

**研究論文**

## 표면실장용 IC 패키지 솔더접합부의 열피로 수명 예측

윤 준 호\* · 신 영 의\*\*

### A prediction of the thermal fatigue life of solder joint in IC package for surface mount

J. H. Yoon\* and Y. E. Shin\*\*

**Key Words:** Thermal Fatigue Life(열피로 수명), Finite Element Method(유한요소법), Creep Strain(크립 변형률), EMC(Epoxy Molding Compound), Crack(균열)

#### Abstract

Because of the low melting temperature of solder, each temperature cycle initiates an irrecoverable creep deformation at the solder interconnection which connects the package body with the PCB. The crack starts and propagates from the position where the creep deformation is maximized. This work has tried to compare and analyze the thermal fatigue life of solder interconnection which is affected by the lead material, the size of die pad, chip thickness, and interface delamination of 48-Pin TSOP under the temperature cycle (0°C~125°C). The crack initiation position and thermal fatigue life which are calculated by using FEA method are well matched with the results of experiments. The thermal Fatigue life of copper lead frame is extended around 3.6 times longer than that of alloy 42 lead frame. It is maximized when the chip size is matched with the length of the lead. It tends to be extended as the thickness of chip got thinner. As the interfacial delamination between die pad and EMC is increased, the thermal fatigue life tends to decrease in the beginning of delamination, and increase after the delamination grew after 45% of the length of die pad.

※ 1998년 3월 24일 접수

\* 정희원, 여주전문대학 자동차과

\*\* 정희원, 중앙대학교 기계설계학과

## 1. 서 론

반도체 패키지는 여러 구성 요소로 이루어진 복합 조립체이기 때문에 열하중 조건하에서 구성 요소간의 상이한 열팽창률과 강성도의 차이로 인해 많은 열변형을 일으킨다. 특히 패키지 몸체와 PCB를 기계적, 전기적으로 연결하는 솔더접합부는 가장 취약한 부분이며, 점소성 특성으로 인해 매 온도 사이클 (temperature cycle) 마다 크립 및 소성 변형이 누적되어 결국은 열피로 (thermal fatigue) 파괴를 일으킨다. 최근에는 칩 (chip)의 고집적화로 인하여 패키지 몸체는 점점 커지고 솔더접합부는 작아지는 추세이기 때문에 솔더접합부의 열피로 수명 예측은 전자 부품의 신뢰성을 평가하는 가장 중요한 기술로 대두되고 있다. 패키지와 PCB 연결에 사용되는 63Sn-37Pb 솔더 재료는 저온 용융 특성으로 인해 0~125℃의 온도 사이클 구간에서 상당량의 크립 변형이 발생한다. 이 시간의존성 (time dependent) 비선형 특성인 크립 거동은 솔더접합부의 거동 특성을 규명하는데 있어 가장 중요한 인자로 인식되고 있다. 또 솔더접합부는 낮은 항복 강도로 인해 온도 사이클링시 시간독립적 (time-independent)인 소성 거동도 동시에 일으키는 매우 복잡한 거동 특성을 지니고 있다.

N. Paydar<sup>1)</sup>는 2차원 평면변형, 2차원 평면응력, 2차원 솔리드 모델을 구성하여 솔더의 크립 물성 변화에 따른 열피로 수명을 최대 변형을 구간법과 에너지 분할법을 이용하여 그 차이를 비교하고, M. Mukai와 T. Kawakami<sup>2)</sup>는 탄성-크립 구성 방정식에 기초하여 PGA (Pin Grid Array)의 열피로 수명을 계산하였다. 또한 R. K. Govila<sup>3)</sup> 등은 LCR (Leadless Chip Resistor)의 곡률반경에 따른 탄성 해석과 탄성-크립 해석을 통해 매 온도별 전단응력 및 변형량의 차이를 비교하였다. J. Lau<sup>4)</sup> 등은 3차원 탄소성 유한요소 해석을 통해 QFP (Quad Flat Package)의 열피로 수명을 산출하였으며 R. Darveaux는 패키지 크기, 다이 크기, 리드 재질등이 TSOP 솔더접합부의 열피로 수명에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 고찰하였다. 본 연구에서는 소성 변형량은 크립 변형량의 약 5~10%에 불과하였기 때문에, 해석시간과 구성 방정식의 간편성을 고려하여 탄성-크립 모델을 구성하고 다양한 조건하에서 TSOP 솔더접합부의 열피로 수명에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험방법 및 열피로 이론

