

모아래 간섭계를 이용한 BGA 패키지의 비선형 열변형 해석

Non-linear Temperature Dependent Deformation Analysis of BGA Package Using Moire Interferometry

주진원*, Bongtae Han

충북대학교 기계공학부, CALCE EPSC, Univ. of Maryland

Abstract

Thermo-mechanical behavior of a ceramic ball grid array(CBGA) package assembly and wire bond ball grid array(WB-PBGA) package assemblies 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(warp) 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. The locations of the critical solder ball in WB-PBGA package assemblies are documented.

1. Introduction

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.

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

본 논문에서는 ceramic ball grid array(CBGA) 패키지와 wire bond ball grid array(WB-PBGA) 패키지를 대상으로 하여, 한 사이클의 온도변화로 인한 열변형 거동에 대한 광학실험과 해석을 수행하였다. 이를 위하여 실시간 모아래 간섭계를 이용하여 각 온도단계에서 변위분포를 나타내는 간섭무늬를 얻고, 그로부터 굽힘변형 거동 및 솔더볼(solder ball)의 변형률에 대한 해석을 수행하였다. 반도체 패키지는 온도가 변화할 때, 패키지 전체의 굽힘변형(warp)과 솔더의 변형집중이 신뢰성에 큰 영향을 미치며, 특히 CBGA 패키지는 높은 온도에서 심한 비선형 변형을 보이므로 이에 대한 해석을 집중적으로 수행하였다. WB-PBGA 패키지의 경우는 솔더 연결부의 그리드 패턴에 따른 변형 거동을 비교하기 위하여 3가지 종류의 시편에 대해 실험을 수행하였다.

2. Experimental Procedure

모아래 간섭법은 Fig. 1과 같이 빛의 회절(diffraction)과 간섭(interference)이라는 두 가지 성질을 주로 이용하여 평면 내에 정해진 2축(x, y)에 대한 변위 성분을 contour map형식으로 나타내는 광학적인 실험방법이다. 모아래 간섭법에서는 아주 작은 간격(보통, 1200 lines/mm)의 회절격자(diffraction grating)를 시편에 접착하여 시편과 함께 변형하도록 한다. 2축에 대한 변위 성분

을 동시에 측정하기 위하여 서로 직각 방향으로 홈이 나 있는 회절 격자를 사용한다.

얻어진 간섭무늬로부터 표면 위 각 점에서의 변위는 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

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

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 $f_s = 1200 \text{ lines/mm}$ 이므로 한 개의 간섭무늬 차이는 $0.417 \mu\text{m}$ 의 변위를 나타낸다.

본 논문에서 대상으로 하는 반도체 패키지는 CBGA(ceramic ball grid array) 패키지와 WB-PBGA(wire bond-ball grid array) 패키지이다. CBGA 패키지는 Fig. 2와 같이 361개(19×19)의 I/O를 가진 한 변 25 mm의 패키지로 대부분 세라믹 모듈로 이루어져 있으며, 이 패키지는 솔더볼 (solder ball)로 FR-4 PCB에 연결되어 있다. 솔더 연결부는 고용점 솔더볼(high melting solder ball, 90%Pb/10%Sn)과 저융점 솔더필렛(eutectic solder fillet, 63%Pb/37%Sn)으로 구성되어 있으며, 높이가 0.97 mm, 가장 큰 직경은 0.89 mm인 구형이고, 솔더 볼 중심선 사이의 간격은 1.27 mm이다. WB-PBGA 패키지는 Fig. 3과 같이 full grid(WB-PBGA-FM), perimeter (WB-PBGA-P) 및 perimeter with central connections(WB-PBGA-P/C)의 3가지 그리드 패턴을 갖는 시편을 실험하였으며, 각각의 단면 주요치수는 그림과 같다.

