

# 모아레 간섭계를 이용한 Flip Chip PBGA 패키지의 온도변화에 대한 거동해석

김도형<sup>†</sup>·최용서\*·주진원\*\*

## Thermo-mechanical Analysis of Flip Chip PBGA Package Using Moiré Interferometry

Dohyung Kim, Yongseo Choi, and Jinwon Joo

**Key Words:** Moiré Interferometry (모아레 간섭계), Flip chip Package (Flip chip 패키지), Thermomechanical behavior (열-기계 거동), BGA package (BGA 패키지)

### Abstract

Thermo-mechanical behavior of flip-chip plastic ball grid array (FC-PBGA) packages are characterized by high sensitive moiré interferometry. Moiré fringe patterns are recorded and analyzed for several temperatures. Deformation analysis of bending displacements of the packages and average strains in the solder balls for a single-sided package assembly and a double-sided package assembly are presented. The bending displacement of the double-sided package assembly is smaller than that of the single-sided one. The largest of effective strain occurred in the solder ball located at the edge of the chip and its magnitude of the double-sided package assembly is greater than that of single-sided one.

### 1. 서 론

반도체 패키지의 고집적화와 패키징 기술의 계속적인 발전에 따라 많은 I/O의 수 대한 필요성에 의해 개발된 패키지가 FC-PBGA (Flip Chip Plastic Ball Grid Array)이다. 이러한 패키지가 PCB에 실장되어 작동될 때는 열하중에 의한 주기적인 온도변화를 받게된다. FC-PBGA 패키지는 실리콘 칩, 유기기질(organic substrate), 솔더뎀프(solder bump), 언더필(fill) 등 다양한 재료로 구성되어 있고, 이것이 PCB와 솔더볼(solder ball)로 연결되어 있다. 이와 같은 패키지 결합체(package assembly, package+PCB+solder ball)에 온

도변화가 생기면 서로 다른 열팽창계수로 인하여 균일하지 않은 변형과 국부응력이 발생한다. 집중된 열응력은 사이클이 진행될수록 파손의 큰 원인이 될 수 있다. 따라서 반도체 패키지의 최대한의 성능과 신뢰성을 얻기 위해서는 열적인 하중에 대한 패키지 각 요소의 변형거동<sup>(1-3)</sup>을 이해할 필요가 있다.

본 논문에서는 FC-PBGA 패키지를 대상으로 하여 열변형에 대한 실험과 해석을 수행하였다. 모아레 간섭계<sup>(4)</sup>를 이용하여 각 온도단계에서 변위분포를 나타내는 간섭무늬를 각각 얻고, 그로부터 굽힘변형 거동 및 솔더 볼(solder ball)의 변형률에 대한 해석을 비교하여 수행하였다. 또한 한 개의 패키지가 PCB에 연결되어 있는 단면 패키지 결합체와 두 개의 패키지가 PCB의 양쪽에 연결되어 있는 양면 패키지 결합체의 변형 거동을 비교하여 기술하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 충북대학교 대학원 기계공학과

E-mail : dhkim2002@just.chungbuk.ac.kr

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

\* 충북대학교 대학원 기계공학과

\*\* 충북대학교 기계공학부

## 2. 모아레 간섭계

모아레 간섭법은 빛의 회절과 간섭을 이용한 정해진 2축(x,y)의 In-plane에 대한 변위로 간섭무늬를 얻어내는 광학식 방법이다. 이 실험에 사용된 모아레 간섭계는 8mirror, 4 beam system 으로 U 변위장과 V 변위장을 동시에 측정할 수 있는 방법이다. 그리소 시편에는 알루미늄을 증착시켜 만든 회절격자(1200lines/mm)를 부착시켜 평행광으로 입사된 레이저 빔의 회절에 의해 간섭을 일으켜 간섭무늬를 얻어 내었다. 이렇게 얻어지는 간섭무늬들은 시편의 표면에서 각각 변위 U와 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 차수이며, 일반적으로  $f_s = 1200 \text{ lines/mm}$  이므로 인접한 간섭무늬간의 차이는  $0.417\mu\text{m}$ 의 변위를 나타낸다.

