

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.380

반도체 패키지의 열변형 해석 시 유한요소 모델의 영향

최 남 진* · 주 진 원†

(2009년 2월 6일 접수, 2009년 3월 13일 수정, 2009년 3월 19일 심사완료)

The Effect of Finite Element Models in Thermal Analysis of Electronic Packages

Nam-Jin Choi and Jin-Won Joo

Key Words: FC-PBGA Package(FC-PBGA 패키지), Thermal Deformation Analysis(열변형 해석), Finite Element Model(유한요소 모델), Viscoplastic Analysis(점소성 해석)

Abstract

The reliability concerns of solder interconnections in flip chip PBGA packages are produced mainly by the mismatch of coefficient of thermal expansion(CTE) between the module and PCB. Finite element analysis has been employed extensively to simulate thermal loading for solder joint reliability and deformation of packages in electronic packages. The objective of this paper is to study the thermo-mechanical behavior of FC-PBGA package assemblies subjected to temperature change, with an emphasis on the effect of the finite element model, material models and temperature conditions. Numerical results are compared with the experimental results by using moiré interferometry. Result shows that the bending displacements of the chip calculated by the finite element analysis with viscoplastic material model is in good agreement with those by moiré inteferometry.

1. 서 론

반도체 칩은 주위의 전자부품들과 전기적, 기계적으로 연결되어야 할 뿐만 아니라, 주위환경으로부터 보호할 수 있는 장치가 필요하며, 이와 같은 장치에 대한 기술을 전자패키징이라고 한다. BGA(ball grid array) 패키지는 면적대비 높은 연결밀도, 좋은 표면 실장특성과 더 나은 전기적, 열적 성능, 낮은 높이 등의 장점으로 개발되어 WB-PBGA(wire bond PBGA) 패키지나 FC-PBGA(flip chip PBGA) 패키지의 형태로 널리 사용되고 있다. 이러한 BGA 패키지의 특성을 평가하고 설계의 신뢰성을 확보하기 위해서는 먼저

패키지의 온도변화로 인한 열-기계적인 거동을 예측하고 평가하는 것이 필요하다

온도변화에 따른 파손을 비교하고 신뢰성을 평가하기 위하여, 패키지 제작회사에서는 열가속사이클(ATC, accelerated thermal cycling) 시험^(1,2)을 거쳐 파손이 일어날 때까지의 반복횟수를 측정하는 방법을 사용한다. 이와 같은 방법은 패키지를 비교하고 정해진 기준에 대한 내구성 확보여부를 판단하는 데는 유용하게 사용될 수 있으나, 개발 단계에서 변형 모드나 파손 미커니즘 등과 같은 유용한 정보는 얻을 수 없다. 반도체 패키지는 상당히 복잡한 구조와 경계조건을 가지고 있으며, 이의 열변형을 해석하고 설계하기 위해서는 유한요소법 등의 수치적인 해석법⁽³⁻⁵⁾이 유용하게 이용될 수 있다. 그러나 솔더볼 재료의 항복응력 등 물성치는 온도에 대단히 큰 영향을 받으며, 패키지의 변형 거동은 이를 결합하는 솔더(solder)의 강성과 열팽창계수에 큰 영향을 받는다. Chen 등⁽⁵⁾은 FC 패키지의 솔더 조인트와 언더필에 대해 유한요소 비선형 해석을 수행하여 기하학적인

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 충북대학교 기계공학부
E-mail : jinwon@chungbuk.ac.kr

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

* 충북대학교 대학원 기계공학과

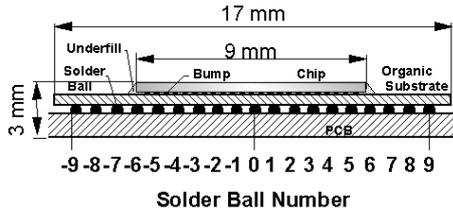


Fig. 1 Schematics of the FC-PBGA package

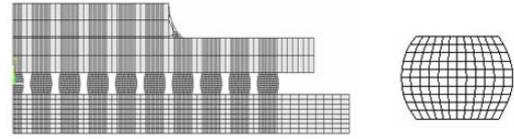
조건에 대한 영향을 해석하였다. 그러나 온도에 따른 재료의 물성치를 잘못 적용하거나 적당하지 않은 해석조건을 적용하면, 실제와 상당히 다른 해석결과가 얻어질 수 있다. 수치적인 해석에는 모델의 단순화가 수반되므로 온도변화에 따른 복잡한 구조의 열변형을 계산에 의해 예측하기 위해서는 유한요소 해석결과에 대한 비교와 평가가 필요하다.

