

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.1.43

SnPb 솔더에 대한 유한요소모델의 크리프 특성 검증

한창운*† · 박노창* · 오철민* · 홍원식* · 송병석*

* 전자부품연구원

Creep Characteristics Verification of FE Model for SnPb Solder

Changwoon Han*†, Nohchang Park*, Chulmin Oh*, Wonsik Hong* and Byeongsuk Song*

* Korea Electronics Technology Institute

(Received August 13, 2009 ; Revised November 28, 2009 ; Accepted November 30, 2009)

Key Words: FE Model Verification(유한요소모델 검증), Creep(크리프), SnPb, Solder(솔더)

초록: 본 논문에서는 네트워크 서버용 컴퓨터 주기판 내 장착된 열방열 시스템 지지구조물에 대한 유한요소 모델의 솔더 크리프 특성을 검증하였다. 열방열 시스템은 앵커 구조물로 지지되며 앵커 구조물은 솔더를 이용하여 인쇄회로기판에 장착된다. 컴퓨터 내 발생하는 지속적인 고온환경 하에서 솔더의 크리핑이 발생하고 이는 궁극적으로 지지구조물의 파괴로 이어진다. 유한요소모델은 솔더에 발생하는 응력분석과 수명예측을 위해 사용되며, 솔더 크리프 특성을 모사하기 위하여 Anand 크리프 모델을 적용하였다. 모델을 검증하고 교정하기 위하여 크리프 시험을 수행하였다. 시험은 인쇄회로기판의 변형을 제외한 솔더 변형만을 측정하기 위하여 특별한 지그를 설계하여 수행하였다. 크리프 시험결과를 유한요소해석결과와 비교하여 Anand 크리프 모델을 검증하고 교정을 수행하였다. 교정된 유한요소모델을 이용하여 열방열 시스템 구조물의 보다 정확한 수명예측을 수행할 수 있다.

Abstract: The heat sink system for a main board in a network server computer is built on printed circuit board by an anchor structure, mounted by eutectic SnPb solder. The solder creeping is caused by a constant high temperature condition in the computer and it eventually makes fatal failures. The FE model is used to calculate the stress and predict the life of soldered anchor in the computer. In the model, Anand constitutive equation is employed to simulate creep characteristics of solder. The creep test is conducted to verify and calibrate the solder model. A special jig is designed to mitigate the flexure of printed circuit board and to get the creep deformation of solder only in the test. Test results are compared with analysis and calibration is conducted on Anand model's constants. Precise life prediction of soldered anchor in creep condition can be performed by this model

- 기호설명 -

- ϵ_p : 소성변형률
- s_0 : 변형저항 초기값
- Q : 활성화에너지
- R : 기체상수
- A : 선지수계수
- α : 응력배율계수
- m : 응력에 대한 변형률 민감도
- h_0 : 경화/연화 상수
- \hat{s} : 변형저항 포화값 상수
- n : 포화에 대한 변형률 민감도
- a : 경화/연화에 대한 변형률 민감도

1. 서론

제품의 수명 및 신뢰성은 인증 시험을 통해서 보증된다. 그러나 신뢰성 인증을 위한 시험은 오랜 기간과 많은 비용이 소요되고 점점 짧아지는 제품개발기간 내에 시험을 수행하기가 어려워진다. 따라서 빠른 시간 내에 제품의 신뢰성을 인증할 수 있는 가속수명시험의 필요성이 날로 증가하고 있다.⁽¹⁾ 가속수명시험은 신상품의 개발기간 중 짧은 시간에 고장데이터를 얻어 수명을 예측하거나 신뢰성의 목표수명시간을 달성하려고 할 때 사용하는 방법으로, 가속계수(=목표수명시간/가속수명시험시간) 만큼 시험시간을 단축할 수 있으므로 신뢰성 시험에서 최강의 도구라 할 수 있다.

† Corresponding Author. cw_han@keti.re.kr

가속수명시험을 수행하기 위해서는 외부하중에 대하여 구조물의 고장 메커니즘을 모사해 줄 수 있고 또한 그로부터 수명을 예측할 수 있는 “가속수명모델”이 필요하다. 이때 구조물에 외부로부터 하중이 주어졌을 때 그 구조물의 수명을 결정짓는 변수를 선택하고 그 변수의 분포를 해석하는 과정이 필수적으로 수반되는데, 크리프의 경우에는 구조물에 가해지는 작용 응력이 크리프 한도를 결정한다.⁽²⁾ 따라서 크리프에 의해 발생하는 크리프 변형 및 크리프 강도의 해석은 고온환경에서의 기기와 부품의 수명을 예측하는데 매우 중요한 요소이다.

