

# 플라스틱 핵 솔더볼의 열응력 해석에 관한 연구

김환동<sup>+</sup>, 윤도영<sup>\*</sup>

(논문접수일 2007. 6. 27, 심사완료일 2007. 8. 13)

## A Study on Thermal Stress Analysis of Plastic-Core Solder Balls

H.-D. Kim<sup>+</sup>, D.-Y. Yoon<sup>\*</sup>

### Abstract

Recently, Pb-free solder ball technology, which is getting more significant in miniaturization of electronic equipment, and resolution of recent environmental problems, is necessary to be developed. A plastic-core solder ball is much promising in those considerations. Plastic-core solder balls have the tendency to replace the usual metal-core solder ball from low material cost and superior mechanical properties. The thermal effects, however, are important in manufacturing process, such as depositing micro-sized metal thin film on the spherical polymer surface. Furthermore plastic-core solder balls are easy to be broken due to CTE and elastic coefficient of material property from heat transfer. We propose technical computational investigations for the manufacturing design and the reliability of plastic-core solder ball from thermal stress analysis.

**Key Words** : Plastic core solder ball(플라스틱 솔더볼), Thermal stress(열응력), BGA(볼 그리드 어레이), FVM(유한체적법)

## 1. 서론

전자기기의 소형화, 경량화와 관련하여 그 중요성이 높아지고 있으며, 최근 환경문제와 관련하여 납의 사용을 규제하는 무연솔더(Pb-free Solder Ball) 기술의 개발이 요구되어지고 있다. 솔더볼을 사용한 BGA기술은 칩을 전기적으로 연결하기 위해 솔더합금을 이용한 솔더링 방법을 사용하며 모재금속보다 용융점이 낮은 금속을 용해시켜 금속간의 접합을 유도하는 것으로서 전자기기의 기판 실장에 필수적인

기술이다. 이러한 무연솔더 기술의 개발의 일부로 솔더볼의 중심부에 구형 플라스틱 표면에 금속 피복한 형태의 솔더볼을 사용하여 솔더볼의 경량화와 고집적화 하려는 경향이 나타나고 있다. 플라스틱 핵을 사용한 솔더볼은 기존의 무연솔더에 비해 플라스틱 특유의 탄성력으로 인한 복원력과 생산비용의 절감을 가져온다. 하지만 플라스틱과 금속층간의 결합력이 약하기 때문에 파손되기 쉬우며 열팽창계수(CTE)의 차이가 크기 때문에 파단의 요인이 되는 경향이 있다. 파단의 현상을 알기 위해서는 실험적인 방법으로 코어의 크기와

<sup>+</sup> 광운대학교 대학원 화학공학과 (saint82@kw.ac.kr)

<sup>\*</sup> 교신저자, 광운대학교 화학공학과 교수 (yoondy@kw.ac.kr)

주소: 139-701 서울시 노원구 월계동 447-1

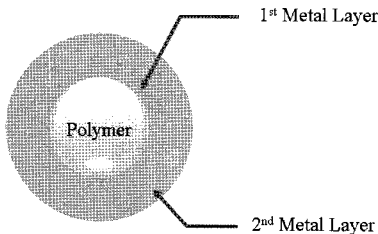
금속층의 두께에 따라 열충격 실험을 통하여 파단되는지의 여부를 확인하여야 하지만 시간과 비용이 많이 들기 때문에, 컴퓨터를 사용한 시뮬레이션을 실행하여 열응력 해석을 함으로써 솔더볼의 열안정성을 높이며 솔더볼 설계 요소에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다. 구조해석은 Abaqus 사용이 일반적이거나, 응력모델의 설정에 제한이 있으며 프로그램의 수정이 쉽지 않다. 유한부피법으로 구성된 Fluent 는 유동해석에 막강하지만, 에너지수치식이 코딩되어 있기 때문에 시간에 따라 변화하는 솔더볼 내부 온도분포의 해석 및 열응력모델의 설정에 용이하다.

