

플라스틱 IC 패키지 접합부의 수명예측 및 품질향상에 관한 연구

신영의* · 김종민**

A Study on the Life Prediction and Quality Improvement of Joint in IC Package

Young - Eui Shin * and Jong - Min Kim **

Key Words : clad lead frame, die pad, FEM, Manson-Coffin, micro-crack, reliability, thermal fatigue, TSOP(Thin Small Outline Package), viscoplastic

Abstract

Thermal fatigue strength of the solder joints is the most critical issue for TSOP(Thin Small Outline Package) because the leads of this package are extremely short and thermal deformation cannot be absorbed by the deflection of the lead. And the TSOP body can be subject to early fatigue failures in thermal cycle environments.

This paper was discussed distribution of thermal stresses at near the joint between silicon chip and die pad and investigated the reliability of solder joints of TSOP with 42 alloy clad lead frame on printed circuit board through FEM and 3 different thermal cycling tests.

It has been found that the stress concentration around the encapsulated edge structure for internal crack between the silicon chip and Cu alloy die pad. And using 42 alloy clad, the reliability of TSOP body was improved. In case of using 42 alloy clad die pad($t=0.03\text{mm}$), σ_{VMmax} is 69MPa. It is showed that 15% improvement of the strength in the TSOP body in comparison with using Cu alloy die pad ($\sigma_{VMmax}=81\text{MPa}$).

In solder joint of TSOP, the maximum equivalent plastic strain and Von Mises stress concentrate on the heel of solder fillet and crack was initiated in it's region and propagated through the interface between lead and solder.

Finally, the modified Manson-Coffin equation and relationship of the ratio of N_f to nest(η) and cumulative fracture probability(f) with respect to the deviations of the 50% fracture probability life($N_{f 50\%}$) were achieved.

※ 1998년 10월 7일 접수

* 정희원, 중앙대 기계설계학과

** 정희원, 중앙대 기계설계학과 대학원

• 신영의 : shinyoun@cau.ac.kr

1. 서 론

전자 기기의 고밀도 실장과 더불어 전자부품을 프린트 회로기판이나 세라믹 기판상의 전극과 접합하는 솔더링(soldering) 기술은 접합부 면적의 미세화 및 접합 피치의 미세화 추세에 따라, 접합성(bondability) 및 신뢰성(reliability) 평가의 중요성이 날로 더해 가고 있는 것이 현실이다. 특히 TSOP(Thin Small Outline Package)는 다른 리드 패키지에 비해 열피로 특성이 나쁘다. 그 이유는 첫째, PCB(Printed Circuit Board) 기판과 패키지 사이에서 발생하는 총체적 열팽창계수 차이(GTEM : Global Thermal Expansion Mismatch)가 크다. 둘째, 상대적으로 짧고 강성이 높은 리드가 대부분의 총체적 열팽창 계수의 차이로 인한 응력을 솔더에 전가한다. 셋째, alloy 42 재질의 리드는 리드와 솔더 사이의 상당한 국부적인 열팽창 계수 차이(LTEM : Local Thermal Expansion Mismatch)를 보이기 때문이다.¹⁾ 이러한 이유로 TSOP 솔더 접합부에 큰 응력과 변형율이 반복적으로 발생되어 균열(crack)을 유발 시킨다. 또한, 솔더 접합부는 솔더의 낮은 항복 강도(yield stress)로 인해 온도 사이클링(thermal-cycling)시 시간 독립적인(time-independent)이고, 비회복성(unrecoverable) 변형인 소성 변형 거동이 동시에 발생된다.^{2,3)} 이 비탄성 변형(inelastic strain)이 집중되는 위치에서 균열의 발생과 전개가 이루어진다. 이것은 패키지 박형화에 따른 리드의 길이가 극단적으로 짧아져, 패키지의 열변형을 리드가 흡수 완화할 수 없어 솔더 접합부에서 발생하는 스트레인이 증대한 것에 기인한 것이다.¹⁾ 또한, 솔더 접합부위의 열피로 특성은 일정 온도의 기계적 피로와는 달리, 재료 강도의 온도 의존성이나 금속의 확산, 조직 변화 등의 영향을 받으므로 파괴 기구가 복잡해진다. 지금까지의 연구에 의하면, TSOP 솔더 접합부의 열피로 강도 평가법은 아직도 확립되어 있지 않으며, 해석 면에서의 검토도 불분명하다.

이에 본 연구에서는 첫 번째로, TSOP 몸체 내부의 신뢰성 측면을 42 alloy 클래드 리드프레임을 사용하여 어떻게 micro-cracks를 방지하는지, 열 응력 분포를 FEM을 통해 분석하고, 실험적으로 확인함으로써 TSOP 몸체 내부의 신뢰성을 검토하였다. 두 번째로, Sn-Pb 계열의 솔더 접합부의 열피로에 관한 연구⁴⁾는 솔더 접합부의 패키지 몸체와 PCB 기판과의 총체적 열팽창 계수의 차이뿐만 아니라 국부적인 열팽창 계수

의 차이도 함께 고려하여, 열 사이클을 통한 솔더 접합부의 점소성 특성을 FEM을 통해 보이고, 열 사이클 실험을 통해 수정된 Manson-Coffin 열피로 수명식을 구하였으며, 실제 피로수명을 통계 처리하여, 50% 파괴확률 수명(N_f 50%)과의 편차를 고려하여 수명 비율(η)과 누적확률(f)과의 관계를 구하였다. 따라서 본 연구는 TSOP의 신뢰성 측면에서 무엇보다도 중요한 접합부의 열피로 수명 평가를 하였으며, 패키지 내부의 실리콘 칩과 다이패드간의 열 응력의 완화방법을 클래드를 이용하여 신뢰성 향상방안을 이룬 및 실험을 병행하여 검토하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

2.1.1 TSOP(Thin Small Outline Package)

본 연구의 신뢰성 평가는 디바이스를 28핀 TSOP를 사용하여 모듈(module)화 시킨 것을 실험 대상으로 하였다. 디바이스의 크기는 $18 \times 10 \times 1.6$ mm 이고, 피치 간격은 1.27mm, 리드의 폭은 0.4mm이고, 리드수는 장변쪽에 각각 14핀으로 되어있다.

