

열충격 시험을 통한 MLCCs SAC305 무연 솔더 접합부의 IMCs 성장과 접합특성 저하에 관한 연구

정상원, 강민수, 전유재, 김도석, 신영의^a

중앙대학교 기계공학부

A Study on The Degradation Characteristics of MLCCs SAC305 Lead-Free Solder Joints and Growth IMCs by Thermal Shock Test

Sang-Won Jung, Min-Soo Kang, Yu-Jea Jeon, Do-Seok Kim, Young-Eui Shin^a

School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

(Received February 10, 2016; Revised February 14, 2016; Accepted February 21, 2016)

Abstract: The bonding characteristics of MLCCs(multi layer ceramic capacitor, C1608) lead-free solder (SAC305) joints were evaluated through thermal shock test (-40°C~125°C, total 1,800 cycle). After the test, IMCs(intermetallic compounds) growth and cracks were verified, also shear strengths were measured for degradation of solder joints. In addition, The thermal stress distributions at solder joints were analyzed to compare the solder joints changes before and after according to thermal shock test by FEA (finite elements analysis). We considered the effects of IMCs growth at solder joints. As results, the bonding characteristics degradation was occurred according to initial crack, crack propagations and thermal stress concentration at solder-IMCs interface, when the IMCs grown to solder inside.

Keywords: Lead-free solder, Thermal shock test, Intermetallic compounds, Shear test

1. 서 론

각종 전자제품의 접합부재료로 쓰여왔던 유연솔더는 다른 합금에 비해 가격이 싸고 전기적, 기계적, 열적으로 우수한 성질을 가지고 있기 때문에 많은 분야에서 유용하게 사용 되어왔다. 그러나 유연솔더에 함유된 납(Pb)은 체내에 축적되어 오랜 시간이 지난 후 독성이 나타나고, 발병하였을 때 뇌와 신경계통에 지장을 초래하여 신체마비, 빈혈 등의 증상을 보인다는 연구결과에

따라, 2006년 7월에 발효된 RoHS(restriction of the use of hazardous substances in EEE)에서는 이러한 물질의 사용을 제한하는 지침이 시행되고 있다 [1-3].

따라서 이를 대체하기 위해 무연 솔더의 연구가 활발히 진행되어, 현재까지 Sn-Cu, Sn-Ag-Cu, Sn-Ag, -Cu-Bi, Sn-Zn-Bi 등 다양한 무연 솔더가 개발되어 사용되고 있다. 이러한 무연 솔더는 유연솔더보다 대체적으로 젖음성 및 접합성능이 떨어져 신뢰성에 문제가 발생하고 있으며, 3·4원계 솔더접합부에서 발생하는 문제를 정량적으로 분석하기 위해 연구하고 있다 [4].

기존의 연구결과에 따르면 솔더 접합부의 피로파손은 복합적인 요소에 의해 발생된다. 특히 전자제품의 사용에 따른 온도의 상승으로 열피로 현상이 나타나며, 용융점이 낮은 솔더의 확산계수가 활성화되어 솔더

a. Corresponding author; shinyoun@cau.ac.kr

계면에서 확산에 의한 금속간화합물(IMCs: inter-metallic compounds)이 형성된다. 금속간화합물은 솔더 접합부의 전단 및 피로강도에 영향을 주며 접합부의 인성을 저하시키기 때문에 이에 많은 연구가 요구되고 있다 [5].

따라서 본 논문에서는 열충격 시험에 따른 솔더 접합부의 특성평가를 위해 유한요소해석(FEA: finite element analysis)과 단면관찰, 전단시험을 수행하여 무연 솔더(wt% 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu) 접합부의 특성저하를 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험시편

본 실험에 사용된 MLCCs(multi layer ceramic capacitors, C1608)는 C1608 사이즈의 시편으로 형상은 그림 1과 같다. C1608의 크기는 1.6 mm × 0.8 mm × 0.8 mm이다. 사용된 chip은 표면에 Cu-electrode(Cu:10 μ m)를 도금하여 전극을 형성한 후, Cu-electrode의 손상방지 및 접합성과 젖음성 향상을 위해 표면에 니켈(Ni:10 μ m) 도금 한 것이다. 사용된 무연 솔더는 SAC305로 최고온도 240 $^{\circ}$ C, 평균온도 220 $^{\circ}$ C에서 약 60초 동안의 리플로우(Reflow) 공정을 통해 접합하였다.

