

자동차 전장모듈대응을 위한 Sn3.5Ag와 Sn0.7Cu 솔더 접합부의 물리적 특성 및 복합진동을 통한 신뢰성 평가

- 자동차 전장모듈의 접합 신뢰성 연구 (II) -

고용호* · 방정환* · 김정환* · 이창우*[†]

*한국생산기술연구원 마이크로조이닝센터

Evaluation of Property and Reliability of Sn3.5Ag and Sn0.7Cu Pb-free Solder Joint by Complex Vibration for Application of Automobile Electric Module

Young-Ho Ko*, Jung-Hwan Bang*, Jeong-Han Kim* and Chang-Woo Lee*[†]

*Microjoining Center, Korea Institute of Industrial Technology

[†]Corresponding author : cwlee@kitech.re.kr

1. 서 론

친환경 소재사용에 대한 환경규제 법안(RoHS 등)은 산업적용범위가 보다 넓어지고 있다. 일반 가전을 비롯하여 노트북, 휴대전화 등의 전자모듈의 제조에 적용되는 무연솔더(Pb-free solder)는 Sn-Ag계를 중심으로 Sn-Cu계, Sn-Bi계 등에 제3의 원소 혹은 제4의 원소를 미량 첨가하는 연구들이 많이 시도되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 지난 10여 년간 많은 전자제품이 무연화되었고 성공적으로 수행되어 왔다¹⁻²⁾. 그러나 환경규제의 움직임이 보다 많은 산업들로 진행됨에 따라 무연솔더를 적용하는 많은 전자모듈들이 보다 높은 물성과 신뢰성을 요구받게 되었다. 가전제품의 경우 국제전기전자협회(IEC)나 일본 전기전자협회(JEDEC)가 제시하고 있는 열충격 특성, 고온고습특성 등의 기준에 비교하여 자동차에 사용되어지는 전장모듈에 대해서는 그 신뢰성 기준이 매우 높은 조건을 요구하고 있는 것이다. 이전강좌에서 기술하였듯이 일반 기계적 특성시험(전단강도시험, peel test 시험 등) 과 일반 신뢰성 시험(열 충격시험, 항온항습시험 등)으로는 자동차의 사용환경 중에 일어나는 진동, 충격 등의 외부적 인자를 반영할 수 없어서 실제 파괴모드에 이르는 환경을 가속적으로 제공할 수 없다³⁻⁴⁾. 일반적으로 자동차 전장모듈에 적용하는 Sn-Pb공정솔더의 신뢰성은 진동에 대한 평가가 일부 이루어져 있으나 무연솔더의 소재 특성을 반영한 것은 아님으로 복합진동시험 등을 포함하는 정밀평가가 필요하다⁵⁻⁷⁾.

더욱이 ELV (End of Life Vehicle) 법안이 2016년 발효될 예정이어서 자동차 전장모듈에 대한 무연솔더의 적용이 산업적으로 시급한 현안으로 대두되어 있고 복합 환경에서의 신뢰성은 그 평가에 대한 재현성, 검증성이 여전히 제기되고 있어 종합적 신뢰성 평가를 통한 적용 검증이 필요한 상황이다. 특히 현대기아차(주), Toyota, GM 등의 선도 자동차 메이커들의 자동차 전장관련 모듈의 신뢰성 기준에 대하여 조금의 차이는 각자 있으나 일반적으로 엔진룸에 사용되는 전장모듈을 기준으로 온도 155°C, 습도 90%, 진동 5G이상을 제시하고 있어 기존의 가전제품에 대한 신뢰성 기준과 비교하여 매우 높은 신뢰성 기준을 적용하고 있다.

이에 본 연구에서는 산업적으로 가장 많이 사용되고 있는 Sn-3.5Ag의 솔더와 비교적 중고온계로 분류할 수 있는 Sn-0.7Cu의 솔더를 사용하여 복합환경시험에 따른 신뢰성 평가를 연구한 결과를 기술한다. 또한 ENIG (Electroless nickel immersion gold)와 OSP (Organic Solderability Preservative)의 표면처리와 Aging time에 따른 미세조직의 변화를 관찰하고 이러한 외부적 인자들이 파괴에 미치는 영향을 기술하고자 한다.