2.1.2 리드프레임

본 연구에 사용한 실험 재료로는 리드는 42 합금과 구리 합금 재질을 사용한다. 여기서, 구리 합금 재질의 리드는 기계적, 전기적 특성으로는 비교적 일반적인 것이지만, 첨가제로써 Zn을 미량으로 부가함으로써, 가열·확산에 의한 구리 패드와 솔더 계면 부근에서 발생하는 Kirkendal void의 발생을 억제하는 재료⁷⁾라는 것에 착안하여 선정하였다. 42 합금 클래드 리드프레임은 Fig. 1과 같은 과정을 통해 제작하여 실험하였다.

2.1.3 솔더 및 PCB 기판

솔더재료는 솔더 페이스트의 타입의 플럭스(flux : RMA 타입)가 내포되어 있는 시판중의 제품인 63Sn-37Pb의 공정솔더를 이용하였으며, 또한 PCB 기판은 가장 일반적으로 사용되고 있는 FR-4를 사용하였으며, 기판상에 있는 구리 패드에 솔더 재료를 이용하여 리드를 접합·접속되도록 시험을 하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 탑재 방법

각 부품의 접합부는 솔더 페이스트(solder paste)로 공

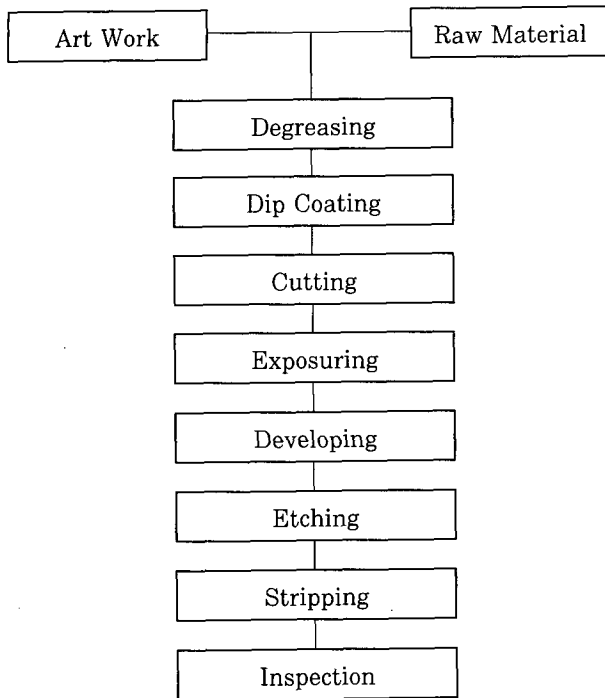


Fig. 1 The process of 42 alloy lead frame manufacturing

급하는 방법을 택하였으며, 공정 솔더(63Sn/37Pb)를 사용하여, PCB의 구리 패드 상에 폭 1.2mm, 길이 2.0mm, 두께 0.2mm로 메탈 마스크를 사용하여 스쿼저(squeeze)로서 인쇄하였다. 접합 방식은 열풍(hot air circulation) 방식으로 리플로우(reflow)하여 접합하였다.

2.2.2 온도 사이클 시험

본 연구에서 솔더 접합부의 신뢰성 평가 실험은 PCB 기판상에 실장된 패키지에 실제 가동 환경의 신뢰성 측면을 고려한 온도 사이클을 통하여 실험을 수행하였다. 온도 사이클 실험은 0~125℃, -50~125℃, -50~150℃의 세 종류로 하였으며, Fig. 2와 같이 1사이클을 60분으로 하였다. 사이클 횟수는 100, 300, 600, 1000, 1500 사이클로 하여 패키지를 꺼내어 솔더 접합부의 통전 시험과 TSOP 몸체와 솔더 접합부의 단면 분석을 통하여 열피로 파단 상태를 파악하였다. 또한, 실험 대상물인 모듈 위에 조립된 패키지는 18개이다. 여기서 솔더 접합부의 관찰대상은 각 패키지 중심에서 가장자리에 있는 4개의 접합부를 대상으로 하여 18 × 4 = 72 개의 접합부를 평가하였다.

이것은 리드 가장자리에 발생하는 상대 변위가 상대적으로 제일 크며, 이 상대 변위는 내부 구조를 고려한 패키지의 선형 팽창 계수와 기판의 선형 팽창 계수의 차에 의하여 구할수 있다. 또한, 열피로 파괴실험결과 실험 관찰대상의 수 72 개로부터 수명 차이가 생겨,

누적 파괴확률과 수명과의 관계를 도식화하여 평균수명(50%)을 구하였다. 그러나, 실제 제품의 수명을 설계 할 때는 수명과의 편차를 고려할 필요가 있다. 따라서, 실제 피로수명을 통계 처리하여 수명 비율(η)과 누적 확률(f)과의 관계를 구하였다.

