

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.3.259>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 온도변화 환경에서 칩저항 실장용 유·무연솔더의 수명모델 검증연구

한 창 운<sup>\*†</sup>

\* 전자부품연구원 시스템로버스트연구센터

### Verification Study of Lifetime Prediction Models for Pb-Based and Pb-Free Solders Used in Chip Resistor Assemblies Under Thermal Cycling

Changwoon Han<sup>\*†</sup>

\* Robust Components and System Research Center, Korea Electronics Technology Institute

(Received May 3, 2015 ; Revised November 25, 2015 ; Accepted December 26, 2015)

**Key Words:** Lifetime Prediction Model(수명예측모델), Pb-free Solder(무연 솔더), Accelerated Life Test(가속 수명시험), Chip Resistor(칩저항)

**초록:** 최근에 온도변화 환경에서 칩저항 실장용 유·무연 솔더의 수명예측모델이 개발되었다. 개발된 수명예측모델에 의하면 가속조건에서는 칩저항 실장 무연솔더가 유연솔더보다 수명이 적은 것으로 나타나지만, 실제조건에서는 무연솔더의 신뢰성이 유연솔더보다 우수하다. 본 연구에서는 개발된 수명예측모델의 검증 연구를 수행한다. 수명예측모델을 다른 칩저항 실장 유·무연 솔더 시험 결과에 적용하고 비교하기 위해서, 유한요소모델을 개발하고 시험 온도사이클 조건을 적용한다. 변형률 에너지 밀도를 계산하고 수명을 예측한다. 마지막으로 유·무연 솔더에 대해서 예측결과를 시험결과와 비교한다. 검증 결과는 개발된 수명예측모델이 사용 가능한 범위에서 수명을 예측할 수 있음을 보인다.

**Abstract:** Recently, life prediction models for Pb-based and Pb-free solders used in chip resistor assemblies under thermal cycling have been introduced. The models suggest that the field lifetimes of Pb-free solders would be better than those of Pb-based solders when used for chip resistors under thermal cycling conditions, while the lifetime of the chip assemblies under accelerated test conditions show a reverse relationship. In this study, the prediction models were verified by applying the model to another research case. Finite element models were built, thermal cycling conditions were applied, and the energy densities were calculated. Finally, life prediction analysis was conducted for the cases where Pb-based and Pb-free solders were used. The prediction results were then compared with the test data of the case. It was verified that the predictions of the developed life cycle models are on the practical scale.

#### 1. 서 론

납(Pb)을 기반으로 하는 유연솔더(Pb-based solder, 대표적 조성으로 SnPb)는 많은 기술적, 경제적 장점으로 인해 지난 50년 이상 전자산업에서 전자부품 실장을 위해 사용되어 왔다. 하지만 최근 환경적 유해를 이유로 WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment Directive)나 RoHS (Restriction

of Hazardous Substances Directive)와 같은 국제 환경규정에 의해 전자부품에서 납의 사용이 금지되면서 유연솔더가 더 이상 사용될 수 없게 되었다.

기존의 유연솔더를 대체하기 위해 납이 없는 무연솔더(Pb-free solder, 대표적 조성으로 SnAgCu) 개발 연구가 진행되면서 무연솔더의 상대적 높은 용점 등에 의해 전자부품 실장에 관련된 신뢰성 문제가 야기되었다. 무연솔더의 유연솔더 대체 가능성을 신뢰성면에서 증명하기 위하여 많은 비교 시험과 연구가 수행되었으며, 온도 사이클 가

† Corresponding Author, cw\_han@keti.re.kr

속시험 조건에서 무연솔더의 신뢰성이 유연솔더 이상임을 BGA (Ball Grid Array)와 같은 주요 패키지 형태에 대해서 증명되어 왔다.

하지만, 몇몇 패키지에 대해서는 상반된 신뢰성 결과가 보고되었다. 대표적으로 미국의 NCMS (National Center for Manufacturing Sciences)가 90년대에 발행한 연구보고서에서는 칩저항 등의 패키지에서는 무연솔더의 시험결과가 유연솔더보다 나쁜 것으로 보고되었다.<sup>(1)</sup> 이런 실험결과는 이후 다른 연구자의 결과에서도 보고되었다.<sup>(2)</sup> 하지만 이렇게 전자패키지 구조에 따라 유·무연 솔더의 상대적 신뢰성 결과가 차이나는 이유에 대해서는 본격적으로 연구된 바가 없다.

