

BGA 형태 솔더 접합부의 피로 수명 예측에 관한 연구

김성걸⁺, 김주영⁺⁺

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 9. 11)

Study on the Prediction of Fatigue Life of BGA Typed Solder Joints

Kim, Seong Keol⁺ and Kim, Joo-Young⁺⁺

Abstract

Thermal fatigue life prediction for solder joints becomes the most critical issue in present microelectronic packaging industry. And lead-free solder is quickly becoming a reality in electronic manufacturing fields. This trend requires life prediction models for new solder alloy systems. This paper describes the life prediction models for SnAgCu and SnPb solder joints, based upon non-linear finite element analysis (FEA). In case of analyses of the SnAgCu solder joints, two kinds of shapes are used. As a result, it is found that the SnAgCu solder has longer fatigue life than the SnPb solder in temperature cycling analyses.

Key Words : Thermal fatigue life prediction, Microelectronic packaging, Lead-free solder, Solder joint, Finite element analysis

1. 서론

최근 전자제품의 수요급증과 함께 제품의 소형화, 고속화, 다기능화 추세에 따라 여러 기능을 수행하는 장치 및 시스템 간의 신속 정확한 정보전달에 기여하는 패키징(Packaging) 기술 개발의 중요성이 강조되고 있다⁽¹⁾. 패키징 기술 중, 플립 칩(Flip chip) 접합 기술은 칩과 기판의 패드사이에 솔더 범프를 위치시켜 연결을 이루는 기술로서, IC 패키징에 있어서 가장 발전된 기술로 인정받고 있다⁽²⁾. 이에 따라 플립 칩 접합 기술에 대한 연구 및 개발의 중요성이 증대되고 있고,

최근에는 플립 칩 접합 방식에서 솔더 접합부가 미세화 됨에 따라 물리적, 열 피로에 민감해짐으로써 솔더 접합부의 수명 예측은 신뢰성을 평가하는 중요한 연구로 평가되고 있다. 또한 솔더 접합부의 신뢰성이 중요한 연구과제로 대두됨과 더불어 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 전 세계적으로 납의 사용이 점차적으로 규제되고 있다^(3,4). 특히, 플립 칩 접합에 사용되는 납이 포함된 솔더를 대체하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있고, 이미 일본을 포함한 다른 선진국에서는 수년 전부터 단계적으로 무연 솔더에 대한 연구 수행 및 사용을 확대하고 있다.

⁺ 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (rhett@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

⁺⁺ 서울산업대학교 에너지 환경 대학원 나노 아יתי 공학과

국내에서도 무연 솔더 사용이 점차 늘어나고 있지만, 유·무연 솔더를 사용했을 때, 신뢰성의 변화에 대한 체계적인 연구는 아직 선진국에 미치지 못하는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 유·무연으로 구성된 솔더 접합부를 모델링하고, 특히 무연 솔더 접합부에서는 동일한 부피의 솔더 범프를 두 가지 모양으로 모델링하여 각각의 모델링에 대해 유한요소해석 상용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 일차적으로 일정 주기의 열 정속을 가해 수렴한 열 변형률을 계산한 후, 각 모델에 대해 수명예측 식을 적용하여 그 결과를 비교 및 분석하고자 한다.

2. 솔더 접합부의 모델링

2.1 유한요소 모델링을 위한 형상 및 물성치 선정

본 해석에 사용된 솔더 접합부의 형상은 Fig. 1과 같으며, 각 부분은 BT, FR4, 솔더 합금(Solder alloy), 그리고 두 개의 구리 패드(Copper pad)로 구성되어 있다. 특히, 솔더 범프의 경우에는 현재 가장 많이 사용되고 있는 형상인 볼록형(Convex)과 본 연구에서 주기적 열 정속에 대한 개선형으로 제시한 오목형(Concave)으로 나누어 모델링을 하였다. 각 형상에 대한 치수는 Table 1에 제시하였다.