본 논문에서는 현재 국내 뿐 아니라 세계적으로 활발하게 개발되고 있는 FC-PBGA 패키지의 온도변화에 따르는 유한요소 비선형 해석을 수행하고, 여러 가지 유한요소 모델링과 여러 가지 해석 조건에 대한 변형거동을 비교한다. 또한 여러 유한요소 모델과 해석조건에 대한 계산 결과를 반도체 패키지의 열변형 해석에 효율적으로 응용되고 있는 무아레 간접계를 이용한 변형 측정 결과⁽⁶⁻¹⁰⁾와 비교하고 신뢰성을 평가한다.

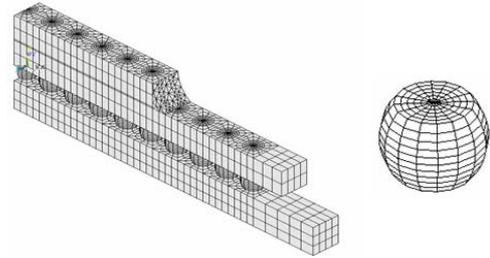
2. 유한요소 해석

본 논문에서 사용된 FC-PBGA 패키지는 Fig. 1과 같이 실리콘 칩(9.0×9.0×0.76 mm)이 유기기판 위에 작은 솔더범프(solder bump)로 연결되어 있고, 칩과 유기기판의 사이는 에폭시 언더필(underfill)로 채워져 있는 구조로 되어 있다. 이 FC-PBGA 패키지는 PCB(printed circuit board)와 361개(19개×19개)의 배열을 가진 저용점 솔더(eutectic solder, 63Sn/37Pb)의 솔더볼로 연결되어 패키지 결합체를 이루고 있다. 솔더볼의 높이는 0.5 mm이고 가장 큰 지름은 0.6 mm이며 솔더볼 간의 거리는 0.8 mm이다.

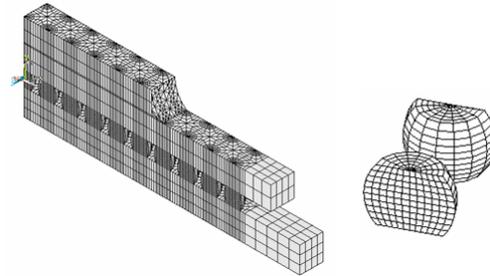
FC-PBGA 패키지는 여러 가지의 재료로 구성되어 복잡한 구조를 가지고 있으며, 탄소성과 크립을 포함한 심한 비선형 해석을 수행하여야 하므로 전체 모델을 3차원으로 자세하게 모델링하여 해석하는 것은 비효율적인 경우가 많이 있다.



(a) Model 1, Model 2



(b) Model 3



(c) Model 4

Fig. 2 Various finite element models of the FC-PBGA package

변형을 측정하는 광학적인 실험방법에서는 언제나 시편의 표면을 측정하게 되므로 본 논문에서는 실험결과와의 비교에 있어서 유한요소 모델의 영향을 파악할 수 있도록 Fig. 2와 같은 4가지 유한요소 모델을 선택하여 모델링하였다. Model 1은 패키지의 단면을 2차원 평면응력 선형 사각형 요소로 구성된 유한요소 모델이고, Model 2는 Model 1과 유한요소 격자는 같으나 솔더볼의 3차원 형상이 고려되도록 두께를 영역별로 다르게 입력한 평면응력 pseudo-3D 유한요소 모델이다. Model 3은 1열의 솔더볼을 포함하는 3차원 부분 모델이며, Model 4는 Model 3과 같으나 실험에서와 같은 조건을 만들기 위하여 솔더볼의 단면이 경계면이 되는 유한요소 모델이다. 솔더볼이 최대로 나타나는 단면의 유한요소 격자는 네 가지 모델 모두 같도록 하였다. 유한요소 모델에 가해지는 하중은 상온에 대한 온도변화 뿐이므로 각 유한요소 모델에서는 변위의 대칭성만 유지되도록 경계조건을 부가하였다.

Table 1 Number of nodes and elements in the 2D and the 3D FC-PBGA finite element model

