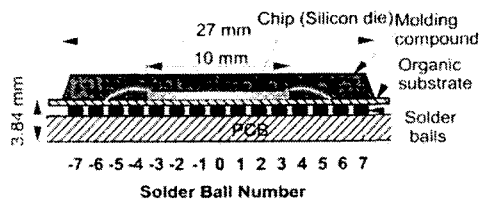


Fig. 2 Schematic diagram of a sectioned WB-PBGA package assembly

광학상지와 시편과의 상대운동을 방지하기 위하여 모든 광학상지와 CCD 카메라가 일체화된 무아래 간섭계 장치 (PEMI-II, Photo mechanics사)를 사용하고 시편을 고정된 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 필요에 따라 줌렌즈를 이용하여 영상을 확대하여 기록하였다. 간섭계 장치에 부착된 강제회전 조정나사를 이용하여 이동 간섭무늬(carrier fringe)를 얻어내었다. Fig. 3은 본 실험에서 수행한 시간에 따른 온도관계를 보여주고 있다.

3.3 4점 굽힘 시험

패키지 결합체에 굽힘변형을 주기 위하여 무아래 간섭계를 위해 특별히 고안된 비소 하중장치를 이용하였다. 하중장치는 2개의 케기블록을 이용하여 힘을 증폭시키는 구조로 되어 있다. Fig. 4과 같이 4개의 핀을 이용하여 4점 굽힘시험을 수행하였다. 바깥쪽의 핀들은 PCB 아래 표면과 접촉하고, 안쪽의 핀들은 패키지의 molding compound 위 표면과 접촉하도록 하여 안쪽 핀 사이에 순수 모멘트가 작용되도록 하였다. 하중

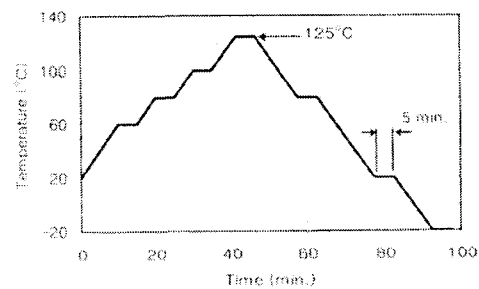


Fig. 3 Temperature profile used in the experiment of thermal loading

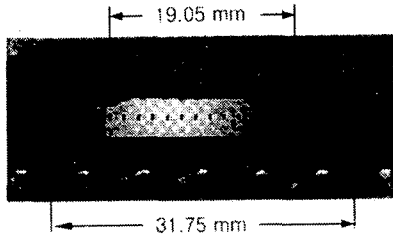


Fig. 4 Four-point bending test of WB-PBGA package assembly with moiré grating

장치에 힘을 단계적으로 가하여 안쪽 핀 사이에 일정한 굽힘 모멘트 14.1 N.mm, 21.2 N.mm, 28.2 N.mm, 35.3 N.mm, 42.3 N.mm, 56.4 N.mm, 70.6 N.mm를 차례로 발생시키고 힘을 제거시켜 35.3 N.mm, 0 N.mm의 모멘트를 발생시켰다. V 블록과 핀 사이, 핀과 시핀 사이의 마찰을 줄이기 위하여 핀의 표면에 테프론 테이프를 접착하였다.

회절격자가 접착된 시핀을 Fig. 4와 같이 핀 사이에 놓고 하중장치와 잘 정렬한 후 아주 작은 힘(1 N 정도)을 가해 시핀을 핀 사이에서 움직이지 않도록 하였다. 이 상태에서 간섭계의 거울들을 정렬하고, 열 하중 실험에서와 같은 방법으로 초기 변위장을 얻어내었다. 하중장치에 힘을 증가시켜 각 하중단계에서 간섭무늬를 기록하였다.