또한, In-plane에서의 변형률은 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

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

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

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

## 3. 실험방법

### 3.1 시편준비

본 실험에서 사용된 플립칩 패키지는 Fig. 1과 같이 실리콘 칩이 유기기판 위에 작은 솔더볼로 연결되어 있고, 그 아래에는 직경 0.8mm 솔더볼이 PCB와 391개(19×19)의 배열로 연결되어 있으며 솔더볼간의 거리(pitch)는 0.8mm이고, 칩과 유기기판의 사이는 에폭시 언더필(underfill)로 채워져서 열변형에 버틸 수 있도록 한 패키지 결합

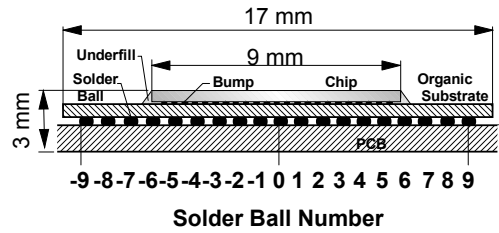


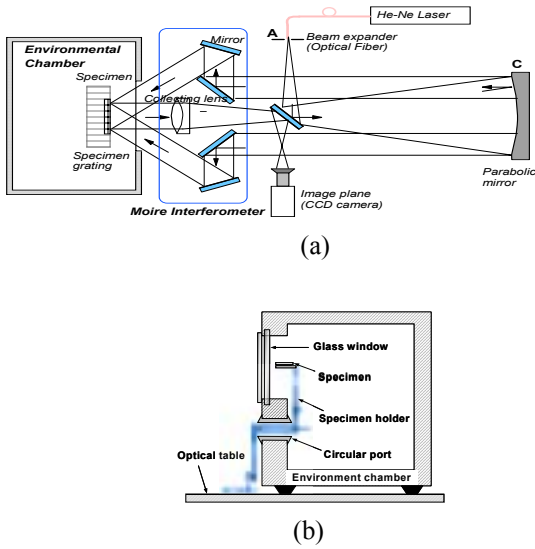
Fig. 1 Schematic diagram of a sectioned FC-PBGA package assembly

체(assembly)이다. 그리고 PCB의 양면에 규격이 같은 플립칩이 연결되어 있는 형태의 시편도 함께 실험하였다.

In-plane 변형을 관찰하기 위하여 패키지의 수직단면이 잘 나타나도록 다이아몬드톱 기계를 이용하여 절단한 후 매우 매끄러운 면이 될 수 있도록 폴리싱머신으로 솔더볼의 단면이 가장 크게 되는 면이 나올 때까지 작업을 하여 알코올로 잘 세척을 하고 건조시킨다. 그리고 시편에 회절격자(1200lines/mm)를 복제하기 위해 점도가 낮은 에폭시로 그 위에 얇게 바른 후 시편을 올려놓은 후 48시간 경화한 후 분리하여 회절격자가 복제된 시편을 완성하였다.

### 3.2 열하중 실험

실험에 사용한 시스템은 Fig. 2 (a)와 같이 광학장치, 모아레 간섭계 온도챔버로 구성하였다. 원하는 열하중을 시편에 주기 위하여 대류로 온도를 상승 또는 하강시키는 온도chamber를 사용하였다. 이 온도 챔버 내부에 Fig. 2(b)처럼 시편을 thermal silicon을 고정대 위에 약간 바른 후 시편을 그 위에 올려놓아 고정대의 온도 상승에 의한 시편의 열변형을 최소화하고 고정대에 시편의 넓지 않은 면적이 닿도록 고안하였다. 챔버내부의 시편을 관찰하기 용이하도록 챔버의 창이 간섭계와 나란하게 정렬하여 레이저 빔이 원활하게 입사될 수 있도록 장치하였다. 챔버의 온도는 RS-232C 통신을 이용하여 개인용 컴퓨터로 단계적으로 상승시킬 수 있도록 제어하였으며 냉각은 chamber 내에서 자연냉각 되도록 하고 설치된 시편의 U, V의 초기 변위장(null field)을 잡기 위해 간섭계를 강제회전을 시켜 시편과 잘 조 절하였다. 그리고 CCD 카메라로 원하는 크기의 이미지를 얻기 위해 초점을 맞추고 챔버의 온도를 올려가며 실험을 실시하였다. 온도상승 시 연

