

플라스틱 BGA 솔더접합부의 고신뢰성에 관한 연구

김경섭* · 신영의** · 이혁***

A Study of the High Reliability in Plastic BGA Solder Joints

Kyung-Seob Kim*, Young-Eui Shin** and Hyuk Lee***

Key Words : Solder joint(솔더접합부), BGA(Ball Grid Array), Fatigue(피로), Creep(크리프), Finite element analysis(유한요소 해석)

Abstract

The increase in high speed, multi-function and high I/O pin semiconductor devices highly demands high pin count, very thin, and high density packages. BGA is one of the solutions, but the package has demerits in package reliability, surface mounting problems due to the PCB warpage and solder joint crack related with TCE mismatch between the materials. On this study to verify the thermal fatigue lifetime of the solder joint FEM and experiments were performed after surface mounting BGA with different solder composition and reliability conditions. FEM showed optimum composition of Ag3.5-Sn96.5 and under the composition minimum creep deformation of the solder joint was calculated, and the thermal fatigue lifetime was improved. In view of temperature cycle condition, the conditions of -65°C to 150°C showed minimum lifetime and it was $1/3$ of 0°C to 125°C condition. Test board was prepared and solder joint crack was verified. Until 1000cycle on solder joint crack was observed.

1. 서 론

패키지와 기판을 기계적, 전기적으로 연결하는 솔더 접합부는 매우 취약한 부분이며, 점소성 특성으로 인해 매 온도 사이클(temperature cycle) 마다 크리프 및 소성변형이 누적되어 결국은 열피로 파괴를 일으킨다. 최근에는 칩의 고집적화로 인하여 패키지 몸체는 점점 커지고, 솔더 접합부는 미세화되는 추세이기 때문에 솔더 접합부의 열피로 수명 예측은 전자 부품의

신뢰성을 평가하는 중요한 기술로 대두되고 있다. N.Paydar¹⁾는 2차원 평면변형, 2차원 평면응력, 2차원 솔리드 모델을 구성하여 솔더의 크리프 물성 변화에 따른 열피로 수명을 최대 변형률 구간법과 에너지 분할법을 이용하여 그 차이를 비교하였고, M.Mukai²⁾는 탄성-크리프 구성 방정식에 기초하여 PGA(Pin Grid Array)의 열피로 수명을 계산하였다. 또한 R.K.Govila³⁾등은 LCR (Leadless Chip Resistor)의 곡률 반경에 따른 탄성해석과 탄성-크리프 해석을 통해 매 온도별 전단응력 및 변형량의 차이를 비교하

※ 1999년 1월 26일 접수

* 정희원, 여주대학 전자과

** 정희원, 중앙대학교 기계설계학과

*** 비희원, 삼성전자 Package개발팀

• 김경섭 : kkseob@yeojoo.ac.kr

였다. J.Lau⁴⁾등은 3차원 탄소성 유한요소 해석 (finite element analysis, FEA)을 통해 QFP (Quad Flat Package)의 열피로 수명을 산출하였으며, K.Mui⁵⁾는 PQFP를 대상으로 솔더 접합부의 응력 해석을 ANSYS 프로그램을 사용하여 3차원 형상으로 고찰하였다. T.S.Lee와 T.P.Choi⁶⁾는 결빙 리드 평면 요소의 각 절점에 높이 함수를 정의하고, 3차원 접합부의 형상을 계산하였다. M.Rassaian⁷⁾은 PBGA를 대상으로 열하중에서 솔더범프에 걸리는 응력을 2D FEA 모델로 해석하였다. 그러나 최근에 주목을 받고 있는 패키지 형태로 인쇄회로 기판에 솔더링으로 접합되는 외부리드 대신 솔더볼로 단자를 구성하는 BGA (Ball Grid Array), CSP(Chip Scale Package)에 대한 연구는 아직 저조한 실정이다.

본 연구에서는 256 BGA를 대상으로 온도 사이클 수명시험 조건의 변화, 솔더볼의 재질변화, 솔더범프의 형상에 따라 발생하는 피로 수명값과 크리프 변형을 유한요소 해석으로 고찰하였다. 또한 시험기판을 제작하여 신뢰성 수준을 유한요소 해석 결과와 비교하여 BGA에 적합한 솔더 재질과 범프 구조를 선정하였다.

