



패키지 유형에 따른 솔더접합부의 열피로에 관한 연구

김 경 섭* · 신 영 의**

* 여주대학 전자과

** 중앙대학교 공과대학 기계설계학과

A Study on the Thermal Fatigue of Solder Joint by Package Types

K.S. Kim* and Y.E. Shin**

* Dept. of Electronics, Yeojoo Institute of Technology, Kyonggido 469-800, Korea

** Dept. of Mechanical Design Engineering, Chungang University, Seoul 156-756, Korea

Abstract

Solder joint is the weakest part which connects in mechanically and electronically between package body and PCB(Printed Circuit Board). Recently, the reliability of solder joints become the most critical issue in surface mounted technology. The solder joint interconnection between plastic package and PCB is susceptible to shear stress during thermal storage due to the mismatch in coefficient of thermal expansion between plastic package and PCB. A general computational approach to determine the effect of solder joint shape on the fatigue life presented. The thermal fatigue life was estimated from the engelmaier equation which was obtained from the temperature cycling loading(-65 °C to 150 °C).

As result of the simulation, TSOP structure has the shortest thermal fatigue life and the same structure Copper lead has 2.5 times as much fatigue life as Alloy 42 lead. In BGA structure, fatigue life time extended 80 times when underfill material exists.

(Received July 5, 1999)

Key Words : Solder joint, Fatigue, Package, Lead frame, Finite element analysis

1. 서 론

표면 실장기술의 발전과 더불어 마이크로 솔더 접합부의 신뢰성은 중요한 관심사가 되어있다. 최근에는 전자기기의 소형화, 고밀도 실장과 더불어 기판상의 전극과 접합하는 솔더링 기술은 접합부 면적 및 접합 피치가 미세화되는 추세이기 때문에 솔더 접합부의 열피로 수명 예측은 전자부품의 신뢰성을 평가하는 중요한 기술로 대두되고 있다.

J.Lau¹⁾등은 탄소성 유한요소 해석(finite element analysis, FEA)을 통하여 QFP(Quad Flat Package)의 열피로 수명을 계산하였고, N.Paydar²⁾

는 2차원 평면변형, 2차원 평면응력, 2차원 솔리드 모델을 구성하여 솔더의 크리프 물성 변화에 따른 피로 수명을 최대 변형을 구간법과 에너지 분할법을 이용하여 그 차이를 비교하였다. 또한 M.Mukai³⁾는 탄성-크리프 구성 방정식에 기초하여 PGA(Pin Grid Array)의 열피로 수명을 계산하였고, K.Mui⁴⁾는 PQFP를 대상으로 솔더 접합부의 응력 해석을 ANSYS 프로그램을 사용하여 3차원 형상으로 고찰하였다. T.S.Lee와 T.P.Choi⁵⁾는 걸링 리드 평면 요소의 각 절점에 높이 함수를 정의하고, 3차원 접합부의 형상을 계산하였다. M.Rassaian⁶⁾은 PBGA를 대상으로 열하중에서 솔더 범프(solder bump)에 걸리는 응력을 2D FEA 모델로 해석하고, J.Pang⁷⁾은 봉지된 FCOB에 대해서 열-

기계적 응력 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 현재 폭넓은 분야에서 사용되고 있는 BGA(Ball Grid Array)와 LOC(Lead On Chip) 구조 TSOP와 SOJ 패키지를 대상으로 하여, 패키지 유형에 따른 온도 사이클 시험 조건에서 솔더 접합부의 최대 크립 변형이 발생하는 위치를 파악하고, 열피로 수명을 계산하여 신뢰성 실험과 비교하였다. 또한 FBGA 구조에서 솔더범프의 형상 변화와 언더필(underfill) 재료의 유무에 따른 영향을 파악하기 위해서 유한요소 해석을 수행하였다.

2. 열피로 이론 및 실험

2.1 열피로 이론

해석에서 공정솔더(63Sn-37Pb)의 크립 거동은 Norton's 법칙을 따른다고 가정하였다.