### 2.1 실험방법

해석에 적용된 2차원 48리드 TSOP 패키지의 탄성-크립 모델은 유한요소 Pre-Processor 프로그램인 PATRAN을 이용하여 모델링 하였고, 해석은 비선형 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS의 Newton-Rapson법에 기초를 두고 해석하였다. Fig. 1은 솔더접합부의 유한요소 모델을 나타내었다.

모델링은 기하학적 대칭구조로 인해 전체 모델의 1/2만을 고려하였다. 유한요소 모델은 967개의 절점과 486개의 요소로 구성하였다. 또한 솔더접합부에는 탄성-크립 모델을 적용하였고, 기타 다른 구성 재료는 순수 탄성거동으로 가정하였다. 시간에 따른 온도 사이클은 125℃에서 시작하였으며, 이 시작온도에서 전체 모델은 균일한 온도를 갖고 초기 응력은 무응력 (zero stress)으로 가정하였다.

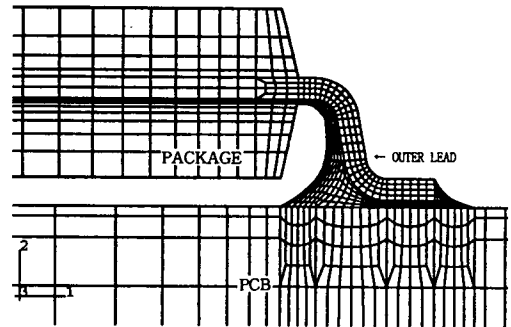


Fig. 1 Finite element mesh of TSOP solder joint

해석에 적용된 열경계 조건으로 신뢰성 시험조건 의 하나인 온도 사이클 (temperature cycle) 수명시험으로 5분 온도 하강 (ramp down) 구간 (125℃~0℃), 10분 저온정지 구간 (0℃), 5분 온도 상승 (ramp up) 구간 (0℃~125℃), 10분 고온 정지구간 (125℃)으로 구성하였다. 시간에 따른 온도 하중은 대기과 접한 패키지 외부표면에 적용시켰다. 경계조건으로는 기하학적 대칭면에는 1 방향의 변위를 구속하였고, PCB 왼쪽 하단 모서리 절점의 2 방향의 변위를 구속하여 전체모델의 강체운동을 제거하였다. 아울러 본 해석에서의 63Sn-37Pb 솔더의 크립거동은 Norton's 법칙을 따른다고 가정하였다.

$$c = A\sigma^n \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 상당 크립 변형률 (equivalent creep strain rate) 이고,  $\sigma$ 는 상당응력 (equivalent stress),  $A$ 와  $n$ 은 솔더의 크립 거동에 관련된 고유 물성치이다. 온도에 따른 솔더의 크립 고유 물성치는 Table. 1<sup>2)</sup>에 구성 재료의 물성치를 Table. 2에 나타내었다.

여기서,  $K$ : 열전도도,  $\rho$ : 밀도,  $C$ : 비열,  $E$ : 탄성계수,  $\nu$ : 포아송비,  $\alpha$ : 열팽창계수이다

### 2.2 열피로 수명 이론

솔더는 점소성 거동 특성으로 인해 매 온도 사이클마다 비회복성 (unrecoverable) 변형이 발생되고, 이 비탄성 변형 (inelastic strain)이 집중되는 위치에서 균열의 발생과 진전이 이루어진다는 사실은 많은 자료를 통하여 입증되었다.<sup>2,5)</sup> 따라서 솔더접합부의 열피로 수명은 매 사이클별 변형구간 (strain range)이 결정되면 계산할 수 있다. Engelmaier<sup>6)</sup>는 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 경험식을 제안하였다.