## 2. 플라스틱 솔더볼

### 2.1 솔더볼의 구조

기존의 무연솔더볼은 형성된 금속층에 따라 Sn-Cu, Sn-Ag-Cu와 Sn-Zn 등이 있으며 접합부에서 금속간 화합물을 형성하기 위해 Au, Pd, Ag 등과 귀금속을 사용하기도 한다. 각 솔더볼은 형성된 금속층의 물질에 따라 고유한 특성을 가지고 있으며 본 연구에서는 polystyrene을 플라스틱 핵으로 사용하여 플라스틱 핵 솔더볼 (Plastic-Core Solder Ball : PCSB)에 Cu 도금을 한 후 기판에 부착하기 위해 그 위에 Sn을 형성한 이중 금속층을 해석하였다. Cu는 인쇄회로기판 상의 터미널 금속으로 널리 사용되며, Cu를 보호하며 접합하기 위해 필요한 Sn은 Cu와 좋은 젖음성을 나타낸다. 해석에 사용한 구조를 Fig. 1에 나타내었다.

열응력은 PCSB의 핵(core)을 이루는 플라스틱과 금속층간의 물성차이에 의해 발생하며 각각의 물성치를 Table 1에 나타내었다. 지름이 300 $\mu$ m인 솔더볼의 온도분포를 구



Position	Material	Thickness
core	Polystyrene	120 $\mu$ m (radius)
1st Metal Layer	Copper	5 $\mu$ m
2nd Metal Layer	Tin	25 $\mu$ m

Fig. 1 Model of PCSB

Table 1 Properties of materials <sup>(3,7)</sup>

Material	CTE ( $\mu$ m/m $^{\circ}$ C)	Modulus of elasticity
Polystyrene	79.8	10.9 $\times 10^3$ GPa
Copper	16.4	110.3 GPa
Tin	22	41.3 GPa

하기 위해 Fluent를 사용하였으며, 해석에 사용된 육각형 메시는 총 324,937개로 구성되어 있다. Fluent는 길이의 차원이 mm단위까지 수행하기 때문에 해석영역이 0.3mm인 솔더볼의 온도분포를 얻기위해 에너지수치식의 오차범위를  $2.0 \times 10^{-16}$ 까지 연산하였다. 사전 시뮬레이션 결과 솔더볼이 25 $^{\circ}$ C에서 250 $^{\circ}$ C까지 완전히 가열되는데 걸리는 시간이 약 0.2초로 계산되었으며, 해석 조건은 초기 25 $^{\circ}$ C에서 경계조건을 250 $^{\circ}$ C로 0.02초씩 0.2초까지 연산하였으며 다시 경계조건을 25 $^{\circ}$ C로 지정함으로써 땀납의 온도 (약 250 $^{\circ}$ C)에 의해 발생하는 온도장을 Fig. 2와 3에 나타내었다.

### 2.2 수학적 모델링

솔더볼의 열응력은 Fluent를 사용하여 얻은 온도분포를

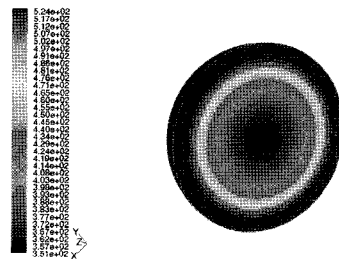


Fig. 2 Temperature profile at 0.02sec

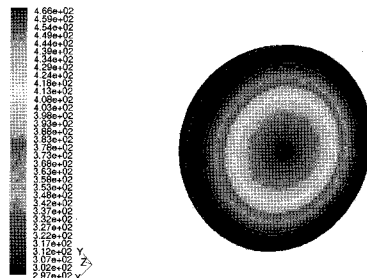


Fig. 3 Temperature profile at 0.22sec

이용하여 솔더볼의 열팽창으로 인한 압축력을 유한요소법을 이용하여 연산 한 후 열응력으로 변환 하였다.

$$\Delta r_p = \alpha_p r_p \Delta T \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{E}{AL} & -\frac{E}{AL} \\ \frac{E}{AL} & \frac{E}{AL} \end{bmatrix} [\Delta r] = [C] \quad (2)$$

$$\sigma = - C/A \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ ,  $E$ ,  $C$  와  $\sigma$  는 물질의 열팽창계수, 탄성도 (elasticity modulus), 압축부하(compressive load)와 열응력(thermal stress)을 각각 나타낸다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 온도구배의 효과

Fluent를 이용한 온도 변화를 Fig. 4와 5에 나타내었다. polystyrene과 금속층간의 열용량 및 열전도도의 차이로 인하여 금속 층에서는 경계조건에 의해 즉시 변화하였지만 polystyrene에서는 온도변화가 두드러지게 나타났다.