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

여기서 ϵ_c 는 상당 크립 변형률(equivalent creep strain rate)이고, σ 는 상당응력(equivalent stress), A 와 n 은 솔더의 크립 거동에 관련된 고유 물성치이다. 온도에 따른 솔더의 크립 물성치는 Table 1⁸⁾과 같다. 또한 솔더는 낮은 항복 강도로 인해 온도 사이클 시험중에는 소성 거동도 동시에 발생하므로, 솔더의 항복 강도는 8.3MPa로 하였고 항복후 10%의 변형 경화가 일어난다고 가정하였다. 해석에 사용된 패키지의

Table 1 Material properties of 63Sn-37Pb solder

| Temperature(°C) | A(MPa/hr) | n |
|-----------------|-------------------------|-----|
| -65 | 6.545×10^{-17} | 9.2 |
| 0 | 3.57×10^{-10} | 5.6 |
| 25 | 1.975×10^{-8} | 4.7 |
| 50 | 6.417×10^{-7} | 3.9 |
| 100 | 7.044×10^{-5} | 3.0 |
| 150 | 2.089×10^{-3} | 2.4 |

물성치를 Table 2에 나타냈다.

솔더의 거동을 설명하기 위해서 Engelmaier⁹⁾는 온도 사이클 횟수(f)와 평균 사이클 온도(T_m)의 영향을 고려하여 식 (2)를 제안하였다.

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

여기서 N_f = 고장 평균 사이클, $\Delta\gamma$ = 매 사이클 부하의 충전단 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 = 평균 사이클 온도(°C) = $1/2(T_{max} + T_{min})$, 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 총합으로 정의된다.

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

여기서, 각각의 상당 변형률 ϵ 는 변형률 텐서의 성분으로부터 구해진다.

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

그리고 상당 변형률 ϵ 는 다음 관계에 의해서 상당 전단 변형률 γ 로 변환된다.

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

2.2 실험

해석은 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. Fig. 1은 해석에 사용된 패키지 유형별 단면 구조로 a)는 TSOP(Thin Small Outline Package), b)는 SOJ(Small Outline J-lead), c)는 BGA(Ball Grid Array) 구조를 나타냈다. 또한 각각

Table 2 Material properties used for analysis

| Component | Chip | Solder | PCB | Lead | EMC | Substrate | Tape | Adhesive | Underfill |
|----------------------|--------|-----------|--------|---------|--------|-----------|--------|----------|-----------|
| Material | Si | 63Pb-37Sn | FR4 | Alloy42 | - | BT Resin | - | - | Epoxy |
| Young's Modulus(MPa) | 1.66E5 | 2.20E4 | 1.79E4 | 1.45E5 | 2.50E4 | 1.20E4 | 4.53E3 | 2.00E4 | 1.45E4 |
| Possion's Ratio | 0.25 | 0.4 | 0.185 | 0.30 | 0.23 | 0.39 | 0.45 | 0.30 | 0.28 |
| CTE(ppm/°C) | 2.3 | 21 | 16 | 4.5 | 11 | 15.0 | 29 | 140 | 20 |

의 패키지에 대한 치수로 TSOP의 외관 크기는 $20.95 \times 10.16 \times 1.0\text{mm}$ ($H \times L \times T$)이고, 리드 두께는 0.125mm , 피치 간격은 1.27mm 이다. SOJ의 크기는 $20.95 \times 10.16 \times 2.79\text{mm}$ 이며, 리드 두께는 0.2mm , 피치 간격은 1.27mm 이다. BGA의 크기는 $27 \times 27 \times 23.3\text{mm}$ 이며, 볼 크기는 0.76mm , 피치는 1.27mm , 솔더는 $63\text{Sn}-37\text{Pb}$ 이고, PSR(Photo Solder Resistor)의 개구 크기는 0.64mm 이다. 모델링은 기하학적 대칭 구조로 인하여 전체 모델의 반단면을 고려하였고, Table 3에 해석에 사용된 요소수와 절점수를 나타내었다. 또한 솔더 접합부에는 탄성-크리프 모델을 적용하고, 기타 다른 구성 재료는 순수 탄성거동으로 가정하였다. 해석은 시작온도에서 전체 모델이 균일한 온도를 갖고, 초기 응력은 영(zero)으로 가정하였다.