전자부품의 실장에 사용되는 솔더는 용점이 상대적으로 낮고 기계적 변형이 온도와 변형률 속도에 민감하게 작용하는 재료의 복잡한 거동으로 인하여 크리프에 대한 유한요소모델을 정확히 구현하기가 쉽지 않다. 솔더의 내부 구조가 사용 환경에 따라 민감하게 변형하면서 변형경화와 바우싱거 효과 등이 발생한다. 따라서 이런 모든 물리적 현상들을 수학적 모델로 재현하기가 쉽지 않다. 솔더에 대한 수명연구는 오래전부터 많이 진행되어 왔으나, 주로 온도사이클로 의한 열 피로파괴에 대한 수명모델개발이나 메커니즘 분석으로 진행되어 왔고^(3,4) 일정온도와 하중에서의 크리프에 의한 수명모델에 대한 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 솔더의 크리프 한도를 예측하기 위하여 유한요소모델을 구성하고 그 모델의 크리프 변형 특성을 실험값으로 검증한다.

2. 크리프 특성 모델링

2.1 유한요소 모델링

서버용 컴퓨터 내 주기판(main board)상에 실장된 IC 패키지의 방열을 위해 장착된 방열판과 그 방열판의 고정을 위해 설계된 앵커 시스템의 구조개요를 Fig. 1에 제시하였다. 인쇄기판(PCB)에 유연공정솔더로 실장된 앵커가 방열판과 스프링 구조물로 연결되어 있어서 앵커에 지속적인 하중이 가해지는 구조이다. 앵커는 Fig. 2에 제시된 바와 같이 정사각형 단면을 갖고 PCB의 원통형 홀에 솔더로 실장 되어 있다. 이 구조물에 일정온도와 인장하중이 작용할 때 발생하는 응력분포를 분석하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 개발된 유한요소모델은

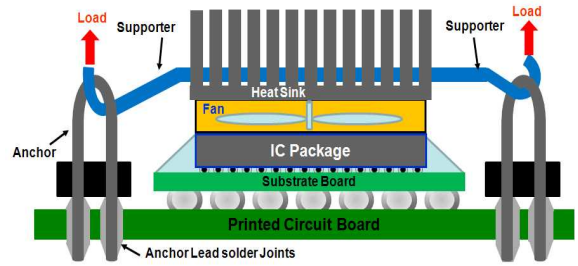


Fig. 1 Schematic diagram of anchor system

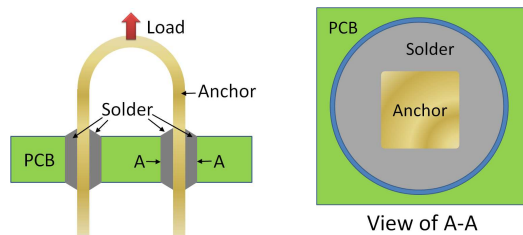


Fig. 2 Cross section of anchor structure

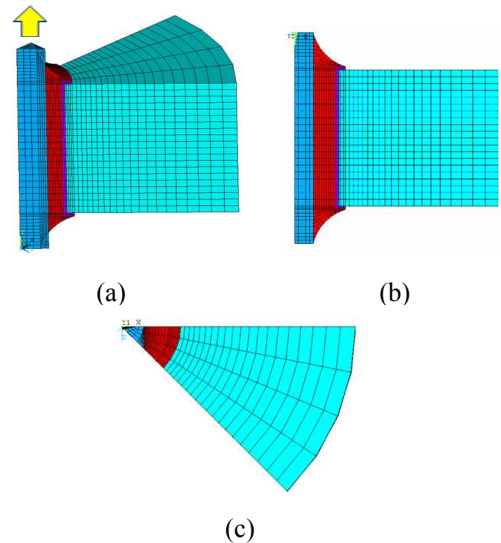


Fig. 3 FE model of anchor system (a) isotropic view, (b) front view, and (c) top view

Fig. 3에서 볼 수 있다.