4. 실험결과 및 토의

각 굽힘하중 단계에서 기록한 U, V 변위의 간섭무늬 중 4가지 경우를 Fig. 5에 나타내었다. U 변위와 V 변위를 나타내는 간섭무늬는 일반적인 4점 굽힘 시핀의 형태를 보이고 있으나, 솔더 볼들의 영향으로 중립축이 분명하지 않고, 반도체 칩의 강성이 다른 재료에 비해 상당히 크기 때문에 칩이 위치한 부분에는 변형이 거의 일어나지 않았음을 보이고 있다. U 변위를 보면 하중이 증가함에 따라, 양쪽 끝 솔더 볼에 진단 변형률 $\Delta U/\Delta y$ 이 커져서 파손이 일어난 것을 알 수 있다. V 변위를 보면 하중이 증가함에 따라 굽힘변형이 급격하게 증가하고 있음을 볼 수 있다. PCB 쪽에서 보면 솔더 볼이 있는 부분에는 강성이 커져서 굽힘변형이 작고, 솔더 볼이 없는 부분은 굽힘변형이 커서 국부적으로는 계단식으로 변형하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 V 변위 간섭무늬에서 패키지의 중심

선을 따라 얻어낸 각 모멘트에 대한 굽힘변위 분포를 보여주고 있다. 모멘트가 증가할수록 변위 값의 증가율이 커지며, 중심부분의 변형이 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 하중을 제거한 후에도 상당한 양의 굽힘변형이 남아 있어서 시핀에 소성변형이 발생하였음을 알 수 있다.

각 온도단계에서 기록한 U, V 변위의 간섭무늬를 Fig. 7에 나타내었다. 80°C의 U 변위에서 나타난 것과 같이 열팽창에 의하여 x 방향으로의 인장변형률이 발생된 것을 볼 수 있다. 열팽창계수가 낮은 반도체 칩 부분에는 작은 변형률이 발생되었고 열팽창계수가 큰 몰딩 및 PCB 부분에는 큰 변형률이 발생되었으며 이로 인하여 전체적으로 굽힘변형이 일어났음을 볼 수 있다. V 변위의 간섭무늬가 4점 굽힘시험에서와 아주 다르게 보이는 것은 온도의 증가로 인해 y 방향으로 팽창함과 동시에 굽힘변형이 발생했기 때문이다.

Fig. 8은 V 변위 간섭무늬에서 중심선을 따라 얻어낸 각 온도에 대한 굽힘변위 분포를 보여주고 있다. 온도가 100°C가 될 때까지는 온도가 증가함에 따라 굽힘변형이 증가하지만, 온도가 125°C가 되면 상당히 다른 변위분포를 보이고 있다. 이것은 100°C 이하의 온도에서는 솔더 볼을 사이에 두고 윗 부분(패키지)과 아랫 부분의 열팽창계수의 차이로 인하여 굽힘변형(-)이 일어나지만, 125°C가 되면 솔더 볼에 항복이 일어나면서 패키지의 몰딩 부분과 칩 부분의 열팽창계수 차이에 의해서 반대로 굽어지는(+) 현상을 보이기 때문이다. 칩이 없는 부분에서는 원래의 굽힘변형(-)이 일어나서 결국 S자로 구부러진(-) 형태의 변형이 일어났다. 온도가 내려갈 때는 solder ball에 이와 같은 현상이 일어나지 않아서 반대방향으로 굽힘변형이 진행되었다.

Fig. 9는 모멘트 및 온도에 따라 발생하는 패키지 끝단의 y 방향 변위 변화를 보여주고 있다. 이 값은 중심으로부터 6번째 솔더 볼과 7번째(제일 바깥쪽) 솔더 볼의 중간 지점 ($x=9.75$ mm)에서 계산한 것이다. 기계적 하중에 의해서는 하중이 증가함에 따라 변위가 크게 증가하다가 하중을 제거하면 탄성회복이 일어나는 일반적인 탄소성 변형거동을 볼 수 있다. 온도의 변화에 의해서는 솔더 볼에 항복이 일어나는 100°C까지 변위가 증가하다가 이 온도를 넘어선 이후에는 변위가 반대방향으로 계속 증가하는 현상을 보였다.