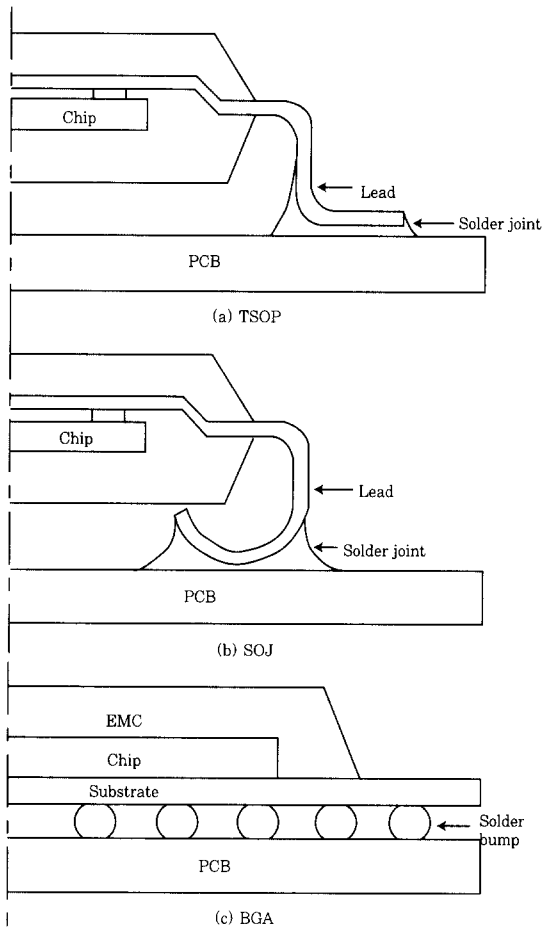


Fig. 1 Analytic models used in this study

Table 3 Node and element used for analysis

| Package type | Element(EA) | Node(EA) |
|--------------|-------------|----------|
| TSOP | 1778 | 2042 |
| SOJ | 1681 | 1924 |
| BGA | 1013 | 1146 |

Fig. 2는 해석에 적용된 온도 사이클 시험 조건으로 5분 온도 상승구간, 10분 고온 정지구간, 5분 온도 하강 구간, 10분 저온 정지구간으로 1 사이클 30분을 적용했다. 시간에 따른 온도 하중은 대기과 접한 패키지 외부 표면에 적용시켰다. 경계조건으로는 기하학적 대칭면에는 x 방향의 변위를 구속하고, 기판의 왼쪽 하단 모서리 절점에 y 방향의 변위를 구속하여 전체 모델의 강체운동을 제거하였다.

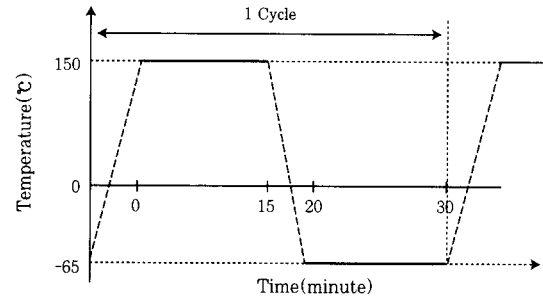


Fig. 2 Temperature cycle profile

3. 결과 및 고찰

3.1 패키지 유형에 따른 영향

패키지 유형에 따라 온도 사이클 시험에서 발생하는 비탄성 변형량을 계산하고, 이 값을 Engelmaier의 경험식에 대입하여 열피로 수명을 구하였으며, 결과를 Table 4에 나타냈다. 또한 Fig. 3에 각각의 패키지 유형에 있어서 응력 집중 부위에 대한 해석 결과를 나타내었다. 솔더 접합부의 피로 수명은 온도 변화 구간이 크고, 변형량이 커지면 피로 수명은 짧아지는 경향을 보인다. 유한요소 해석결과 TSOP 구조에서 가장 짧은 피로 수명이 나타나며, SOJ 구조에서 가장 긴 피로 수명을 보인다. 각각의 패키지에 대해서 응력 집중 부위를 분석하면 BGA는 내부 칩의 끝을 기준으로 해서 좌측 솔더범프에 많은 응력이 걸리며, 패키지 외각에 근접한 솔더범프에 작은 응력이 발생한다. TSOP 에서는 최대 응력과 변형의 집중은 솔더 필렛의 힐(heel) 부분에 가장 많은 응력이 발생하고, 그 다음에 리드의 토투(toe) 부분에 집중 응력이 발생한다

Table 4 Thermal fatigue life with the temperature cycle conditions

| Package type | Creep strain(%) | Nf (Cycle) |
|--------------|-----------------|------------|
| TSOP | 2.93 | 293 |
| SOJ | 1.64 | 1250 |
| BGA | 2.29 | 527 |

다. 또한 SOJ 에서는 리드와 솔더 접합부의 좌측 상단부 경계면에 가장 많은 응력이 발생한다. 이러한 결과는 패키지 내부의 실리콘 칩(몸체)과 실장된 기판과의 열팽창률 차이로 인하여 열피로가 솔더 접합부에 발생하기 때문으로 사료된다.