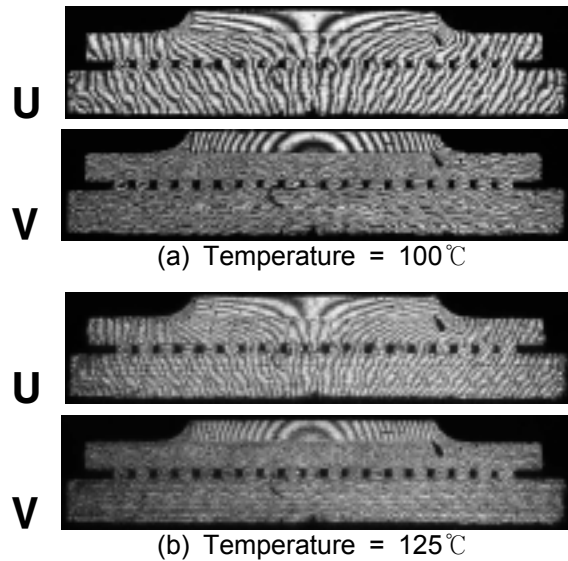


**Fig. 2** Schematic illustration of (a) experimental apparatus and (b) specimen holder with a environment chamber

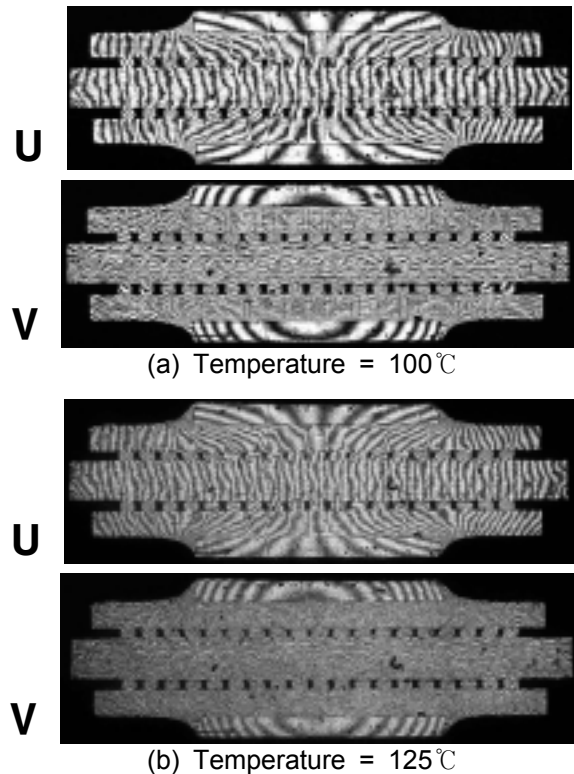
어지는 시편의 간섭무늬를 얻기 위해 개인용 컴퓨터에 설치되어 있는 영상획득장치의 프로그램을 이용하였으며 이때 외부진동을 차단하기 위해 챔버의 대류를 위한 팬(fan)을 정지시키고 시편에 연결되어 있는 온도계를 보면서 시편이 원하는 온도에서 변화하기 전에 영상을 얻어내었다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

**Fig.3**은 단면 패키지 결합체(single-sided package assembly)의 100℃와 125℃에서 기록한 간섭무늬를 보여주고 있다. U 변위를 나타내는 간섭무늬에서 보는 바와 같이, 온도의 상승으로 인하여 길이방향으로 큰 팽창이 일어났음을 알 수 있다. U 변위는 열팽창계수의 차이로 인하여 칩 쪽 보다 PCB 쪽이 훨씬 크게 나타났으며, 칩 바깥부분의 유기기질 부분에서는 PCB와 비슷한 정도의 팽창이 일어났다. 이로 인하여 칩이 차지하는 영역에서는 전체적으로 굽힘 변형이 일어났음을 볼 수 있다. 이러한 굽힘 변형은 V 변위를 나타내는 간섭무늬를 해석하면 정량적으로 구할 수 있다. V 변위를 나타내는 간섭무늬에서 보는 바와 같이 전체적으로 높이 방향으로도 큰 변형이 일어났다. 특히 PCB는 면외방향으로의 열팽창계수가 면내방향으로의 열팽창계수보다 상당히 크므로 높이 방향의 간섭무늬가 조밀하게 기록되었다.



