

플립 칩 BGA 솔더접합부의 열사이클링 피로해석 (Thermal Cycling Fatigue Analysis of Flip-Chip BGA Solder Joints)

김경섭, 유정희*, 김남훈**, 장의구**, 임희철***

여주대학 전자과, *한국전자통신연구원, **중앙대학교 전자전기공학부, ***(주) 폴리오그

Abstract

In this paper, global full 3D finite element analysis fatigue models are constructed for flip-chip BGA on board to predict the creep fatigue life of solder joints during the thermal cycling test. The fatigue model applied is based on Darveaux's empirical equation approach with non-linear viscoplastic analysis of solder joints. It was estimated by the creep life as the variations of the four kinds of thermal cycling test conditions, pad structure, composition and size of solder ball. The shortest fatigue life of results was obtained at the thermal cycling testing condition of $-65^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$. It was increased about 3.5 times in comparison with that of $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$. As the change of pad structure at the same other conditions, the fatigue life of SMD structure increased about 5.7% as compared with NSMD structure. Consequently, it was confirmed that the fatigue life became short as the creep strain energy density increased in solder joint.

1. Introduction

플립 칩(flip chip, FC) 접속 기술은 시스템의 소형화, 고속화, 고 열방출 요구와 마이크로 일렉트로닉스의 성능을 향상시키기 위해 중요한 기술이다. 향후 1~2년 후에는 $10 \times 10\text{mm}$ 칩 당 I/O 패드수가 2000개 이상 될 것으로 예상되어 플립 칩 실장 기술의 중요성이 강조되고 있다.^{1,2)} 플립 칩(flip chip, FC) 접속 방식은 칩 패드에 형성된 범프를 이용하여 직접 기판 측의 패드와 연결하기 때문에 와이어 본딩 방식보다 접속 길이를 짧게하여 전기적인 특성과 열방출 능력의 향상을 도모할 수 있다. 그러나 FC-BGA 패키지에서는 열사이클시험과 같은 신뢰성시험중에 칩과 BT(Bismaleimide Triazine) 기판, 그리고 언더 필(underfill) 재료들간의 열팽창계수 차이로 인해 발생하는 과도한 응력 집중으로 균열이 발생하여 솔더접합부 파손의 주된 요인으로 작용하고 있다.^{3~11)} 현재 여러 반도체 업체에서 FC-BGA의 개발을 진행하고 있으나, 이들 패키지를 시스템보드에 실장한 후 발생하는 저주기 피로(low cycle fatigue) 파괴에 대한 종합적이고 체계적인 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 FC-BGA에서 발생하는 솔더접합부의 신뢰성 문제를 해결하기 위해 유한요소 해석(finite element analysis)을 적용하여, 다양한 열사이클 조건(thermal cycling test, TCT) 및 SMD(Solder Mask Defined)와 NSMD(Non-Solder Mask Defined)의 구리패드 구조, 솔더 볼의 조성 및 크기 변화를 매개변수로 하여 솔더접합부의 피로수명을 평가하였다.

2. Experimental

해석에 사용된 패키지는 165 FC-BGA(11×15)이다. 패키지의 외관 크기는 $13 \times 15\text{mm}$ 이고, 칩 두

께는 500 μ m이다. 또한 솔더 볼의 크기는 0.45mm와 0.50mm이며, 피치는 1.0mm이다. 패키지용 BT 기판의 두께는 0.95mm를 적용하였다. FC-BGA 실장에 사용된 PWB(Printed Wiring Board) 크기는 17 \times 25mm이고, 1.2mm 두께의 6층 FR-4를 사용하였다. 볼 패드 부분은 솔더마스크가 개방된 SMD와 NSMD 구조를 적용하였다. 유한요소 해석에 필요한 비선형 점소성(viscoplastic) 3차원 모델링과 해석은 PaxSi-TM¹¹⁾을 사용하였으며, Fig. 1과 같이 모델의 대칭구조를 고려하여 반단면의 1/2부분을 모델링하였다. 구성되어진 모델은 응력과 피로수명에 미치는 영향을 고려하여 칩, 솔더 범프, 기판, 언더 필, 볼 패드, 솔더 볼, PWB로 형상을 세분화하였다. 또한 솔더를 제외한 모든 재료는 선형 탄성재료로 가정하였다. 해석 모델의 절점은 27306개, 요소는 21499개로 구성되었다. 해석에 적용된 열사이클 온도 조건은 1) -65 $^{\circ}$ C~150 $^{\circ}$ C, 2) -25 $^{\circ}$ C~125 $^{\circ}$ C, 3) -40 $^{\circ}$ C~85 $^{\circ}$ C, 4) 0 $^{\circ}$ C~100 $^{\circ}$ C이다. 한편 해석에 필요한 온도 구간은 각각의 온도조건에서 온도 상승구간 10분, 고온유지기간 5분, 온도 하강구간 10분, 저온 유지기간 5분을 적용하였다.