	Model 1 Model 2	Model 3	Model 4
Nodes	2792	16758	16802
Elements	3059	17654	19601

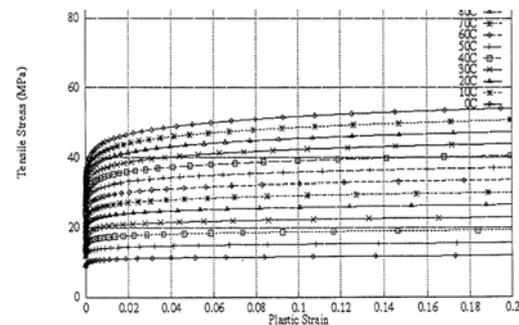
유한요소 해석은 상용코드를 사용하였으며 각 유한요소 모델의 절점 수와 요소 수는 Table 1과 같다. FC-PBGA 패키지의 온도해석과 같은 가혹한 비선형 해석에서는 상당한 하중 증분과 각 하중증분에서 해에 수렴하기 위한 많은 반복계산 수가 필요하므로 2차원 유한요소 모델과 3차원 유한요소 모델에 대한 계산 시간과 필요한 기억 용량은 큰 차이가 난다. Model 2와 같이 3차원 형상을 고려한 2차원 유한요소 모델에 대한 해석에 신뢰성이 검증된다면 결과는 유사하면서 계산 비용은 적게 들므로 중요한 부분을 훨씬 더 조밀하게 모델링하여 계산의 정확도를 높일 수 있다.

유한요소법을 이용하면 복잡한 하중조건과 경계조건을 갖는 대부분의 반도체 패키지를 해석할 수 있다. 그런데 이 경우 서로 다른 재료 사이의 특이해(singularity) 문제, 솔더와 같은 재료의 비선형 거동 문제 등으로 인하여 경우에 따라서는 큰 오차를 나타낼 수 있다. 온도나 시간에 대한 솔더볼의 재료거동이 잘못 입력되면 전혀 다른 해석이 이루어질 수 있으며 어느 편의 해석이 맞는지도 판단하기 어려운 경우도 많다. FC-PBGA 패키지를 연결하는 솔더 재료는 온도가 높아지면 상당히 심각한 탄소성 거동을 가지며, 온도에 따라 항복응력 등이 매우 다른 값을 갖는다. 솔더의 물성치는 패키지의 변형 거동과 응력집중에 대단히 큰 영향을 미치므로 온도를 고려하지 않은 탄소성 물성치의 적용은 무의미한 해석이 된다. 본 논문에서는 다음의 2가지 응력-변형률 관계를 고려하여 해석하고 실험결과와의 비교를 통하여 신뢰성을 평가하였다. 첫째로 가정한 모델은 이단 선형 탄소성(bilinear hardening) 모델로서 온도에 따른 탄성계수 $E(T)$ 와 항복응력 $\sigma(T)$ 은 저용점 솔더(63Sn/37Pb)에 대해 Pang 등⁽¹¹⁾이 발표한 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$\begin{aligned} E(T) &= 75.970-152 \times T \text{ (MPa)} \\ \sigma(T) &= 49.2-0.097 \times T \text{ (MPa)} \end{aligned} \quad (1)$$

Table 2 Elastic properties of FE-PBGA package

Part	Young's modulus (MPa)	Poisson's ratio	CTE ($\times 10^{-6}$)
Chip	131000	0.30	2.3
Underfill	6600	0.25	33.0
Substrate	26000 (x) 11000 (y)	0.39	18 (x) 36.7 (y)
Eutectic solder	Eq.(1)	0.40	21.0
PCB	22000 (x) 10000 (y)	0.28	12.3 (x) 45 (y)

**Fig. 3** Plastic strain-stress relationships of eutectic solder according to the temperature

둘째로 가정한 모델은 Fig. 3과 같이 실험에 의해서 구해진 탄소성 변형률-응력 관계⁽¹²⁾를 이용한 것으로, 온도에 따른 변형률 경화(multi-linear hardening) 곡선을 이용하여 해석하였다. 솔더를 제외한 나머지 재료는 탄성영역 내에 있다고 가정하였으며 Table 2와 같은 재료상수 값을 사용하였다. 특히 PCB와 유기기판(substrate)은 면내 방향과 면외 방향의 이방성을 고려하였다.

ATC 시험에서 온도범위를 어떻게 선정하고 그에 대한 수명 평가 기준을 어떻게 지정할 것인가는 FC-BGA 패키지의 신뢰성 평가에 대단히 중요한 조건이 된다. 특히 솔더 재료는 고온에서 심한 비선형 거동과 크립 거동을 보이므로 이에 대한 영향을 검토하고 비교하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 다음의 3 가지의 온도 범위에 대한 해석과 실험을 수행하고 그에 대한 영향을 평가하였다

- (1) $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_f = 125^\circ\text{C}$
- (2) $T_0 = -5^\circ\text{C}$, $T_f = 100^\circ\text{C}$
- (3) $T_0 = 125^\circ\text{C}$, $T_f = 20^\circ\text{C}$

Table 3 Anand constants used in the finite element viscoplastic analysis

Parameter	Units	Wang
so	stress (MPa)	56.33
Q/R	1/temperature (K ⁻¹)	10830
A	1/time (s ⁻¹)	1.49e7
ξ	dimensionless	11
m	dimensionless	.303
ho	Stress (MPa)	2640.75
ŝ	Stress (MPa)	80.42
n	dimensionless	0.0231
a	dimensionless	1.34