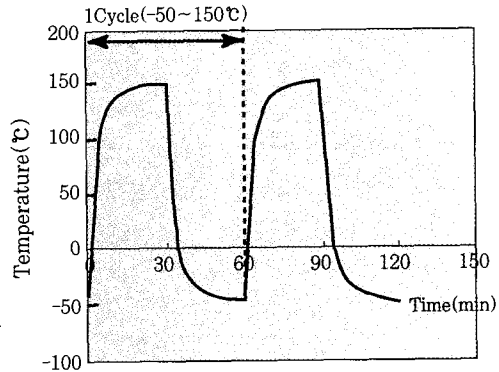


Fig. 2 The schematic illustration of typical thermocycling profile

3. 수치 해석

유한 요소 해석을 위하여 preprocess(모델링)-solution(해석)-postprocess(그래픽) 기능을 장착한 ANSYS 5.4를 이용하여 2차원 비선형 유한 요소 해석을 수행하였다.

3.1 FEM 모의 해석

본 연구에서는 28 핀 TSOP 패키지를 PCB 기판 위에 접합된 구조를 해석 대상으로 하였으며, 모듈 전체는 symmetric 구조로 되어 있으므로 1/2로 축소하여 모델링하였다. 또한 본 연구에서는 유한 요소 해석을 크게 두 가지로 분류하였다. 첫 번째는 TSOP 내부의 실리콘 칩과 다이패드 부위의 신뢰성 평가를 위해 다이패드를 구리 합금 재질, 42 합금 재질, 42 합금 클래드(base material : 구리 합금)로 하고, 42 합금 클래드의 두께를 10, 20, 30 μ m로 모델링하여 해석하였다. 두 번째는 솔더 접합부의 리드 재질에 따른 솔더와의 국부적인 열팽창 계수의 차이에 의한 열 응력해석을 위한 모델링으로 구분하였다. 솔더를 제외한 모든 재료는 선형 탄성재료로 가정하였으며, 솔더재료는 낮은 항복강도와 높은 유연성의 특성으로 viscoplastic 재료로 모델링 하였다. 전체 모델은 3799절점과 3664개의 요소로 구성되었으며, 특히 Fig. 3에서와 같이 응력 집중이 예상되는 솔더 접합 부위의 mesh를 더욱 세밀하게 나누어 관찰하였다. 요소 타입

은 4절점 요소로, 각 절점에서 2개의 자유도(x-y)를 가지는 plane 42로 솔더의 점소성 거동 및 stress stiffening, large deflection, large strain 효과를 함께 고려하여 구조해석(structure analysis)을 하였다. 경계조건으로는 symmetry 구속조건으로 TSOP 원편을 x축으로 고정(x=0) 시켰으며, PCB 기판의 휨을 최소한으로 막아 솔더 접합부에서의 피로 손상(fatigue damage)을 얻기 위하여 PCB 기판 하단 부위를 수직 방향으로 고정(y=0) 하였다. 또한 하중 조건으로는 Fig. 2에서 보는 바와 같은 온도 사이클로 각각의 모든 요소(elements)에 고르게 분포시켰다. 이 열 사이클은 솔더의 비선형성에 따라 안정한 히스테리시스 루프(hysteresis loop)를 얻고, 일시적인 텀(transient ratchetting) 현상이나 하강(shakedown) 효과를 최소화하기 위하여 완전한 2사이클을 가하였다.⁸⁾

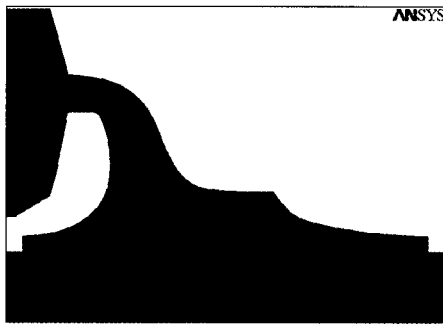


Fig. 3 Finite element model of one half of the TSOP

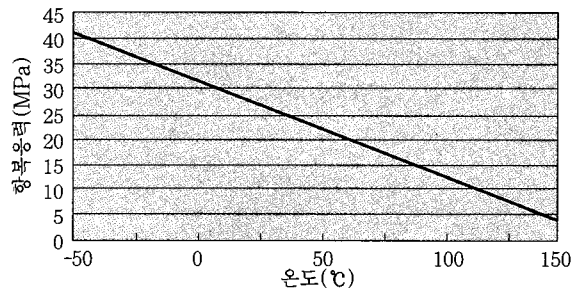
3.2 물성치(material property)

본 연구에서 사용한 각 재료의 물성치를 Table 1에 나타내었다. 전술한 바와 같이 솔더를 제외한 모든 재료는 isotropy하게 탄성 재료로 가정하였다. 또한, 낮은 항복강도와 높은 유연성으로 점소성 특성을 보이는 솔더를 해석 대상으로 한 온도 사이클 범위에서의 비선형 거동을 나타내기 위하여 온도 의존적(temp-

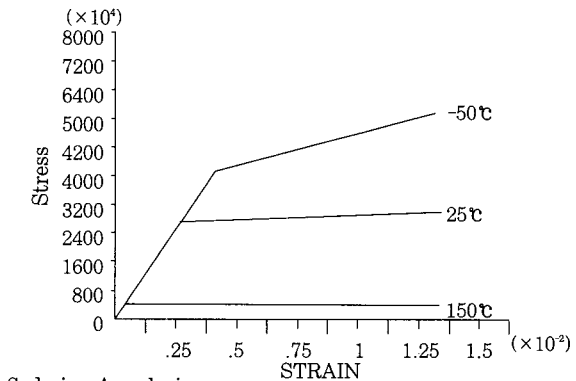
dependent)인 항복관계를 Fig. 4(a)와 같이 선형 관계로 판정하여 Von Mises의 항복조건을 이용하여 해석하였다. 이 관계를 수식으로 나타내면

$$\sigma_y = 31.509 - 0.18325 T \tag{1}$$

여기서, σ_y (MPa)는 항복응력을 T(°C)는 섭씨온도를 나타낸다.⁹⁾ 또한, 소성변형을 고려해야 하는 솔더 접합부의 비 선형 해석을 위하여 솔더의 온도에 따른 σ - ϵ 커브^{5,10)}를 Fig. 4(b)와 같이 bi-linear kinematic hardening으로 표현하였다.