2. 열피로 이론 및 실험

2.1 열피로 이론

해석에서 63Sn-37Pb 솔더의 크리프 거동은 Norton's 법칙을 따른다고 가정하였다.

$$\epsilon = A\sigma^n \tag{1}$$

여기서 ϵ 는 상당 크리프 변형률(equivalent creep strain rate)이고, σ 는 상당응력(equivalent stress), A와 n은 솔더의 크리프 거동에 관련된 고유물성치이다. 온도에 따른 63Sn-37Pb의 크리프 고유물성치는 Table 1²⁾에, 해석에 사용된 패키지의 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Material properties of 63Sn-37Pb solder

Temperature(°C)	A(MPa/hr)	n
-65	6.545E-17	9.2
0	3.57E-10	5.6
25	1.975E-8	4.71
50	6.417E-7	3.9
100	7.044E-5	3.0
150	2.089E-3	2.4

Table 2. Material properties used for analysis

Component	Dimension (mm)	E (MPa)	ν	α (ppm/°C)
EMC	24(W) 1.12(H)	1.4E4	0.24	11.0
Die (silicon)	9.9(W) 0.32(H)	1.9E5	0.28	2.6
PCB (FR4)	72(W) 1.6(H)	1.1E4	-50°C:0.3 25°C:0.28 120°C:0.3	15.0
Solder (63Sn-37Pb)	0.76(W) 0.6(H)	2.0E4	0.37	21.4
Substrate (BT Resin)	27(W) 0.56(H)	1.2E4	0.39	15.0

여기서, E: 탄성계수, ν : 포아송비, α : 열팽창계수이다.

솔더 접합부의 열피로 수명은 매 사이클별로 변형구간이 결정되면 계산할 수 있다. Engelmaier는 온도 사이클 횟수(f)와 평균 사이클 온도(T_m)의 영향을 고려하여 63Sn-37Pb 솔더의 거동을 보다 정확히 설명할 수 있는 식 (2)와 같은 Coffin-Manson 형태의 경험식⁸⁾을 제안하였다.

$$N_f = 1/2(\Delta\gamma/2\epsilon)^{1/c} \tag{2}$$

여기서 N_f = 고장 평균 사이클, $\Delta\gamma$ = 매 사이클 부하의 총전단 변형구간, ϵ_f = 피로 연성계수 = 0.325, c = 피로연성지수 = $-0.442 \sim 6 \times 10^{-4} T_m + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1+f)$, T_m = 평균사이클 온도(°C), T_{max} = 최대 사이클 온도(°C), T_{min} = 최소 사이클 온도(°C), f = 사이클 빈도수, $1 < f < 1000$ 사이클/일이다. 전체 상당 변형률은 유한요소 해석 결과로부터 얻어진 탄성, 비탄성 변형률 크기의 종합으로 정의된다.

$$\epsilon = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{cr} \tag{3}$$

여기서 각각의 상당 변형률은 변형률 텐서의 성분으로부터 계산된다.

$$\epsilon = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)]^{1/2} \tag{4}$$

그리고 상당 변형률 ϵ 은 다음 관계에 의해서 상당 전단 변형률로 전환된다.

$$\gamma = \sqrt{3}\epsilon \tag{5}$$

2.2 실험

패키지 형상과 유한요소 모델링은 PATRAN을 이용하였고, 해석은 비선형 유한요소 해석 프로그램인

ABAQUS의 Newton-Rapson법에 기초하여 해석하였다. Fig. 1은 PBGA의 단면 구조를, Fig. 2에는 2차원 유한요소 해석 모델을 나타내었다. 모델링은 기하학적 대칭구조로 인하여 전체 모델의 1/2만을 고려하였고, 1146개의 절점과 1013개의 평면변형 요소들로 구성하였다. 솔더 접합부에는 탄성-크리프 모델을 적용하였고, 기타 다른 구성 재료는 순수 탄성거동으로 가정하였다. 해석은 시작온도에서 전체 모델이 균일한 온도를 갖고, 초기 응력은 무응력(zero stress)으로 가정하였다.

