

# 자동차 전장모듈의 적용을 위한 Sn3.5Ag, Sn0.7Cu 및 Sn-5.0Sb 솔더와 이종공정에 대한 접합 신뢰성 연구 (I)

강명석\* · 방정환\*\* · 이창우\*\*†

\*과학기술연합대학원대학교 전자패키징공학과

\*\*한국생산기술연구원 용접접합기술센터

## Joint Reliability of Sn3.5Ag, Sn0.7Cu and Sn5.0Sb Pb-free Solder and Hybrids Joining Process for Application of Automobile Electric Module

Myong-Suk Kang\*, Jung-Hwan Bang\*\* and Chang-Woo Lee\*\*†

\*Dept. Electronic Packaging, University of Science & Technology

\*\*Advanced Welding & Joining Technology, Korea Institute of Industrial Technology

†Corresponding author : cwlee@kitech.re.kr

### 1. 서 론

지난 20여년간 WEEE, RoHS 등과 같은 친환경을 추구하는 법안들의 발효에 따라 전자모듈제조에 있어서 무연(Pb-free)솔더에 대한 연구가 진행되었다<sup>1-2)</sup>. Sn-Pb 공정 솔더의 물성에 비해 젖음성, 퍼짐성, 솔더링성 등의 기초물성이 열악한 무연솔더는 백색가전, 휴대용 전자제품(노트북, 휴대용 전화기) 등을 중심으로 10여년간의 급속한 발전을 이루면서 솔더의 신뢰성 평가를<sup>3-4)</sup> 바탕으로 무연화가 성공적으로 진행되어 왔다. 친환경 규제의 산업적 범위가 확대됨에 따라 자동차 전장모듈에도 무연솔더의 적용을 요구하는 ELV (End of Life Vehicle) 법안이 2016년 1월 발효될 예정이다. 이 법안은 폐차에 대한 제조사의 책임을 규정한 법안으로 자동차 전장모듈 (Electric Control Unit, ECU)의 전반에 있어 무연솔더를 적용하는 것을 골자로 하고 있다.

자동차 전장모듈의 경우에는 사용환경이 기존의 백색가전 및 휴대용 전자제품에 비교하여 매우 열악한 조건이기 때문에 기존의 무연솔더 물성에 보다 증진된 우수 물성이 요구되고 있다. 예를 들어 자동차의 오디오, 계기판, 네비게이션 등과 같은 전장모듈이 작동되는 실내 환경은 온도와 습도가 일반 가전제품과 비슷한 환경을 지니고 있지만, 운행 중 잦은 진동영향을 받게 되고 더욱이 엔진룸 안에 장착되어지는 IGBT module 등은 온도가 155°C에 이르고 습도도 일반 전자제품의 환경에 비교하여 매우 높은 90%까지도 이르게 되며 내 충

격 및 고진동(최대 15-20G이상)의 환경에 노출되어 있다. 또한 자동차의 사용수명은 일반 전기제품과 달리 10년 이상을 요구하고 있어 장기적 신뢰성에 대한 중요도는 어떠한 전자모듈에 비교하여 매우 높다<sup>5,6)</sup>.

현재까지 IPC, JEDEC 등이 제시하는 전자 모듈의 평가기준, 특히 기계적 특성시험 (전단강도시험, peel test 시험 등) 과 일반 신뢰성 시험 (열 충격시험, 항온항습시험 등) 만으로는 실제 파괴모드에 이르는 환경을 가속적으로 제공할 수 없어 이에 대한 정확한 신뢰성을 평가할 수 없다. 더욱이 가전제품에 사용되는 무연솔더로는 고온 사용 환경을 모두 반영할 수 없기 때문에 고 용점의 솔더가 적용되어야 하며 이러한 고 용점의 솔더에 대한 기본 물성과 신뢰성을 판단할 기본 평가기준이 필요하다. 현재까지 자동차 전장모듈에 적용하는 솔더는 일반 Sn-Pb공정 솔더로서 진동에 대한 평가가 일부 이루어져 있어도 고온 무연솔더의 소재 특성을 반영하여야 하기 때문에 무연을 적용하는 자동차 전장모듈에 대한 평가로는 볼 수 없다<sup>7-9)</sup>. 사용 환경에 대한 신뢰성을 정확히 판단하기 어렵다. Table 1에 자동차 신뢰성 평가에 대한 일반적 평가기준을 가전제품의 경우와 비교하여 나타내었다.