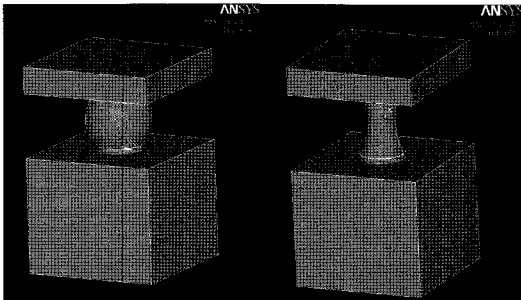


Fig. 1 Schematic drawing of solder joints

Table 1 Dimensions of the geometry(mm)

Material	Length	Width	Thickness	Diameter
BT	0.810	0.810	0.150	None
FR4	0.810	0.810	0.653	None
Copper pad	None	None	0.027	0.270
Solder joint (Convex)	None	None	0.250	0.418
Solder joint (Concave)	None	None	0.375	0.225

또한, Table 2에서 솔더 접합부의 각 구성요소에 대한 물성치, 즉, 탄성계수, 포아송비, 그리고 열팽창계수를 나타내었다^(5,6). 여기서 Sn95.5-Ag4-Cu0.5 무연 솔더의 탄성계수는 Table 3에 주어진 것처럼 열 정속 해석에서 온도에 따라서 다른 값을 적용하였다.

2.2 열 정속(Thermal Cycle) 해석을 위한 조건

열 정속 유한요소해석의 목적은 소성 일 밀도(Plastic work density)를 알아내는데 있다. 본 연구에서는 해석을 위해 유한요소해석 상용 프로그램인 ANSYS 10.0에서 Newton-Rapson법을 적용하였으며, 사용된 요소는 솔더 범프의 경우 VISCO107을, 다른 재료들은 SOLID45를 채택하였다⁽⁷⁾. 해석의 경계조건으로는 모든 방향의 직선변위가 0인($U_x=0, U_y=0, U_z=0$) 질점을 각각 축의 방향에 대하여 고정시켰다. 해석에 적용된 온도 변화 조건으로, Table 4에 제시된 것과 같이 125°C~55°C의 온도 분포와 구간은 크게 네 부분으로 처음 15분 동안의 125°C~55°C 온도 하강(Ramp down)구간, 두 번째 15분 동안은 -55°C 저온 유지(Dwell low)구간, 세 번째 15분 동안은 -55°C~125°C 온도 상승(Ramp up)구간, 마지막 15분 동안은 125°C 고온 유지(Dwell high)구간으로 구성하였다. Fig. 2에서는 시간-온도변화 조건을 그래프로 나타내었다.

플립칩 공정 패키지의 수명예측 연구에서, 열 피로 파괴현

Table 2 Material Properties used in the model

Material	E(GPa)	Poisson ratio	CTE (ppm/°C)
BT	26	0.11	15
FR4	22	0.11	18
Copper pad	120	0.34	17
Solder alloy (Sn95.5Ag4Cu0.5)	Temperature dependent	0.34	22.5
Solder alloy (63Sn37Pb)	35	0.34	25.5

Table 3 Young's modulus of solder alloy

Temperature(K)	E(GPa)
223	57.32
273	54.21
298	52.00
398	45.84

상은 솔더 접합부에서의 크립(Creep)변형과 연관되어 있다. 특히 열 정속 유한요소해석에서 적용된 Anand 모델은 수명 예측 연구와 관련되어 널리 사용되어 왔는데, 이 모델은 식 (1) ~ (4)와 같이 유동 방정식(Flow equation)과 3개의 열 방산 방정식(Evolution equation)으로 나눌 수 있다⁽⁸⁾.