그러나 금속 층에서는 실질적인 온도구배가 존재하지 않

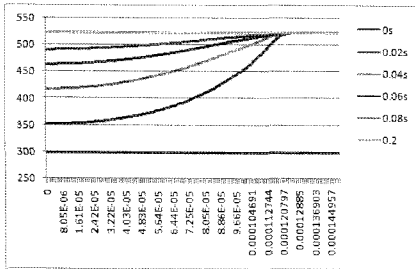


Fig. 4 Temperature profile under heating.

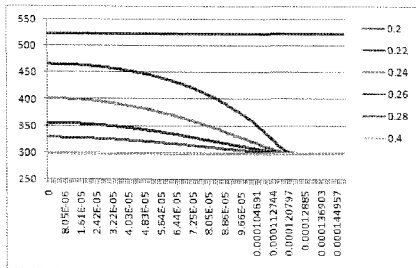


Fig. 5 Temperature profile under cooling.

으며 전체시간 영역에서 공통적인 현상으로 나타남을 확인할 수 있었다. 시간에 대한 효과를 확인하기 위하여 0.2초간은 가열을 0.2초간은 냉각을 시키기 때문에 경계조건에 따라 온도 프로파일을 두 부분으로 나누어 해석하였다.

#### 3.2 열응력

열응력 해석은 초기 온도인 25℃를 기준으로 하여 시간에 따라 변화하는 온도에 대해 시간별로 열응력을 해석하였으며 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 그림의 결과는 Fluent에서 계산된 온도분포를 활용하여 UDF(User-Define Function)을 구사하여 산출된 결과이다. 그림에서 x축은 반경방향, y축은 시간, 그리고 z축은 발생하는 열응력을 각각 나타내고 있다. 이 그래프는 0s에서 0.4s까지의 열응력을 나타내며 사전 시뮬레이션에 의해 솔더볼이 완전히 가열되는데 걸리는 시간과 냉각되는데 걸리는 시간이 0.2s인 점을 감안하면 솔더볼의 온도변화에 대해 발생할 수 있는 모든 열응력을 의미한다. 시뮬레이션의 경계조건에 의해 외부 금속 층의 온도변화가 빠르게 변화하므로 초기에서부터 열응력이 발생하지만 polystyrene를 사용한 코어에서는 열응력이 발생하지 않는다. 이는 고분자물질의 특유의 탄성력으로 인한 것이다. 이와 병행하여 Sn-Cu-Sn 솔더볼에서 발생하는 열응력을 해석 해본 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 열응력은 열팽창계수와 탄성계수가 다른 두 물질의 경계층에서 높게 생성되며 기존 금속솔더볼 (Metal Core Solder Ball : MCSB)보다 PCBs의 열응력이 작은 것으로 나타난다.

PCBs의 열응력에 의해 발생하는 최대 응력은 구리층에서 약 1.9GPa의 응력이 발생하였다. 이는 솔더볼의 크기가 작기 때문에 단면적을 고려하여 압축력을 계산한 결과 압축력은 약 71N으로 계산되었다.