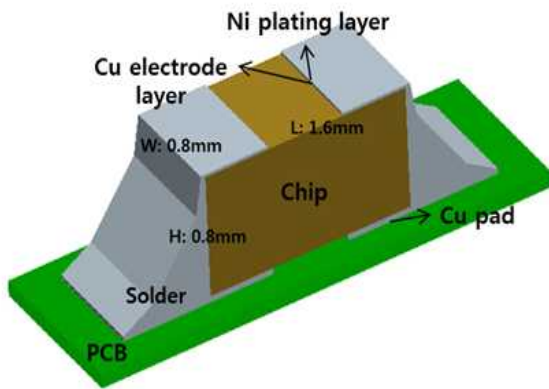


Fig. 1. The shape of specimen.

2.2 열충격 시험

열충격 시험은 ESPEC社의 TSE-11-A 장비를 이용하였으며, 열충격 시험기는 상·하 챔버로 분리되어

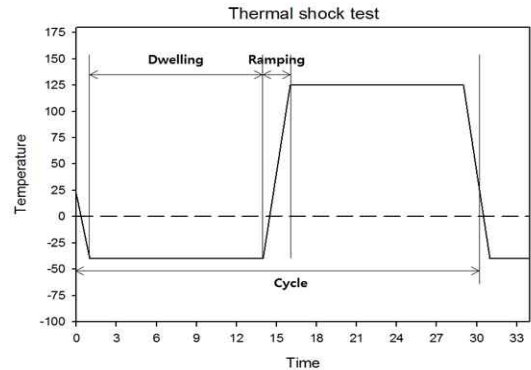


Fig. 2. Temperature profile of thermal shock test.

상챔버는 고온을 유지, 하챔버에서는 저온을 유지시켜 주어 내부의 승강장치를 통해 시편을 이동시키게 된다.

따라서 시편의 급격한 온도변화를 주어 열충격을 가하는 장비이다. 본 실험에 사용된 온도 조건은 JESD22-A106B 열충격 시험 테스트 규격과 JESD22-A104C의 열사이클 시험 규격 [6]을 인용하여 -40 $^{\circ}$ C~125 $^{\circ}$ C로 설정하였다. 열충격 시험의 온도프로파일은 그림 2와 같으며 125 $^{\circ}$ C의 고온 구간 15분, -40 $^{\circ}$ C의 저온구간 15분이며, 승온구간(ramping time)을 포함하여 사이클당 30분(1,800 sec)으로 설정하였다.

2.3 전단시험 및 단면관찰

열충격 시험 전·후 솔더 접합부의 접합특성 변화를 측정하기 위해 전단시험을 수행하여 전단력을 측정하였다. 전단시험 장비는 RHESCA社의 PT-1000을 사용했고, JIS-Z-3198-7 규격 [7]을 이용하여 그림 3과 같이 실온에서 chip의 1/4 높이 이하(150 μ m), 전단속도 15 mm/min으로 전단강도 값을 측정하였다. 또한 SEM(scanning electron microscope)을 이용해 SAC305 무연 솔더 접합부 관찰, 성분 분석 및 특성변화를 고찰하였다.

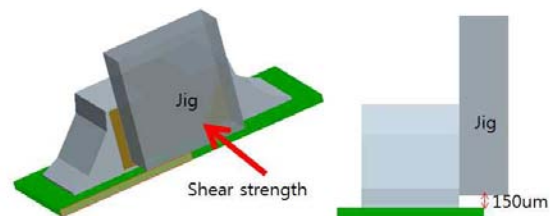


Fig. 3. Shear test.