본 기술 강좌에서는 산업적으로 널리 사용되고 있는 Sn3.5Ag, Sn0.7Cu 및 Sn5.0Sb 솔더를 적용하여 자동차 전장모듈 제조에 대한 joint 부의 열 충격, 열 사이클 시험 평가를 한 결과와 고 신뢰성을 위해 접착방

**Table 1** Comparing of using condition for each industrial field

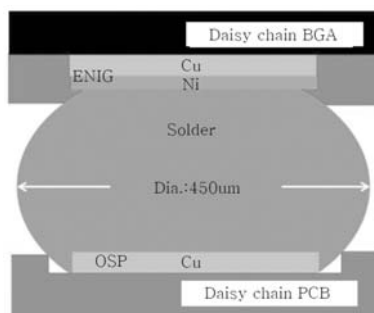
Parameter	Consumer	Industrial	Automotive
Temperature	0℃~+40℃	-10℃~+70℃	-40℃~+155℃
Operation time	1~3years	5~10 years	up to 15 year
Humidity	Low	Environment	0~100%
Tolerated failure rates	3%	<<1%	Target: zero failure
Supply	up to 2 year	up to 5 year	up to 30 year

Ref. Robert Bosh GmbH

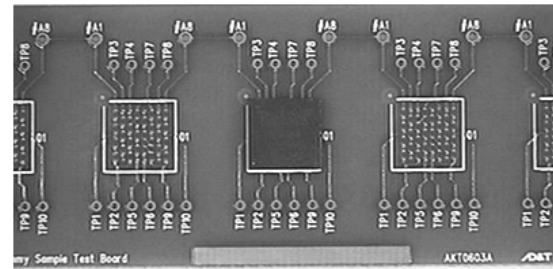
식과 솔더링을 결합한 방법으로 제조된 joint 부에 대한 기계적 강도를 (I)편에 소개하고 (II)편에 복합 환경시험의 결과와 접합강도의 변화 등에 대해 기술하도록 하겠다.

### 2. Sn3.5Ag, Sn0.7Cu 및 Sn5.0Sb 전장용 솔더링 샘플

본 기술 강좌에서 기술하는 솔더링 샘플은 Sn3.5Ag, Sn0.7Cu 및 Sn5.0Sb(각 wt.%)의 조성에 직경 450 μm의 솔더볼을 이용하여 제작된 것이다. BGA chip의 Cu 패드 표면처리는 ENIG(Electroless Nickel/Immersion Gold)를 적용하였고, PCB 보드의 Cu 패드는 OSP (Organic Solderability Preservative) 표면처리를 적용하여 나타난 결과이다. 리플로우 공정은 peak temp. 를 245℃에서 255℃로 하고, melting temp. zone은 50sec로 하여 제작하였다. 또한 BGA chip 과 PCB는 daisy chain을 형성하여 전기의 통전 및 전기저항을 측정할 수 있도록 제작하였다. 이의 개략도는 Fig. 1에 나타나 있다. Fig. 2는 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.