솔더볼은 핵 위에 전기적 전도성이 좋은 Cu나 Au 등을

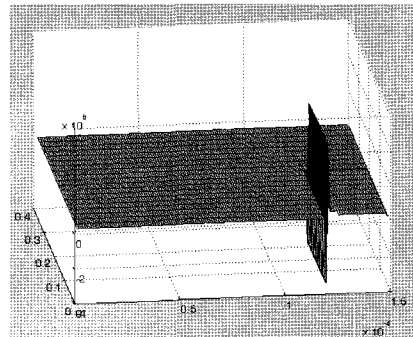


Fig. 6 Thermal stress distribution at PCBs

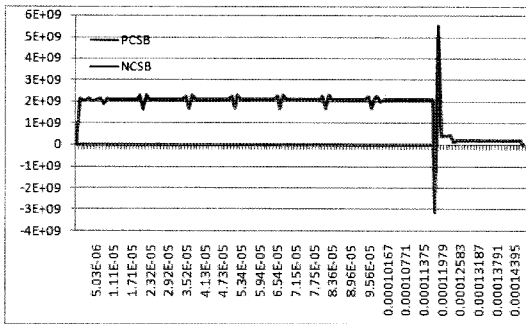


Fig. 7 Comparison of thermal stress between PCBS and MCBS

사용함으로써 경계면에 열응력이 발생하게 된다. 그러나 PCSB의 열응력은 polystyrene와 금속층간의 열팽창 계수와 탄성계수의 차이로 인해 생성되며 해석 결과 경계면에서 polystyrene 영역에서는 솔더볼의 중심부 방향으로 구리 영역에서는 반경방향으로 열응력이 발생하였으며, 파단의 위험성을 가지는 것으로 예측되었다. 각 물질의 고유한 열팽창 계수와 열전달계수에 의해 발생하는 열응력을 PCSB는 플라스틱을 핵으로 사용하기 때문에 핵의 재료에 따라서 그 특성이 매우 다르게 나타난 것이다. 반면에 플라스틱 특유의 탄성력으로 인하여 응력이 낮아져 열피로가 감소하는 경향이 있었으며, 계산결과 기존의 MCSB보다 PCSB가 열응력이 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 하지만 MCSB의 경우 일반적으로 사용하는 Sn-Cu 솔더볼에서 상호간에 인력으로 작용함으로써 PCSB보다 높은 인장강도를 가진다. 따라서 효과적인 솔더볼의 설계에 있어서 MCSB와 PCSB의 선택이 매우 중요하며, 본 연구의 결과는 솔더볼의 설계 및 선택에 있어 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상업용 소프트웨어인 Fluent를 사용하여, 플라스틱 솔더볼내의 비정상상태 온도장을 해석하였다. 동작중인 솔더볼의 열응력 해석에서 가장 중요한 점은 시간에 따라 변화하는 온도차에서 비롯되며, Fluent는 에너지수지식을 포함하고 있기 때문에 효과적으로 열응력을 산출할 수 있었다. 기존의 구조해석 프로그램의 결과와 유사함을 확인할 수 있었으며, 응력의 계산 및 후처리는 오히려 사용자 정

의함수로서 적당하게 수정할 수 있었다. 뿐만 아니라, 비정상상태에서의 계산에서는 오히려 막강한 해석능력을 보여주었다. 계산결과 고분자물질과 금속물질간에서는 상이한 온도분포로 인하여 열응력구배가 변화하는 것으로 나타났으며, 그 효과는 고분자솔더볼의 신뢰성평가에 있어서 효과적으로 활용될 수 있음이 확인되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 서울시 산학연 협력사업의 지원으로 수행되었음(과제번호 10583).

This work was supported by the Seoul Research & Business Development Program (Grant No.10583).

#### 참고 문헌

- (1) Okinaga, N., Kuroda, H. and Nagai, Y., 2001, "Excellent reliability of solder ball made of a compliant plastic core," IEEE, 2001 *Electronic Components and Technology conference*.
- (2) Hang, X., Lee, S. W. R, Yan, C. C. and Hui, S., 2001, "Characterization and analysis on the solder Ball Shear Testing Conditions," IEEE, *Electronic Components and Technology conference*.
- (3) Bedford., A. and Liechti, K., 2002, "Mechanics of materials," *Prentice Hall*.
- (4) Chia, J. Y., Cotterell, B. and Chai, T. C., 2006, "The mechanics of the solder ball shear test and the effect of shear rate," *Materials Science and Engineering A* 417 pp. 259~274.
- (5) Kim, H. G., Yang, S. M. and No, H. G., 2003, "Stress analysis of a discontinuous composite using mechanics of materials approach," *Journal of KSMTE*, Vol. 12, No. 4, pp. 63~69.
- (6) Kim, S. Y., Kim, I. G., Moon, C. J., Jung, Y. J. and Ahn, Y. H., 2000, "A study on analysis of heat transfer and residual stress on the weld zone using FEM," *Journal of KSMTE*, Vol. 9, No. 5, pp. 96~104.