반도체 패키지 결합체를 구성하고 있는 솔더볼의 재료는 하중의 속도에 따라 소성 변형률이 달라지는 점소성 거동을 보인다. 점소성 거동은 소성 거동과 크립 거동이 결합된 현상이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 솔더볼의 점소성 거동 해석을 위하여 Anand 모델⁽¹³⁾을 사용하였다. Anand model에서는 비탄성 변형률(inelastic strain rate) $\dot{\epsilon}_p$ 와 변형저항률(rate of deformation resistance) \dot{s} 의 관계를 다음 식과 같이 정의하고 9개의 상수를 사용하여 재료의 점탄성 특성을 나타낸다.

$$\dot{\epsilon}_p = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\xi \frac{\sigma}{s}\right) \right]^{1/m} \quad (2)$$

$$\dot{s} = \left\{ h_0 \left| 1 - \frac{s}{s^*} \right|^a \cdot \text{sign}\left(1 - \frac{s}{s^*}\right) \right\} \cdot \dot{\epsilon}_p \quad (3)$$

여기서

$$s^* = \hat{s} \left[\frac{\dot{\epsilon}_p}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \right]^n \quad (4)$$

솔더의 점소성 특성을 고려하기 위해 Anand model에서 사용된 9가지 상수와 단위는 **Table 3**과 같다. 솔더 재료에 사용된 Anand 상수에는 Darveaux⁽¹⁴⁾, Ye 등⁽¹⁵⁾ 및 Wang 등⁽¹⁶⁾이 발표한 몇 가지 연구결과가 있지만 본 논문에서는 반도체 패키지에의 응용에 신뢰성이 있다고 알려진 Wang 등이 발표한 상수를 사용하였다. Anand model에서는 온도에 관한 항이 포함되므로 상수값들은 온도와 독립적으로 사용될 수 있다.

3. 결과 및 토의

반도체 패키지의 온도가 변하면 서로 다른 열팽창으로 인해 패키지 전체의 굽힘변형이 발생할 뿐 아니라, 이를 연결하는 솔더볼도 변형하게 된다. 일반적인 BGA 패키지의 경우 패키지 부분과 PCB 부분의 열변형 차이로 인하여 솔더볼에는 전단변형률(τ_{xy})과 수직변형률(ϵ_y)이 주로 발생하며, 패키지의 굽힘변형과 함께 솔더볼의 변형률이 패키지의 파손과 신뢰성에 큰 영향을 미친다고 알려져 있다. 따라서 본 논문에서는 유한요소 모델의 영향을 평가하기 위하여 패키지 전체의 굽힘변형과 솔더볼의 변형률을 비교하였다.

3.1 유한요소 모델에 따른 해석 결과

Fig. 4는 앞에서 기술한 네 가지 유한요소 모델에 대해서 상온(20°C)을 기준으로 온도가 100°C일 때 솔더볼 중앙단면의 x 방향 변위 U와 y 방향 변위 V의 등변위 곡선을 보여주고 있다. 인접한 등변위 곡선 사이는 실험에서의 간섭무늬와 같도록 0.417 μm 의 변위를 나타내도록 하였다. 이 해석결과는 **Table 2**의 탄성 재료상수 값과 **Fig. 3**의 온도에 따른 탄소성 변형률-응력 관계를 이용하여 계산되었다. 그림에서 보는 바와 같이 네 가지 모델의 등변위 곡선은 솔더볼 부분의 미세한 차이를 제외하고는 모두 유사하게 나타났다.

U변위를 나타내는 등변위 곡선에서는 온도의 상승으로 인하여 길이반향으로 전체적인 팽창이 일어났으며, U 변위는 열팽창 계수의 차이로 인하여 칩 부분보다 PCB 부분이 훨씬 크게 나타나서 전체적으로 굽힘변형이 일어났음을 알 수 있다. 이러한 굽힘변형은 V 변위를 나타내는 등변위 곡선을 보면 정량적으로 알 수 있다.

Fig. 5는 유기기판의 중앙선을 따라서 변화하는 굽힘변위의 분포를 보여주고 있다. 가로축은 **Fig. 1**의 솔더볼 번호로 표시하여 x 방향의 위치를 나타내었다. 각 재료의 열팽창계수 차이로 인하여 칩이 있는 부분에서는 아래로 볼록한 형태의 굽힘변형을 보였으며 칩이 끝나는 부분인 5번 솔더볼과 6번 솔더볼 사이에서 변곡점이 나타나서 그 오른쪽에는 위로 볼록한 형태의 변형을 보였다. 네 가지 모델에서의 굽힘변위는 거의 같은 값을 가졌으나, 솔더볼의 면외방향 형상을 고려하지 않은 2차원 유한요소 모델인 Model 1은 다른 모