칩저항은 가격의 비중 면에서는 전자제품에서 매우 미미한 수준이나 접합 신뢰성면에서는 사용되는 개수가 워낙 많아서 높은 실장 신뢰성이 요구되는 부품이다. 최근 연구에서 온도 사이클 하중에 대해서 칩저항 유·무연 솔더의 수명예측모델을 제안하고 이를 이용하여 다른 패키지와 달리 칩저항에서는 가속시험조건에서 칩저항의 무연솔더가 유연솔더보다 수명이 낮게 나오지만 실제 사용조건에서는 오히려 무연솔더의 수명이 크게 나올 수 있음을 보였다.<sup>(3)</sup>

본 논문에서는 상기 개발된 수명모델의 증명 연구를 수행한다. NCMS의 유·무연 솔더 시험결과에 기 개발된 칩저항 수명모델을 적용하고 수명모델로부터 예측된 예측수명과 실험에서 나온 실제수명을 비교하여 수명모델의 유효성을 검증한다. 수명모델의 적용을 위해서 유한요소 모델링을 수행하고 온도 사이클을 가하였을 때 솔더에 발생하는 변형을 에너지 밀도를 구한다. 이렇게 구한 에너지 밀도를 수명모델에 적용하여 가속 조건에서의 수명을 구하고 실험치와 비교한다. 또한 실제 조건에서의 유·무연 솔더의 수명을 예측하고 상호 비교한다.

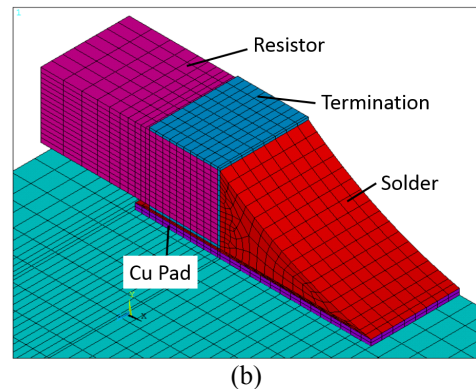
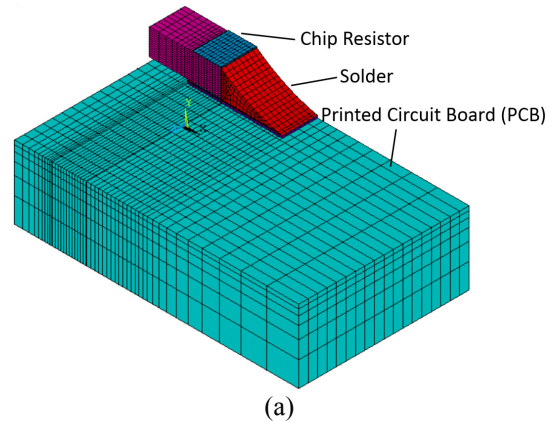
## 2. 수명모델 적용

### 2.1 수명모델 리뷰

온도 변화에 대한 솔더의 수명 예측모델은 그동안 응력 기반 수명모델,<sup>(4)</sup> 변형을 기반 수명모델,<sup>(5)</sup> 에너지 기반 수명모델<sup>(6)</sup> 등 여러 방법이 연구되어 왔다. 그 중 온도 변화에 따라 솔더에 누적되는 변형을 에너지 밀도를 분석하여 수명을

**Table 1** Life model constants for the Pb-based and Pb-free solders

Constants	for Pb-based solder (SnPb)	for Pb-free solder (SnAgCu)
$K_3$	2.443e1	5.495e9
$K_4$	3.938	10.30



**Fig. 1** Developed quarter-symmetric FE model for NCMS chip resistor; (a) full view and (b) local view for chip resistor area

예측하는 Darveaux의 에너지 기반 수명모델이 가장 많이 연구되어 왔다.<sup>(6-9)</sup>

Darveaux의 솔더 수명모델은 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서  $\Delta W_{ave}$ 는 온도 사이클 당 솔더에 누적되는 평균 변형을 에너지 밀도이고,  $a$ 는 솔더에 발생하는 크랙의 총 진전 길이이다.  $K_3$ 와  $K_4$ 는 모델 상수이고,  $N$ 은 계산되는 수명이다. 온도 사이클 당 발생하는  $\Delta W_{ave}$ 는 유한요소모델로 계산할 수 있다. 이전 연구<sup>(3)</sup>에서 칩저항에 대해서 제시된 수명모델 상수  $K_3$ 와  $K_4$ 는 Table 1에 제시되어 있다.