**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	4.7
50	6.417E-7	3.9
100	7.044E-5	3.0
150	2.089E-3	2.4

**Table 2.** Material properties of packaging elements

Component	Material	K (W/mm °C)	$\rho$ (kg/mm <sup>3</sup> )	C (J/kg °C)	E (Mpa)	$\nu$	$\alpha$ (ppm/°C)
EMC	Plastic	7.1E-4	1.9E-6	1047	1.4E4	0.24	11
Chip	Si	1.48E-1	2.33E-6	699	1.88E5	0.28	2.6
Lead	Alloy 42	1.465E-2	8.1E-6	502	1.45E5	0.3	4.5
	Cu	2.617E-1	8.92E-6	400	1.193E5	0.34	17
PCB	RR-4	6.3E-4	1.77E-6	190	1.114E4	25°C:0.3	15
						25°C:0.28	
						120°C:0.3	
Solder	63Sn-37Pb	2.46E-2	8.42E-6	1890	1.0E4	0.4	21.1

$$Nf = 1/2 (\Delta \gamma / 2\epsilon f) (1/c) \quad (2)$$

여기서  $Nf$ 는 고장 평균 사이클,  $\Delta \gamma$ 는 매 사이클 부하의 총 전단 변형구간,  $\epsilon f$ 는 피로 연성계수 = 0.325,  $c$ 는 피로 연성지수 =  $-0.442 \sim 6 \times 10^{-4} T_m + 1.74 \times 10^{-2} \ln(1+f)$ ,  $T_m$  = 평균 사이클 온도 (°C),  $T_{min}$  = 최소 사이클 온도 (°C),  $f$  = 사이클 빈도수,  $1 < f < 1000$  사이클/일이다.

전체 상당 변형률은 유한요소 해석 결과로 부터 얻어진 탄성, 비탄성 변형률 크기의 종합으로 정의된다.

$$\epsilon = \epsilon_{el} \epsilon_{in} \quad (3)$$

여기서 각각의 상당 변형률은 변형률 텐서 (strain tensor)의 성분으로 계산된다.

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

그리고 상당 변형률은 다음 관계에 의해서 상당 전단 변형률로 전환된다.

$$\gamma = \sqrt{3} \epsilon \quad (5)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 솔더접합부의 거동 특성

탄성-소성-크립 모델을 구성하여 유한요소 해석을 수행한 결과 솔더 접합부의 비탄성 거동을 지배

하는 요인은 대체적으로 시간 의존성(time dependent)의 크립 변형에 의한 것으로 해석되었다. 시간 독립적인 소성 변형은 크립 변형의 5~10%에 불과하기 때문에 해석시간과 구성방정식의 간편성을 고려하여 탄성-크립 모델을 구성하여 다양한 조건하에서 TSOP 솔더접합부의 열피로 수명을 산출하였다. Fig. 2는 TSOP 솔더 접합부 Alloy<sup>®</sup>에서의 500 사이클후의 균열 진전 양상을 나타내는 SEM 사진이다. Fig. 3은 5 사이클후 솔더접합부 및 패키지의 변형형상을 나타내었으며, 온도 변화에 따라 패키지와 PCB의 열팽창 계수의 차이에 따라 전단변형이 되고 있음을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 균열이 필렛 언덕부위에서 발생하고 온도 사이클이 증가할수록 균열이 진전됨을 알 수 있다.