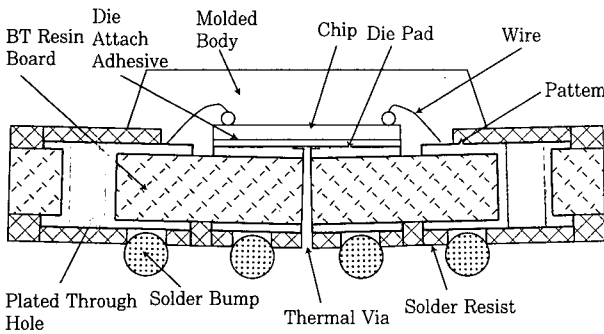


Fig. 1 Cross section view BGA

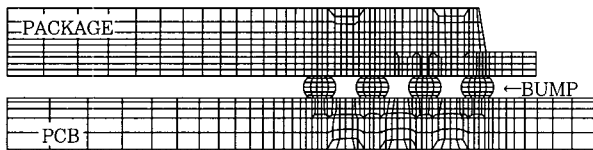


Fig. 2 Finite element mesh for 256-pin BGA model

Fig. 3은 해석에 적용된 온도 사이클 수명시험으로 1분 온도 상승구간, 14분 고온 정지구간, 1분 온도 하강 구간, 14분 저온 정지구간으로 적용하였다. 시간에 따른 온도 하중은 대기과 접한 패키지 외부표면에 적용시켰다. 경계조건으로는 기하학적 대칭면에는 x 방향의 변위를 구속하고, 기판의 왼쪽 하단 모서리 절점에 y 방향의 변위를 구속하여 전체모델의 강체운동을 제거하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 사이클 조건에 따른 피로 수명

솔더는 점소성 거동 특성으로 인해 매 온도 조건에서 비회복성 변형이 발생되고, 이 변형이 집중되는 위치에서 균열의 발생과 진전이 이루어지기 때문에 여러 가지 신뢰성조건에서 비탄성 변형 해석을 수행하였다.

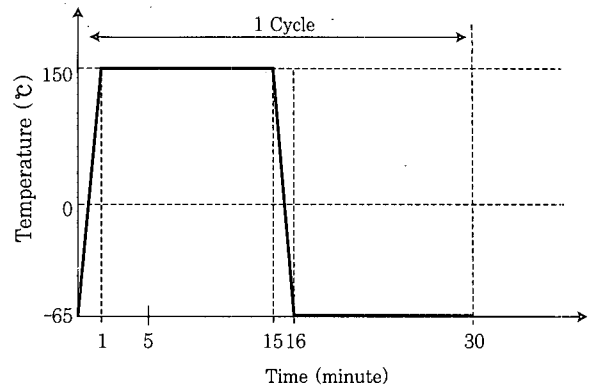


Fig. 3 Temperature cycle profile

이때의 온도 조건은 1) -65~150°C, 2) -55~125°C, 3) 0~125°C 이다. 각각의 조건에서 솔더범프의 누적 수명을 산출하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다. 해석결과 -65~150°C의 조건에서 가장 짧은 피로 수명이 나타나며, 0~125°C 조건보다 3배 정도 작은 피로 수명 차이를 보였다. 또한 응력 분포를 분석하면 내부 칩의 끝을 기준으로 해서 좌측 솔더범프에 많은 응력이 걸리며, 패키지 외각에 근접한 솔더범프에 작은 응력이 발생하였다. 이러한 원인은 패키지내의 실리콘 칩과 실장된 인쇄회로 기판과의 열팽창률 차이로 인하여 열피로가 솔더범프에 발생하기 때문이다.