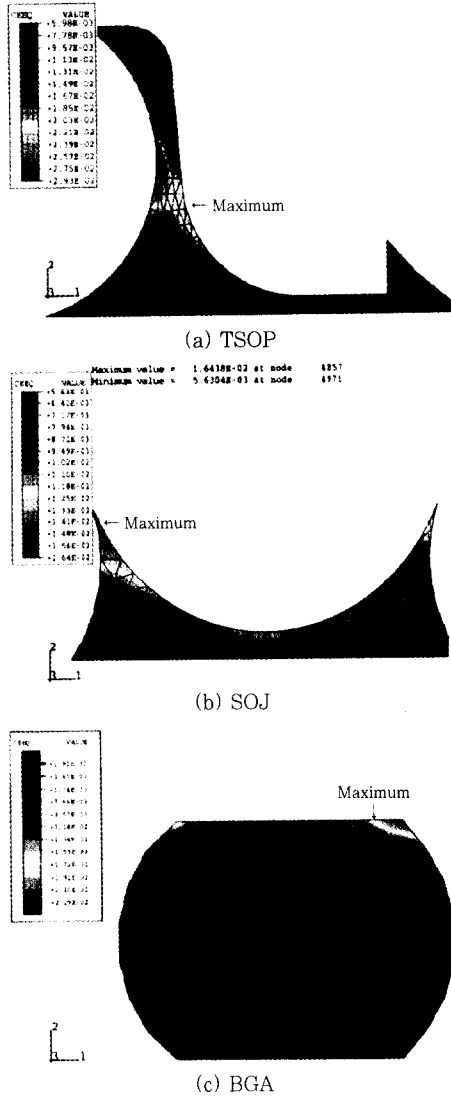


Fig. 3 Creep strain of the solder joint

3.2 솔더범프의 형상에 따른 영향

BGA는 회로 기판상에 납땜 범프가 격자상으로 형성되어 있기 때문에 기존 패키지보다 고밀도화가 가능하다. 그러나 BGA 구조는 열팽창계수(Thermal expansion coefficient)의 차이를 흡수하는 리드가 없기 때문에 솔더범프에 많은 열응력과 변형이 발생한다. 그러므로 솔더범프의 형상 변화와 언더필 재료의 유무에 따른 영향을 분석하기 위해서 솔더범프 부분의 공백을 예폭시 기판의 재료로 언더필 처리하는 FBGA(Flip Ball

Grid Array)를 대상으로 피로 수명 해석이 수행되었다. Fig. 4와 같은 솔더형상을 토대로 솔더범프와 기판이 이루는 각도를 $70^{\circ} \sim -70^{\circ}$ 사이로 정량화하여 해석하고, 결과를 Table 5에 나타냈다. 해석 결과 동일한 형상에서 솔더범프 부피(각도)와 언더필 재료가 솔더범프의 피로 수명에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

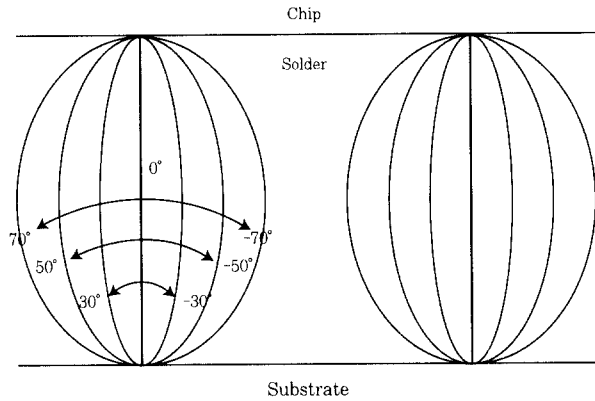


Fig. 4 Shape of solder bump

Table 5 Effect of underfill on fatigue life

(a) No underfill

| Angle | Creep strain (%) | Fatigue Life (Cycle) |
|-------|------------------|----------------------|
| -70 | 3.40 | 204 |
| -50 | 3.17 | 357 |
| -30 | 3.19 | 238 |
| 0 | 3.74 | 160 |
| 30 | 4.16 | 123 |
| 50 | 4.79 | 86 |
| 70 | 6.19 | 45 |