Table 4 Strains at the center of solder balls at the temperature of 100°C

Strain comp.	FEM Model	Strain ($\times 10^{-6}$)			
		#3	#4	#5	#6
ϵ_y	Model 1	1549	1514	1625	1795
	Model 2	1480	1464	1584	1687
	Model 3	1424	1396	1528	1649
	Model 4	1455	1434	1569	1734
γ_{xy}	Model 1	87	190	334	161
	Model 2	141	229	362	222
	Model 3	164	301	493	234
	Model 4	197	365	597	287

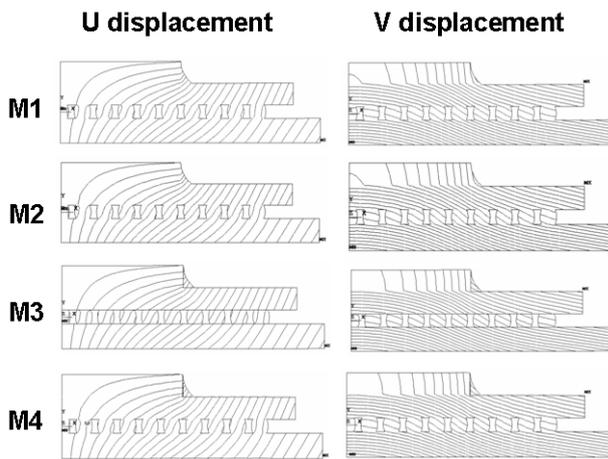


Fig. 4 Displacement contours of the FC-PBGA package at the temperature of 100°C calculated for various finite element models

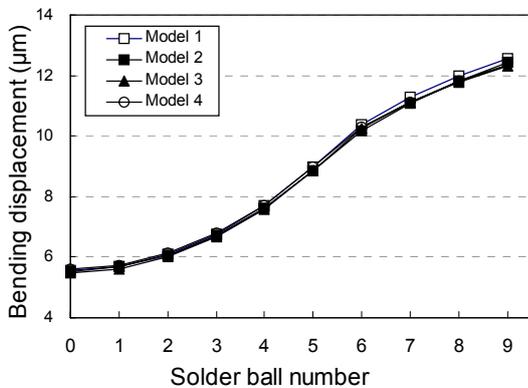


Fig. 5 Bending displacement distributions along the chip center of the FC-PBGA package at the temperature of 100°C

델보다 약간 큰 굽힘변위 값을 보였다.

FC-PBGA 패키지가 온도변화를 받을 때는 패키지의 굽힘변형과 패키지와 PCB를 연결하는 솔더볼의 변형률이 신뢰성에 주로 영향을 미친다고 알려져 있다. Table 4는 온도 100°C에서 각 모델에 대해 계산된 수직변형률 ϵ_y 와 전단변형률 γ_{xy} 값을 보여주고 있다. 표에서는 변형률이 다른 것보다 큰 값을 가지는 솔더볼 3번에서 6번까지의 중앙부분의 값을 표시하였다. 수직변형률이 전단변형률보다 훨씬 큰 것은 수직변형률 ϵ_y 에는 자유 열팽창에 변형률 약 1600×10^{-6} 이 포함되어 있기 때문이다. 표에서 보는 바와 같이 각 변형률은 3차원 모델들 (Model 3, Model 4)과 pseudo-3D 모델(Model 2)에서는 비슷한 값들을 가지나 Model 1에서는 다른 모델과 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 따라서 반도체 패키지의 유한요소 해석에 있어서 Model 2와 같이 3차원 형상을 고려한 2차원 유한요소 모델을 사용하면 효과적이면서 3차원 유한요소 모델의 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 이후의 결과는 Model 2를 대상으로 하여 해석한 결과를 보여준다.

3.2 탄소성 모델에 대한 해석결과

Fig. 6은 식 (1)을 사용한 2단 선형 탄소성 모델 (BKIN)과 Fig. 3의 탄소성 곡선을 이용한 다단 선형 탄소성 모델 (MKIN)을 탄소성 재료성질로 사용했을 때의 해석결과를 무아래 간섭무늬와 함께 보여주고 있다. 무아래 간섭계 실험에서는 상온(20°C)을 기준으로 각 온도단계에서 간섭무늬를 측정하였다. 인접한 간섭무늬 사이는 $0.417 \mu\text{m}$ 의 변위를 나타낸다. U 변위를 나타내는 간섭무늬에서 보는 바와 같이, U 변위는 열팽창계수의 차이로 인하여 솔더볼을 중심으로 칩 쪽 보다 PCB 쪽이 훨씬 크게 나타났으며, 칩 바깥부분의 유기기질 부분에서는 PCB와 비슷한 정도의 팽창이 일어났다. 이로 인하여 칩이 차지하는 영역에서는 전체적으로 굽힘변형이 일어났다. 솔더볼에서의 간섭무늬는 솔더볼 위와 아래의 U 변위 차이로 인하여 솔더볼에 전단변형이 일어났음을 보여주고 있으며, V 변위는 솔더볼의 위치에 따라 상당히 다르게 나타나서, 솔더볼에 수직방향의 균일한 열팽창 뿐 아니라 상대적인 변형에 의한 수직응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 특히 PCB는 면외방향으로의 열팽창계수가 면내방향으