패키지 결합체(패키지+솔더볼+PCB)로부터 시편을 절단해 내고, 솔더 볼들의 직경이 가장 크게 되도록 표면을 연마하여 아주 매끄럽게 하였다. 회절격자 모듈을 상온에서 시편에 복제하여 1200 lines/mm의 주기를 가진 회절격자를 생성하였다. 회절격자가 복제된 패키지 복합체 시편에 대하여 상온에서 모아래 간섭계를 정렬하여 간섭무늬가 가능한 없어진 초기 변위장(null field)을 얻어 내었다. 시편에 온도변화를 주기 위하여 대류방식의 가열과 냉각을 할 수 있는 온도 chamber를 사용하였다. 시편을 chamber 안에서 고정시킨 후 거울들을 정렬하고 간섭계 전체에 강제회전을 주어 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.

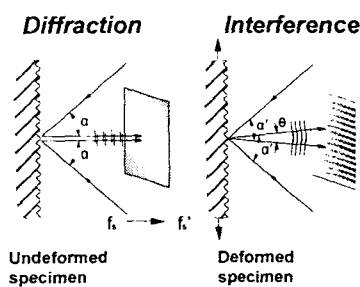


Fig. 1 Moiré interferometry technique for the measurement of deformation

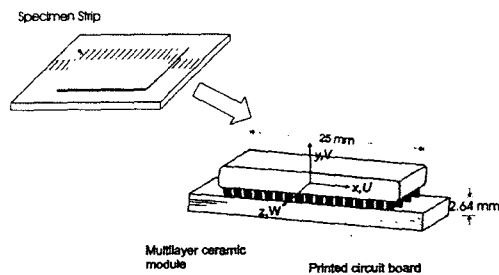


Fig. 2 Schematic diagram of specimen geometry of sectioned CBGA package assembly

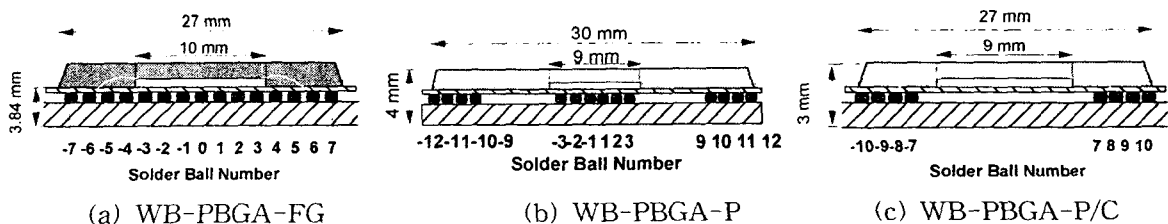


Fig. 3 Schematic diagram of specimen geometry of sectioned WB-PBGA package assembly

3. Results and Discussion

3.1 CBGA 패키지의 열변형 거동

각 온도단계에서 기록한 간섭무늬 중 75°C에서 기록한 U, V 변위에 대한 간섭무늬를 Fig. 4에 나타내었다. U 변위 간섭무늬에서 보는 것과 같이 열팽창에 의하여 x 방향으로의 인장변형률이 발생되었으며. 열팽창계수가 낮은 세라믹 모듈 부분에는 작은 변형률이 발생되었고 열팽창계수가 큰 PCB 부분에는 큰 변형률이 발생되었으며, 이 차이로 인하여 솔더볼의 위, 아래 경계면 사이에 U 변위의 차이가 크게 발생되었다. 이로 인해 솔더볼에 상당한 전단변형률이 발생되었으며, 중심으로부터의 거리가 커질수록, 즉 바깥쪽의 솔더볼로 갈수록 이 전단변형률이 커짐을 볼 수 있다.

Fig. 5는 V 변위 간섭무늬에서 세라믹 모듈의 중심선을 따라 얻어낸 굽힘변위(수직방향 변위) 분포를 보여주고 있다. 온도가 55°C로 증가하였을 때는 세라믹 모듈보다 PCB가 더 많이 팽창하므로 위로 굽어지는(∩) 현상을 보인다. 온도가 75°C가 될 때까지는 온도가 증가함에 따라 굽힘변형이 증가하지만, 온도가 더 증가하여 100°C가 되면 오히려 굽힘변형이 감소하는 현상을 보인다. 75°C이상의 높은 온도에서는 솔더볼에 대단히 큰 비탄성 변형이 발생하며 이로 인해 세라믹 모듈과 PCB 사이의 결합력이 완화되기 때문에 굽힘 변형이 감소하게 된다. 패키지 결합체를 냉각시킬 때에는 100°C 때의 변형률 기준으로 반대방향으로 굽어지는(∪) 현상을 보여서 다시 상온으로 돌아왔을 때에도 상당한 양의 굽힘변형이 남았다.