(b) Underfil

| Angle | Creep strain (%) | Fatigue Life (Cycle) |
|-------|------------------|----------------------|
| -70 | 1.520 | 1204 |
| -50 | 1.220 | 2054 |
| -30 | 1.120 | 2527 |
| 0 | 0.909 | 4196 |
| 30 | 0.908 | 4207 |
| 50 | 0.956 | 3712 |
| 70 | 0.966 | 3620 |

언더필 재료를 사용하지 않았을 경우는 70° 의 볼록형(convex shape)이 부피의 증가로 인하여 온도사이클 시험에서 가장 큰 크립 변형이 발생하고, 피로 수명은 가장 짧았다. 전반적으로 솔더범프의 부피가 증가함에 따라 국부적인 열팽창계수 차이의 증가로 인하여 피로 수명은 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 언더필 재

료를 사용했을 경우는 다른 경향을 나타내는데, 정사각형(0°)에 가까운 볼록형에서 가장 긴 피로수명이 나타나고, 솔더범프의 형상이 오목형(concave shape)으로 치우칠수록 피로수명은 급격히 감소한다. 이것은 솔더범프와 언더필 재료의 기계적 특성이 유사하여 솔더범프가 온도 사이클 시험 조건에서 팽창과 수축을 반복하면서 응력 집중 요인이 적은 정사각형과 같은 형상에서 가장 열피로 수명이 길기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 언더필 재료가 솔더범프에 발생하는 응력을 완화시켜주는 역할을 하여 언더필 재료를 사용했을 경우가 사용하지 않았을 경우 보다 향상된 신뢰성 결과가 나올것으로 사료된다.

3.3 리드 프레임 재질에 따른 영향

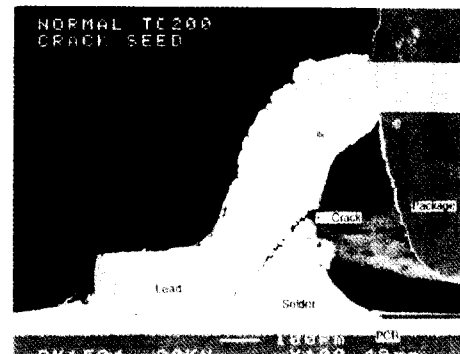
플라스틱 패키지 구조에서 리드 프레임 재질에 따른 피로수명의 변화를 분석하기 위해서 리드 프레임 재질을 철합금인 Alloy42와 구리로 구분해서 해석하였다. 해석에서는 LOC 구조를 기본으로 선정하였으며, 칩의 영향을 고려하여 동일한 크기로 설정하였다. 해석 결과 응력이 집중되는 영역은 TSOP와 SOJ 구조 모두 패키지 유형의 결과와 동일하였으나, 피로수명에서는 TSOP 구조에서 리드 프레임 재질이 구리인 경우 738 사이클로 Alloy42의 293 사이클보다 2.5배 향상된 피로수명 결과를 얻었다. 또한 SOJ 구조에서는 구리에서 3557사이클, Alloy42에서 1250 사이클을 얻었다. 이와 같은 솔더 접합부의 열피로 수명의 향상은 구리의 경우가 Alloy42 리드 프레임을 사용한 구조에 비해서 패키지의 열팽창률이 기판과 근접하기 때문으로 사료된다. 또한 기계적 측면에서 Alloy42에 비해서 구리가 재료의 유연성이 뛰어나기 때문에 실제 환경에서는 더욱 향상된 피로수명을 보일 것으로 판단된다.

3.4 솔더 접합부 평가

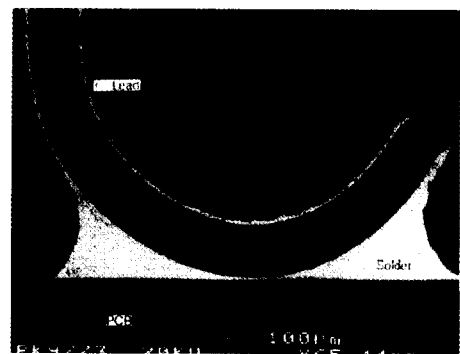
솔더 접합부의 피로강도 시험법으로 온도사이클 시험이 일반적으로 사용되고 있다.