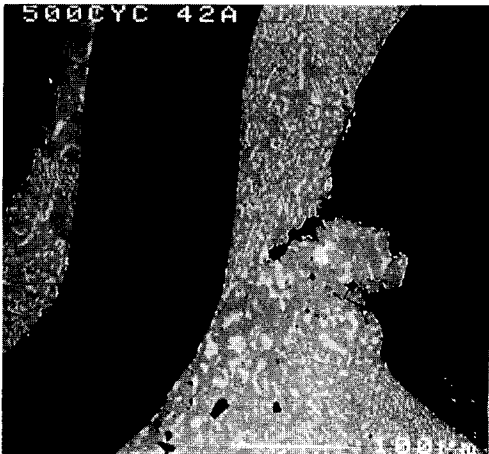


Fig. 2 Cross sectional view of solder joint after 500 cycles

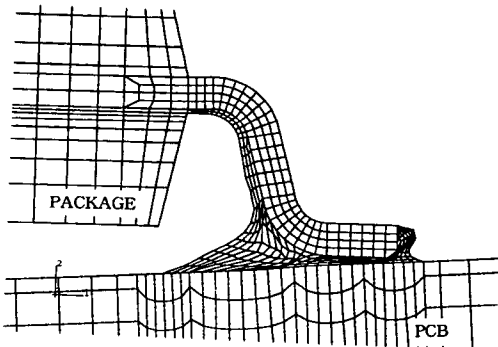


Fig. 3 Solder deformation shape after 5 cycles

### 3.2 리드 재질에 따른 열피로 수명 해석

솔더접합부의 응력장을 지배하는 요인은 GTEM(Global Thermal Expansion Mismatch)과 LTEM(Local Thermal Expansion Mismatch)으로 분류할 수 있다. 구리합금(Copper) 리드(열팽창계수:17ppm/°C)는 패키지 내부에 응력을 집중시켜 패키지 균열을 유발하는 문제점을 가지고 있지만, 패키지 몸체의 전반적인 열팽창률을 증가시켜 PCB(열팽창계수:15ppm/°C)의 열팽창률에 근접시키기 때문에 GTEM을 감소시킨다. 또 구리합금 리드의 열팽창률은 솔더접합부의 열팽창률(열팽창계수:21ppm/°C)에 근접하여 LTEM도 감소되기 때문에 솔더접합부의 열피로 수명이 증가하게 된다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 Alloy 42 리드와 구리합금 리드에서 솔더접합부에 작용하는 상당 크립 변형량을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 유한요소 해석 결과 최대 크립 변형을 보이는 위치는 솔더 필렛 언덕부위이며, Fig. 2에 나타난 500사이클후의 실제 균열 발생 위치와 서로 일치함을 알 수 있다.