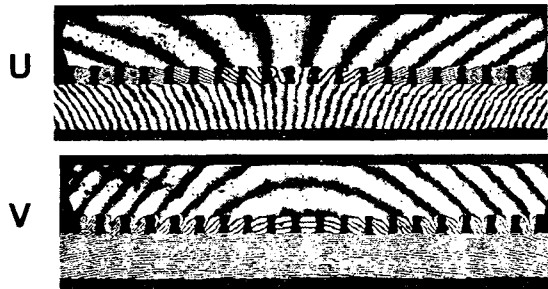


Fig. 4 Fringe patterns of the CBGA package assembly by temperature change

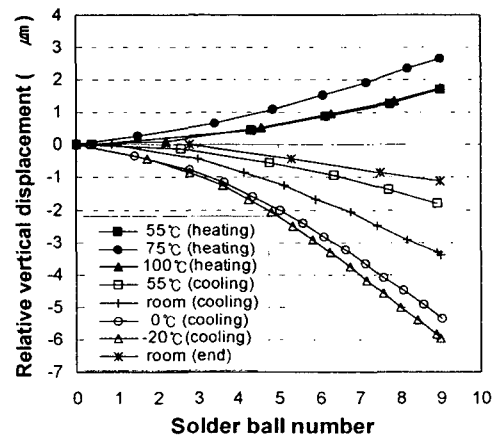


Fig. 5 Bending displacements distributions of the module by temperature change

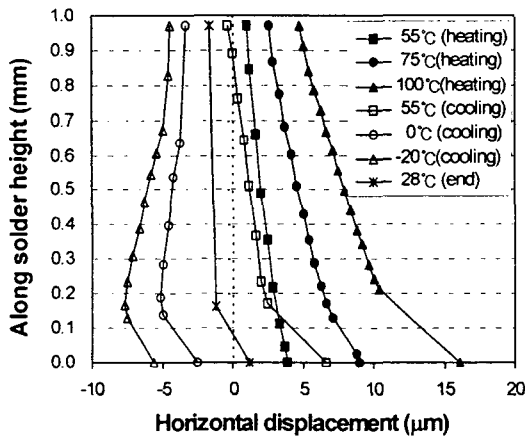


Fig. 6 Horizontal displacements of the rightmost solder interconnection

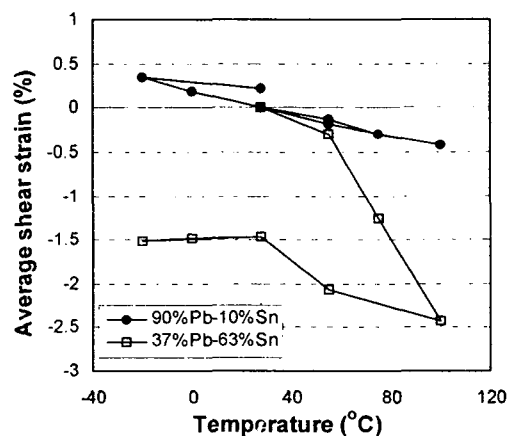


Fig. 7 Average shear strain history of the CBGA solder interconnections

Fig. 6은 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 균일한 전단변형률이 발생된 것을 볼 수 있다. 그러나 온도가 75°C 이상이 되면 전단 변형이 점점 커질 뿐만 아니라, 저온융점 솔더필렛(eutectic solder fillet) 부분의 변위가 급격하게 증가되어서 항복이 일어나는 현상을 볼 수 있다. 온도가 55°C로 내려왔을 때에는 솔더볼 부분은 온도를 올릴 때와 거의 비슷한 수평방향 변위를 보이지만 솔더필렛 부분은 변형이 거의 회복되지 않는다. 결과적으로 두 부분의 솔더는 반대방향의 전단변형률을 보이면서 변형하게 된다. 결국 한 온도사이클이 경과하여 상온으로 돌아온 후에도 솔더필렛 부분에 영구변형이 남게 된다.