2.4 3D 모델링

열충격 시험을 모사하여 유한요소해석을 진행하기 위해 Pro/ENGINEER 프로그램을 이용하여 모델링을 수행하였다. 시편은 해석시간을 고려하여 그림 4(a)와 같이 접합부의 1/2만 모델링하고 대칭조건을 주었다. 유한요소해석을 위한 모델링은 2가지 경우로 진행하였으며, 열충격 시험 전의 접합부를 모사하기 위해 그림 4(b)와 같이 IMCs가 없이 모델링하였으며, 열충격 시험후의 접합부를 모사하기 위해 그림 4(c)와 같이 IMCs(Cu₆Sn₅, Cu₃Sn) 층을 모델링하였다.

IMCs의 두께는 Cu₆Sn₅, Cu₃Sn 각각 3 μm로 설정하였다. 얇은 박막 간의 정확한 해석을 위해서 Ansys V13.0-ICEM tool을 이용하여 격자를 형성하였으며, Tetra/Mixed를 이용해 Cu-electrode, Ni 도금막, IMCs 등 두께가 얇은 부분의 요소를 세밀하게 형성하였다. 해석의 용이성을 위해 접합부의 재료는 선형, 탄성, 등방성 재료로 가정하였으며, 물성치를 표 1에 나타내었다 [8-13].

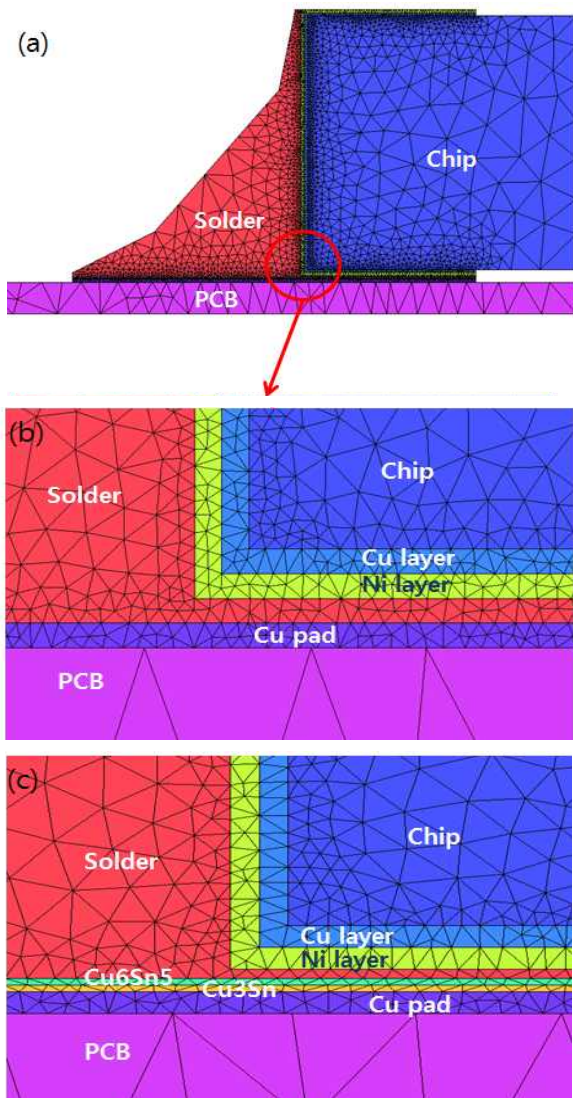


Fig. 4. Image of elements (a) whole image of 1/2 modeling (b) image of solder joint with out IMCs (c) image of solder joint with IMCs.

Table 1. Properties of materials in simulation [8-13].

	<i>E</i> GPa	<i>ν</i>	<i>ρ</i> Mg m ⁻³	<i>CTE</i> 10 ⁻⁶ K ⁻¹	<i>TC</i> W/mK
Chip (BaTiO ₃)	108.0	0.33	6.00	7.6	5.00
Cu layer	129.8	0.34	8.94	16.4	386.20
Ni layer	205.0	0.31	8.90	13.3	67.00
Solder	48.4	0.33	7.38	21.0	64.00
Pad (Cu)	129.8	0.34	8.94	16.4	386.20
PCB (FR4)	22.0	0.28	1.94	18.0	0.39
Cu ₆ Sn ₅	85.6	0.31	8.28	16.3	34.10
Cu ₃ Sn	108.3	0.30	8.90	19.0	70.40