유동 방정식(Flow equation)

$$\frac{d\epsilon_p}{dt} = A[\sinh(\zeta\sigma/s)]^{1/m} \exp\left(\frac{-Q}{kT}\right) \quad (1)$$

열 방산 방정식(Evolution equation)

$$\frac{ds}{dt} = \left\{ h_0 \left(\frac{B}{|B|} \right)^a \frac{B}{|B|} \right\} \frac{d\epsilon_p}{dt} \quad (2)$$

$$B = 1 - \frac{s_0}{s} \quad (3)$$

$$s^* = s \left[\frac{d\epsilon_p/dt}{A} \right] \exp\left(\frac{Q}{kT}\right)^n \quad (4)$$

여기서, 식 (1)-(4)에서 사용된 Anand 상수는 Darveaux 에 의해 소개되었으며, 그동안 많은 크립(Creep) 모델이 제

안되었지만, Anand 모델을 적용한 Darveaux의 방법은 여전히 많은 연구자들과 엔지니어들에게서 채택되고 사용됨으로, 본 연구에서도 Darveaux에 의해 소개된 Anand 상수를 사용하였다. Table 5는 Anand 모델에 사용되는 다양한 상수들의 의미와 값을 나타내고 있다.

2.3 열 정속 유한요소 해석의 결과

Anand 모델을 적용한 열 정속 유한요소해석은 세 가지로 나누어 수행하였다. 첫째, 블록형 무연 솔더 접합부에 대한 해석, 둘째, 블록형 유연 솔더 접합부에 대한 해석, 그리고 마지막으로, 오목형 무연 솔더 접합부에 대한 해석을 수행하였다. 각 해석에 대한 결과는 Fig. 3~5에 나타내었다.

Fig. 3~5의 결과에서 알 수 있듯이, 열 사이클(-55℃~125℃)조건에 대한 해석의 결과에서 제시된 점소성 일 밀도의 분포는, 블록형의 경우 무연 솔더(Sn95.5-Ag4-Cu0.5)와, 유

Table 4 Thermal cycle profile

Low temperature (°C)	-55
High temperature (°C)	125
Ramp down time (sec)	900
Dwell low time (sec)	900
Ramp up time (sec)	900
Dwell high time (sec)	900

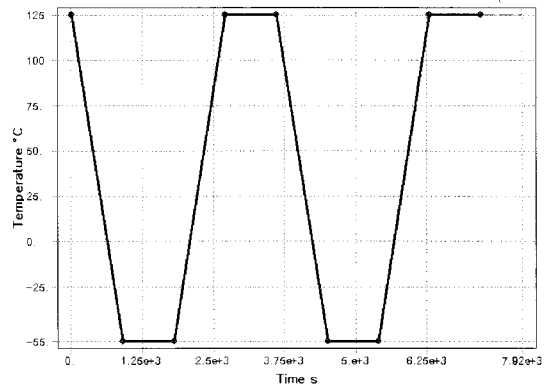
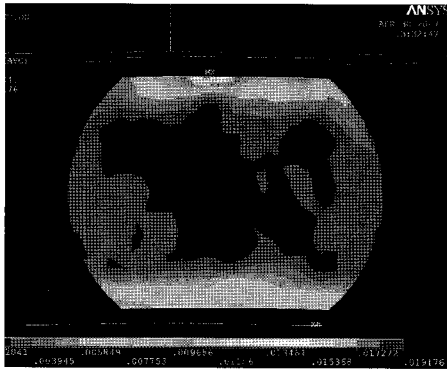