로의 열팽창계수보다 상당히 크므로 수직 방향의 간섭무늬가 조밀하게 기록되었다. 칩과 유기기질은 작은 솔더범퍼로 연결되어 있으며 그 사이에 언더필이 채워져 있는데 그 부분에서 U 변위를 나타내는 간섭무늬의 불연속이 일어난 것으로 보이나 이것은 언더필의 좁은 영역에서 전단변형이 집중되었기 때문이다.

Fig. 6의 2단 선형 경화모델(BKIN)에 의한 유한요소 해석결과는 실험에서의 간섭무늬와 대체적으로는 일치하지만 솔더볼 영역에서 다른 분포

Table 5 Strains at the center of solder balls at the temperature of 100°C

Elastoplastic Model	Chip warpage (μm)	
	T=100 °C	T=125 °C
Moire interferometry	4.42	6.07
BKIN	5.25	7.21
MKIN	4.98	6.44

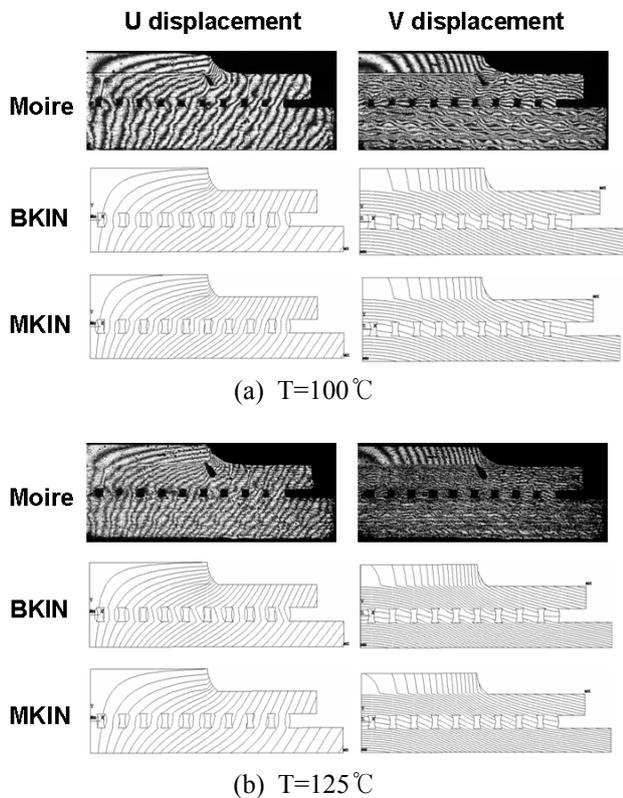


Fig. 6 Moire fringe patterns and displacement contours of the FC-PBGA package calculated with the bilinear hardening model (BKIN) and multi-linear hardening model (MKIN)

를 보여주고 있다. 반면에 실험에 의한 탄소성 곡선(Fig. 2)를 이용(MKIN)하여 유한요소 해석한 등변위 곡선은 무아레 간섭계에 의한 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 유한요소법에 의한 등변위 곡선과 무아레 간섭계에 의한 간섭무늬에서 인접한 곡선 사이는 똑같이 0.417 μm 를 나타내도록 하였다. Table 5는 온도가 100°C와 125°C일 때 2가지 탄소성 모델에 의한 유한요소 해석과 무아레 간섭무늬 해석으로부터 구한 칩의 최대 굽힘변위(warpage)를 비교하여 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 MKIN 모델이 BKIN 모델에 비해 실험값과 더 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 솔더볼의 탄소성 물성치의 선택은 FC-PBGA 패키지의 열변형 유한요소 해석에서는 온도에 따른 정확한 탄소성 특성식을 사용해야 한다는 것을 알 수 있다.