3. 결과 및 고찰

3.1 IMCs 성장과 균열 진전

SEM의 BSE 이미지를 통해 열충격 시험에 따른 IMCs 성장을 확인하였다. 솔더 접합부에서 Cu Pad와 SAC305솔더 계면에서 Cu-Sn계 IMCs가 형성되었지만 조성의 구분이 확연하게 드러나지 않았다. 열충격 시험 전 Cu-Sn IMCs의 두께는 1.33 μm이었으나 열충격 시험 1,800 사이클 후 3.78 μm까지 성장하였다. 사이클에 따른 IMCs의 성장을 그림 5에 나타내었다. Cu-Sn계 IMCs의 성장은 각 재료(Cu, Sn)간 원자의 확산에 의해 발생하며 다음 식 (1)과 같은 Arrhenius의 관계식을 따른다 [14].

$$D = D_0 e^{(-Q/RT)} \tag{1}$$

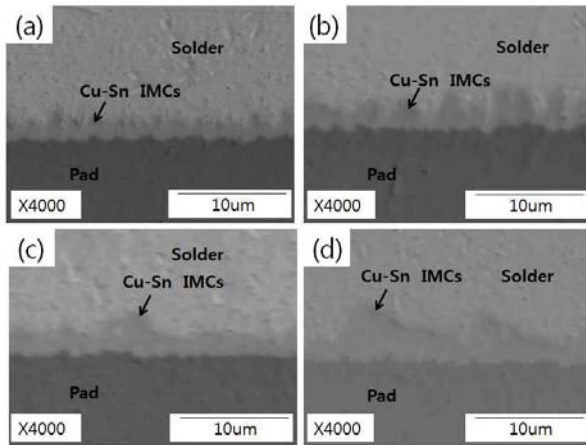


Fig. 5. Growth of IMCs (a) 0 cycle (b) 600 cycle (c) 1,200 cycle (d) 1,800 cycle.

D_0 는 확산상수, Q 는 IMCs의 성장을 위한 활성화에너지, K 는 절대온도, R 은 기체상수이다. 위의 식 (1)에서 알 수 있듯 재료의 확산계수 D 는 온도에 대한 지수적 의존성을 가진다. 즉 온도가 증가함에 따라 확산계수의 증가로 인해 IMCs의 성장은 더욱 가속화된다.

열충격 시험에 따른 접합부에서 발생하는 균열(crack)은 그림 6에 나타났다. 그림 6(b)와 같이 초기 균열은 1,200 사이클(cycle) 이후 확인되었으며 이때의 균열 길이는 약 $23 \mu\text{m}$ 였다. 초기 균열은 Cu Pad와 SAC305솔더 계면에서 성장한 Cu-Sn IMC에서 시작되며 이후 IMCs와 솔더 사이의 계면을 따라 성장하다 솔더 내부로 균열이 진전되었다. 열충격 시험이 진행됨에 따라 그림 6(d)와 같이 균열의 폭이 넓어지는 것을 확인할 수 있었고 최대 $461 \mu\text{m}$ 까지 성장했다. 이러한 계면에서의 균열 진전은 이종재료 접합계면의 특성으로 이종재료의 열팽창계수 차이에 의해 온도변화 시 열변형률의 차이가 발생하고, 이로 인해 재료간의 자유팽창을 억제시킴으로써 계면에서 발생하는 열응력 균열의 주된 요인이 된다.

$$\epsilon_T = \alpha(\Delta T) \quad (2)$$

ϵ_T 는 열변형률, ΔT 는 온도의 변화, α 는 열팽창계수이다. 이러한 열변형에 의한 열응력과, 경도가 주변 다른 금속에 비해 높고 인성이 낮은 IMCs는 원자가 특정 방향으로 강하게 결합되는 특징 때문에 대칭성이 낮아 소성변형이 제한적으로 구속되고 이에 따라 강한