**Table 2** The material properties used in the FE model

Materials	Young's Modulus (Mpa)	Poisson's Ratio	CTE* (10 <sup>-6</sup> /°C)
Cu Pad <sup>(11)</sup>	132,400	0.34	16.7
Resistor (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sup>(11)</sup>	295,000	0.22	6.67
Termination (Ag) <sup>(11)</sup>	76,000	0.37	19.6
PCB <sup>(8)</sup>	See Fig. 6(b)	0.39(xy) 0.11(xz) 0.17(yz)	14.5 (in-plane dir.) 67.2 (thickness dir.)

\* CTE : Coefficient of Thermal Expansion

**Table 3** Anand model constants for the Pb-based and Pb-free solders

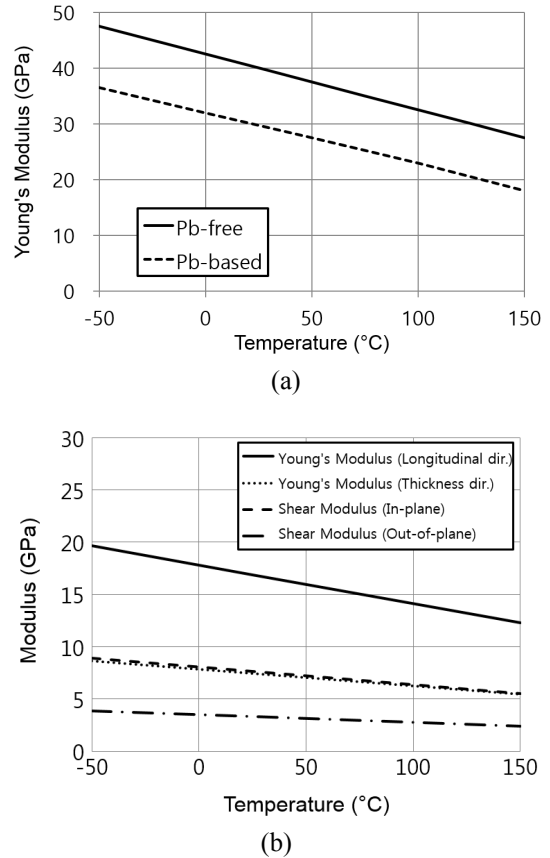
Solder Variable	Pb-based (Sn36Pb2Ag)	Pb-free (Sn3.0Ag0.5Cu <sup>(13)</sup> )
$s_0$ (MPa)	12.41	2.15
$Q/R$ (1/K)	9400	9970
$A$ (1/s)	4e6	17.994
$\xi$	1.5	0.35
$m$	0.303	0.153
$h_0$ (MPa)	1379	1525.98
$\hat{s}$ (MPa)	13.79	2.536
$n$	0.07	0.028
$b$	1.3	1.69

- $s_0$  : initial value of deformation resistance
- $Q/R$  : activation energy/universal gas constant
- $A$  : pre-exponential factor
- $\xi$  : multiplier of stress
- $m$  : strain rate sensitivity of stress
- $h_0$  : hardening / softening constant
- $\hat{s}$  : coefficient for deformation resistance saturation value
- $n$  : strain rate sensitivity of saturation value
- $b$  : strain rate sensitivity of hardening or softening

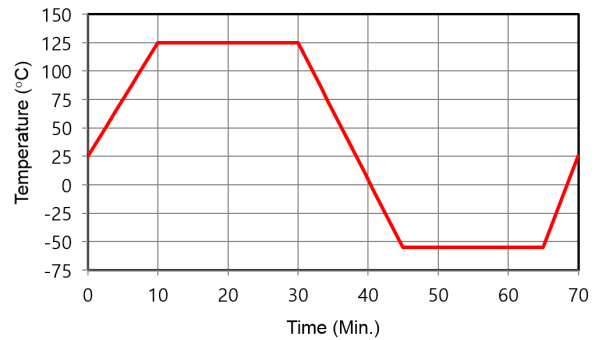
$$N = \frac{a}{K_3 (\Delta W_{ave})^{K_4}} \quad (1)$$