유한요소모델은 구조물의 형상과 하중의 대칭성을 이용하여 축방향으로 1/8 모델링 되었으며 사용된 총 요소 수는 4,648개이다. 요소수는 수렴성 검증 후에 최종 결정하였다. Fig. 3에서 적색으로 표현된 요소가 솔더에 해당한다. 파랑색과 녹색은 각각 앵커와 PCB에 해당한다. 사용된 요소 종류는 ANSYS의 3D 구조요소인 “185” 요소와 솔더부분 모델링을 위해 3D 점소성 요소인 “107” 요소가 사용되었다. 모델의 경계조건은 1/8

Table 1 Material properties for FE modelling

Materials Properties	Brass ⁽⁵⁾	Copper ⁽⁵⁾	PCB ⁽⁶⁻¹¹⁾	
			In-plane	Out-of Plane
Young's Moduls (MPa)	102,000	112,000	17,000	7,300
Shear Moduls (MPa)	-	-	6,640	6,640
Poisson's Ratio	0.343	0.321	0.28	0.28
CTE (ppm/°C)	20.4	18.3	16	62

모델의 양 측면이 대칭조건으로 모델링 되었으며 앵커 맨 끝단이 앵커 길이방향으로 구속되며 앵커 상단에 하중을 압력으로 적용하였다.

구조물에 사용된 솔더를 제외한 부품으로는 황동으로 제작된 앵커와 PCB와 구리도금이 있다. 황동과 구리는 등방성 재료이고, PCB는 횡등방성(transverse isotropic) 재료로 모델링하였다. PCB 물성치의 경우 참고문헌⁽⁶⁻¹¹⁾의 값을 조사분석한 후 평균값을 사용하였다.

2.2 솔더 구성방정식

솔더의 구성방정식은 크게 두 가지로 접근 방법으로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법으로는 솔더의 탄성, 소성, 점소성의 특성을 구분하여 정의하는 구분 구성방정식 모델(partitioned constitutive equation model)이 있고, 두 번째 방법으로는 각각의 특성을 하나의 방정식으로 표현하는 통합 구성방정식 모델(unified constitutive equation model)이 있다.

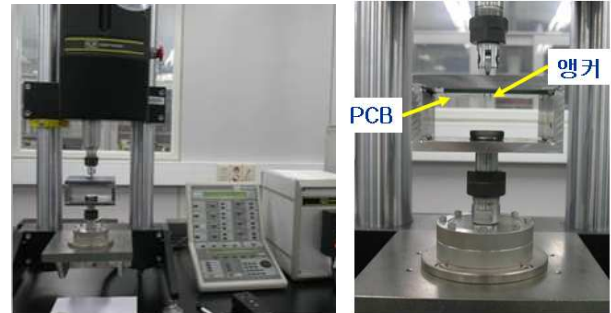
이 중 통합 구성 방정식은 처음 Anand⁽¹²⁾에 의해 제시되어 일반적으로 Anand 모델로 불리어 진다. Anand 모델은 식 (1)과 같이 속도에 독립적인 소성 변형과 속도에 종속적인 점성 변형이 하나의 속도에 종속적인 비선형 변형으로 표현된다.

$$\frac{d\varepsilon_p}{dt} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \left[\sinh\left(\alpha \frac{\sigma}{s}\right)\right]^m \quad (1)$$

여기서 ε_p 는 소성 변형률, A , α , Q , R , T , m 은 물성치 변수이고 σ 는 작용하는 등가 응력이다. s 는 응력과 같은 차원을 갖는 내부 스칼라 변수로써 변형저항으로 불리며 진화방정식으로 정

Table 2 Anand model constants for SnPb solder

Variables	Sn36Pb2Ag ⁽¹⁵⁾	Sn37Pb ⁽¹⁷⁾
	(Darveaux 2000)	(A. Yeo 2006)
1 s_0 (MPa)	12.41	37.9
2 Q/R (1/K)	9,400	5,797
3 A (1/s)	4,000,000	26
4 α	1.5	10
5 m	0.303	0.256
6 h_0 (MPa)	1,379	92,148
7 \hat{s} (MPa)	13.79	83.12
8 n	0.07	0.043
9 a	1.3	1.24

**Fig. 4** Creep test equipment and its jig

의된다.⁽¹²⁾

Anand 모델은 솔더의 구성방정식을 표현하기 위해 꾸준히 사용되어 왔다.⁽¹³⁻¹⁶⁾ Table 2에 솔더에 대한 Anand 모델 구성방정식 물성치의 대표적 예가 표시되어 있다. Table 2에서 Darveaux⁽¹⁵⁾의 데이터는 정확한 공정솔더는 아니지만 오래전부터 유연공정솔더에 대해서 대표적으로 사용된 물성치 데이터이고, Yeo⁽¹⁷⁾의 데이터는 비교적 최신 데이터지만 정확한 공정유연솔더에 대하여 측정한 물성치이다.