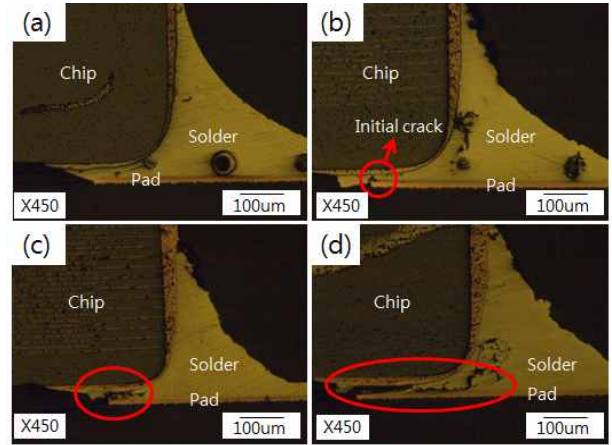


Fig. 6. Propagation of crack in Solder joint (a) 0 cycle (b) 1,200 cycle (c) 1,600 cycle (d) 1,800 cycle.

취성의 특징을 갖게 된다 [15]. 따라서 균열의 진전은 열응력에 취약한 부위인 IMCs 계면에서부터 시작되며 계면과 솔더 내부 공공들이 연속적으로 연결되며 솔더 내부로 진전됨을 알 수 있다.

3.2 접합특성 평가

열충격 시험에 따른 접합특성 저하를 평가하기 위해 200 사이클 간격으로 전단력 측정을 수행하여 그림 7과 같이 그래프로 나타내었다. 전단시험 결과, 열충격 시험 전 28.6 N 이었으나, 열충격 시험이 진행 될수록 감소하였으며, 1,200 사이클 이후 24.8 N으로 13% 이상 감소하였고 1,800 사이클에서는 22.3 N으로 22% 이상 감소했다. 그림 7(a)의 IMCs의 성장 거동과 접합강도저하의 그래프를 비교하면 IMCs가 $3 \mu\text{m}$ 이상 되는 1,200 사이클 이후부터 접합강도가 급격히 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 7(b)의 접합강도와 균열의 길이 그래프에서도 IMCs가 $3 \mu\text{m}$ 이상 되는 1,200 사이클 이후 균열이 급속도로 진전되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 IMCs 성장은 솔더접합 계면의 접착에너지를 감소시키는 것으로 나타난다. Lim은 IMCs의 성장과 계면접착에너지에 관한 연구를 수행하였다. 180°C 에서 24시간 동안 aging하여 Cu-Sn계열의 IMCs를 형성한 시편에 대한 4점 굽힘강도 실험을 통해 이종재료간의 계면에너지의 감소를 정량적으로 계산하였으며 Cu와 Sn의 반응으로 인해 형성되는 취성특성을 가진 금속간화합물이 계면접착에너지의 감소에 영향을 미치는 것으로 판단했다 [16].

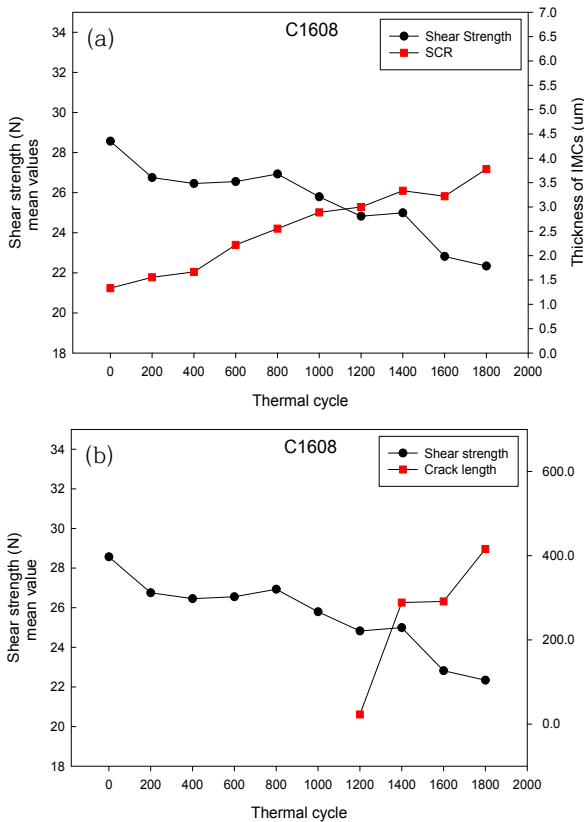


Fig. 7. Degradation of shear strength graph (a) shear strength with IMC growth (b) shear strength with crack propagation.