**Fig. 3** Fringe Patterns of the single-sided FC-PBGA package assembly due to temperature change



**Fig. 4** Fringe Patterns of the double-sided FC-PBGA package assembly due to temperature change

간섭무늬가 수평방향과 평행하지 않은 것은 굽힘 변형이 일어났음을 보인다. 솔더볼에서도 열팽창으로 인한 V 변위가 발생함을 볼 수 있으며, 그 크기는 솔더볼의 위치에 따라 다르게 나타났다. 칩과 유기기질 사이에는 작은 솔더범퍼와 언더필이 채워져 있는데 그 부분에서 U 변위를 나타내는 간섭무늬의 불연속이 일어난 것으로 보이나 이것은 언더필 부분에서 전단변형이 집중되었기 때문이다.

Fig. 4는 양면 패키지 결합체의 간섭무늬를 보여주고 있다. PCB를 중심으로 양쪽에 패키지가 대칭적으로 연결되어 있기 때문에 PCB는 굽힘변형이 거의 일어나지 않았으며 패키지는 굽힘변형이 일어났으나, 그 크기는 단면 패키지 결합체의 경우에 비하여 작게 나타났다. 솔더볼에서의 간섭무늬는 솔더볼의 위치에 따라 상당히 다르게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 6은 각각 온도 100°C에서 V 변위 간섭무늬로부터 구한 단면과 양면 패키지 결합체의 굽힘변형 분포를 보여주고 있다. 굽힘변형은 칩의 길이방향 중간선, 유기기질의 중간선 및 PCB의 중간선을 따라 나타내었다. 단면 패키지 결합체에서는 칩과 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 전체적으로 위로 굽은 변형을 보였으며, 칩 가장자리 부근에서 유기기질과 PCB는 굽힘 방향이 변하는 변곡점이 발생되었다. 칩의 최대 수직 방향 변위는 약 5.0 μm이었다. 유기기질의 수직 방향 변위는 칩 가장자리를 기준으로 안쪽에서는 PCB의 수직방향 변위보다 크고, 바깥쪽에서는 PCB의 수직방향 변위보다 작게 나타났으며, 이러한 변위의 차이는 솔더볼의 수직방향 인장변형 분포와 관련이 있다.

Fig 6에서 보여주는 양면 패키지 결합체의 굽힘변형은 대칭성으로 인하여 단면 패키지 결합체와는 다른 분포를 보인다. PCB는 거의 굽힘변형을 하지 않았으며, 칩과 유기기질의 변형도 단면 패키지 결합체에 비해 작게 나타나서 칩의 최대 수직방향 변위는 약 2.5 μm이었다. PCB를 기준으로 반대편에 위치한 칩과 유기기질의 변형은 부호가 반대인 대칭의 형태로 나타났으며, 칩의 가장자리 바깥에서는 변형이 반대로 발생하였다.

Fig. 7은 칩 아래에 있는 솔더볼 중 가장 바깥(No. 5) 솔더볼의 중심을 수직방향으로 지나는 선을 따라 분포하는 수평방향 변위(U 변위) 분포를