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 전단 변형률은 BGA 패키지 결합체에서 가장 흔히 발생하는 파손의 원인이 된다. Fig. 7은 솔더볼을 고온융점 솔더부와 저온융점 솔더필렛부로 나누어 온도에 따른 각각의 평균 전단변형률 변화를 보여주고 있다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 고온융점 솔더볼 부의 변형률은 온도에 따라 거의 선형적으로 변하지만, 저온융점 솔더필렛부는 온도가 올라감에 따라 급격하게 증가하다가 온도가 내려갈 때에는 거의 변화가 없었고, 상온으로 돌아온 후에도 상당한 크기의 영구 변형률이 발생되었다. 100°C에서의 솔더필렛의 평균전단변형률은 솔더볼의 변형률보다 약 6배 정도 크게 발생되었다. 이와 같이 저온융점 솔더부의 소성변형은 패키지 결합체 전체의 비선형 거동을 발생시키는 주요 원인이 됨을 알 수 있다.

3.2 WB-PBGA 패키지의 열변형 거동

Fig. 8은 100°C에서 기록한 U, V 변위의 간섭무늬를 나타내고 있다. 길이방향 변형률은 열팽창 계수가 낮은 반도체 칩 부분에는 작은 변형률이 발생되었고 열팽창계수가 큰 몰딩 및 PCB 부분에는 큰 변형률이 발생되었으며 이로 인하여 전체적으로 굽힘변형이 일어났음을 볼 수 있다.

Fig. 9는 V 변위 간섭무늬에서 패키지의 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 125°C가 되면 솔더 볼에 항복이