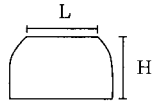

Table 3. Thermal fatigue life with the Temperature cycle conditions

No	Temperature condition(°C)	Creep strain(%)	N _f (Cycle)
1	-65~150	5.01	770
2	-55~125	3.85	1550
3	0~125	1.64	3210

3.2 솔더범프의 형상에 따른 피로 수명

솔더범프의 형상 변화에 따른 피로 수명에 대하여 해석을 수행하였다. 솔더범프를 동일한 부피 조건에서 볼록형(convex shape)과 오목형(concave shape)으로 구분해서 해석하였고, 결과를 Table 4에 나타내었다. 해석 결과 동일한 조건에서 솔더범프의 높이가 큰 오목형이 볼록형에 비해서 피로수명값이 증가하였으며, 이 이유는 오목형이 볼록형에 비해서 응력이 적게 걸리고, 범프의 구조가 유연하기 때문이다. 또한 응력 분포는 볼록형의 경우 기판과 솔더범프의 계면에 집중 응력이 걸리고, 오목형은 범프의 중앙에서 많은 응력이 발생하였다.

Table 4. Thermal fatigue life with the stand-off height

Shape	Model	Dimension (mm)	Nf (Cycle)
Convex		L:0.4 H:0.6	770
Concave		L:0.4 H:0.9	3850

3.3 Sn, Pb, Ag 함량에 따른 비탄성 변형량

BGA 패키지 실장시 접합부의 재질로 Sn, Pb, Ag 함량이 서로 다른 솔더를 사용하는데, 그 함량에 따라 열적 거동이 다르기 때문에 패키지 형태와 구조에 따라서 솔더 재질의 선정이 필요하다. 이를 상대적으로 비교하기 위해서 Fig. 4와 같은 형상에 솔더 접합부를 A, B 부분으로 나누어 각각에 여러 솔더의 물성치를 입력하여 해석을 하였다. 온도 사이클 수명시험 조건 (-65~150℃)으로 1 사이클을 가한 후 잔류되는 크리프 변형량을 계산한 결과 Table 5와 같은 결과를 얻었다.

해석결과와 같이 솔더 A, B 부분에 동일한 솔더 재질을 사용하는 것이 피로 수명을 증가시키는데 있어서 유리하다. Ag를 모두 함유한 사례 2가 다른 사례에 비해 온도 사이클 시험에 의한 크리프 변형이 작아서 상대적으로 열 하중에 대한 저항력이 큰 것을 알 수 있었다. Fig. 5는 사례 1의 경우 솔더에 걸리는 응력 분포를 나타낸 것으로, 최대 비탄성 변형이 패드와 솔더범

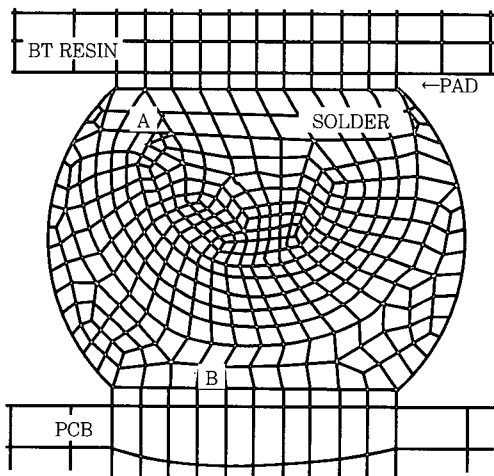


Fig. 4 Solder ball shape

Table 5. Creep strain with the solder material

No	Solder A	Solder B	Creep strain(%)
1	63Sn-37Pb	63Sn-37Pb	12.1
2	3.5Ag-96.5Sn	3.5Ag-96.5Sn	7.14
3	63Sn-37Pb	3.5Ag-96.5Sn	24.6
4	5Sn-95Pb	63Sn-37Pb	24.8

프의 경계면에서 발생하였다. 또한 동일한 솔더 재질을 사용한 사례 1과 2의 경우 솔더범프의 우측 상단부에 최대 비탄성 변형이 발생하고, 서로 다른 솔더를 사용한 사례 3과 4의 경우에는 좌측 하단부에 최대 비탄성 변형이 발생하였다. 이 이유는 모델을 구성하고 있는 솔더의 물성치 차이로 인해 발생하는 현상으로 사료된다.