정상상태에서의 크리프 해석은 Darveaux의 경험식^{12,13)}에 기초한 식 (1)~(4)를 적용하였다.

$$\dot{\epsilon}_s = C_{4t} \left(\frac{G}{T} \right) \left[\sinh \left(\frac{\alpha_t \sigma}{G} \right) \right]^n \exp \left(\frac{-Q}{kT} \right) \quad (1)$$

$$G = G_0 - G_1(T - 273) \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_s$ 는 상당 크리프변형률, σ 는 상당 von mises 응력, G 는 온도의존 전단계수,

T 는 절대 온도이다. C_{4t} 는 상수, α_t 는 power법칙 의존성이 깨지는 곳의 응력 수준, n 은 응력 지수, Q 는 크리프 변형중의 활성화에너지, k 는 Boltzmann 상수이다. 또한, 초기 균열(crack initiation) $N_0 = K_1(SED)^{K_2}$ 이고, (3)

$$\text{솔더접합부의 피로수명(characteristic life) } \alpha = N_0 + a/[K_3(SED)^{K_4}] \quad (4)$$

으로 구하였다. 여기서 SED (Strain Energy Density, ΔW)는 변형에너지 밀도이다. α 는 고장비 63.2%의 피로수명이며, 피로상수는 $K_1=56300$ cycles/psi, $K_2=-1.62$, $K_3=3.34 \times 10^{-7}$ in/cycle/psi, $K_4=1.04$ 를 적용하였다. Table 1에 패키지를 구성하고 있는 재료의 물성치를 나타내었으며, 여기서 CTE(Coefficient of Thermal Expansion)는 열팽창계수이다.

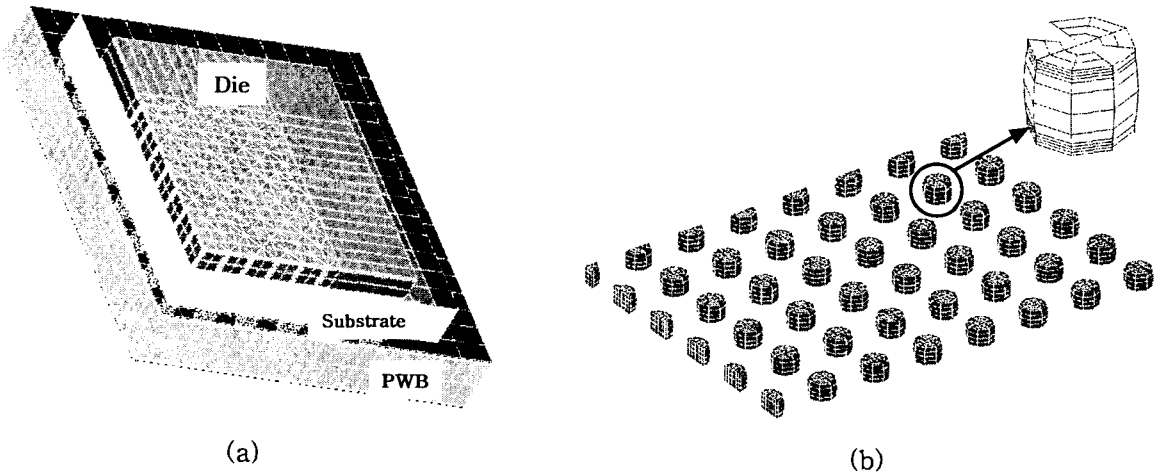


Fig. 1 3-D Finite element mesh model of FC-BGA on PWB (a) 165 FC-BGA (b) global solder ball

Table 1. Material properties of components in a FC-BGA

Component	Material	Young's modulus(GPa)	CTE (ppm/°C)	Possion's ratio
Chip	Silicon	165.0	2.4	0.28
Substrate	BT	20.0	15.0	0.39
Solder ball	Sn-37Pb	31.0	25.1	0.40
	Sn-3.0Ag-0.5Cu	45.1	23.0	0.30
	Sn-3.5Ag	43.0	30.0	0.30
Solder mask	Epoxy	1.24	59.0	0.496
Encapsulant	Underfill	6.60	α 1: 33.0 α 2: 99.7	0.35
PWB	FR-5	31.0	7.0	0.45
	FR-4	22.0	18.0	0.28