2. Sn3.5Ag와 Sn0.7Cu 솔더를 적용한 시편 제조 및 복합 환경시험 조건

솔더링 샘플은 Sn3.5Ag, Sn0.7Cu (각 wt.%)의 공정솔더 조성에 직경 450 μm 의 솔더볼을 이용하였다.

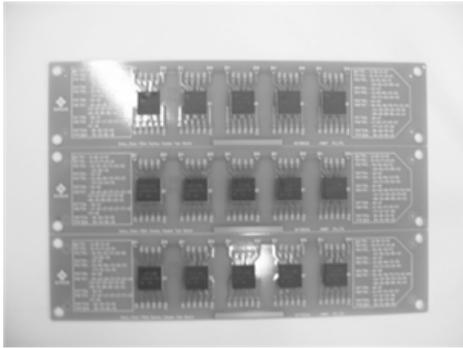


Fig. 1 Plane image of fabricated test sample module

Chip의 Cu pad는 ENIG (Electroless Nickel/Immersion Gold)로, PCB 보드의 Cu 패드는 OSP (Organic Solderability Preservative)로 표면처리하여 실험하였다. Reflow 공정은 peak temp.를 250℃, melting temp. 구간speed는 45sec로 수행하였다. 그림 1은 PCB 위에 각각의 솔더볼을 이용하여 chip이 접합된 시험샘플의 평면도를 나타내고 있다. 기계적 물성을 평가하기 위하여 시험 중 전단 강도 시험을 통하여 시험 전 후의 접합 강도를 비교, 평가하였다.

시험에 사용된 복합 환경진동시험기는 Espec사의 챔버(PVL-3KPH)와 Shinken사의 진동자(G-120N & G23-130)를 이용하였으며 챔버의 온도조건은 85℃와 150℃ 두 조건에서 수행하였다. 또한 진동발생기위에 시험편의 장착을 위해 특수 지그를 제작, 사용하였으며 이 지그의 평면에서 6mm 떨어진 거리에 Z축 방향으로 평가 보드를 탑재한 후 네 모서리에 볼트를 체결하여 고정하여 공진을 평가한 후에, 이의 제거 조건에서 시험하였다. 진동시험은 주파수 10~1,000Hz, 진동가속도는 27.8m/s²에서 시험하였으며 고온 진동시험은 Z축에 대해 120hrs 동안 수행하였다. 이때 60시간과 120시간에서 평가보드를 저항측정기를 이용하여 ((Multi-Meter 3700, Keithley) 각 보드의 전기저항을 측정, 비교하였다. 이후 chip의 전단강도시험은 전단속도 200mm/s로 각 22회 측정하여 최고값과 최저값을 제외한 평균으로 측정하였다. 그림 2는 복합 환경진동시험의 모식도이다. 고온의 챔버내에서 실시간으로 저항값을 측정하여 파괴까지의 시간을 측정하도록 하였다.

3. 고온 복합 환경진동시험에 따른 전기저항의 변화

85℃와 150℃의 두 온도에서 진행된 복합 진동 시험에 따른 전기 저항의 변화를 그림 3에 나타내었다. 시험 전, Sn-3.5Ag솔더와 Sn-0.7Cu솔더의 초기 저항