3.3 온도범위에 따른 해석결과

Fig. 7은 온도 증분이 105°C로 같을 때, 3가지 다른 온도 조건으로부터 계산한 전단변형률 분포도를 보여주고 있다. 전체적인 등변위 곡선의 형상은 비슷하나, 솔더볼 부분 집중되는 변형률에서 차이가 남을 볼 수 있다. 20°C에서 125°C로 온도가 상승하였을 때 5번 솔더볼의 구석에서 3149×10^{-6} 의 최대 전단변형률이 발생되었으나, -5°C에서 100°C로 온도가 상승하였을 때는 4번

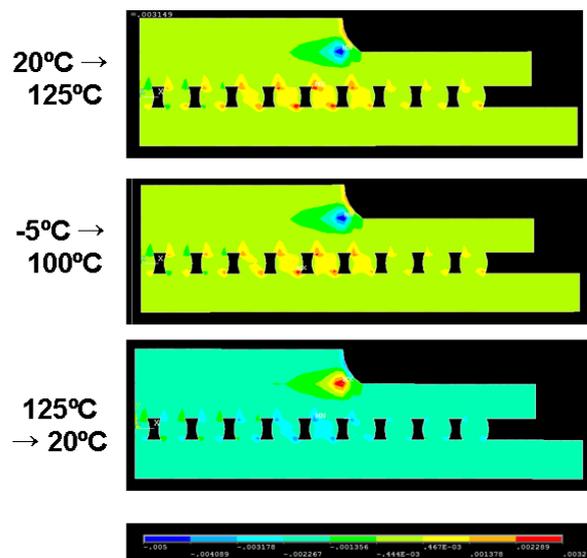
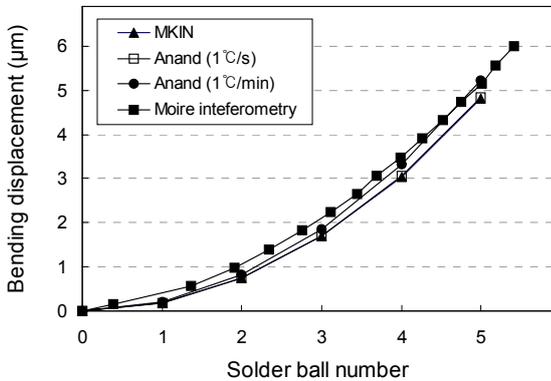
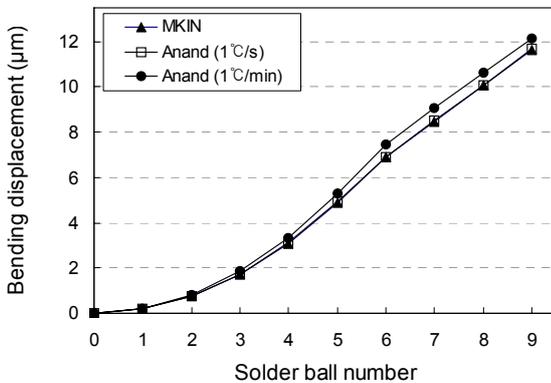


Fig. 7 Shear strain contours of the FC-PBGA package according to the temperature history ($\Delta T=105^\circ\text{C}$)



(a) Along chip center



(b) Along substrate center

Fig. 8 Bending displacement distributions of the FC-PBGA package at the temperature of 100°C calculated by viscoplastic material model

솔더볼의 구석에서 2640×10^{-6} 의 최대 전단변형률이 발생되었다. 언더필 부분에 집중되는 전단변형률은 각각 4997×10^{-6} 과 4969×10^{-6} 로 거의 같은 최대 전단 변형률이 발생되었다. 125°C에서 20°C로 온도가 낮아졌을 때는 5번 솔더볼의 구석에서 1562×10^{-6} 의 최대 전단변형률이 발생되어 온도를 낮출 때에는 상승시킬 때에 비하여 상당히 작은 변형률이 발생됨을 알 수 있다. 이로부터 FC-PBGA 패키지의 온도 변화에 대한 해석은 비선형적이며, 같은 온도 조건이라도 온도의 범위에 따라, 또 온도를 상승시킬 때와 온도를 하강시킬 때의 솔더볼에 집중되는 변형률의 결과가 다르므로 온도의 이력이 중요하게 작용함을 알 수 있다.

3.4 점소성 모델 사용에 따른 해석결과

Fig. 8에서는 솔더볼의 재료를 탄소성 재료로

가정했을 때와 시간의 함수로 표현되는 점소성 재료로 가정했을 때의 유한요소 해석결과를 비교하였다. Fig.8(a)와 (b)는 각각 칩의 중앙선과 유기기관의 중앙선을 따라서 계산한 굽힘변위 분포를 보여주고 있다. 그래프에서는 탄소성 모델(MKIN)과 온도 상승속도를 1°C/s로 했을 때의 Anand 모델 및 온도 상승속도를 1°C/min로 했을 때의 Anand 모델의 해석결과를 무아레 간섭계 실험결과와 비교하였다. 그림에서 보는 것과 같이 재료를 탄소성 모델로 했을 때와 빠른 온도 상승속도의 점소성 모델로 했을 때의 해석결과는 거의 같게 나타났으며, 온도 상승속도를 느리게 했을 때 (1°C/min)의 굽힘변위는 온도 상승속도를 빠르게 했을 때의 굽힘변위보다 크게 계산되었다. 이 결과는 무아레 간섭계 실험결과와 잘 일치하였다.