3. Results and Discussion

3.1 열사이클 온도조건에 따른 크리프 해석

칩과 기판을 전기적, 기계적으로 연결하는 솔더접합부는 매우 취약한 부분이며, 낮은 열사이클 조건에서 크리프에 의한 불량 발생한다. FC-BGA에서는 칩과 BT 기판 사이를 언더 필 재료로 봉지(encapsulation)하여 1차 접합부인 솔더 범프의 피로수명을 향상시킬 수 있다. 언더 필 재료를 적용하지 않을 때에는 칩과 BT 기판의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 응력이 솔더접합부에서 흡수되지만, 언더 필 재료를 봉지하는 경우는 언더 필이 칩과 BT 기판 사이에 상호 구속작용을 하여 솔더접합부에 발생하는 응력을 감소시키는 효과가 있다. 한편 언더 필은 1차 솔더접합부의 수명을 증가시키지만 반대로 패키지의 휨 등으로 인한 2차 솔더접합부의 불량을 발생시키는 문제점도 동시에 가지고 있다. FC-BGA에서 2차 솔더접합부의 크리프 수명을 평가하기 위해 다양한 열사이클 조건에서 해석을 수행하였다. Table 2는 각각의 온도조건에서 평균 크리프 변형에너지 밀도를 구하고, 이 값을 식(3)에 적용하여 초기 균열값인 N_0 를 구하였다. 또한 식(4)에 나타난 Darveaux의 경험식에 기초하여 솔더 볼의 누적 수명(α)을 구하였다. 표에서와 같이 $-65^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 의 열사이클 시험 조건에서 크리프 해석을 수행한 결과 가장 짧은 피로 수명값을 보였으며, $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 조건과 비교하면 약 3.5배의 피로수명 차이를 나타내었다. $-65^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ 조건은 $0^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 에 비해 크리프 변형이 많이 발생하는 $100^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 의 온도 영역이 존재하고, 큰 온도차(ΔT)의 열사이클 시험은 많은 열 응력과 변형에 의해 피로수명이 줄어드는 결과를 초래한다. 따라서 크리프 변형에너지 밀도가 높으면 피로수명은 짧아지는 것을 알 수 있다. Fig. 2는 전체 솔더 볼에 발생하는 von-mises stress 분포도를 나타낸 것이다. 솔더 볼에서 von-mises 응력이 가장 많이 발생하는 위치는 화살표로 표기된 칩의 가장자리(edge)의 하단부분에 위치한 7번째 솔더 볼이며, 25.4psi 응력이 발생하였다. 몰딩이나 포팅 형태의 BGA의 경우, 2차 솔더접합부의 파단 위치는 칩 하단의 DNP(Distance from the Neutral Point)가 가장 큰 솔더 볼에서 발생한다. 이와 같은 결과는 칩과 PWB 사이의 열팽창계수 차이로 인해 발생하는 응력이 칩 가장자리 근처에서 최대가 되기 때문이다.³⁸⁾

Fig. 3은 165 FC-BGA의 SMD 패드 구조에서 $-25^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 의 열사이클 조건으로 완전한 2사이클 해석을 수행하여 얻은 크리프 변형에너지 밀도를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 또한 Fig. 4는 응력-변형률선도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 히스테리시스 루프 형상이 안정된

것을 확인할 수 있다.

Table 2. Solder joint fatigue life with the two thermal cycling conditions

Profiles	ΔW (psi)	N_0 (cycles)	α (cycles)
-65°C ~ 150°C	62.71	68	864
-25°C ~ 125°C	36.32	167	1572
-40°C ~ 80°C	35.42	171	1616
0°C ~ 100°C	20.71	415	2935