2.2 유한요소모델 개발

상기에 기술한 수명모델을 NCMS 시험결과에 적용하기 위해서 NCMS 시험에 사용된 칩저항을 Fig. 1과 같이 유한요소 모델링하였다. 모델은 1/4 대칭모델이며 모델링은 상용프로그램인 ANSYS



**Fig. 2** Temperature-dependent elastic moduli of (a) solders<sup>(14,15)</sup> and (b) PCB<sup>(8)</sup> used in the model



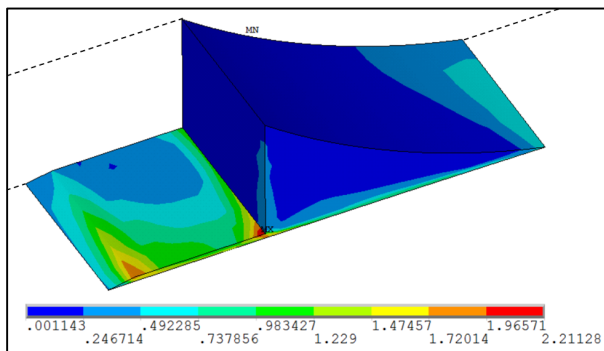
**Fig. 3** Thermal cycling profile applied to the FE model

를 사용하였다. 사용된 총 요소 수는 9,432개이며 모델은 요소 수에 대한 결과 수렴성을 확인 후 결정하였다. 칩저항은 1206 타입으로 가로 세로 크기가 각각 3.0mm, 1.5mm이다. 모델에 적용된 재료상수는 Table 2와 Fig. 2에 제시되어 있다. 점소성 재료인 솔더의 경우에는 통합형 점소성 모델 중 하나인 Anand 모델<sup>(10)</sup>을 사용하였다. 사용된 Anand 모델의 재료상수는 Table 3과 같다. 유

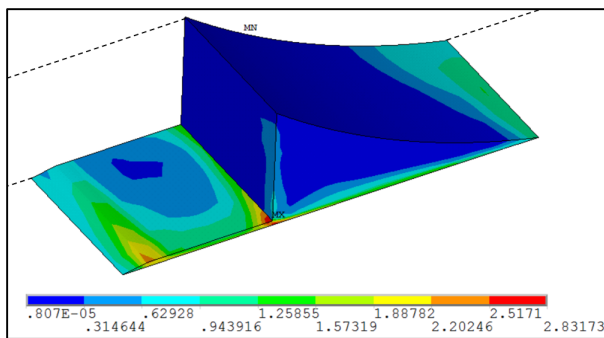
한요소모델에 적용된 하중은 NCMS 시험에서 사용된 저온 -55°C에서 고온 125°C까지의 70분 온도 사이클로 Fig. 3에 묘사되어 있다.

2.3 수명모델 적용

유한요소모델 해석결과, 온도 사이클에 의해 솔더 영역에 발생하는 변형을 에너지 밀도의 분포 예가 Fig. 4에 제시되어 있다. Fig. 4로부터 유무연 솔더에 발생하는 에너지밀도는 서로 유사하며, 최대 에너지 밀도는 솔더가 꺾이는 칩저항의 모서리부분에서 발생함을 알 수 있다. 따라서 최초 크랙은 솔더의 모서리 영역에서 발생하고, 크랙의 진전은 패드를 따라 횡으로 진전하거나 터미네이션을 따라 종으로 진전할 수 있다. NCMS 보고서에서 수명시험 후 찍은 칩저항의 고장모드 (Fig. 5)에서 유연솔더(Fig. 5(a))의 경우에는 패드를 따라 횡 방향으로 진전하였고 무연솔더(Fig. 5(b))의 경우에는 터미네이션을 따라 종 방향으로 진전하였다.