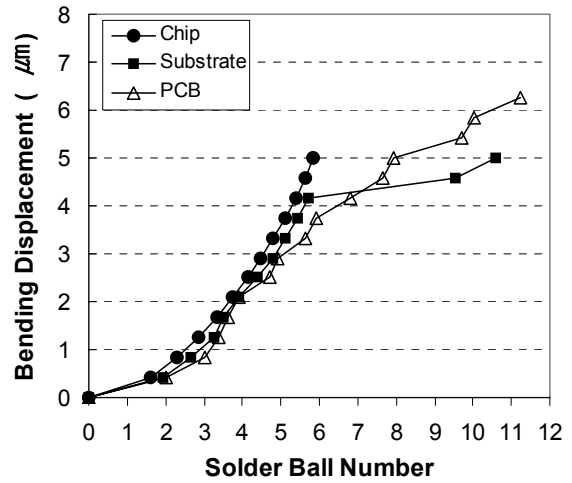


Fig. 5 Bending distributions of the single-sided FC-PBGA package assembly at 100°C

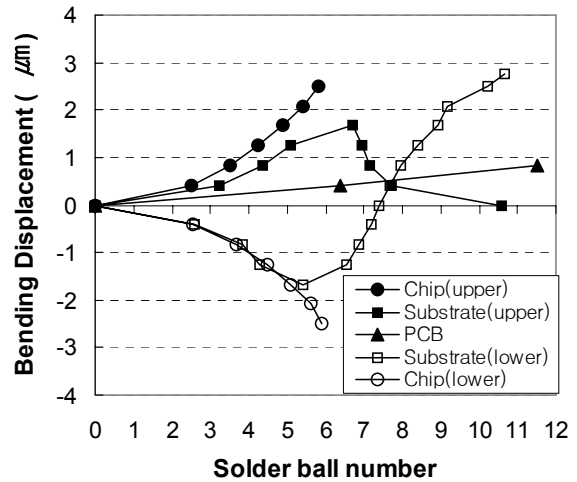


Fig. 6 Bending distributions of the double-sided FC-PBGA package assembly at 100°C

보여주고 있다. U 변위는 PCB에서 가장 크게 나타났으며, 양면 패키지 결합체보다 단면 패키지 결합체의 경우에 변위가 약간 크게 나타났다. 칩과 유기기질의 연결부분인 언더필이 있는 부분에서 U 변위의 변화가 상당히 크게 나타났으며, 이것은 칩과 유기기질 사이에 미끄럼이 일어나거나 솔더범퍼의 전단변형이 크게 나타났음을 의미한다. Fig. 8은 온도에 따른 칩과 유기기질 사이에서 일어나는 수평방향 상대변위를 보여주고 있다. 두 가지 패키지 결합체의 상대변위는 단면 패키지 결합체가 양면 패키지 결합체보다 크게 나타났으며, 온도가 높아짐에 따라 두 패키지의

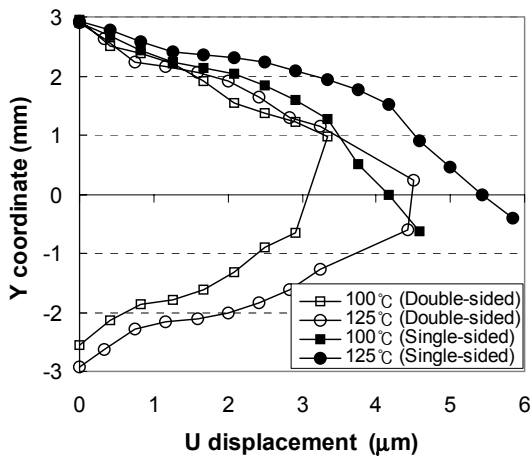


Fig. 7 Horizontal displacement distribution along the vertical line at #5 of solder ball

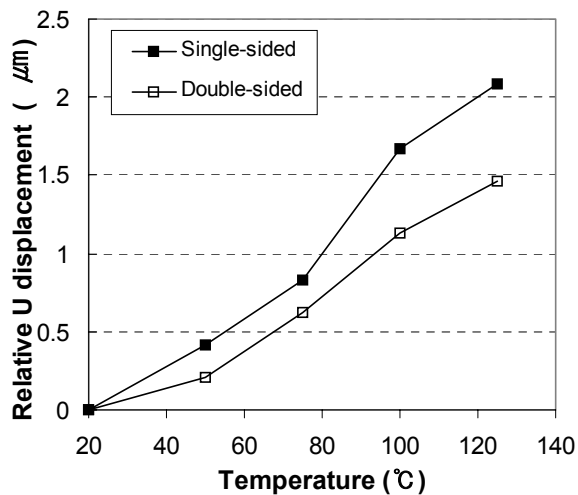


Fig. 8 Relative displacement of U field between chip and substrate at #5 solder ball