(a) Yield strength vs temperature for eutectic solder



Soldering Analysis
(b) σ - ϵ curve of eutectic solder for different temperature on the bilinear kinematic approximation

Fig. 4 Input data for FEA

Table 1. Material properties

Comp.	Material	K (W/mm°C)	ρ (kg/mm ³)	C (J/kg°C)	E(MPa)	ν	α (ppm/°C)
EMC	Plastic	7.1E-4	1.9E-6	1047	2.5E4	0.35	11
Chip	Si	1.48E-1	2.33E-6	699	1.88E5	0.25	2.3
Lead	42 alloy	1.465E-2	8.1E-6	502	1.323E5	0.3	5.3
	Cu	2.617E-1	8.92E-6	400	1.213E5	0.34	17.7
PCB	FR-4	6.3E-4	1.77E-6	190	1.114E4	0.3	15
Solder	63Sn /37Pb	2.46E-2	8.42E-6	1890	0.1E5	0.4	21.4

4. 수치 해석 결과 및 실험 결과

4.1 수치 해석 결과

4.1.1 TSOP 몸체 내부의 열 응력 분포

Fig. 5는 -50~150℃의 열 사이클을 하중 조건으로 하여 다이패드의 재질에 따른 다이패드와 Si-칩과 EMC 경계면의 열 응력 분포를 나타내고 있다. Fig. 5에서와 같이 TSOP 내부의 최대 응력 분포를 보이는 부분은 실제적으로 내부 균열이 발생하는 실리콘 칩 끝단과 다이패드와의 접합부에서 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 내부 균열이 발생하는 실리콘 칩과 다이패드 사이에서 발생된 열 응력은 다이패드와 EMC사이에서 발생하는 열 응력에 비해 높다. 다이패드의 재질별로, 구리 합금 재질의 다이패드의 경우, 최대 Von Mises

응력값($\sigma_{VMmax}=81MPa$)로 42 합금($\sigma_{VMmax}=50MPa$)에 비해 62%정도 더 큰 응력이 걸림을 알 수 있다. 이런 높은 응력은 칩과 다이패드 사이의 상당한 열 팽창 계수 차이에 기인한 것이다.

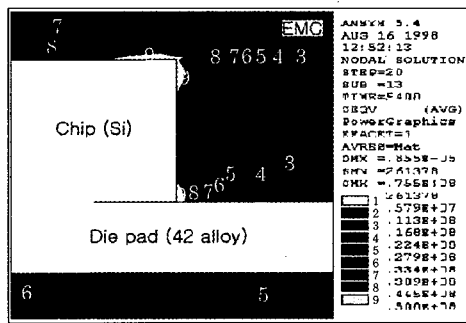
즉, 실리콘 칩과 구리 합금 재질의 다이패드와의 열팽창 계수의 차($\Delta\alpha=15.4ppm/^\circ C$)가 칩과 42 합금 재질의 다이패드와의 열팽창 계수의 차($\Delta\alpha=3ppm/^\circ C$)에 비해 상당한 차이를 보이기 때문이다. 그림과 같이 30 μm 의 두께를 가진 42 합금 클래드를 이용한 다이패드의 경우, 그 최대 Von Mises 응력값($\sigma_{VMmax}=69MPa$)은 구리 합금재질의 다이패드를 사용할 경우($\sigma_{VMmax}=81MPa$)에 비해 그 최대 Von Mises 응력값이 15% 정도 감소하였음을 알 수 있다.

4.1.2 솔더 접합부의 열 응력 분포

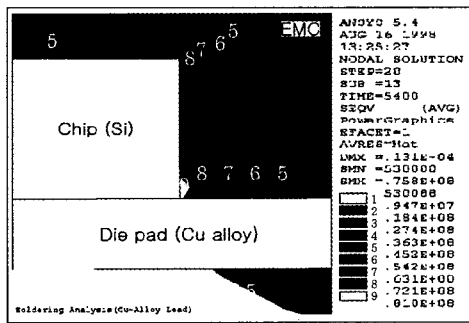
솔더 접합부의 신뢰성에 관한 연구를 위하여 Fig. 2에서와 같은 온도 프로파일을 가지는 세 종류의 열 사이클을 가하여 솔더 접합부의 Von Mises 응력 및 상당 소성 변형률(equivalent plastic strain) 값을 구하였다. Fig. 6은 각각 리드 재질에 따른 솔더 접합부에 발생한 열 응력 분포를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 리드의 재질과는 상관없이 모두 최대 응력이 걸리는 부분은 솔더 필렛의 heel 위쪽 부위인 것을 알 수 있다.