**Fig. 1** The schematic illustration of solder joint as joining

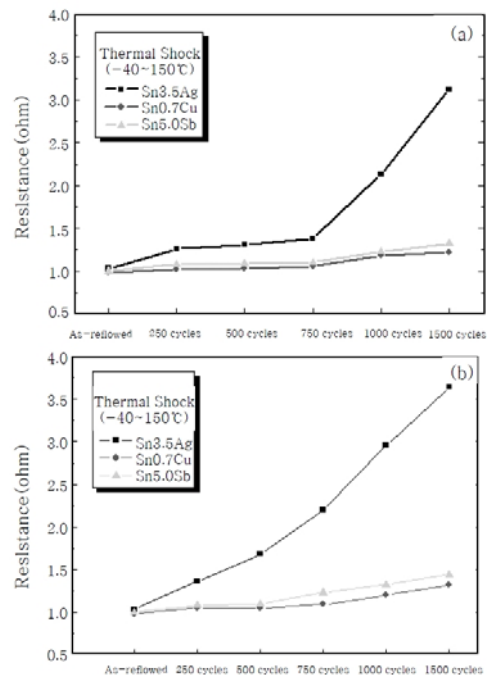


**Fig. 2** Plane image of fabricated test sample module

전단 강도 시험은 DAGE-4000(Nordson) 장비를 사용하였으며 전단속도는 200mm/s, 전단강도기의 팁은 PCB의 솔더 마스크에서 50mm 높이에 위치시켜 전단 시험을 진행하였다.

### 3. 신뢰성 시험에 따른 전기저항의 변화

일반 전기제품에 장착되는 모듈의 신뢰성 평가는 가속시험의 시험조건을 -40℃에서 120℃까지의 온도범위에서 열 충격시험이나 열 사이클 시험을 하는 것이 가장 가혹한 조건으로 제시되고 있으나 자동차 전장모듈의 경우에는 -40℃에서 150℃까지의 온도구간에서 시험을 수행하는 것이 제시되고 있다. Fig. 3은 -40℃에서 150℃의 온도구간에서 Sn3.5Ag, Sn0.7Cu 및



**Fig. 3** Changing of electric resistance as increase cycles in thermal shock test (a) and thermal cycle test (b) on various Pb-free solders

Sn5.0Sb 솔더 조인트부에 대해서 열 충격 시험과 열 사이클 시험을 수행한 결과를 시험 사이클 수에 대비 저항증가 비율에 대하여 나타낸 그래프이다. 컴퓨터, 냉장고 등 일반 전자제품의 전자모듈에 적용하고 있는 120℃까지의 온도구간에서 보고되고 있는 Sn3.5Ag의 우수성이 150℃까지의 온도구간에서는 전기저항이 매우 급격히 증가하는 물성을 나타내고 있다. 기본적으로는 파괴의 원인<sup>10)</sup>이 계면에서 형성되고 있는 균열의 진전 방향과 각도 및 파단면을 관찰한 결과, 솔더 내부 미세 구조에서 Ag<sub>3</sub>Sn과 같은 금속간화합물과 계면에서의 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 과 같은 금속간화합물 120℃의 온도구간에 비해의 매우 급속히 증가한 것이 원인으로 추정되고 있다. 특히 열 충격시험에서 나타나는 바와 같이 750cycles까지는 전기저항의 증가가 안정적으로 낮은 상태를 보이다가 그 이후의 구간에서 매우 급격히 증가하는 것은 이미 충분한 균열발생 및 전파의 에너지가 축적되어 있음을 나타내고 이는 임계 환경조건까지는 안정성을 보이는 Sn3.5Ag솔더가 가혹환경에서는 파괴에 이르는 시간이 다른 솔더에 비교하여 매우 짧아지는 것을 의미한다. 젖음성, 퍼짐성이 우수하고 접합강도와 같은 기계적 강도도 비교적 우수한 Sn3.5Ag 솔더는 일반 전기제품의 모듈에 많이 적용되어 왔으나 자동차 전장용 모듈제조에 있어서는 타 솔더대비 적용가능성이 낮은 것으로 보인다.