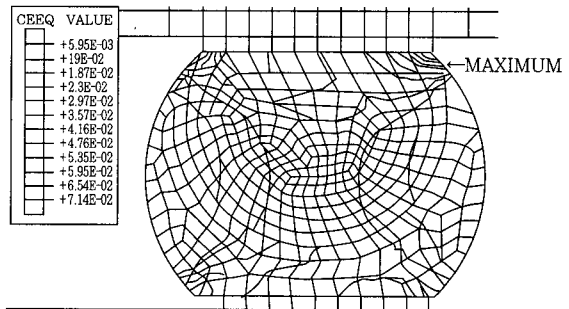


Fig. 5 Maximum creep strain for solder ball (case2)

3.4 신뢰성 평가

솔더 접합부의 신뢰성 실험을 위해서 제작된 인쇄회로 기판은 72×110×1.6 mm(W×L×H)이고, 256 BGA를 상하로 배열시킨 뒤 표면실장 솔더링 방식중의 하나인 적외선 리플로우 방식으로 실장하였다. 리플로우 솔더링에 사용된 장비는 IR Lamp+Hot N2 방식(Research Inc: 4470XN)을 사용하였으며, 리플로우 솔더링 조건은 Fig. 6과 같다.

BGA의 볼 피치는 1.27 mm, 솔더 재료는 63Sn-

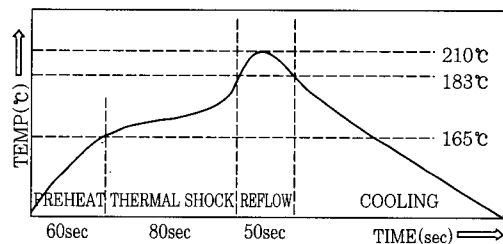


Fig. 6 Reflow soldering conditions

37Pb이고, PSR(Photo Solder Resistor)의 개구 크기는 0.64 mm이다. Fig. 7에 BGA가 실장된 실험 기판을 나타내었으며, Fig. 8은 리플로우 솔더링후 솔더 범프의 접합상태를 나타낸 전자 현미경 사진이다.

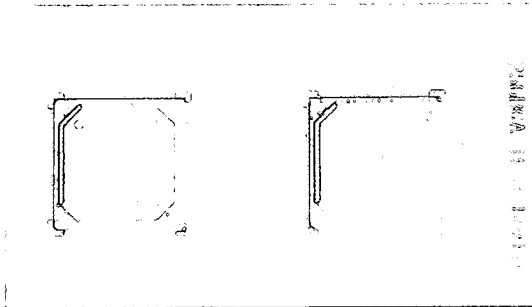


Fig 7. Experimental test board

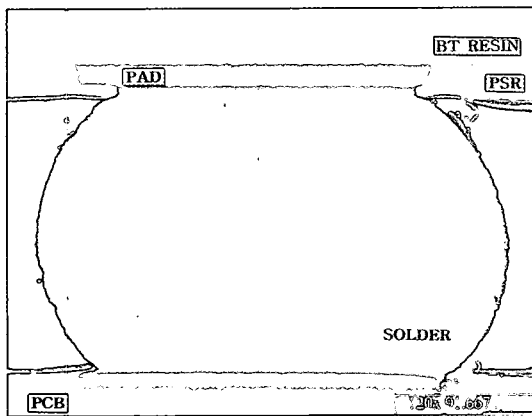


Fig. 8 SEM micrograph of solder jointing

실험은 실장이 완료된 20개의 기판을 챔버에 넣어 온도 사이클 수명시험(-55~125℃)을 1000 사이클 까지 진행시켰으며, 매 200 사이클 증가시 마다 4개의 기판을 추출하여 신뢰성 여부를 분석하였다. 신뢰성은 기판에 실장된 패키지의 저항 변화를 측정하여 솔더 접합부의 균열 유무를 확인하였으며, 1000 사이클까지 저항의 변화없이 양호한 결과를 얻었다. Fig. 9는 1000 사이클 실험후 솔더 접합부의 단면을 관찰한 것으로 패드와 계면사이의 박리 및 초기 균열의 진전없이 양호하였다. 따라서 본 논문에서 적용한 256 BGA는 유한 요소 해석 결과와 실험결과가 잘 일치됨을 확인하였고, 고신뢰성이 확보된 우수한 패키지로 사료된다.