(a)



(b)

Fig. 4 Representative strain energy density distributions around the solder areas, obtained at the maximum temperature; (a) Pb-based and (b) Pb-free solders

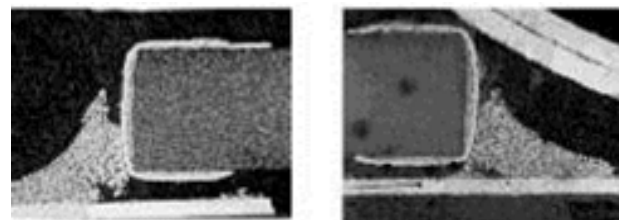
수명모델 식 (1)에 적용되는 평균 변형을 에너지 밀도는 솔더 영역의 평균 밀도로, 해석 모델의 요소 체적 크기에 대한 영향성을 최소화하기 위해 식 (2)와 같이 계산한다.<sup>(6)</sup> 여기서  $W_{elem}$  는 각 요소의 에너지 밀도이고  $V_{elem}$  는 각 요소의 부피이다.

$$\Delta W_{ave} = \frac{\sum_{elem} \Delta W_{elem} V_{elem}}{\sum_{elem} V_{elem}} \quad (2)$$

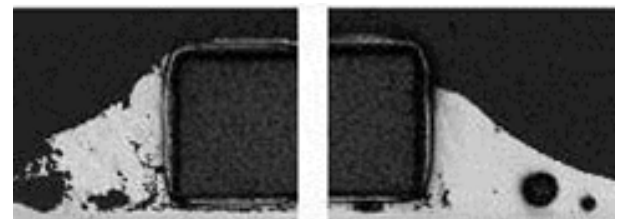
온도 사이클이 진행하면서 점차 증가하는 솔더의 평균 에너지 밀도를 시간에 따른 온도 하중의 변화와 같이 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 6는 처음 온도 사이클 4회에 대한 에너지 변화 그림으로 한 사이클당 증가하는 평균 에너지 밀도( $\Delta W_{ave}$ )는 유연솔더의 경우 0.0429 MPa, 무연솔더의 경우에 0.0505 MPa로 계산된다. 진전된 최종 크랙 길이

Table 4 Summarized results of strain energy density, crack length, and lifetime prediction of each solder

Solder	$\Delta W_{ave}$ (MPa)	$a$ (mm)	Lifetime Prediction (cycles)
Pb-based	0.0429	0.9	8,943
Pb-free	0.0505	0.9	3,781



(a)



(b)

Fig. 5 Failure modes of (a) Pb-based and (b) Pb-free solder after thermal cycling test at NCMS report<sup>(1)</sup>

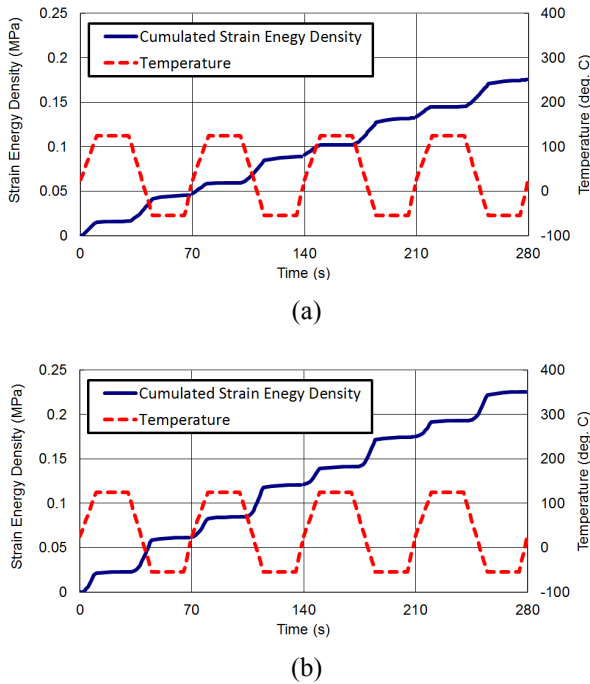


Fig. 6 Averaged strain energy density of solder during thermal cycling for (a) Pb-based and (b) Pb-free solders

(a)는 NCMS 시험결과인 Fig. 5로부터 0.9mm로 측정할 수 있었다. 계산된 에너지 밀도와 측정된 크랙 길이를 수명모델 식 (1)에 적용하면 예측되는 수명은 유·무연 솔더에 각각 8,943과 3,781 사이클로, Table 4에 결과가 정리되어 있다.