상대변위의 차이가 증가하는 것을 볼 수 있다. 반도체 패키지 결합체의 온도가 변화하면 균일하지 않은 열팽창으로 인해 굽힘변형이 발생할 뿐 아니라, 이를 연결하는 솔더볼도 변형하게 된다. 일반적인 패키지의 경우 솔더볼의 전단변형은 신뢰성에 큰 영향을 미치게 되며, FC-PBGA의 경우 수직방향의 수직변형률도 신뢰성에 관계된다고 알려져 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 온도 100°C에서 단면과 양면 패키지 결합체의 각 솔더볼에서 식(2)를 이용하여 구한 평균 전단변형률과 평균수직변형률을 보여주고 있다. 전단변형률은 두 경우 모두 PCB의 열팽창계수가 패키지의 유효열팽창계수보다 크므로 음의 부호를 가지며,

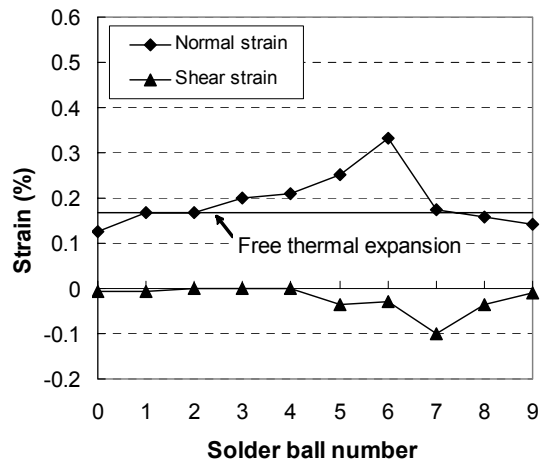


Fig. 9 Average strains of solder balls for the single-sided FC-PBGA package assembly

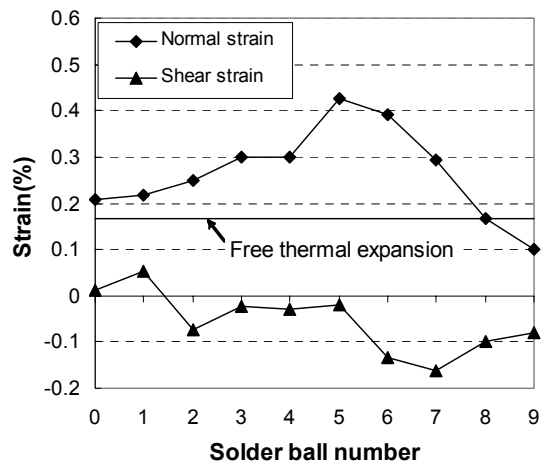


Fig. 10 Average strains of solder balls for the double-sided FC-PBGA package assembly

칩의 중앙 부분에서는 거의 0의 값을 갖고 바깥쪽으로 갈수록 서서히 증가하여 칩의 가장자리 바로 바깥쪽인 No. 7 솔더볼에서 최대값을 갖는다. 최대 평균 전단변형률은 단면 패키지 결합체의 경우 -0.10%이고, 양면 패키지의 경우는 -0.16%로 단면의 경우보다 약 1.6배 가량 크게 나타났다.