패키지 유형에 따른 솔더 접합부의 신뢰성 실험을 위해서 일차적으로 인쇄회로 기판에 표면실장 솔더링 방식중 하나인 적외선 리플로우 방식으로 실장하였다. 리플로우 솔더링에 사용된 장비는 IR Lamp+ Hot N2 방식(Research Inc: 4470XN)을 적용하였다. 실험은 실장이 완료된 기판을 온도 사이클 시험($-65^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$) 챔버(TABAI, TSA-70H)에 넣어 1000 사이클까지 진행시켰으며, 일정 사이클 증가시 마다 기판을 추출하여 신뢰성을 분석하였다. Fig. 5(a)는

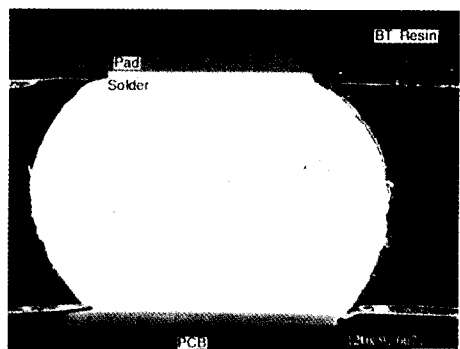
200 사이클 실험후 TSOP의 접합부 단면을 SEM (Scanning Electron Microscope)으로 관찰한 것으로, 초기 균열이 솔더 접합부 필렛의 힐 부근에서 시작하여 리드와 솔더 계면으로 파단이 진전된 모습이다. Fig. 5(b)는 SOJ를 800 사이클 동안 진행시킨후 접합부의 단면을 관찰한 것으로 리드와 솔더 계면사이의 박리 및 균열의 발생없이 양호하다. 또한 BGA 구조에서는 기판에 실장된 패키지의 저항 변화를 전기적으로 측정하여 솔더 접합부의 균열 유무를 확인하였다. 600 사이클 동안 진행시킨후 계면의 접합 상태를 확인한 결과 미세한 계면 박리가 발견되었으나 접합 상태는 양호하며, 이때의 계면 접합 상태를 Fig. 5(c)에 나타냈다.



(a) TSOP



(b) SOJ



(c) BGA

Fig. 5 The cross sectional view of solder joint after temperature cycling test

4. 결 론

패키지 유형에 따라 온도 사이클 수명시험 조건에서 발생하는 비탄성 변형량과 열피로 수명을 유한요소 해석으로 구하고, 실험 결과에서 나타난 솔더 접합부의 신뢰성과 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) BGA는 솔더범프와 기판의 경계면에서, TSOP와 SOJ 에서는 필렛의 힐 부분에서 가장 많은 응력이 발생한다.
- 2) 패키지 유형에 따라서는 TSOP 구조가 239 사이클로 가장 짧은 피로 수명을 보였으며, 리드 프레임 재질이 Alloy42보다 구리에서 TSOP, SOJ 모두 피로 수명이 2.5배 향상된 결과를 보였다.
- 3) 언더필 재료를 사용하지 않았을 경우 보다 사용했을 경우가 솔더 부피 70° 에서 최고 80배의 피로 수명이 증가하였다.
- 4) 언더필 재료를 사용했을 경우 블록형이 오목형에 비해서 피로 수명이 향상되고, 솔더범프가 기판과 이루는 각도가 직사각형(0°)에 가까운 블록형에서 긴 피로수명을 보였다.
- 5) TSOP는 200 사이클 진행후 리드와 솔더 계면으로 균열이 진전되었으나, SOJ와 BGA에서는 각각 800 사이클과 600 사이클까지 계면의 박리 없이 양호하여, 해석 결과와도 일치함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. J.Lau, D.Rice : Thermal Fatigue Life of 256-Pin, 0.4mm Pitch Plastic Quad Flat Package (QFP) Solder Joints Advances in Electronic Packaging (1992), pp.855~863
2. 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
3. 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
4. K.Mui : Solder Joint Formation Simulation and Finite Element Analysis, ECTC(1997), pp.436~443
5. 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
6. M.Rassaian, W.Chang : Multi-Domain Analysis of PBGA Solder Joints for Structural Design Optimization, IEEE(1998)
7. H.Pang : Thermo-Mechanical Analysis of Solder Joint Fatigue and Creep in Flip Chip on Board Package Subjected to Temperature Cycling Loading, IEEE(1998)
8. M.Mukai, Y.Hiruta : Elastic-Creep Thermal Stress Analyses for the SMT-PGA Package's Solder Joint, ASME(1994), pp.197~203
9. 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
10. W.Jung, J.H.Lau : Nonlinear Analysis of Full-Matrix and Perimeter Plastic Ball Grid Array Solder Joints, Journal of Electronic Packaging, Vol.119(1997), pp.163~170