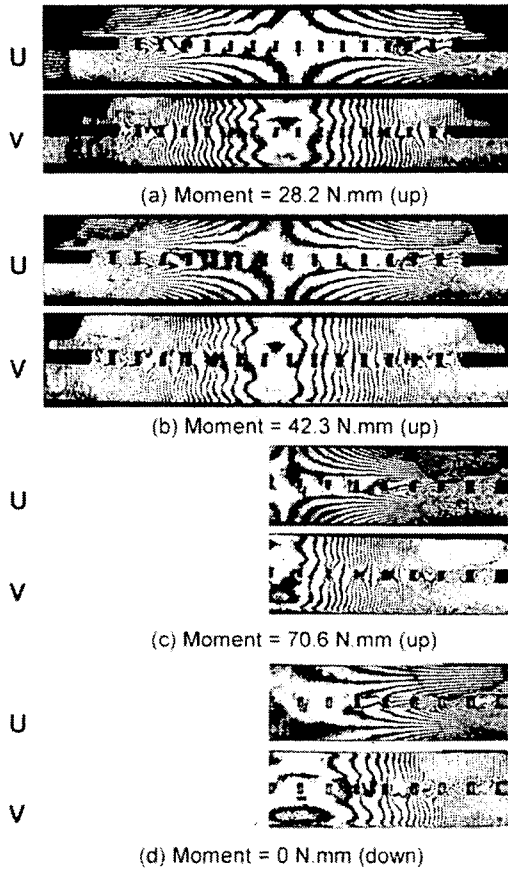


Fig. 5 Fringe patterns of the WB-PBGA package assembly in four point bending

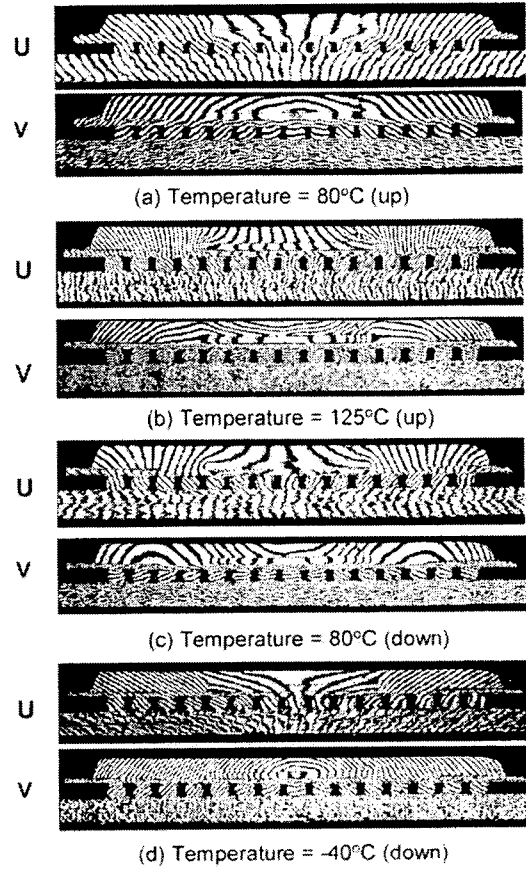


Fig. 7 Fringe patterns of the WB-PBGA package assembly by temperature change

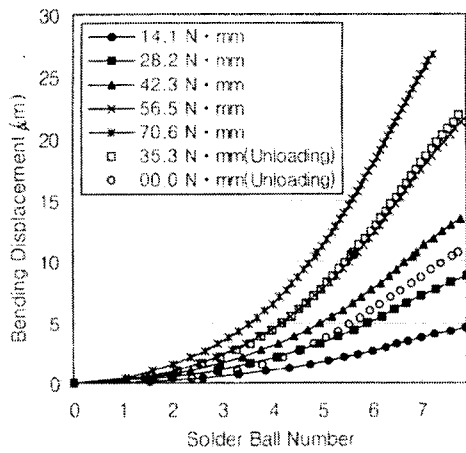


Fig. 6 Bending displacement distributions in the four point bending

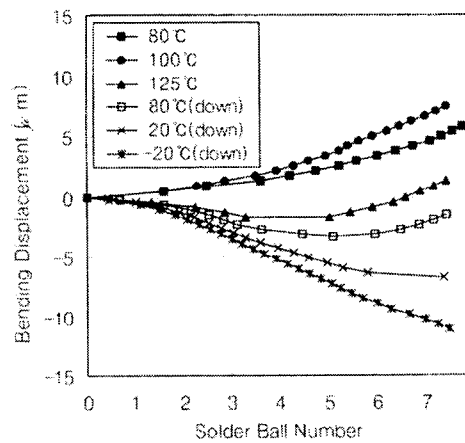


Fig. 8 Bending displacement distributions by temperature change

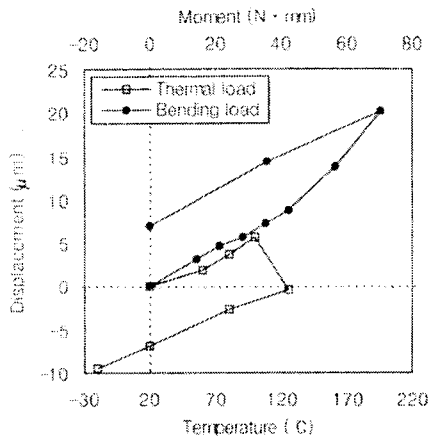


Fig. 9 Tip displacement according to the bending load and thermal load

모멘트가 28.2 N.mm일 때의 굽힘변형 분포가 온도가 100°C일 때의 굽힘변형 분포와 아주 일치하였다. 따라서 이 반도체 패키지 결합체의 경우 솔더 볼에 항복이 일어나기 전까지는 1°C가 증가할 때마다 약 0.176 N.mm의 모멘트를 받아 굽힘 변형을 하는 것과 같다고 할 수 있다.