따라서, 본 실험에서 열충격 시험이 진행됨에 따라 IMCs가 성장하고, 두께가 3 μm 이상이 되면 솔더 접합면의 접촉에너지가 감소하게 되어 균열이 발생하게 되며 발생한 균열은 접합특성 저하에 영향을 주는 것으로 나타났다.

3.3 Finite Element Analysis

본 FEA은 초기온도인 -40°C를 기준으로 125°C까지 상승하였을 때의 열하중에 의한 von-Mises응력을 해석하였으며 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)는 IMCs가 없는 접합부에 대한 응력분포이며, 그림 8(b)는 IMCs(Cu₆Sn₅, Cu₃Sn 각각 3 μm)가 존재하는 접합부의 응력분포이다. 두 해석 결과 모두 열응력은 열팽창계수와 탄성계수가 다른 이종재료간의 경계층에서 높게 형성되었다. 이러한 열응력 분포를 통해 계면 부근에서의 균열 또는 파손의 가능성이 있음을 확인했다.

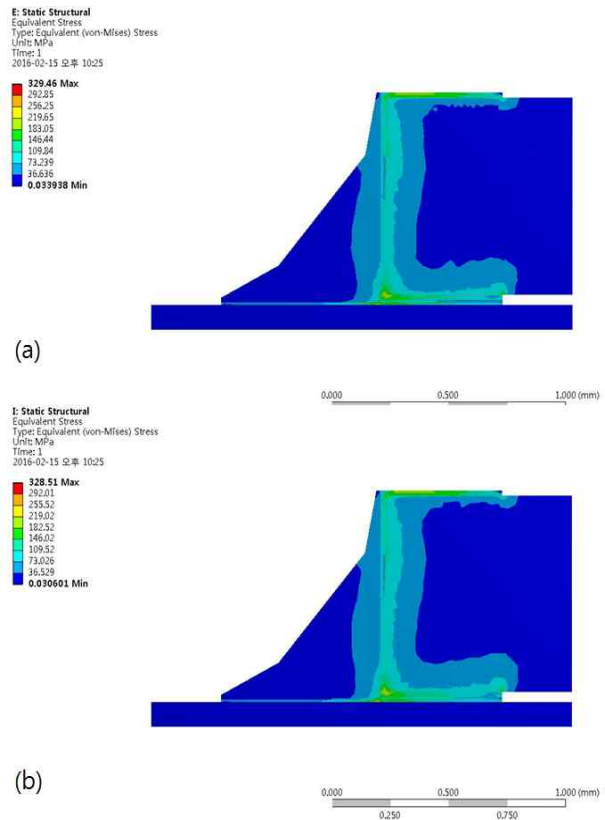


Fig. 8. Distribution of thermal-stress after thermal shock test (a) Solder joint with out IMCs (b) Solder joint with IMCs.

최대응력은 (a)와 (b) 각각 329.46MPa, 328.51MPa로 두 결과 모두 Cu layer와 Chip의 contact면의 edge에서 나타났으며 이는 해석상의 응력특이성 (Stress Singularity)으로 보인다.

그림 6의 단면관찰 결과를 토대로, 초기 균열이 발생한 솔더 하단 접합부에 IMCs의 유무에 따른 열응력 분포를 중점적으로 고려하기 위해 Scoping 기능을 이용하여 그림 9와 같이 표본점(sampling points)을 형성하였다. IMCs가 형성되지 않은 접합부 모델은 솔더-Cu Pad가 접하는 계면에서 설정하였으며, IMCs가 형성된 접합부 모델은 솔더-IMCs 계면에서 49-points의 동일한 표본점을 설정하였다.