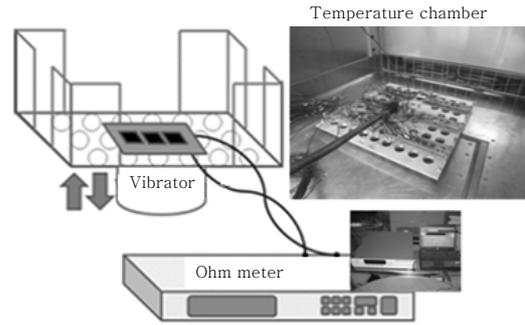


Fig. 2 The schematic diagram of complex vibration test

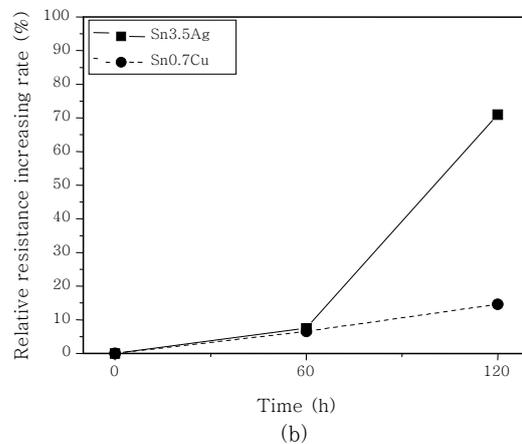
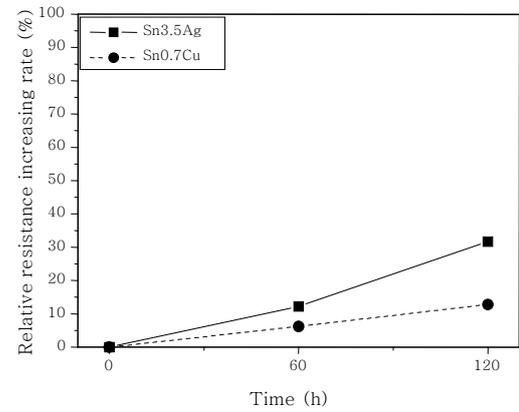


Fig. 3 Electrical resistance changes during the complex vibration test at (a) 85℃ and (b) 150℃

은 0.1Ω의 값을 나타내었으며 시험 시간이 증가하면서 저항의 증가가 나타났다. 85℃에서 시험된 솔더조인트의 전기저항은 비교적 완만한 저항의 증가를 나타내었다. 이는 기존의 가전 및 휴대 전자기기에 사용되어 안정적 솔더로 인정을 받고 있는 Sn-3.5Ag 솔더와 비교적 증고는 솔더로 각광받고 있는 Sn-0.7Cu 솔더 모두에게서 나타났으며 복합 환경시험의 시간이 120시간 경과한 후에 각각 32%와 13%가 증가한 32Ω과 13Ω

으로 측정되었다. 그러나 자동차 전장의 사용 환경 중, 엔진룸에 적용되고 있는 150°C의 환경에서 복합 진동 시험을 수행한 결과, Sn-3.5Ag 솔더를 적용한 솔더의 조인트는 초기 저항 대비 71% (71Ω)의 급격한 증가를 나타내었다. 반면 Sn-0.7Cu는 85°C 조건과 유사한 15%의 증가를 나타내어 비교적 고온에서 안정적 신뢰성을 나타냄을 알 수 있다.

이러한 급격한 전기적 저항 증가의 요인으로 5절에 기술될 금속간 화합물 (IMCs, Intermetallic Compounds)의 형성과 깊은 연관이 있을 것으로 추정되고 이러한 결과는 이전의 다단 리플로우 공정에서의 전기적 특성평가와 시효처리에 따른 전기적 저항증가에 대한 연구⁸⁾와 같은 경향의 연구결과를 나타내고 있다.

열적 에너지의 증가에 따라 Cu와 Sn이 상호 확산하여 형성되는 IMCs의(Cu₆Sn₅, Cu₃Sn 등) 조대화에 따라 전기적 저항의 증가를 야기하고 Sn-3.5Ag의 경우 이러한 IMCs의 스폐링 현상과 함께 조대한 판형의 Ag₃Sn 화합물이 전기저항의 증가에 보다 기여한 것으로 사료된다. 단, Ag₃Sn 화합물의 전기적 저항에 대한

영향은 Cu-Sn의 화합물(Cu₆Sn₅, Cu₃Sn)과 분리하여 정밀 연구의 필요성이 있다. 화합물의 영향 등을 고려하여 전기적 물성에 대해서는 150°C의 고온 환경에서 Sn-0.7Cu솔더가 Sn-3.5Ag 솔더에 비교하여 복합 환경진동시험에 대해서 보다 안정적 신뢰성을 나타내고 있는 것이다.