### 3. 예측 결과 검증

전절에서 예측된 수명 결과를 NCMS 시험결과와 비교하면 Table 5와 같다. 유연솔더의 경우에는 시험결과가 8,911 사이클이고 예측결과는 8,943 사이클로 예측 오차는 -0.4%이며, 무연솔더의 경우에는 시험결과 4,679 사이클, 예측결과 3,781 사이클로 예측 오차는 19.2%이다. 이로부터 이전 연구에서 개발된 칩저항의 수명모델이 적절한 수준에서 수명예측이 가능하다고 말할 수 있다. 무연솔더의 경우 유연솔더에 비해 상대적으로 예측 오차가 큰 것은 NCMS 시험에서 사용된 무연솔더가 Sn2.6Ag0.8Cu0.5Sb로 예측모델 개발을 위해 사용된 솔더 조성Sn3.0Ag0.5Cu와 차이가 있기 때문이라고 판단된다. 무연솔더의 경우 같은 조성이라도 세부조성량이 조금만 다르면, 크립 스트레인 에너지 양이 많이 차이가 날 수 있

Table 5 Comparison between NCMS tests and life model predictions

Solder type		Pb-based	Pb-free
Lifetime (cycles)	of NCMS test	8,911	4,679
	by prediction	8,943	3,781
Prediction error		-0.4%	19.2%

Table 6 Comparison of lifetime predictions in a field and accelerated conditions

Solder type		Pb-based	Pb-free
Lifetime prediction at (cycles)	a field condition	1.87e+5	7.75e+10
	accelerated condition	8,943	3,781
Acceleration Factor		2.1e+01	2.0e+07

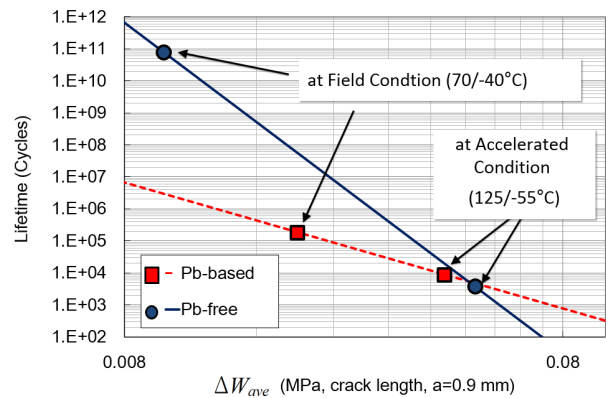


Fig. 7 Validation of the life prediction models with the previous research result of NCMS for the (a) Pb-based and (b) Pb-free solder

음이 알려져 있다.<sup>(13)</sup>

수명예측을 가속조건이 아닌 실제 조건에 대해서 수행하였다. 실제 조건에서는 유·무연 솔더 수명이 어떤지 비교하기 위해, IEC 60721-3-7<sup>(16)</sup>에 정의된 휴대기기의 실제 온도 조건인 70°C ~ -40°C 온도 사이클 조건을 개발된 수명모델에 적용하였다. 가속조건과 실제조건에서 계산된 솔더의 예측 수명과 실제조건에서의 수명 대 가속조건에서의 수명으로 정의되는 가속지수(acceleration factor)를 Table 6에 정리하였다. 결과가 Fig. 7에서 비교되어 있듯이 NCMS 시험의 경우 가속 조건에서는 무연솔더(3,781)가 유연솔더(8,943) 보다 수명이 짧았으나 실제 조건에서는 무연솔더(7.75e+10)가

유연솔더( $1.87e+5$ ) 보다 수명이 긴 것으로 예측되었다. 이는 무연솔더의 가속지수( $2.0e+7$ )가 유연솔더 가속지수( $2.1e+1$ ) 보다 큰 것으로 설명이 된다.

#### 4. 결 론

최근에 온도변화 환경에서 칩저항 실장용 유·무연 솔더의 수명예측모델이 개발되었다. 본 논문에서는 개발된 수명모델에 대한 검증 연구를 수행하였다. 타 연구의 시험결과(NCMS 연구결과)에 대해서 개발된 수명모델을 적용하여 예측된 예측수명과 시험치 수명을 비교하였다. 수명모델을 다른 칩저항 실장 유·무연 솔더 시험 결과에 적용하기 위해서, 유한요소 모델을 개발하고 시험 온도사이클 조건을 적용하였다. 변형률 에너지 밀도를 계산하고 수명을 예측하고 유·무연 솔더에 대해서 시험결과와 비교하였다.