이에 따른 응력 분포를 그림 10에 나타내었다. 유한요소 해석 결과, IMCs가 없는 솔더 접합부 모델에서 솔더-Cu Pad 계면의 최대 열응력은 117.35 MPa로 나타났으며, IMCs가 형성된 솔더 접합부 모델은 솔더-IMCs 계면에서 최대 129.5 MPa로 나타났다. 표본점들의 평균 열응력은 각각 93.23 MPa와 112.95 MPa로

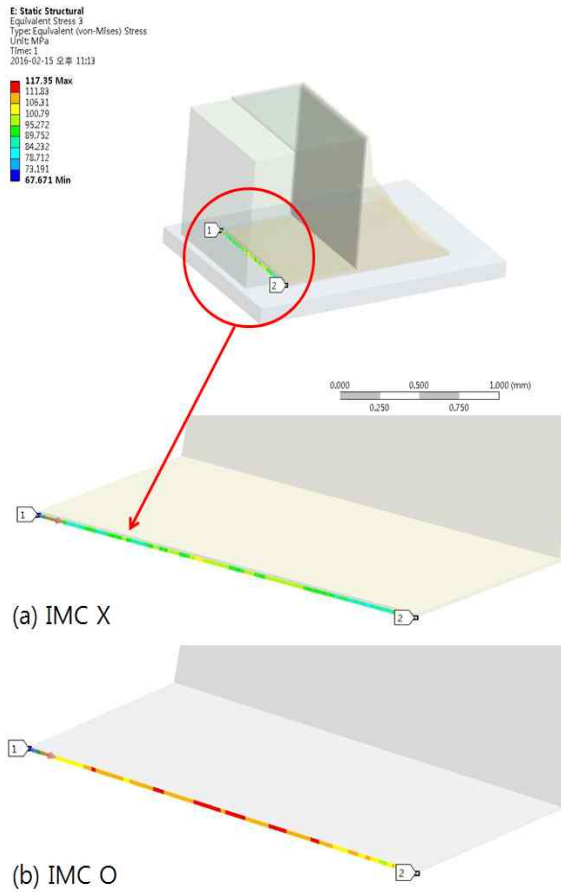


Fig. 9. Sampling points on Solder joint (a) points at solder-pad interface (b) points at solder-IMC interface.

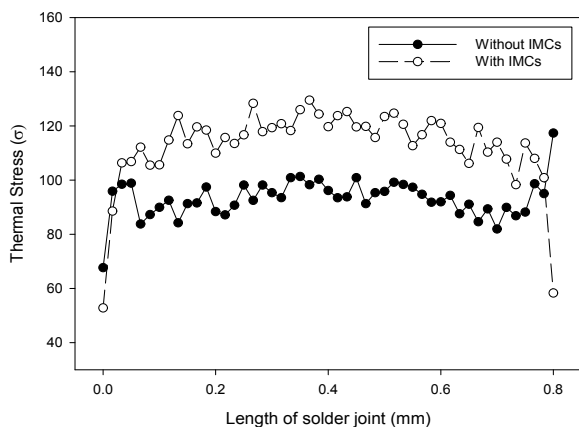


Fig.10 Thermal stress at sampling points.