3. 크리프 특성 검증

3.1 크리프 시험 설계 및 수행

만들어진 유한요소모델이 앵커 크리프 현상을 정확히 재현하는 지에 대한 검증을 위해서 실제

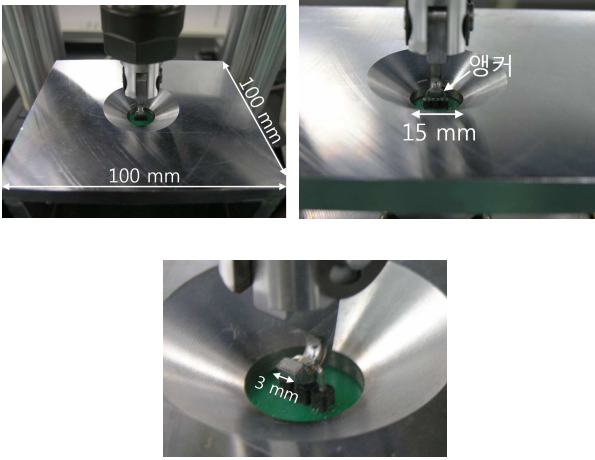


Fig. 5 Creep test specimen installation

앵커시편에 대해서 크리프시험을 수행하였다. 앵커 크리프시험에서 측정된 변형량과 유한요소모델에서 예측되는 변형량을 비교하여 두 데이터 간 불일치성을 확인하고 두 데이터 간에 발생하는 차이를 보상하기 위하여 유한요소모델의 물성치를 교정하였다.

크리프시험은 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 변위분해능 1 μm를 갖는 인장시험기(모델명: Instron 858)를 이용해 상온 조건에서 실제조건을 고려하여 80N의 하중을 총 1,000시간동안 시험편에 일정하게 인가하였고 데이터 수집 장비를 사용하여 10분마다 슬더가 변형되는 길이를 측정하였다.

크리프시험 시 PCB의 변형률을 최소화하고 순수히 슬더의 크리프 변형량만을 측정하기 위해서 Fig. 5와 같은 지그를 제작하였다. 100x100mm² 넓이의 지그의 중심부분에 15mm의 원형 구멍을 만들어서 그곳으로 앵커가 나올 수 있도록 설계하였다. 앵커를 당겨주는 갈고리 모양의 지그는 곡률반경 4mm, 두께 3mm로 제작하였다.

Fig. 6에 총 1,000시간 동안의 시험을 통해 앵커에 발생된 크리프 변형량을 시간에 대한 함수로 표시하였다. 크리프변형은 초반 약 100시간 정도까지 천이영역(transient region)까지는 급격히 증가하다가 그 이후부터는 변형이 일정한 비율로 증가하는 전형적인 2차 크리프영역(steady-state region)의 특성을 보인다. 파단 전 200시간 정도에서는 변형의 증가 속도가 2차영역보다 약간 빨라지면서 3차영역(tertiary region)의 특성을 보인다. 유한요소모델의 크리프특성 중 가장 중요한 특성은 크리프의 대부분 시간을 점유하는 정상영역상