4. 고온 복합 환경진동시험에 따른 전단강도의 변화

복합 진동 시험에 따른 전단강도(접합강도)의 변화가 그림 5에 나타내었다. 복합 진동 시험 전 접합 초기의 강도는 Sn-3.5Ag는 42.72 kgf, Sn-0.7Cu는 32.49 kgf로 Sn-0.7Cu가 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이는 Cu₆Sn₅, Cu₃Sn와 같은 IMCs의 형성이 초기에 접합강도를 유지시켜주는 역할을 하는데 Sn-0.7Cu 솔더의 경우가 Sn-3.5Ag에 비교하여 약 60%미만의 IMCs를 형성하고 있고 솔더링성에 있어서의 요소인자 인 젓음성, 퍼짐성 등이 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있는 것에 기인한다고 사료된다.

85°C 온도조건에서 수행한 복합 진동시험 후에 접합 강도의 변화를 살펴보면 Sn-3.5Ag 솔더와 Sn-0.7Cu 솔더 모두에서 감소하는 경향은 분명하나, 큰 변화가

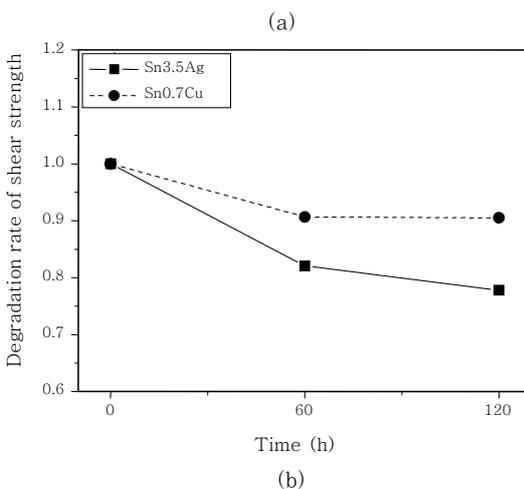
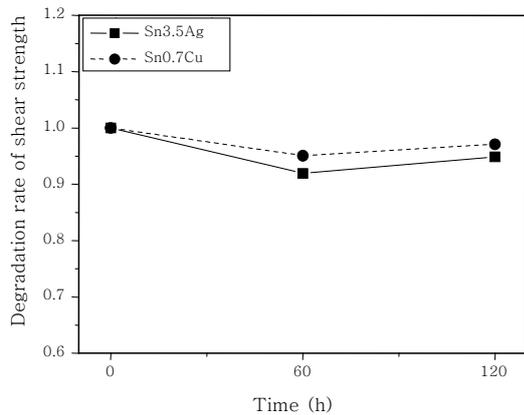
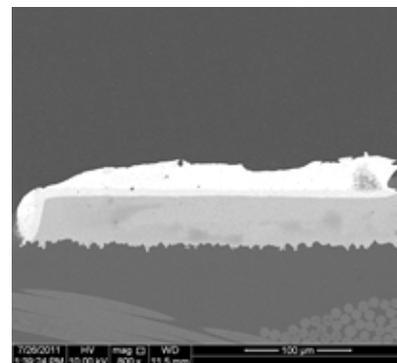
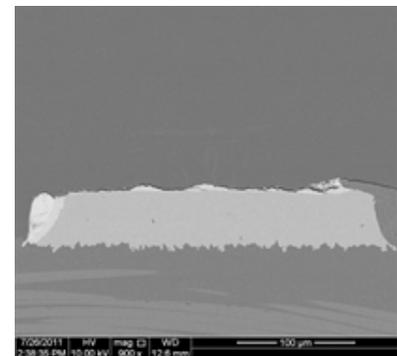


Fig. 4 Shear strength changes during the complex vibration test at (a) 85°C and (b) 150°C



(a)



(b)

Fig. 5 Cross section SEM images of chip shearing test; (a) as reflow sample and (b) after complex vibration test

없었으며 오차범위를 10%정도 벗어난 범위에서 변화를 나타내고 있다. 반면 150°C에서의 접합 강도의 변화를 보면 Sn-3.5Ag 솔더의 강도 저하가 두드러지게 나타난 것을 확인 할 수 있다. 150°C에서 복합 진동시험을 한 후 chip의 전단강도는 Sn-3.5Ag솔더의 경우에는 초기 강도대비 23% 이상의 접합강도 저하를 나타내고 있는 반면, Sn-0.7Cu솔더의 경우에는 초기 강도 대비 10%의 강도저하를 나타내고 있다.