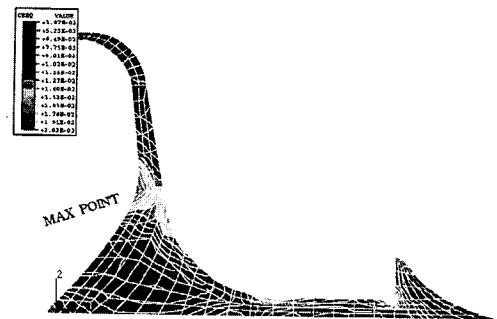


Fig. 4 Equivalent creep strain field in alloy 42 lead

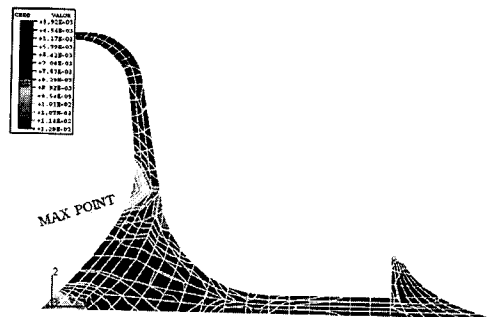


Fig. 5 Equivalent creep strain field in copper lead

### 3.3 다이패드 길이에 따른 열피로 수명 해석

48리드 TSOP의 칩과 다이패드의 길이는  $3698\mu\text{m}$ 와  $3988\mu\text{m}$ 이다. 이를 기준으로 다이패드 길이만을 변화시키면서 솔더접합부의 열피로 수명에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 6은 다이패드 길이별 솔더접합부의 열피로 수명관계를 나타낸 것이다. 각각의 경우에 대해서 열피로 수명에 큰 차이를 보이지 않지만, 다이패드와 칩 길이가  $3698\mu\text{m}$ 로 일치할 때 열피로 수명이 상대적으로 길어진다. 이는 솔더접합부에 작용하는 잔류변형의 크기는 패키지 내부 응력장의 영향을 받으며 이 응력장은 온도 수명시험등과 같은 재질간의 열팽창률 차이에 의한 변화와 패키지 구성 재료의 기하학적 배치에 따라 변화하기 때문이며, 다이패드 길이와 칩 길이가 일치할 때 응력 집중이 상대적으로 감소된다.

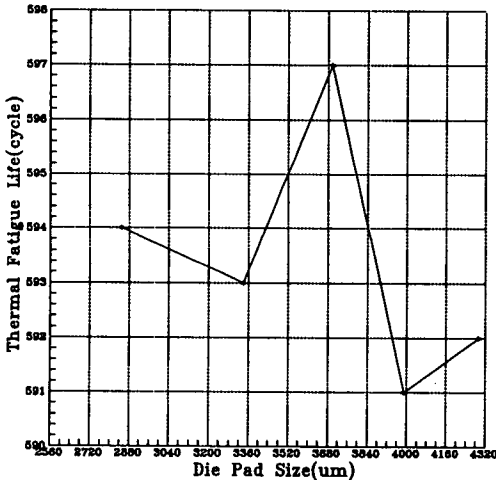


Fig. 6 Thermal fatigue life according to the die pad size

### 3.4 칩 두께에 따른 열피로 수명 해석

칩 두께가 솔더접합부의 열피로 수명에 미치는 영향을 파악하기 위해서  $300\mu\text{m}$ 의 칩 두께를  $80\mu\text{m}$ 까지 변화시켜 가면서 솔더접합부에 작용하는 최대 비탄성 변형을 계산하였다. Fig. 7은 칩 두께에 따른 솔더접합부의 열피로 수명 관계를 나타내었다. 칩 두께가 감소할수록 열피로 수명은 증가하는 경향을 나

타내었다. 이는 칩(열팽창계수:  $2.6\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ )이 차지하는 영역을 EMC(Epoxy Molding Compound, 열팽창계수:  $11\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ )가 대체하면서 패키지의 열팽창률을 증가시키고, PCB와의 열팽창률 차이를 줄임으로써 GTEM을 감소시키기 때문이다.