초기 균열이 발생하는 솔더 필렛 상단 부위에 걸리는 최대 Von Mises 응력은 리드 재질에 따라서 구리 합금 재질의 리드의 경우, 최대 Von Mises 응력 값($\sigma_{VMmax}=9.31MPa$)이며, 42 합금 리드의 경우($\sigma_{VMmax}=26.9MPa$)에 비해 약 65%정도 적게 걸린다. 또한, 온도 범위가 확대됨에 따라 최대 Von Mises 응력 값이 증가함을 알 수 있다. 각 열 사이클에 따라 구리 합금 리드의 경우, ($\sigma_{VMmax}=8.47MPa$)_{0~125℃}에서 ($\sigma_{VMmax}=9.34MPa$)_{-50~150℃}로 10% 증가되었으며, 42 합금 리드의 경우 ($\sigma_{VMmax}=16.1MPa$)_{0~125℃}에서 ($\sigma_{VMmax}=26.9MPa$)_{-50~150℃}로 67% 증가되었다.

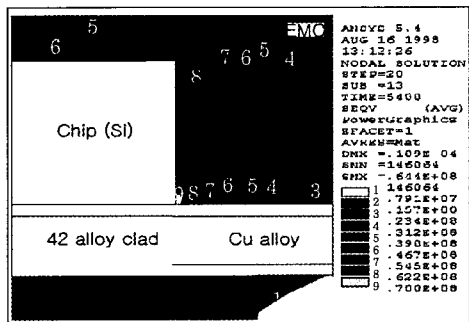
결국, 42 합금 리드의 경우 온도의 범위가 커질수록 더욱 큰 응력이 걸리는 것을 알 수 있다. 이는 구리 재질의 리드의 경우, Table 1에서 보는 바와 같이 탄성계수는 121,300 MN/m² 이고 α 는 $17.07 \times 10^{-6}/^\circ C$ 이다. 따라서, 구리 합금 재질의 리드와 솔더와의 국부적인 열팽창 계수의 차이($\Delta\alpha=3.7ppm/^\circ C$)는 42 합금 재질의 리드와 솔더와의 열팽창 계수의 차이($\Delta\alpha=16.1ppm/^\circ C$)에 비해 대단히 작다. 또한 구리 합금 리드의 강성도 또한 42 합금 리드에 비해 약 8%가 작다. 그만큼 구리 합금 리드가 42 합금 리드에 비해 유연성(flexibility)이 좋다는 것을 의미한다.



(a) 42 alloy die pad

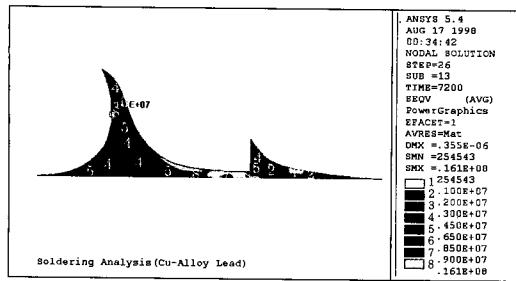


(b) Cu alloy die pad

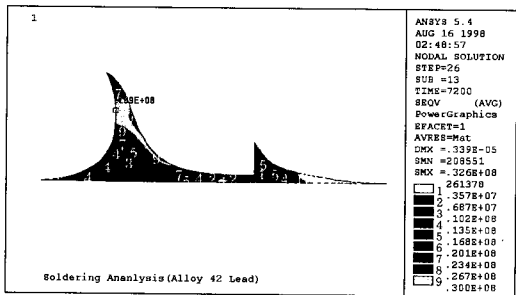


(c) 42 alloy clad die pad (t=0.03mm)

Fig. 5 Von Mises stress distribution in the TSOP body (1 cycle : -50~150℃)



(a) Cu alloy lead frame (unit:Pa)



(b) 42 alloy lead frame (unit:Pa)

Fig. 6 Von Mises stress distribution of the solder joint (1 cycle : -50~150℃)

따라서, PCB 기판과 TSOP 몸체간의 총체적인 열팽창 계수의 차이로 인해 발생된 응력과 변형률을 구리 합금 재질의 리드를 사용한 패키지는 42 합금 재질의 리드를 사용한 패키지에 비해 많이 흡수함으로써 솔더로의 소성변형을 막고 있다는 것을 알 수 있다.

각각의 리드 재질에 따른 세 종류의 열 사이클 별로 발생한 상당소성 변형률 분포 또한, 최대 Von Mises 응력이 분포된 지점에서 가장 큰 값이 발생하였다. 42 합금의 경우 최대 상당소성 변형률은 -50~150℃의 온도 범위에서 0.97%로 0~125℃의 온도 범위에서의 0.43% 보다 약 56% 더 큼을 알 수 있다. 또한, 구리 합금의 경우 최대 상당 소성변형률(0.26%) 보다 4배 가량 크게 발생하였다.

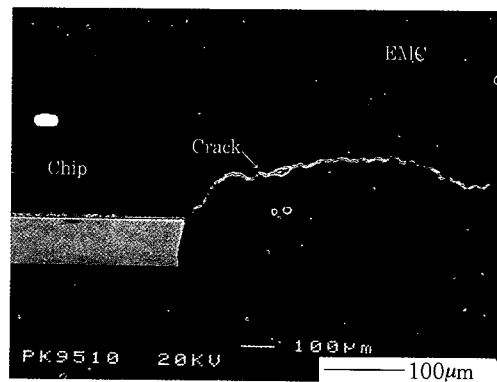
4.2 실험 결과 및 고찰

4.2.1 패키지 내부 접합부의 균열

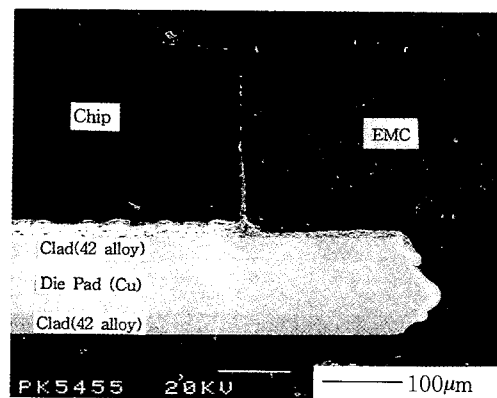
Fig. 7은 온도 범위 -50~150℃에서 20 사이클 후의 TSOP 몸체의 단면을 보인 것이다.

Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 구리 합금의 다이패드의 경우, 20 사이클 범위에서 균열이 발생되어 친착되어 간다. 유한요소해석을 통해 살펴본 바와 같이, 응력이 집중되었던 실리콘 칩 끝단과 다이패드와의 접합부 위에서 초기 균열이 발생되어 다이패드 계면을 따라 성장되어 감을 알 수 있다. 이 파괴 모드는 유한요소해석 결과에서와 같이 높은 응력이 집중되는 부위와 일

치하는 결과이다. 또한 Fig. 7(b)에서와 같이 42 합금 클래드를 이용한 다이패드의 경우, 실리콘 칩과 다이패드 간에 균열은 발생되지 않았다. 유한요소 해석결과에서 보았듯이 구리 합금 다이패드의 경우, 최대 Von Mises 응력 값 ($\sigma_{VMmax} = 81\text{MPa}$)이 42 합금 ($\sigma_{VMmax} = 50\text{MPa}$) 경우에 비해 62%정도 더 큰 집중 응력이 발생되며, 이 응력이 반복하중으로 작용하여 상대적으로 취약함을 알 수 있다. 즉, 실리콘 칩과 구리 합금 다이패드와의 열팽창 계수의 차($\Delta\sigma = 15.4\text{ppm}/\text{℃}$)가 칩과 42 합금 재질의 다이패드와의 열팽창 계수의 차($\Delta\sigma = 3\text{ppm}/\text{℃}$)에 비해 상당한 열팽창 계수의 차이를 보이기 때문이다. 이로 인한 내부 열팽창 계수의 차이로 인해 그 경계면에서 균열이 발생하고 있다. 따라서, 구리 합금 재질의 다이패드의 경우 이러한 큰 열팽창 계수의 차이를 42 합금 클래드를 이용하여 TSOP 내부의 신뢰성 문제를 보완·향상시킬 수 있다는 것을 실험 결과를 통해 입증할 수 있었다.



(a) Cu alloy die pad



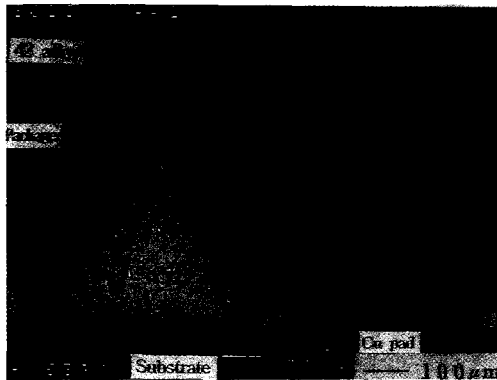
(b) 42 alloy die pad

Fig. 7 The cross sectional view in the TSOP body in 20 cycles (1cycle : -50~150℃)

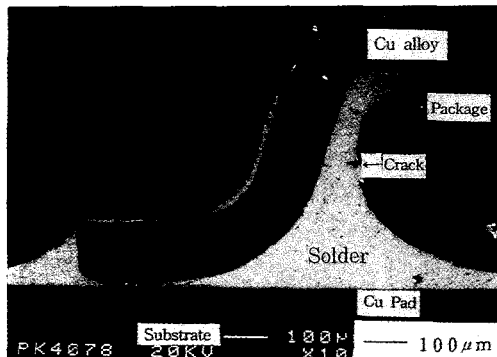
4.2.2 솔더 접합부의 균열 거동

열 사이클 실험 후의 리드 재질에 따른 솔더 접합부의 단면을 Fig. 8에 나타내었다. 전술한 유한 요소해

석의 결과에서 보았듯이 최대 상당소성 변형률 값을 보이는 솔더 필렛 heel 상단부위에서 초기 균열이 발생되고, 리드와 솔더와의 접합 계면을 따라 균열이 성장되어 감을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 TSOP 내부에 42 합금 클래드를 입히고, 구리 합금 재질의 리드를 사용한 패키지의 800 사이클 후의 단면을 보인 것이다. 앞선 결과와 마찬가지로 솔더 필렛 heel 상단 부위에서 초기 균열이 발생되고 있음을 알 수 있다. 이 경우, 상대적으로 42 합금 재질의 리드의 경우에 비해 초기 균열 발생에 걸리는 시간이 길고, 균열 진척이 느리게 진행된다. 파괴 경향도 솔더 필렛 heel 상단 부위에서 초기 균열이 발생하여 리드와 솔더와의 접합 계면을 따라 성장하고 있음을 알 수 있다.