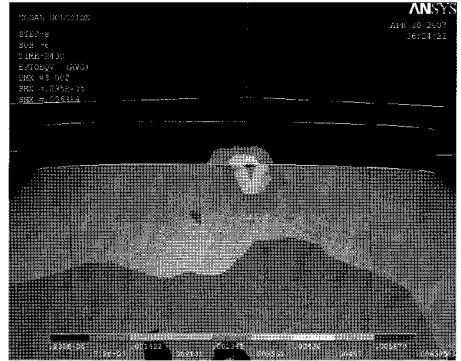
Fig. 2 Thermal cycling

Table 5 Anand's constants for solder ball alloy

Constant	Parameter	Sn95.5 Ag4 Cu0.5	63Sn 37Pb	Meaning
C ₁	S ₀ (MPa)	1.0	12.41	Initial value of deformation resistance
C ₂	Q/R(1/K)	8400	9400	Activation Energy/Boltzmann's constant
C ₃	A(1/sec)	4.61E6	4.0E6	Pre-Exponential Factor
C ₄	ζ	0.038	1.5	Multiplier of stress
C ₅	m	0.162	0.303	Strain Rate sensitivity of stress
C ₆	h ₀ (MPa)	3090	1378.95	Hardening Constant
C ₇	s [^] (MPa)	1.04	13.79	Coefficient of deformation resistance saturation value
C ₈	n	4.6E-3	0.07	Strain Rate sensitivity of saturation value
C ₉	a	1.56	1.3	Strain Rate sensitivity of hardening



(a)

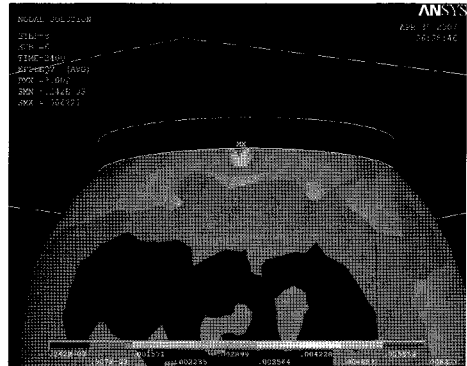


(b)

Fig. 3 Contour plots of convex typed solder joints (Sn95.5-Ag4-Cu0.5)



(a)



(b)

Fig. 4 Contour plots of convex typed solder joints (63Sn-37Pb)



(a)



(b)

Fig. 5. Contour plots of concave typed solder joints (Sn95.5-Ag4-Cu0.5)

연 솔더(63Sn-37Pb) 모두 솔더 범프와 구리 패드와의 접합 부분에서 높게 나타났다. 이러한 원인은 첫째, 솔더 접합부를 구성하고 있는 물질들이 서로 상이한 열팽창 계수를 갖고 있으며, 둘째, 열 정속 해석에서 온도의 상승과 하강의 반복으로 인해 비회복성 변형이 일어났고, 셋째, 솔더 접합부에 변형률이 집중되기 때문이다. 이 때, 집중되는 변형률로 인해 솔더 범프와 구리 패드 사이에서 균열이 발생하고 진전될 것을 예상할 수 있다. 반면에, Fig. 5의 오목형의 경우는 볼록형과는 다르게 점소성 일 밀도의 분포가 범프의 중간(Neck) 지점에서 높게 나타났다. 이는 오목형의 중간부분에서 최대 응력이 발생됨을 의미하며, 이 부분에서 균열이 시작됨을 예측할 수 있다.

3. 솔더 접합부의 수명 예측

3.1 수명 예측 기법

Darveaux가 제안한 모델에서 총 파괴 수명은 초기 균열 및 균열의 진전과 관련이 깊다. 초기 균열이 일어나는 시점에서의 사이클 수(N_0)는 식 (5)를 통해 계산할 수 있다⁽⁹⁾.

$$N_0 = K_1 \Delta W_{ave}^{K_2} \quad (5)$$

여기서 ΔW 는 매 사이클마다 축적되는 점소성 일 밀도 값을 나타내고, 이는 식 (6)을 통해 계산되어 진다.