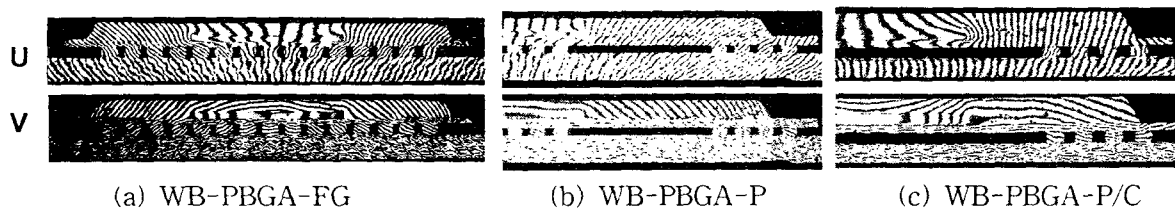


Fig. 8 Fringe patterns of the WB-PBGA package assemblies by temperature change

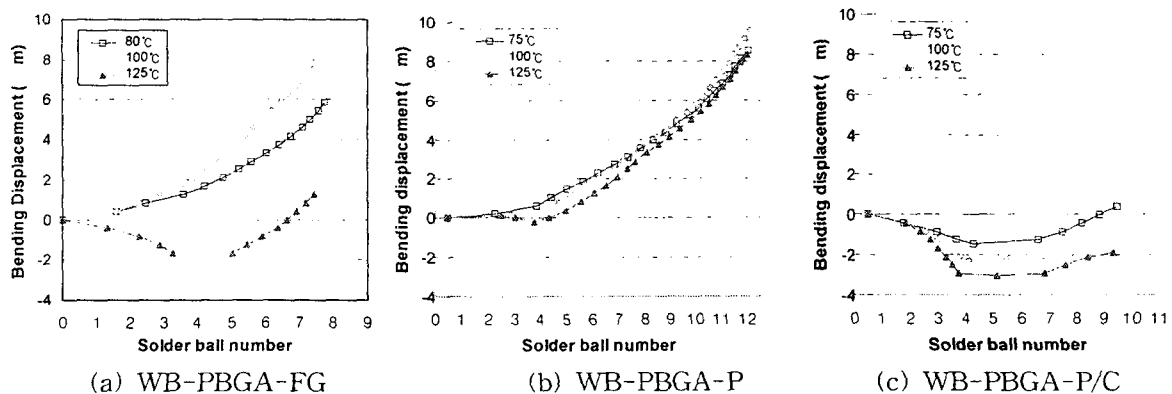


Fig. 9 Bending displacements distributions along the middle line of the packages

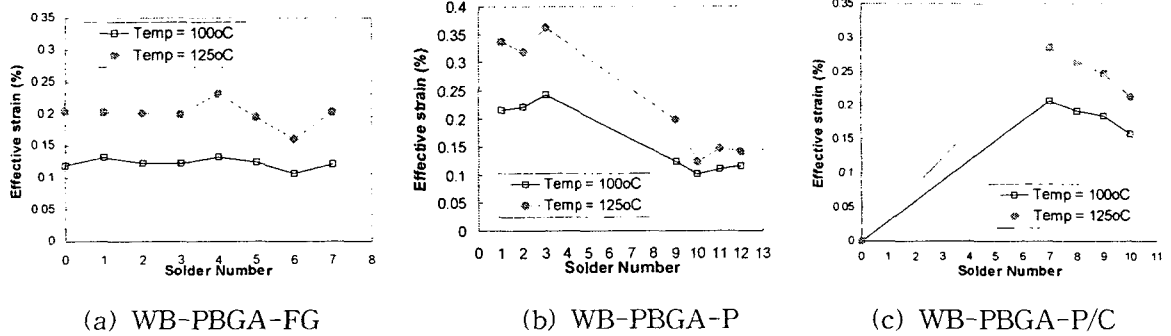


Fig. 10 Average effective strain of solder balls of WB-PBGA package assemblies

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. 이와 같은 현상은 WB-PBGA-P에서보다 WB-PBGA-FG에서 더욱 뚜렷하게 나타났다. 온도가 내려갈 때는 solder ball에 이와 같은 현상이 일어나지 않아서 반대방향으로 굽힘변형이 진행되었다. WB-PBGA-P/C의 경우에는 중간에 연결하는 솔더볼이 없으므로 낮은 온도에서도 이같은 현상이 나타났고, 온도가 증가할수록 변형이 선형적으로 증가하였다.

Fig. 10은 각 솔더볼의 유효변형률을 보여주고 있다. 유효변형률이 가장 커서 온도사이클이 진행될수록 파손될 가능성이 많은 솔더볼은 WB-PBGA-FG의 경우 칩 경계면 바로 아래 솔더볼, WB-PBGA-P의 경우는 가운데 연결 솔더볼의 가장 바깥 솔더볼, 그리고 WB-PBGA-P/C의 경우는 칩과 가장 가까운 안쪽 솔더볼로 나타났다.

4. Conclusions

본 논문에서는 모아래 간섭계를 이용하여 CBGA 패키지와 WB-PBGA 패키지의 온도변화에 대한 변형거동을 해석하였고 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 패키지 결합체의 온도가 변화하면 패키지와 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 솔더부는 큰 비선형 소성변형과 크립현상을 보이며, 온도가 낮아지면 이런 현상이 없어져서 온도에 대해 선형적으로 변형하므로 한 온도사이클이 경과하면 상당한 영구변형이 남는다.

(3) 유효변형률이 가장 큰 솔더볼은 CBGA의 경우 가장 바깥쪽 솔더볼이었고, WB-PBGA-FG의 경우 칩 경계면 바로 아래 솔더볼, WB-PBGA-P의 경우는 가운데 연결 솔더볼의 가장 바깥 솔더볼, 그리고 WB-PBGA-P/C의 경우는 칩과 가장 가까운 안쪽 솔더볼로 나타났다.

Acknowledgement

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

References

[1] B. Han, "Recent Advancements of Moire and Microscopic Moiré Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices," *Experimental Mechanics*, 38(4), 278(1998).
 [2] 주진원, Bontae Han, 모아래 간섭계를 이용한 WB-PBGA 패키지의 온도변화 및 굽힘하중에 대한 거동해석, "대한기계학회 논문집 A, 26(7), 1302(2002)