Fig. 10은 molding compound 윗면을 따라 분포하는 굽힘 변형률 ϵ_x 의 분포를 보여주고 있다. 이 분포는 U 변위 간섭무늬와 식 (2)에 의하여 구해졌다. 온도가 100°C일 경우와 모멘트가 28.3 N.mm일 경우에 y 방향 변위 V는 거의 같았지만 굽힘 변형률은 아주 다른 값을 갖는 것을 알 수 있다. 모멘트를 받을 때는 molding compound 윗면은 압축변형률, PCB 아랫면은 인장변형률이 발생되지만, 온도가 증가할 때는 전체적으로 큰 인장변형률을 받고 거기에 굽힘에 의한 인장변형률과 압축변형률이 중첩된다. 따라서 모멘트에 의해서는 압축변형률, 온도증가에 의해서는 인장변형률을 발생되었다. Fig. 10에서 점선은 반도체 칩이 있는 범위 ($x=-5\text{ mm} \sim 5\text{ mm}$)를 나타내고 있으며, 굽힘변형률의 절대값은 이 범위의 바깥에서 급격하게 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

BGA와 같이 높은 IO 개수를 가진 반도체 패키지 결합체가 기계적 하중이나 열하중을 받을 때 파손의 가장 큰 원인이 되는 것은 molding compound와 PCB를 연결하는 솔더 볼의 응력집중이다. 그 중에서 솔더 볼의 전단 변형률은 BGA 패키지 결합체에서 가장 흔히 발생하는 파손의