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum \Delta W \cdot V}{\sum V} \quad (6)$$

또한, 여기서 $\sum V$ 는 요소의 부피 합계를 의미한다. 유사한 형태의 식 (7)은 매 사이클 마다 발생하는 균열의 진전을 계산할 때 사용된다.

$$\frac{da}{dN} = K_3 \Delta W_{ave}^{K_4} \quad (7)$$

식 (5)와 (7)에 사용된 상수 $K_1 \sim K_4$ 는 균열의 진전과 관련된 상수 값이며, 본 연구에서는 Darveaux가 제안한 상수 값을 사용하였고, Table 6에 그 값을 제시하였다⁽¹⁰⁾.

총 파괴 수명(N_f)는 식 (8)에 의해 구해진다.

$$N_f = N_0 + \frac{a}{da/dN} \quad (8)$$

이 식에서 a 는 파괴전 발생될 총 균열의 길이로, 솔더 접합부에서는 솔더 범프가 접합된 표면의 지름으로 정의할 수 있다.

Table 6 Darveaux ($K_1 \sim K_4$) crack growth correlation constants

Constant	Value
K_1	22400(cycle/psi)
K_2	-1.52
K_3	5.86E-7(in/cycle/psi)
K_4	0.98

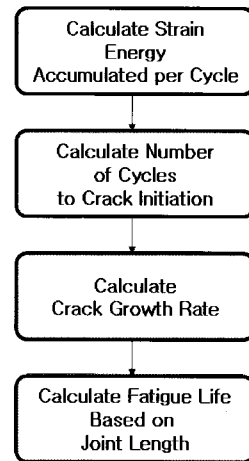


Fig. 6 Algorithm for analysis of fatigue life prediction

3.2 수명 예측 해석

열 사이클 조건(-55°C~125°C)에 대한 해석을 수행한 후 획득한 점소성 일 밀도 ΔW 값과 Darveaux가 제안한 모델에서의 파괴수명 예측 식을 사용하여, Fig. 6과 같은 순서로 솔더 접합부의 수명을 예측하였다.

제시된 알고리즘을 토대로 계산된 결과 값은 Table 7에 나타내었다.

점소성 일 밀도 ΔW 값은 볼록형 및 오목형 두 가지 형상 모두, Sn95.5-Ag4-Cu0.5의 솔더 범프일 경우가 63Sn-37Pb 보다 상대적으로 작은 수치를 보였다. 그리고 ΔW 값을 가지고 총 파괴 수명(N_f)을 예측하였을 때, 무연 솔더의 경우가 유연 솔더에 비해 약 1.1배 정도 높은 파괴 수명을 나타냈다. 또한 Sn95.5-Ag4-Cu0.5의 같은 재질로 구성된 볼록형 및 오목형 솔더 범프의 형상 변화에 따른 수명을 비교해 보면, 오목형이 볼록형에 비해 파괴 수명(N_f)값이 약 1.3배 더 증가한 것을 알 수 있었다. 따라서, 볼록형의 솔더 범프보다 오목형의 솔더 범프를 사용하였을 때, 보다 향상된 신뢰성의 결과가 나올 것으로 사료된다.

Table 7 The results of analyses of fatigue life prediction

	Sn95.5 Ag4 Cu0.5	63Sn 37Pb	Sn95.5-Ag4-Cu0.5
	Convex		Concave
ΔW_{ave} (psi)	52.97	58.78	40.77
N_0 (cycle)	53	46	80
da/dN (in/cycle)	0.286E-4	0.317E-4	0.221E-4
a (in)	0.0106	0.0106	0.0106
$a/(da/dN)$ (cycle)	371	334	478
N_f	424	380	558