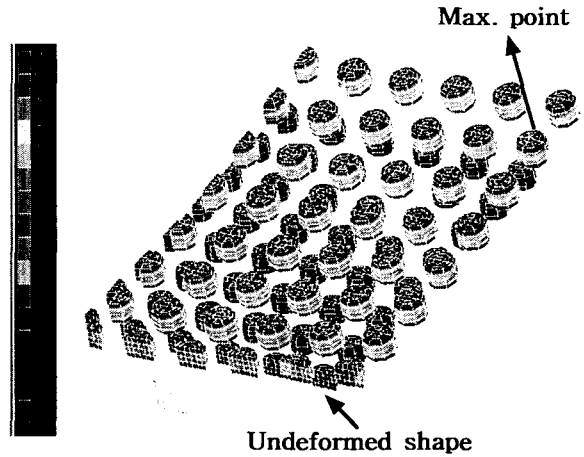


Fig. 2 Centroid von-mises stress in the flip chip solder balls

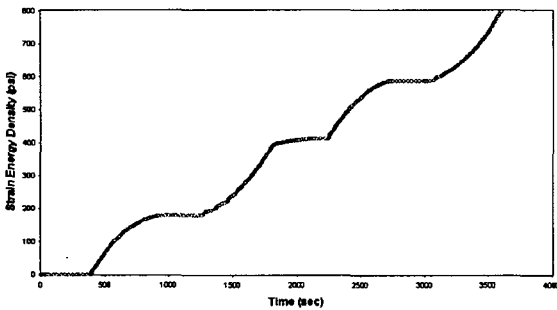


Fig. 3 Time-dependent creep strain energy density at the FC-BGA solder joint critical location

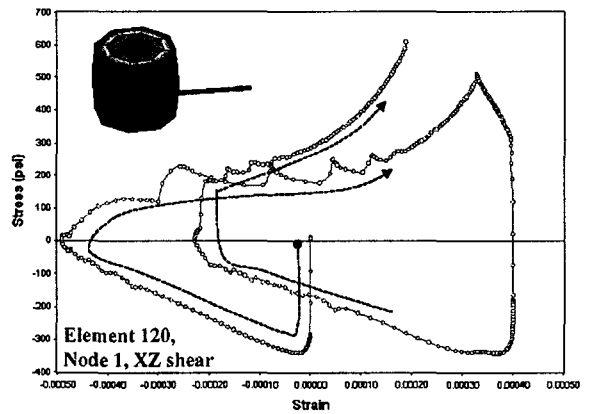


Fig. 4 Hysteresis loops of the stress and strain at the FC-BGA solder joint critical location

3.2 패드 구조에 따른 크리프 해석

솔더 볼의 크기 변화에 따른 피로 수명에 대한 해석을 수행하였다. 0.45mm 솔더 볼을 동일한 원주형(column shape) 모양에서 행하였고, 결과를 Table 3에 나타내었다. 해석 결과 SMD 패드 구조가 NSMD 패드 구조에 비해 동일한 부피의 솔더 볼 크기에서는 솔더접합부의 피로 수명값이 향상되었다. 솔더 볼의 높이를 0.32mm로 설계하여 -25°C ~ 125°C의 조건에서 피로 수명값을 비교하면 SMD 구조가 NSMD 구조에 비해 5.7% 향상된 결과를 보였다. 응력은 SMD의 경우 패드와 솔더 계면에서 많은 응력이 발생하였고, NSMD에서는 패드를 감싸고 있는 랜드 상단 모서리 부분에 집중 응력이 발생하였다. 제품에 실장시 NSMD 구조는 SMD 구조보다 솔더 높이가 내려가는 영향을 고려하여, 솔더 높이를 0.27mm로 적용하여 해석하면 1171 사이클로 17.1% 감소한 결과를 나타내었다. 그러나, 실제 패키지 환경에서 NSMD 구조와 같이 구리패드 부분에 집중적으로 발생하는 응력은 응력 집중에 의한 균열 진전이 없었다. 한편 SMD 구조에서는 패드와 솔더접합부 경계면에서 집중 응력이 발생하여 솔더 내부로 파단이 진전하는 경향을 나타낸다. 그렇기 때문에 SMD 구조에 비해 NSMD 구조에서 솔더접합부의 피로 수명값이 작아도 장기신뢰성 측면에서는

우수할 것으로 판단된다.

Table 3. Solder joint fatigue life analysis resulted from pad structure

Pad	ΔW (psi)	N_0 (cycles)	α (cycles)
SMD	36.75	163	1412
NSMD	38.77	150	1332

Table 4. Solder joint fatigue life analysis resulted from ball size

Profiles	ΔW (psi)	N_0 (cycles)	α (cycles)
-65°C ~ 150°C	62.07	70	794
-25°C ~ 125°C	36.75	163	1412
-40°C ~ 80°C	35.35	174	1475
0°C ~ 100°C	21.03	404	2636

3.3 솔더 볼 크기와 조성에 따른 크리프 해석

솔더 볼의 크기 변화에 따른 열피로 수명에 대하여 각각의 온도 조건에서 해석을 수행하였다. 0.45mm 크기의 솔더 볼을 동일한 원주형 부피 조건에서 수행하였고, 해석 결과를 Table 4에 나타내었다. 0.50mm 솔더 볼의 해석 결과인 Table 2와 비교하면, 0.45mm 솔더 볼 보다 평균 9.4%의 피로 수명값이 증가함을 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 솔더 볼 크기의 증가는 솔더접합부의 실장 높이를 증가시켜 전단 변형률을 감소시키기 때문에 솔더접합부의 피로수명이 향상되는 것으로 판단된다.