이상의 결과로 솔더볼은 온도 상승속도에 따라 다른 해석결과를 보이며 변형이 시간에 따라 변하는 점소성 모델을 사용하여야 패키지 전체의 신뢰성 있는 유한요소 해석 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 FC-PBGA 패키지의 온도변화에 따르는 유한요소 비선형 해석을 수행하고, 여러 가지 유한요소 모델링과 조건에 대한 해석결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반도체 패키지의 유한요소 해석에 있어서 3차원 형상을 고려한 2차원 유한요소 모델(pseudo 3D 모델)을 사용하면 효과적이면서 3차원 유한요소 모델의 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있다.
- (2) FC-PBGA 패키지의 열변형 유한요소 해석에서 2단 선형 경화모델을 사용하면 솔더볼의 변형을 정확히 예측하기 어려우며, 온도에 따른 정확한 탄소성 특성식을 사용할 때 무아레 간섭계 실험결과와 잘 일치하였다.
- (3) FC-PBGA 패키지의 온도변화에 대한 해석은 비선형적이며, 같은 온도 차이라도 솔더볼에 집중되는 변형률의 크기는 온도이력에 따라 매우 다른 결과를 얻게 되었다.
- (4) 솔더볼은 온도 상승속도에 따라 다른 해석결과를 보이며 상승속도가 낮을 때에는 변형이 시간에 따라 변하는 점소성 모델을 사용하여야 패키지 전체의 신뢰성 있는 유한요소 해석 결과

를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2006-521-D00020).

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) 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.
- (4) Pang, J. H. L, Chong, D. Y. R and Low, T. H., 2001, "Thermal Cycling Analysis of Flip-Chip Solder Joint Reliability," *IEEE Trans. Comp. & Pack. Technol.* Vol. 24, No. 4, pp. 705~712.
- (5) Chen, S. C., Lin, Y. C. and Cheng, C. H., 2006, "The Numerical Analysis of Strain Behavior at the Solder Joint and Interface in a Flip Chip Package," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 171, pp. 125~131.
- (6) Joo, J. and Cho, S., 2004, "Evaluation of thermal Deformation Model for BGA Packages Using Moiré Interferometry," *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 2, pp. 230~239
- (7) Joo, J. W., Cho, S. and Han, B., 2005, "Characterization of Flexural and Thermo mechanical Behavior of Plastic Ball Grid Package Assembly Using Moiré Interferometry," *Microelectronics Reliability*, Vol. 45, Iss. 4, pp. 637~646.
- (8) Han, B., 1998, "Recent Advancements of Moire and Microscopic Moiré Interferometry for Thermal Deformation Analysis of Microelectronics Devices," *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.4, pp. 278~288.
- (9) 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.
- (10) Cho, S.-M., Cho. S.-Y. and Han, B., 2002, "Observing Real-Time Thermal Deformations in Electronic Packaging," *Experimental Techniques*, Vol. 26, No. 3, pp. 25~29.
- (11) Pang, J. H., Seetoh, C. W., and Wang, Z. P., 2000, "CBGA Solder Joint Reliability Evaluation Based on Elastic Plastic Creep Analysis," *ASME J. Electron. Packag.*, Vol. 122, Issue 3, pp. 255~261.
- (12) Jung, W., Lau, J. H. and Pao, Y. H., 1996, "Nonlinear Analysis of Full-matrix and Perimeter Plastic Ball Grid Array Solder Joint," *Proc. 1996 ASME Intrnl Mech. Eng. Congress & Exhi.*, Atlanta, Nov., 96-WA/EEP-17, pp. 1~19.
- (13) Anand, L., 1982, "Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures," *ASME J. Engineering Material Technology*, Vol. 104, pp. 12~17.
- (14) Darveaux, R., 1997, "Solder joint fatigue life model," *Proceedings of 1997 TMS Annual Meeting*, pp. 213~218.
- (15) Ye, H., Lin, M. and Basaran, C., 2002, "Failure Modes and FEM Analysis of Power Electronic Packaging," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 38, Issue.7, pp. 601~612.
- (16) Wang, G. Z., Cheng, Z. N., Becker, K., and Wilde, J., 2001, "Applying Anand Model to Represent the Viscoplastic Deformation Behavior of Solder Alloys," *J. Electronic Packaging, Trans. ASME*, Vol. 123, No. 3, pp. 247~253.