(a) 500 Cycles of -50°C to 150°C (42 alloy lead frame)



(b) 800 cycles of -50°C to 150°C (42 alloy clad lead frame)

Fig. 8 The cross sectional view of the solder joint after thermal cycling test

4.2.3 솔더 접합부의 열피로 수명

기본적인 이론 해석은 온도 변화에 따른 패키지 와 PCB 기판 사이의 상대변위가 발생한 경우 Von Mises 항복 조건식은 다음과 같다.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{1/2 [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2)$$

$$\epsilon_{eq} = \sqrt{2/3 [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]} \quad (3)$$

여기서, σ_i ($i=1, 2, 3$)는 주응력을, ϵ_i ($i=1, 2, 3$)는 주변형률로 온도변화에 따른 응력 및 변형률 값을 구할 수 있다. 여기에 발생된 전체 상당 변형률은 유한 요소 해석 결과로부터 얻어진 탄성, 소성 변형률 크기의 총합으로 정의된다.

$$\epsilon_i = \epsilon_{ei} + \epsilon_{pi} \quad (4)$$

또한, 열 피로수명 평가를 위해 온도 사이클에 의한 솔더 접합부 부위에서 열 팽창계수의 차이로 인해 발생된 상당 소성 변형률과 수명(N_f)와의 관계를 살펴보기 위해 널리 사용되고 있는 Manson-Coffin 수식을 사용하였다. 이 수식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta \epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (5)$$

여기서, $\frac{\Delta \epsilon_p}{2}$ 는 소성 변형률을 $2N_f$ 는 피로 수명을 ϵ'_f 는 피로 유연도 계수, c 는 피로 유연도 지수를 나타낸다. 윗식을 이용하여 Sn-Pb 솔더를 사용한 리플로우 솔더링 한 디바이스를 세 종류의 온도 사이클을 가한 경우의 솔더 필렛 heel 상단 부위의 상당소성 변형률을 유한 요소 해석을 통해 구하면 $\Delta \epsilon_{peq}$ 는 0.43%_(0~-125°C), 0.63%_(-50~-125°C), 0.97%_(-50~-150°C)가 각각 얻어진다. 또한, 열피로 파괴실험 결과 실험 관찰 대상의 수 72개로부터의 수명 차이가 생겨, 누적 파괴 확률과 수명과의 관계를 도식화하여 평균수명(50% 파괴확률 수명)을 구하였다. 그 결과 각각의 온도 변화에 따른 50% 파괴확률 수명($N_{f50\%}$)은 각각 1250, 720, 500 이었다. 유한 요소 해석을 통해 얻은 $\Delta \epsilon_{peq}$ 와 실험을 통해 얻은 $N_{f50\%}$ 과의 관계를 최소 자승법으로 선형화하였다. 여기서, 50% 파괴확률 수명($N_{f50\%}$)의 기울기로부터 $N_{f50\%}$ 와 $\Delta \epsilon_{peq}$ 의 관계를 Manson-Coffin식의 형태로 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \epsilon_{peq} = 2.098 N_{f50\%}^{-0.872} \quad (6)$$

위의 식(6)이 본 연구의 이론과 실험을 통하여 얻어진 Manson-Coffin의 수정식이다. 일반적으로 파괴확률 수명을 구하는데 있어 균열을 고려한 해석을 할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 솔더의 형상이나 치수가 실제치와 거의 일치하기 때문에 최대 상당 소성 변형률이 균열 진전이나 파괴확률 수명과 일정한 관계가 있기 때문에 식(6)과 같은 수정식을 얻을 수 있었다. 그림 9(a)가 $N_{f50\%}$ 과 $\Delta \epsilon_{peq}$ 의 관계를 나타낸 것이다.

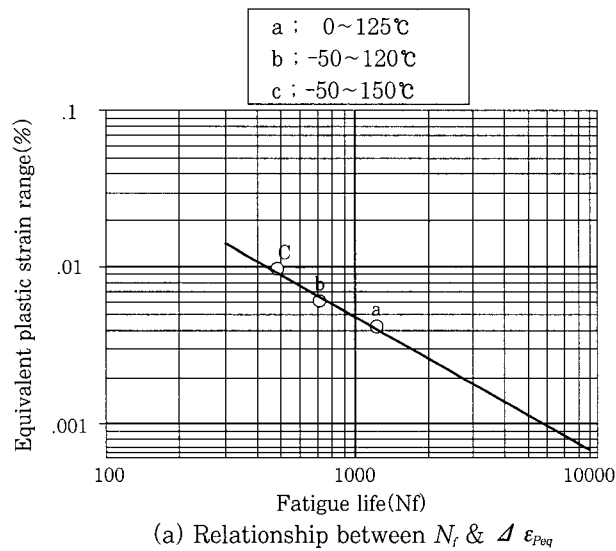
즉, 본 연구에서는 최대 상당 소성 변형률 해석에 의해 파괴확률 수명을 얻을 수 있었다.

그러나, 실제의 제품 수명 설계를 할 때는 50% 파괴 확률 수명과의 편차를 고려할 필요가 있다. 따라서, 실제 피로수명을 통계처리하여 50% 파괴확률 수명과의 편차를 고려하였다.

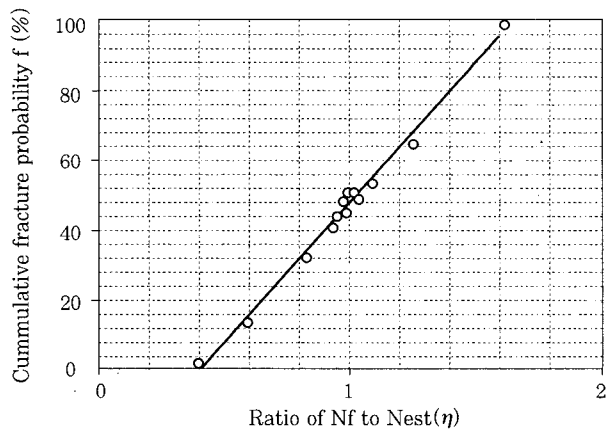
여기서 실제 피로수명 (N_f)을 통계처리하면 식 (6)로부터 얻어지는 추정수명(N_e)에 대한 샘플 72개의 실제수명의 비는 다음과 같이 표기된다.

$$\eta = \frac{N_f}{N_e} = \frac{N_f}{\left(\frac{\Delta \epsilon_{Peq}}{2.098}\right)^{-1/0.872}} \quad (7)$$

여기서, η 는 수명 비율을 N_f 는 실제 피로수명을 N_e 는 추정 피로수명을 나타낸다. 따라서, η 와 f 와의 관계는 그림 9(b)와 같이 된다. 그림과 같이 η 와 f 의 관계를 직선으로 선형화하면 $f = 0.1, 10, 90, 99\%$ 에 대응하는 η 값이 나오게 된다. 예를 들면 50%의 파괴확률을 기준으로 한 추정식 식 (6)으로부터 얻어지는 수명의 0.4배가 0.1%의 파괴확률 수명이 되고, 1.6배가 99%의 파괴확률 수명이 된다.