최근 솔더 내부에 함유된 납의 환경 유해성 문제가 거론되면서, 실장기관에서 납을 대체하기 위한 무연 솔더 재료와 그 접합기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 패키지 실장시 접합부의 재료로 Sn, Pb, Ag 등의 함량이 서로 다른 솔더를 사용하는데, 그 함량에 따라 열적 거동이 다르기 때문에 패키지 형태와 외부 접속단자의 구조에 따라서 적합한 솔더 재료의 선정이 필요하다. 솔더 조성에 의한 솔더접합부의 피로수명 차이를 상대적으로 비교하기 Sn-37Pb 솔더와 실용화가 유력한 2 종류의 무연 솔더를 대상으로 해석을 수행하였다. -25°C ~ 125°C의 열사이클 수명시험 조건에서 2 사이클을 가하여 Table 5와 같은 결과를 얻었다. 이때의 솔더 볼 크기는 0.5mm이며, 패드는 SMD 구조를 적용하였다.

Table 5. Solder joint fatigue life with the solder materials

Solder	ΔW (psi)	N_0 (cycles)	α (cycles)
Sn-37Pb	36.32	167	1572
Sn-3.5Ag	56.77	81	964
Sn-3.0Ag-0.5Cu	27.16	267	2168

Table 5에서와 같이 피로수명은 Sn-3.0Ag-0.5Cu > Sn-37Pb > Sn-3.5Ag 순이었다. 이와 같은 결과는 피로수명이 각각의 솔더가 갖는 온도 변화에 따른 물성치와 열팽창계수 차이에 많이 의존함을 알 수 있다. 무연 솔더는 Sn-3.0Ag-0.5Cu에서 상대적으로 양호한 결과값이 나타났으며, Cu 성분의 첨가로 기계적인 강도가 높아진 결과로 판단된다. 따라서 솔더접합부의 피로수명 향상은 PWB와 패키지간의 열팽창계수 차이를 감소시키고, 패키지 구조에 따른 최적의 패드 구조 설계가 효과적임을 알 수 있었다.

References

- [1] M.B. Vincent, C.P. Wong, "Enhancement of Underfill Encapsulants for Flip-Chip Technology", Proceeding of Surface Mount International Conference, pp.303~312 (1998).
- [2] Rao R. Tummala, Fundamentals of microsystems packaging, McGraw-Hill (2001).
- [3] Scott F. Popelar, "An Investigation into the Fracture of Silicon Die used in Flip Chip Application", 4th International Symposium on Advanced Packaging Materials, pp.41~48 (1998).
- [4] Quan Qi, "2nd Level Reliability Investigation of Memory Package Using Power Cycling Test", International Symposium on Microelectronics, pp.688~693 (1999).
- [5] Peng Su, Sven Rzepka, "The Effects of Underfill on the Reliability of Flip Chip Solder Joints", Journal of Electronic Materials, Vol. 28, No. 9, pp.1017~1022 (1999).
- [6] John H. Lau, Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip, and Fine Pitch SMT Assemblies, McGraw-Hill, (1997).
- [7] C.G. Woychik, D.L. Hawken, J.R. Wilcox, and P.J. Brofman, "Extending Flip Chip Ball Grid Array Field Life", Semiconductor Packaging Technologies Symposium, SEMICON West, (1999).
- [8] Eun-Chul Ahn, Tae-Je Cho, "Reliability of flip chip BGA package on organic substrate", Proc. 49th Electronic Components and Technology Conference, pp.1215~1220 (2000).
- [9] T. Burnette, Z. John, T. Koschmieder, and W. Oyler, "Underfilled BGAs for Ceramic BGA Packages and Board-Level Reliability", Proc. 49th Electronic Components and Technology Conference, pp.1221~1226 (2000).
- [10] John H. L. Pang, D. Y. R. Chong, and T. H. Low, "Thermal Cycling Analysis of Flip-Chip Solder Joint Reliability", IEEE Trans. Comp., Packaging. Technol., Vol. 24, pp.705~712 (2001).
- [11] Optimal Corporation, "PakSi-TM User Manual", (2002).
- [12] R. Darveaux and K. Banerji, "Constitutive relations for tin-based solder joints", IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol., Vol. 15, pp.1013~1024 (1992).
- [13] Fusaro, J. and Darveaux, R., "Reliability of Copper Base-Plate High Current Power Modules", Int. J. Microcircuits and Electronic Packaging, Vol. 20, No. 2, pp.81~88 (1997).