평균 수직변형률도 전단변형률과 비슷하게 중심점에서부터 바깥 솔더볼로 갈수록 증가하다가 단면 패키지결합체의 경우 칩 가장자리의 바로 바깥쪽 솔더볼인 No. 6 솔더 볼에서, 양면 패키지 결합체의 경우는 칩 가장자리의 바로 안쪽 솔더볼인 No. 5 솔더볼에서 가장 큰 값을 보였으며, 양면 패키지 결합체의 최대값은 단면의 경우

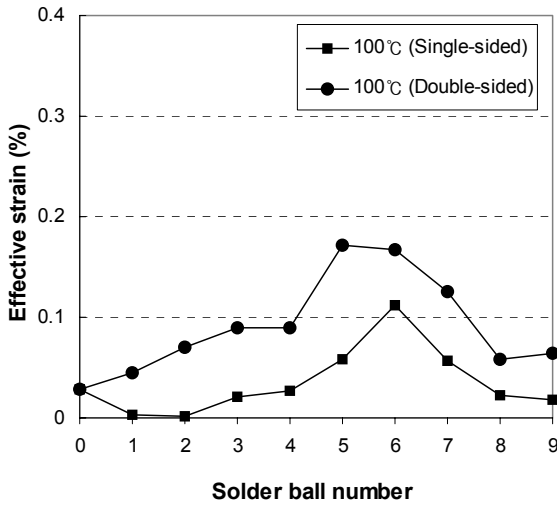


Fig. 11 Effective strains of solder balls for the FC-PBGA package

보다 약간 크게 발생되었다. 평균 수직변형률은 평균 전단변형률에 비해 상당히 큰 값으로 나타났으나, 대부분은 솔더볼의 열팽창에 의한 자유 변형률이며, 결정된 수직변형률과 자유 변형률의 차이가 열응력을 발생시키는 변형률로 간주할 수 있다.

Fig. 11은 온도 100°C에서 각 솔더볼에 대한 평균 유효변형률 값을 보여주고 있다. 패키지 결합체의 파손에 영향을 미치는 유효변형률의 최대값은 칩 가장자리 부근에서 발생하는 것으로 나타났다. 단면 패키지 결합체의 경우 칩 가장자리의 바로 바깥쪽 솔더볼인 No. 6 솔더볼에서 가장 큰 값인 0.112%를, 양면 패키지 결합체의 경우는 칩 가장자리의 바로 안쪽 솔더볼인 No. 5 솔더볼에서 가장 큰 값인 0.172%를 보였다

## 5. 결 론

본 논문에서는 모아레 간섭계를 이용하여 FC-PBGA 패키지의 온도변화에 대한 거동을 해석하였고 이를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

(1) FC-PBGA의 단면 패키지 결합체는 패키지 와 PCB의 열팽창계수 차이로 인하여 전체적으로 패키지 쪽으로 굽은 변형을 보였으며, 칩 가장자리 부근에서 유기기질과 PCB는 굽힘방향이 변하는 변곡점이 발생되었다.

(2) 양면 패키지 결합체의 굽힘변형은 대칭성으

로 인하여 PCB는 거의 굽힘변형을 하지 않았으며, 칩과 유기기질의 굽힘변형도 단면 패키지 결합체에 비해 작게 발생하였다.

(3) 솔더볼의 평균 전단변형률과 평균 수직변형률은 칩의 가장자리 바로 바깥쪽인 솔더볼에서 최대값을 갖으며, 양면 패키지 결합체의 최대값은 단면의 경우보다 크게 발생되어 열하중에 대하여 더 취약할 것으로 예측된다.

(4) 온도가 100°C일 때, FC-PBGA의 솔더볼의 유효변형률은 단면 패키지 결합체의 경우 칩 가장자리의 바로 바깥쪽 솔더볼에서 가장 큰 값인 0.112%를, 양면 패키지 결합체의 경우는 칩 가장자리의 바로 안쪽 솔더볼에서 가장 큰 값인 0.172%를 보였다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- (1) 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.
- (2) Verma, K, Columbus, D. and Han, B., 1999, "Development of Real Time/Variable Sensitivity Warpage Measurement Technique and its Application to Plastic Ball Grid Array Package," *IEEE Tran. Electronics Packaging Manufacturing*, Vol.22, No.1, pp.63 ~ 70.
- (3) 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.
- (4) Post, D., Han, B. and Ifju, P., *High Sensitivity Moiré : Experiental Analysis for Mechanics and Materials*, Springer-Verlag, New York.