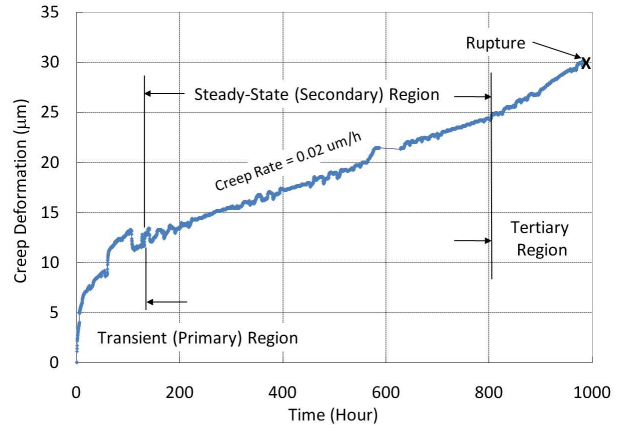


Fig. 6 Creep test results

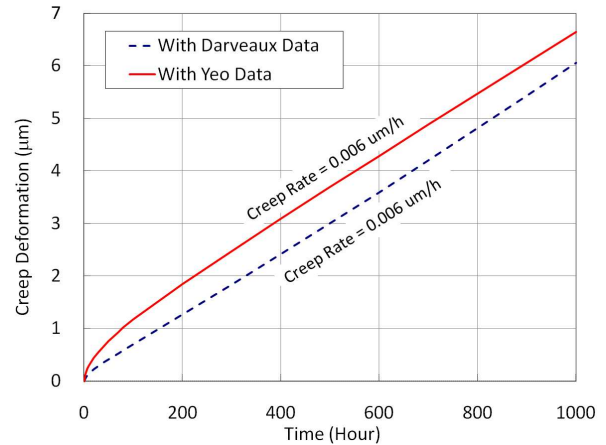


Fig. 7 Creep simulation results by FE model

태인 2차영역으로, 실험데이터로부터 계산된 2차영역 크리프변형속도는 0.02 μm/h이다.

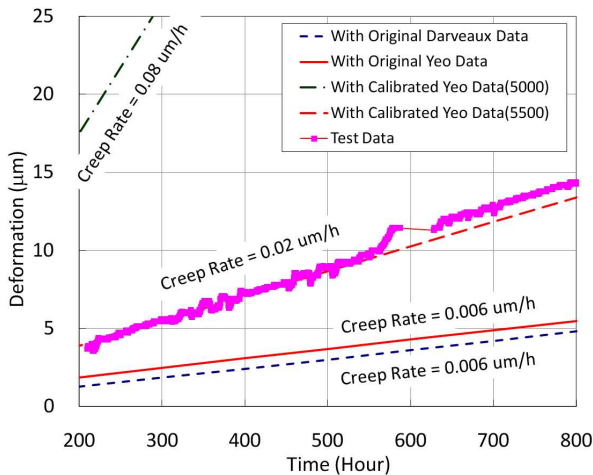
3.2 크리프 특성 검증 및 교정

개발된 유한요소모델로부터 계산된 앵커의 크리프 변형량을 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 "With Darveaux Data"와 "With Yeo Data"로 명기된 범례는 각각 Table 2의 Darveaux⁽¹⁵⁾와 Yeo⁽¹⁷⁾의 슬더 물성치를 이용하여 분석한 앵커의 크리프 변형 데이터임을 의미한다. Darveaux 데이터로 계산된 크리프변형은 크리프의 천이영역(transient region)이 거의 나타나지 않는다. 두 데이터의 크리프변형속도는 모두 0.006 μm/h로 실제 시험결과와 크리프변형속도(0.02 μm/h)와는 많은 차이를 보인다.

유한요소모델의 크리프변형속도를 시험데이터와 일치하게 교정하기 위하여 슬더의 물성치를

Table 3 Simulated creep rates depending on material properties and comparison with test data

Q/R (1/K)	Creep Rate ($\mu\text{m/h}$)
5,797	0.006
5,500	0.02
5,000	0.08
Test Data	0.02

**Fig. 8** Comparison of test data and calibrated simulation results

수정하였다. Anand 솔더 물성치 모델에서 크리프 변형속도에 가장 밀접한 관계를 갖는 상수는 크리프의 확산속도와 관계된 Q/R(Table 2 참조)이다. 여기서 Q는 활성화에너지를 의미하고 R은 기체상수이다.

천이영역(transient region)을 나타낼 수 있는 Yeo의 데이터를 기준으로 Anand 솔더 물성치에서 Q/R을 5,000(1/K)과 5,500(1/K)으로 교정하였다. 예상한 바와 같이 앵커의 크리프변형량은 Q/R의 변화에 민감하게 변화한다. Table 3과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 Q/R 값이 5,000 (1/K)일 경우 크리프변형속도는 0.08($\mu\text{m/h}$)로 크게 증가하며, 5,500(1/K)일 경우에 0.02($\mu\text{m/h}$)로 교정되어 시험데이터의 크리프변형속도와 거의 일치하게 된다.

4. 결론

SnPb 솔더에 대한 유한요소모델의 크리프특성을 검증하였다. 이 솔더는 고온이 지속적으로 유지되는 환경에서 사용되는 컴퓨터내 주보드의 방

열판을 고정하는 앵커의 실장을 위해서 사용된다. 유한요소모델에서 솔더의 특성은 Anand 통합 구성 방정식을 이용하여 모델링하였고 물성치로는 Darveaux⁽¹⁵⁾와 Yeo⁽¹⁷⁾의 데이터를 사용하였다.