IMCs가 성장할 경우 약 21% 증가한 것을 확인할 수 있었다. 따라서 열충격 시험에 따라 솔더 접합부에서

IMCs가 성장하게 되면 솔더와 IMCs의 접합 계면에서 열응력이 커지게 되며, $3\mu\text{m}$ 이상 성장할 경우 균열이 발생되고 전단력이 크게 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 MLCCs(C1608)의 SAC305무연 솔더 접합부의 접합특성 평가를 위해 열충격 시험을 수행하였다. 열충격 시험 후 IMCs의 성장과 균열을 확인하였으며, 유한요소해석을 통해 열충격 시험 전·후 나타나는 IMCs 성장에 따른 열응력분포 변화를 확인하였다. 또한 전단강도를 측정하여 접합특성 변화를 고찰하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 열충격 시험이 진행됨에 따라 솔더 접합부에서 Cu Pad와 SAC305 무연 솔더 계면에서 Cu-Sn 금속간 화합물이 형성되었으며, 열충격 시험 전 $1.33\mu\text{m}$ 이었으나 열충격 시험 1,800 사이클 후 $3.78\mu\text{m}$ 까지 성장하였다.
- (2) 열충격 시험 1,200 사이클 이후 IMC와 SAC305솔더 계면에서 균열이 확인되었으며, 계면을 따라 성장하다 솔더 내부로 진전되어 최대 $461\mu\text{m}$ 까지 성장하였다.
- (3) 전단력 측정 결과, 열충격 시험 전 28.6 N 이었으나, 1,200 사이클 이후 24.8 N으로 13%이상 감소하였고, 1,800 사이클에서는 22.3 N으로 22%이상 감소하였다. 또한 IMCs의 두께가 $3\mu\text{m}$ 이상이 되면 균열의 진전이 가속화되며 접합강도에 저하에 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (4) 유한요소해석 결과, 열응력은 열팽창계수와 탄성계수가 다른 이종재료간의 사이에서 높게 형성되었다. 이러한 열응력 분포를 통해 IMCs계면 부근에서의 균열 또는 파손의 가능성을 확인하였다.
- (5) 초기 균열이 발생한 계면 부근에서의 평균 열응력은 IMCs가 없는 접합부는 93.23 MPa, IMCs가 형성된 접합부는 112.95 MPa로 약 21%이상 증가한 양상을 보였다.

따라서, 열충격 시험이 진행됨에 따라 발생하는 IMCs층의 성장은 SAC305 무연 솔더 접합부의 기계적 특성저하 및 신뢰성 저하로 이어지므로 Cu-Sn계 금속간화합물 형성 메커니즘 및 제어 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 (주)창성의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 10044380)

REFERENCES

- [1] J. J. Soh, D. S. Shim, K. S. Kim, and W. B. Byun, *Trans. KIEE.*, **7**, 1289 (2009)
- [2] Y. J. Jeon, S. I. Son, D. S. Kim, and Y. E. Shin, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **23**, 611 (2010).
- [3] Y. E. Shin, S. J. Hwang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **16(6)**, 549 (2003).
- [4] J. H. Lee, N. H. Kang, C. W. Lee, and J. H. Kim, *Journal of KWS.*, **24(2)**, 17 (2006).
- [5] K. Y. Yu, S. M. Yang, and H. S. Yu, *KSAE 2009 Annual Conference*, (2009) p. 2637.
- [6] JEDEC Solid State Technology Association. "JESD22-A104C." Temperature cycling (2005).
- [7] JIS Z 3198-7, *Translated and Published by Japanese Standards Association* (2003).
- [8] E. K. Lee, C. W. Kim, *Korean Society Of Precision Engineering* (2009) p. 197.
- [9] I. Plotog, T. Cucu, B. Mihailescu, G. Varzaru, P. Scasta, and I. Busu, *Electronics and Telecommunications (ISETC), 9th International Symposium on. IEEE*, (Bucharest, Romania, 2010) p. 421.
- [10] Pang, H. L. John, and D. Y. R. Chong. *Advanced Packaging, IEEE Transactions*, **24**, 499 (2001).
- [11] B. H. Liou, C. M. Chen, R. H. Horng, Y. C. Chiang, and D. S. Wu, *Microelectronics Reliability*, **52.5**, 861 (2012).
- [12] C. C. Lee, P. J. Wang, and J. S. Kim, *Electronic Components and Technology Conference, 2007. ECTC'07. Proceedings. 57th. IEEE*, 648 (2007).
- [13] Y. J. Xu, L. Q. Wang, F. S. Wu, W. S. Xia, and H. Liu, *Electronic Packaging Technology (ICEPT), 14th (IEEE)*, (2013) p. 959.
- [14] Y. Tian, J. Chow, X. Liu, and Y. P. Wu, *Journal of electronic materials*, **42**, 230 (2013).
[DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-012-2302-4>]
- [15] W. S. Hong, W. S. Kim, N. C. Park, and K. B. Kim, *Journal of KWJS*, **25**, 82 (2007).
- [16] G. T. Lim, B. J. Kim, K. W. Lee, M. J. Lee, Y. C. Joo, and Y. B. Park, *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, **15**, 17 (2008).