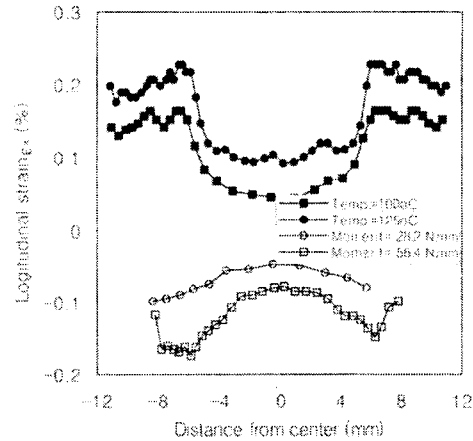


Fig. 10 Longitudinal strain distributions along the top of the molding compound

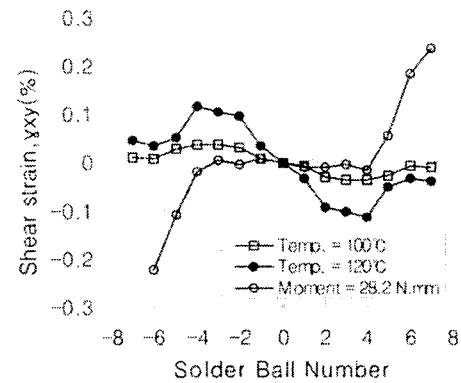


Fig. 11 Average shear strain distributions for WB-PBGA solder balls

원인이 된다. Fig. 11은 솔더 볼에서 발생하는 평균 전단 변형률 γ_{xy} 값을 보여주고 있다. 모멘트에 의해서는 중간 부분의 솔더 볼에는 전단 변형률이 거의 발생하지 않고 가장 바깥에 있는 솔더 볼에서 큰 전단변형률이 발생하여 큰 모멘트에서는 소성변형이 나타났다. 온도증가에 의해서는 실리콘 칩의 경계 부분인 4번째 솔더 볼 부근에서 가장 큰 전단 변형률이 발생하였다. 이것은 최대 전단 변형률이 솔더 볼을 중심으로 열팽창 계수의 차이가 가장 큰 지점 중 중심축으로부터의 거리가 가장 큰 지점에서 나타남을 보여주고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 실시간 무아래 간섭계를 이용하여 WB-PBGA 패키지의 열적하중 및 굽힘하중에 대한 거동을 해석하였고 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굽힘모멘트에 의해 발생하는 굽힘변형은 하중이 증가함에 따라 커지다가 하중이 더 증가하면 급격히 커지며 하중을 제거하였을 때에도 잔류변형이 남는 비선형 거동을 보였다. 온도변화에 의해서는 100°C 근처까지는 온도가 증가함에 따라 굽힘변형이 커지다가 그 이상이 되면 솔더 볼에 항복이 일어나 굽힘변형이 작아지는 거동을 보였고 온도가 감소할 때에는 탄성 거동을 보였다.

(2) 굽힘모멘트에 의해서 발생하는 솔더 볼의 평균 전단변형률은 중심으로부터 바깥으로 갈수록 급격하게 증가하였고, 온도변화에 의해 발생하는 전단 변형률은 반도체 칩이 있는 부분까지 증가하다가 그 바깥쪽에서는 감소하여 칩의 경계 부분에 있는 솔더 볼에 가장 큰 전단 변형률이 발생되었다.

(3) 무아래 간섭법은 반도체 패키지와 같은 초소형 전자장치의 변형을 측정하고 거동을 파악하는데 유용하게 이용될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단의 2000년도 목적기초 연구사업 지역대학 우수과학자 지원연구 (과제번호 R02-2000-00304)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Darveaux, R. and Mawer, A., 1995, "Thermal and Power Cycle Limit of Plastic ball grid array (PBGA) assemblies," *Proc. Surface Mount Int. Conf.*, pp. 315 ~ 326.
- (2) Skipor, A.F., Harren, S.V. and Botsis, J., 1996, "On the Constitutive Response of 63/37 Sn/Pb Eutectic Solder," *ASME. J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 118, pp. 1 ~ 11.
- (3) Corbin, J.S., 1993, "Finite Element Analysis for Solder Ball Connect (SBC) Structural design Optimization," *IBM J. Research Development*, Vol. 37, pp. 585 ~ 596.
- (4) Lee, T., Lee, J. and Jung, I., 1998, "Finite Element Analysis for Solder Ball Failures in Chip Scale Packages," *Microelectronics and Reliability*, Vol. 38, No. 12, pp. 1941 ~ 1947.
- (5) Post, D., Han, B. and Ifju, P., *High Sensitivity Moiré : Experimental Analysis for Mechanics and Materials*, Springer-Verlag, New York.
- (6) Joo, J. W., Chai S. E. and Shin, D. I., 2001, "Deformation Analysis of Composite-Patched Concrete Using Moiré Interferometry," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 1, pp. 160 ~ 170.
- (7) Post, D., Wood, J. D., Han, B., Parks, V. J. and Gerstle, Jr, F. P., 1992, "Thermal Stresses in a Bimaterial Joint : An Experimental Analysis," *J. Applied Mechanics. Trans. ASME*, Vol. 61, pp. 192 ~ 198.
- (8) Y. Guo, D. Post and B. Han, 1992, "Thick Composites in Compression: An Experimental Study of Micro-mechanical Behavior and Smeared Engineering Properties," *J. Composite Material*, Vol. 26, No. 13, pp. 1930 ~ 1944.
- (9) 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.
- (10) Han, B. and Guo, Y., 1995, "Thermal Deformation Analysis of Various Electronic Packaging Products by Moiré and Microscopic Moiré Interferometry," *J. Electronic Packaging. Trans. ASME*, Vol. 117, pp. 185 ~ 191.
- (11) Han, B., 1998, "Recent Advancements of Moiré and Microscopic Moiré Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices," *Experimental Mechanics*, Vol. 38, No. 4, pp. 278 ~ 288.
- (12) Stout, E.A., Sottos, N.R. and Skipor, A.F., 2000, "Mechanical Characterization of Plastic Ball Grid Array Package Flexure Using Moiré Interferometry," *IEEE Trans. on Advanced Packaging*, Vol. 23, No. 4, pp. 637 ~ 645.