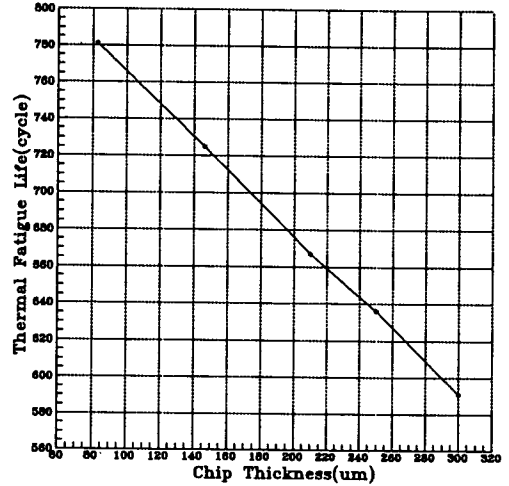


Fig. 7 Thermal fatigue life according to the chip thickness

### 3.5 다이패드 계면박리에 따른 열피로 수명 해석

반도체 패키지와 같이 여러 구성 재료로 이루어진 조립체는 상이한 물성을 지닌 주위의 다른 재료와 경계를 이루기 때문에 각 재료의 계면사이에는 미세 균열 및 초기 크랙등의 결함이 존재할 수 있다. 때문에 다이패드와 EMC 사이의 계면 박리가 솔더접합부의 열피로 수명에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다. 초기 결함은 일반적인 불량 모드인 다이측면은 완전 박리시키고 밑면은 다이패드 길이를 100%로 하여 박리 길이를 환산하였다. Fig. 8은 다이패드 박리정도에 따른 솔더접합부의 열피로 수명을 나타낸 것이다. 다이패드 박리가 진행되면서 열피로 수명이 감소하는 경향을 보이다가 박리정도가 45%인 지점을 넘어서면 다시 증가하는 경향을 나타낸다.

또한 다이패드가 완전박리인 경우의 열피로 수명(576사이클)이 완전착입인 경우의 열피로 수명(591사이클)에 비해 짧다. 이는 처음 박리가 진행

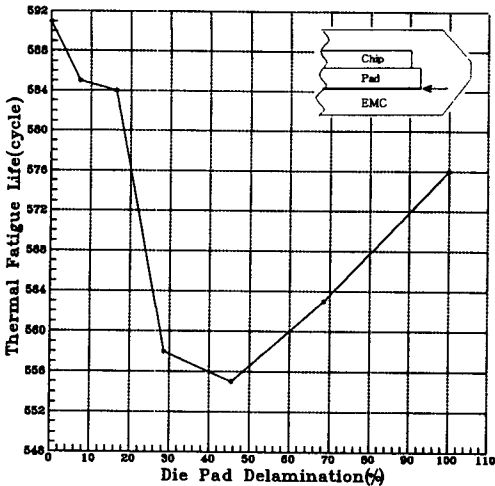


Fig. 8 Thermal fatigue life according to the die pad delamination

되면서 급격한 패키지의 형상 변화가 바깥 리드에 보다 큰 변위를 전달하지만 어느 지점을 넘어서면 내부 응력이 완화되고 패기지 형상변화도 완만해져서 바깥리드에 전달되는 변형량이 작아지기 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

솔더접합부는 패키지 몸체와 PCB를 전기적, 기계적으로 연결하는 접속 수단으로 패키지 내부 구성 재료들의 기하학적 형상과 적용에 따라 열피로 수명에 차이가 난다. 본 연구에서는 이러한 사실에 근거하여, 유한요소 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 패키지 구성 요소중 리드 재질을 Alloy42에서 구리합금으로 변경할 경우 약 4배의 열피로 수명이 연장된다는 것을 확인하였다.
- (2) 다이 패드 크기를 칩 크기와 동일하게 설계할 경우 다른 경우에 비해 열피로 수명이 증가한다.
- (3) 칩 두께를 감소시킬수록 열피로 수명은 증가한다.

(4) 다이패드와 EMC사이의 계면박리가 증가함에 따라 처음에는 열피로 수명이 감소하는 경향을 보이다가 다이 패드 길이의 45%를 기점으로 다시 증가한다.

#### 참 고 문 헌

1. N. Paydar, Y. Tong, and H. U. Akay : A Finite Element Study of Fatigue Life Prediction Methods for Thermally Loaded Solder Joints, *Advances in Electronic Packaging*, EEP-Vol. 4-2, (1993) pp. 1063-1070
2. M. Mukai and T. Kawakami : Elastic-Creep Thermal Stress Analyses for the SMT-PGA Package's Solder Joint, *Mechanics and Materials for Electronic Packaging*, Vol. 187, (1994) pp. 197-203
3. R. K. 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. E. P. Basso : Modeling Complex Inelastic Deformation Processes in IC Package's Solder Joints, *Transactions of the ASME*, Vol. 116, (1994) pp. 6-15
6. Engelmaier, W. : Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints during Power Cycling, *IEEE Transaction on components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 6, No. 3, (1993) pp. 232-237
7. PATRAN, User's Manual, MacNeal-Schwendler Corporation, (1997)
8. ABAQUS, User's Manual, Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc., (1997)