개발된 유한요소모델이 실제 크리프 현상을 정확히 재현하는 지에 대한 검증을 위해서 앵커시편에 대해서 크리프시험을 수행하였다. 앵커 크리프시험에서 분석된 크리프속도(0.02 $\mu\text{m/h}$)와 유한요소모델에서 예측되는 크리프속도(0.006 $\mu\text{m/h}$)가 일치하지 않음을 확인하고 두 데이터간에 발생하는 차이를 보상하기 위하여 유한요소모델의 물성치 중 Q/R을 5,797(1/K)에서 5,500(1/K)으로 교정하였다. 교정된 유한요소모델은 솔더의 크리프 속도 0.02($\mu\text{m/h}$)를 잘 반영하였다. 검증된 크리프특성을 갖는 유한요소모델은 솔더의 정확한 수명예측 등에 이용할 수 있다.

참고문헌

- (1) Meeker, W. Q. and Escobar, L. A., 1993, "A Review of Recent Research and Current Issues in Accelerated Testing," *International Statistical Review*, Vol 61, No.1, pp.147~168.
- (2) Li, J. and Dasgupta, A., 1993, "Failure- Mechanism Models for Creep and Creep Rupture," *IEEE Trans. on reliability*, Vol 42, No.3, pp.339~353.
- (3) Kim, I. H., Park, T. S. and Lee, S. B., 2004, "A Comparative Study of the Fatigue Behavior of SnAgCu and Snpb Solder Joints," *Trans.of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 12, pp. 1856~1863.
- (4) Lee, S. C., Hyun, C. M., Lee, H. M., Kim, M. J., Kim, H. K. and Kim, K. T., 2004, "Thermal Fatigue Reliability of Solder Joints in a Thin Film Optical Filter Device," *Trans.of the KSME(A)*, Vol. 28, No. 6, pp. 677~684.
- (5) www.matweb.com.
- (6) Tee, T.Y., Ng, H. S. and Zhong, Z., 2006, "Board Level Solder Joint Reliability Analysis of Stacked Die Mixed Flip-chip and Wirebond BGA," *Micro- electronics Reliability*, Vol. 46, No. 12, pp. 2131~2138.
- (7) Amagai, M., 1999, "Chip Scale Package Solder Joint Reliability and Modeling," *Microelectronics Reliability*, Vol. 39, No. 4, pp. 463~477.
- (8) Pecht, M., Agarwal, R., McCluskey, P., Dishongh.

- T., Javadpur, S. and Mahajan, R., 1998, *Electronic Packaging Materials and their Properties*, CRC Press.
- (9) Pang, J.H.L., Seetoh, C.W. and Wang, Z.P., 2000, "CBGA Solder Joint Reliability Evaluation Based on Elastic-Plastic-Creep Analysis," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 122, No. 3, pp. 255~261.
- (10) Zhao, J.-H., Dai, X. and Ho, P., 1998, "Analysis and Modeling Verification for Thermal-Mechanical Deformation in Flip-chip Packages," *Proc. of 48th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 336~344.
- (11) Bhandarkar, S.M., Dasgupta, A., Barker, D., Pecht, M. and Engelmaier, W., 1992, "Influence of Selected Design Variables on Thermo-mechanical Stress Distributions in Plated-through-hole Structures," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 114, No.1, pp. 8~13.
- (12) Anand, L., 1982, "Constitutive Equations for the Rate-Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 104, pp. 12~17.
- (13) Wilde, J., Becker, K., Thoben, M., Blum, W., Jupitz, T., Wang, G. and Cheng, Z.N., 2000 "Rate-Dependent Constitutive Relations Based on Anand Model for 92.5Pb5Sn2.5Ag Solder," *IEEE Transaction on Advanced Packaging*, Vol. 23, No. 3, pp. 408~414.
- (14) Cheng, Z.N., Wang, G.Z., Chen, L., Wilde, J. and Becker, K., 2000, "Viscoplastic Anand Model for Solder Alloys and its Application," *Soldering and Surface Mount Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 31~36.
- (15) Darveaux R., 2000, "Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation", *Proc. of 50th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1048~1058.
- (16) Wang, G.Z., Cheng, Z.N., Becker, K. and Wilde, J., 2001, "Applying Anand Model to Represent the Viscoplastic Deformation Behavior of Solder Alloys," *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 123, pp. 247~253.
- (17) Yeo, A., Lee, C. and Pang, H. L., 2006, "Flip Chip Solder Reliability Analysis Using Viscoplastic and Elastic-Plastic-Creep Constitutive Models," *IEEE Trans. Comp. Pack. Tech.*, Vol. 29, No. 2, pp. 355~363.