(a) Relationship between N_f & $\Delta \epsilon_{Peq}$



(b) Fracture probability distribution

Fig. 9 Results of FEM & Thermal cycling test

5. 결 론

본 연구에서는 TSOP 솔더 접합부의 열피로 수명 평가와 패키지 내부의 Si-칩과 다이패드 간의 열 응력 완화를 통한 신뢰성 향상 방안을 이론 및 실험을 병행하여 검토하였다.

열 사이클 온도 범위와 다이패드 및 리드 프레임의 재질을 변수로 하여 유한 요소 해석 및 열 사이클 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 구리 합금 재질의 리드 사용에 따른 TSOP 몸체 내부의 실리콘 칩과 다이패드 간의 열팽창 계수의 차이로 인해 칩과 다이패드와의 접합 계면에서 발생된 상당한 열 응력 ($\sigma_{VMmax}=81\text{MPa}$) 과 변형률을 42 합금 클래드($\sigma_{VMmax}=69\text{MPa}$)를 사용함으로써, 그 최대 Von Mises 응력값을 15%정도 감소시킬 수 있었다. 즉, TSOP 내부의 신뢰성 문제를 보완·향상시킬 수 있다는 것을 유한요소 해석 및 실험 결과를 통해 확인하였다.
2. 솔더 접합부의 경우, 온도 범위를 $-50\sim 150^\circ\text{C}$ 로 하였을 경우, 리드 재질로 구리 합금 재질의 리드를 사용한 경우, 솔더 필렛 heel 상단 부위에서 σ_{VMmax} 는 9.31MPa , $\Delta \epsilon_{Peq}$ 은 0.26%로 42 합금 재질의 리드를 사용한 경우, σ_{VMmax} 는 26.9MPa , $\Delta \epsilon_{Peq}$ 은 0.97%에 비해 각각 65%, 73%정도 감소되었다. 이로부터, 리드의 재질을 구리 합금 재질로 사용함으로써, 솔더와 리드간의 국부적인 열팽창 계수의 차이를 줄여 열 피로 특성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.
3. 솔더 접합부의 파괴 모드는, 유한 요소해석의 결과에서 보았듯이 최대 상당소성 변형률 값을 보이는 솔더 필렛 heel 상단 부위에서 초기 균열이 발생하여, 리드와 솔더와의 접합 계면을 따라 균열이 진척되어 감을 알 수 있었다.
4. 솔더 접합부에 발생하는 $\Delta \epsilon_{Peq}$ 및 $N_{f50\%}$ 를 통하여 TSOP의 열피로 수명식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\Delta \epsilon_{Peq} = 2.098 N_{f50\%}^{-0.872}$$

5. 수명비율(η)과 누적확률(f)의 관계로부터 0.1%부터 99%의 파괴 확률 수명을 구할 수 있으며, 4.의 결론식의 0.4배가 0.1%이고, 1.6배가 99%의 확률 수명이 된다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공

학 : ME97-E-33)에 의하여 연구되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Robert Darveaux: Optimizing the Reliability of Thin Small Outline Package (TSOP) Solder Joints, Advanced in Electronic Packaging ASME, EEP-Vol. 10-2, (1995), pp. 675-685
2. John H. Lau, Suresh Golwalkar, Steve Erasmus: Advantages and Disadvantages of TSOP with Copper Gull-Wing Leads, Advanced in Electronic Packaging ASME, EEP-Vol. 4-2, (1993), pp. 1119-1126
3. Shubo Wang, Qiang Yu, Masaki Shiratori: 表面実装部品はんだ接合部の弾塑性-クリープ有限要素解析法に関する研究, 日本機械學會論文集 (A編) 62巻 594, (1996.2), pp. 229-234
4. W. Englmaier, Elect. Park and Prob., (1983.4), pp. 58
5. D. R. Frear, S. N. Burchett, H. S. Morgan, J. H. Lau: The Mechanics of Solder Alloy Interconnects, Van Nostrand Reinhold, New York, (1994), pp. 199-313, 363-385
6. D. J. Xie, Yan C. Chan, J. K. L. Lai, I. K. Hui: Fatigue Life Studies on Defect-Free Solder Joints Fabricated from Modified Reflow Soldering, IEEE Transaction on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B, V. 19, N. 3, (1995.11), pp. 679-684
7. Fujita: 稀薄亜含有銅合金のスズおよびソルダの密着性, 日本マイクロ接合委員會, MJ-168-91, pp. 33-44
8. S. Verma, A. Dasgupta, D. Barker: A Numerical Study of Fatigue Life of J-Leaded Solder Joints Using the Energy Partitioning Approach, Transactions of the ASME, Vol. 115, (1993.12), pp. 416-423
9. Tsung-Yu Pan, ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 113, (1991), pp. 8.
10. John H. Lau: Handbook of fine Pitch Surface Mount Technology, Van Nostrand Reinhold, New York, (1993), pp. 1-54