4. 결 론

256 BGA에 대해서 온도 사이클 수명시험 조건, 솔더 범프의 재질변화, 솔더범프의 형상에 따라 발생하는 피로 수명값과 크리프 변형의 분포양상을 유한요소 해석

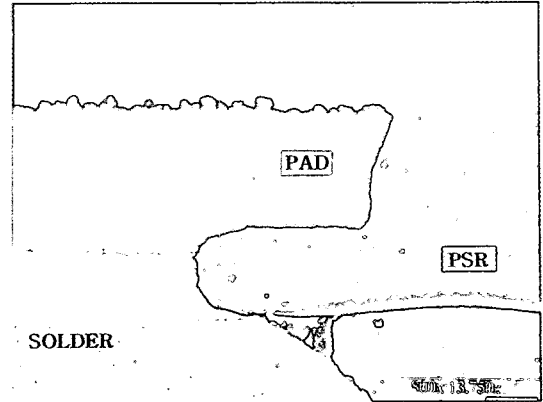


Fig. 9 Cross section of solder joints after 1000cycle

- 과 신뢰성 시험 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.
- 1) 응력 분포는 내부 칩의 끝을 기준으로 해서 좌측 솔더범프에 큰 응력이 걸리며, 패키지 외각에 근접한 솔더범프에 작은 응력이 발생하였다.
 - 2) 온도 사이클 조건에 따른 피로수명을 해석한 결과 -65~150℃의 조건에서 가장 짧은 열피로 수명을 보였다.
 - 3) 솔더볼은 전체의 조성이 3.5Ag-96.5Sn일 때 열피로 수명이 증가하였으며, 최대 비탄성 변형이 패드와 솔더범프의 경계면에서 발생하였다.
 - 4) 솔더접합부 형상에 동일한 솔더 재질을 적용한 경우는 솔더범프 우측 상단부에서, 서로 다른 솔더 재질을 적용한 경우에는 좌측 하단부에서 최대 비탄성 변형이 발생하였다.

참 고 문 헌

1. N.Paydar, Y.Tong, and H.Akay : A Finite Element Study of Fatigue Life Prediction Methods for Thermally Loaded Solder Joints Advances in Electronic Packaging, Vol.4-2, (1993), pp.1063~1070
2. M.Mukai : Elastic-Creep Thermal Stress Analysis for the SMT-PGA Package's Solder Joint Mechanics and Materials for Electronic Packaging, AMD-Vol.187, (1994), pp.197~203
3. R.Govila, E.Jih : Thermal Fatigue Damage in the Solder Joints of Leadless Chip Resistor, Journal of Electronic Packaging, Vol.116, (1994), pp.83~88
4. J.Lau, D.Rice, and S.Erasmus : Thermal

- Fatigue Life of 256-Pin, 0.4mm Pitch Plastic Quad Flat Package(QFP) Solder Joints Advances in Electronic Packaging, (1992), pp.855~863
5. K.Mui : Solder Joint Formation Simulation and Finite Element Analysis, ECTC, (1997), pp.436~443
 6. T.Lee, T.Choi : Finite Element Modeling of 3-Dimensional Solder Joint Geometry in SMT, Journal of Electronic Packaging, ASME, Vol.119, (1997), pp.119-126
 7. M.Rassaian, W.Chang : Multi-Domain Analysis of PBGA Solder Joints for Structural Design Optimization, IEEE, (1998)
 8. Engelmaier : Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints during Power Cycling, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol.6, (1983), pp.232~237
 9. W.Jung, J.H.Lau : Nonlinear Analysis of Full-Matrix and Perimeter Plastic Ball Grid Array Array Solder Joints, Journal of Electronic Packaging, Vol.119, (1997), pp.163~170
 10. 신영의 : 표면실장용 IC 패키지 솔더접합부의 열피로 수명 예측, 대한용접학회, 제16권, 제4호, (1998), pp.348~353