예측된 수명과 시험결과를 비교한 결과 유연솔더에서 -0.4%, 무연솔더에서 19.2% 정도의 예측 오차를 보였다. 검증 결과로부터 개발된 칩저항 실장용 솔더 수명예측모델은 적절한 수준에서 수명예측이 가능하다고 할 수 있다. 또한, NCMS 시험의 경우 가속조건에서 무연솔더가 유연솔더보다 수명이 짧았으나 실제조건에서는 무연솔더가 유연솔더보다 긴 것으로 예측되어 무연솔더의 가속계수가 유연솔더의 가속계수보다 큼을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술평가관리원의 신성장동력장비경쟁력강화사업 (과제번호: 10050980) 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) NCMS, 1997, Lead-free Solder Project Final Report, NCMS, Ann Arbor, Mich.
- (2) Suhling, J. C., Gale, H. S., Johnson, R. W., Islam, M. N., Shete, T., Lall, P. and Thompson, J. R., 2004, "Thermal Cycling Reliability of Lead Free Solders for Automotive Applications," *Proc. 9th Conf. on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp. 350~357.
- (3) Han, C. and Han, B., 2014, "Board Level Reliability Analysis of Chip Resistor Assemblies under Thermal Cycling: A Comparison Study between SnPb and SnAgCu," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 879~886.
- (4) Steinberg, D. S., 2000, *Vibration Analysis for Electronic Equipment*, John Wiley & Sons, 3rd Ed.
- (5) Engelmaier, W., 1983, "Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints during Power Cycling," *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Tech.*, Vol. 6, No. 3, pp. 232~237.
- (6) Darveaux, R., 2000, "Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation," *Proc. 50th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1048~1058.
- (7) Ng, H. S., Tee, T. Y., Goh, K. Y., Luan, J. E., 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," *Proc. 55th Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1282~1291.
- (8) Lall, P., 2004, "Model for BGA and CSP Reliability in Automotive Underhood Applications," *IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manuf. Tech.*, Vol. 27, No. 3, pp. 585~593.
- (9) Rodgers, B., Punch, J. and Jarvis, J., 2002, "Finite Element Modeling of a BGA Package Subjected to Thermal and Power Cycling," *Proc. 18th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, pp. 993~1000.
- (10) Anand, L., 1982, "Constitutive Equations for the Rate-dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures," *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 104, No. 1, pp. 12~17.
- (11) Rizvi, M. J., Bailey, C. and Lu, H., 2010, "Damage Predictions in a Chip Resistor Solder Joint on Flexible Circuit Board," *Microelectronic Engineering*, Vol. 87, No. 10, pp. 1889~1895.
- (12) Chaillot, A., Grieu, M., Munier, C., Lombaert-Valot, I., Bousquet, S., Chastanet, C. and Maron, D., 2009, "Fatigue Life Prediction Models Developed

- for Green Electronics in Aeronautical and Military Communication Systems (GEAMCOS)," *Proc. 10th. Int. Conf on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro- Systems*, pp. 1~8.
- (13) Mysore, K., Subbarayan, G., Gupta, V. and Zhang, R., 2009, "Constitutive and Aging Behavior of Sn3.0Ag0.5Cu Solder Alloy," *IEEE Trans. Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 32, No. 4, pp. 221~232.
- (14) Lau, J. H. and Pao, Y.-H., 1997, Solder Joint Reliability of BGA, CSP, Flip Chip, and Fine Pitch SMT Assemblies, McGraw-Hill, New York, USA.
- (15) Kanda, Y. and Kariya, Y., 2012, "Evaluation of Creep Properties for Sn - Ag - Cu Micro Solder Joint by Multi-temperature Stress Relaxation," *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, No. 7, pp. 1435~1440.
- (16) IEC 60721-3-7, 2002, Classification of Environmental Conditions-Part 3-7: Classification of Groups of Environmental Parameters and Their Severities - Portable and Non-stationary Use, 2nd Ed.