4. 결론

무연 재료인 Sn95.5-Ag4-Cu0.5와 유연 재료인 63Sn-37Pb 솔더의 재질 및 형상에 따른 솔더 접합부의 수명예측에 관한 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Sn95.5-Ag4-Cu0.5의 무연 솔더 및 63Sn-37Pb의 유연 솔더를 사용하여 열 정속 유한요소 해석을 수행한 결과, 유·무연 솔더 모두 볼록형의 경우 솔더범프와 구리 패드와의 접합부분에서 점소성 일 밀도가 높게 나타났다. 반면에, 오목형의 경우는 솔더 범프의 중간지점에서 그 분포가 높게 나타났다.
- (2) 동일한 솔더범프 형상(볼록형)에 따른 솔더 접합부의 수명을 예측하였을 때, Sn95.5-Ag4-Cu0.5의 무연 솔더 범프의 경우가 63Sn-37Pb의 유연 솔더범프 보다 상대적으로 높은 수명 값을 보였다. 이를 통해 Sn95.5-Ag4-Cu0.5가 기존의 63Sn-37Pb보다 신뢰성이 다소 우수하다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 동일한 Sn95.5-Ag4-Cu0.5에서 솔더범프의 형상을 달리하여 해석을 수행한 결과, 오목형의 경우가 볼록형의 경우보다 더 큰 수명 값을 나타냈다.

후 기

본 논문은 서울특별시 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원사업(3D Microsystem Packaging을 위한 접합 공정 및 장비개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참 고 문 헌

(1) Kim, J. W., Kim, D. G., and Jung, S. B. 2006,

“Evaluation of Thermo-mechanical Reliability of Flip Chip Solder Joints (II) : II. Pb-free Solder,” *The Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 44, No. 8, pp. 587~594.

(2) Kim, J. W., Kim, D. G., Ha, S. S., Moon, W. C., Yoo, C. S., Moon, J. H., and Jung, S. B., 2006, “Evaluation of Thermo-mechanical Reliability of Flip Chip Solder Joints (I) : I . Pb-bearing Solder,” *The Korean Institute of Metals and Materials*, Vol. 44, No. 8, pp. 581~586.

(3) Ha, B. Y., Lee, J. H., Shin, Y. E., Jung, J. P., and Han, H. J., 2000, “Reliability of Fine Pitch Solder Joint with Sn-3.5wt%Ag Lead-Free Solder,” *The Korean Welding and Joining Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 350~357.

(4) Shin, K. H., Kim, H. T., and Jang, D. Y., 2007, “An Analysis on the Thermal Shock Characteristics of Pb-free Solder Joints and UBM in Flip Chip Packages,” *Proceedings of The KSMTE Spring Conference 2007*, pp. 22~27.

(5) Guedon-Gracia, A., Woïrgard, E., and Zardini, C., 2005, “Correlation between Experimental Results and FE Simulations to Evaluate Lead-Free BGA Assembly Reliability,” *Microelectronics Reliability*, Vol. 45, pp. 1652~1657.

(6) Gonzalez, M., Vandeveldel, B. Vanfleteren, J., and Manassis, D., 2005, “Thermo-Mechanical FEM Analysis of Lead Free and Lead Containing Solder for Flip Chip Applications,” *EMPC*, pp. 440~445.

(7) Darveaux, R., Islam, M. N., Singh, N., and Suhling, J. C., 2004, “Model for BGA and CSP Reliability

- in Automotive Underhood Application,” *IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies*, Vol. 27, No. 3, pp. 585~593.
- (8) Ng, H. S., Tee, T. Y., Goh, K. Y., Luan, J., Reinikainen, T., Hussa, E., and Kujala, A., 2005, “Absolute and Relative Fatigue Life Prediction Methodology for Virtual Qualification and Design Enhancement of Lead-free BGA,” *IEEE Electronic Components and Technology Conf.*, pp. 1282~1291.
- (9) Zhang, L., Sitaraman, R., Patwardhan, V., Nguyen, L., and Kelkar, N., 2003, “Solder Joint Reliability Model with Modified Darveaux’s Equations for the micro SMD Wafer Level-Chip Scale Package Family,” *IEEE Electronic Components and Technology Conf.*, pp. 572~577.
- (10) Darveaux, R., 2000, “Effect of simulation methodology on solder joint crack growth correlation,” *Proc. 50th ECTC*, pp. 1048~1063.