이는 파괴가 발생하는 경로차이에 기인한다고 사료된다. 그림 5는 복합 진동시험을 한 후에 chip의 전단강도 측정을 한 단면사진이다. 전단시험의 방향은 사진의 왼쪽에서 오른쪽으로 이루어졌다. Chip이 전단된 단면이 리플로우공정 직후의 초기 상태(복합 환경시험이 진행되지 않은 상태)에서는 솔더의 내부로 진행됨을 알 수 있고 복합 환경진동시험이 120시간 진행된 후의 샘플에서는 크랙이 솔더와 IMC (Cu_6Sn_5) 계면사이에서 집중적으로 진행된 것을 확인 할 수 있다. 단면사진의 결과에서 IMC가 파괴에 매우 중요한 원인을 제공하는 것을 알 수 있다. 물론 초기 상태에서도 IMC는 존재하나 이때는 계면사이의 Cu와 Sn의 결정학적 불 합치성 (mismatch)이 적어서 계면의 접합성이 조대한 경우에 비교하여 매우 우수하고 계면에 존재하는 응력상태도 조대한 상태에 비교하여 안정적으로 사료된다. 그러나 조대한 IMC의 경우에는 계면에서의 균열전파에 대한 저항성이 매우 낮아지게 됨으로서 파괴에 이르는 저항성이 현저히 감소한 것으로 생각된다. 이는 복합 환경 시험 후에 나타나는 전기전향의 증가와 동일한 경향을 보이는 것으로 Sn-0.7Cu솔더가 Sn-3.5Ag 솔더에 비교하여 복합 진동 시험에 대하여 상대적으로 좋은 신뢰성을 나타낸 결과였다.

한편 150°C에서 120시간 복합 진동시험을 한 후 OSP 표면처리를 한 PCB위의 Chip joint 부에 미세 조직을 관찰한 결과가 그림 6에 나타나 있다. Sn-3.5Ag 솔더의 경우에는 Cu_6Sn_5 IMC가 4.8 μm 에서 6.0 μm 이상으로 조대하게 성장하여 있는 것을 관찰할 수 있으며 이러한 조대한 IMC의 성장으로 파괴에 저항성이 낮아짐을 알 수 있다. 반면, Sn-0.7Cu 솔더의 경우에는 같은 조건의 복합 진동시험을 한 후에 그림 6의 (b)에서 보이는 것과 같이 3 μm 에서 4 μm 의 상대적으로 얇은 Cu_6Sn_5 IMC 층을 나타내어 복합 진동시험에 대한 신뢰성이 보다 우수한 것을 알 수 있다. 복합 진동시험 후에 파괴의 모드에 대해 기존의 연구결과로 Date9) 등이 발표한 논문(에 기인하면 시효처리 된 시편의 접합강도의 저하는 IMC의 증가에 그 원인이 있다고 규명한 바와 같이 본 연구에서도 동일한 경향을 나타내었다고 볼 수 있다.

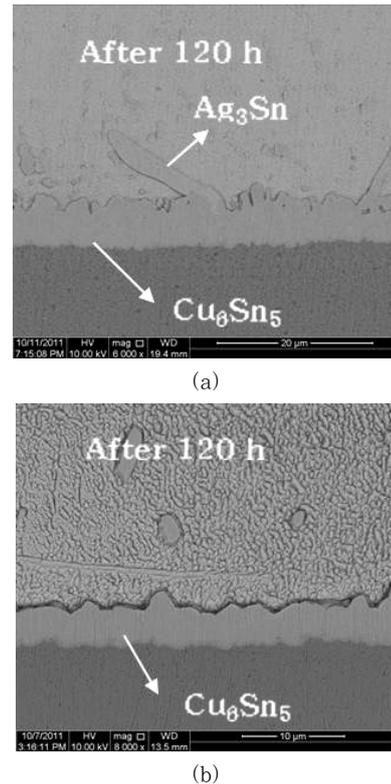


Fig. 6 Cross sectional microstructure image SEM images of (a) Sn-3.5Ag and (b) Sn-0.7Cu lead-free solders at PCB side after complex vibration test under 150°C

5. 제 언

자동차 산업에 적용하는 전자모듈의 신뢰성에 대한 평가 및 공정에 대한 개선은 비단 복합 진동시험만에 국한되어 있지는 않다. 내 충격성, 미세구조변화에 따른 기계적 강도변화 등 많은 신뢰성 인자를 검증해야 무연솔더의 안정적 적용을 기대할 수 있으리라 생각한다. 그러나 기존의 일반 전자제품에 비교하여 온도, 습도, 외부적 진동, 충격 등 보다 많고 복잡한 외부 사용 환경이 고려되어야 하기 때문에 전류인가를 포함한 복합 환경의 조건에서 기계적, 전기적 물성변화를 관찰하여 사용자 조건에 만족하는 공정과 소재가 개발되어야 할 것이다. 특히 고온에서 보다 안정적인 무연솔더의 개발을 통하여 미세구조의 변화에도 만족할 만한 신뢰성을 확보하기 위한 많은 연구가 필요한 상태라 생각한다.

감사의 글

본 기고에서 고온 진동시험에 대한 SMT공정 data는 지식경제부에서 지원하는 글로벌 국제공동연구의 일환으로 진행된 결과임으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Y. K. Jee, Y. H. Ko, and J. Yu, *J. Mater. Res.*, "Effects of Zn addition on the drop reliability of Sn-3.5Ag-xZn/Ni(P) solder joints", *J. Mater. Res.*, **22(10)** (2007), 1879
2. B. I. Noh, S. H. Won, and S. B. Jung, "Study on Characteristics of Sn-0.7wt%Cu-Xwt%Re Solder", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, **14(4)** (2007), 21
3. R. W. Johnson, J. L. Evans, P. Jacobsen, J. R. Thompson, and M. Christopher, "The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics", *IEEE Trans. Electron. Package. Manuf.* **27(3)** (2004), 164
4. J. H. Choi, S. W. Jun, H. J. Won, B. Y. Jung, and T. S. Oh, "Electromigration Behavior of the Flip-Chip Bonded Sn-3.5Ag-0.5Cu Solder Bumps", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, **11(4)** (2004), 43
5. Y. S. Chen, C. S. Wang, and Y. J. Yang, "Combining vibration test with finite element analysis for the fatigue life estimation of PBGA components", *Microelectron. Reliab.*, **48** (2008), 638
6. J. M. Song, T. S. Lui, G. F. Lan, and L. H. Chen, "Resonant vibration behavior of Sn-Zn-Ag solder alloys", *J. Alloy. Compd.*, 379 (2004)
7. F. X. Che and John H. L. Pang, "Vibration reliability test and finite element analysis for flip chip solder joints", *Microelectron. Reliab.*, **49**, 754 (2009)
8. S. K. KANG, W. K. CHOI, M. J. YIM, and D. Y. SHIH, "Studies of the Mechanical and Electrical Properties of Lead-Free Solder Joints", *J. Electron. Mater.*, **31(11)** (2002), 1292
9. M. Date, T. Shoji, M. Fujiyoshi, K. Sato, K.N. Tu, "Ductile-to-brittle transition in Sn-Zn solder joints measured by impact test", *Scripta Materialia*, **51** (2004), 641



- 고용호
- 1977년생
- 한국생산기술연구원
- 무연솔더, 플렉서블 기반 집합
- e-mail: yonghoko@kitech.re.kr



- 김정한
- 1956년생
- 한국생산기술연구원
- 마이크로전자집합
- e-mail : jhkim@kitech.re.kr



- 방정환
- 1975년생
- 한국생산기술연구원
- 무연솔더, SMT 공정
- e-mail: nova75@kitech.re.kr



- 이창우
- 1967년생
- 한국생산기술연구원
- 무연솔더, WLP, TSV
- e-mail : cwlee@kitech.re.kr