한편, 금속간 화합물의 성장모형도 물성에 중요하게 기여하는 것으로 사료된다. 판상 혹은 침상으로 성장하게 되는 경우 균열전파에 대해 저항하는 힘이 낮아지게 됨으로 작은 구형으로 성장하는 것에 비교하여 기계적 물성에 기여가 낮을 것으로 판단된다. 이는 특히 균열의 전파방향이 판상 혹은 침상의 금속간 화합물과 평행하게 진행되는 경우에는 금속간 화합물과 솔더모재(matrix)와의 결합력에 따라 다소 차이는 있을 수 있으나 균열전파에 대한 저항이 미흡할 것으로 사료된다.

또한 Cu확산은 금속간 화합물의 형성에 대해 중요한 형성기전인데 Sn3.5Ag의 경우에는 확산의 구동력이 Sn0.7Cu에 비교하여 높다는 것이다. 이는 Sn에 대한 Cu의 공정조성이 0.8wt%Cu여서 Cu 원소가 Sn0.7Cu 솔더로 확산하는 구동력 (diffusion driving force)이 상대적으로 적고 이로 인해 같은 열적 에너지 입력조건(input condition)에서는 금속간 화합물이 보다 적게 형성되는 것으로 사료된다.

향후에는 신뢰성 시험에 대해 사용조건에 대한 보다 정확한 파괴모드를 규명하기 위해서는 전기적 입력, 모재의 잔류응력(residual stress) 등이 반영된 시험을 진행할 필요가 있다.

#### 4. 솔더링과 NCP를 결합한 hybrid 표면실장

기계적 강도의 증진을 통하여 장기적 신뢰성을 증진시키고자하는 노력도 현재 연구되어지고 있다. NCP(Non-conductivity paste)를 활용하여 접합강도를 늘리고자하는 노력은 반도체 웨이퍼의 No flow underfill공정을 표면실장에 적용하는 연구 분야로서 SMT공정에서 프린팅고정과 마운팅 공정사이에 NCP dispensing 공정을 삽입하여 진행하는 것으로 최근 발표되기 시작하였다.

Fig. 4는 SAC305(Sn3.0Ag0.5Cu)솔더와 직접 제조된 NCP를 적용한 hybrid실장의 공정을 보여주는 모식도와 주요 공정별 평면 이미지를 나타내고 있다. 이때 SCA305의 powder size는 20-35μm였으며 reflow 공정의 예열은 150-200℃에서 100sec를 유지하였고 peak temp.는 245℃였고 용융지속구간(220℃이상)에서 50sec동안 유지, 수행하였다.

Hybrid SMT 공정에서 사용된 NCP는 에폭시 레진(Bisphenol A)을 기본 레진으로 사용하였고 경화시스템으로 anhydride/imidazole을 이용하였다. 구체적인 함량비는 나타내지 않았으나 주요 formulation design은

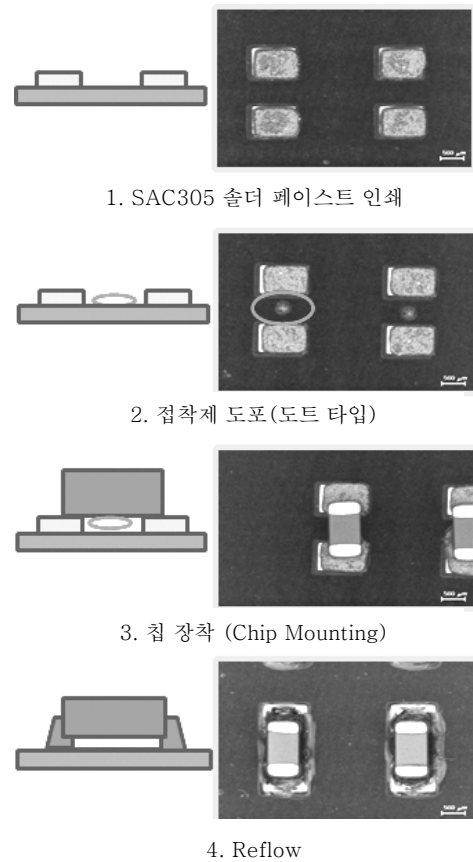
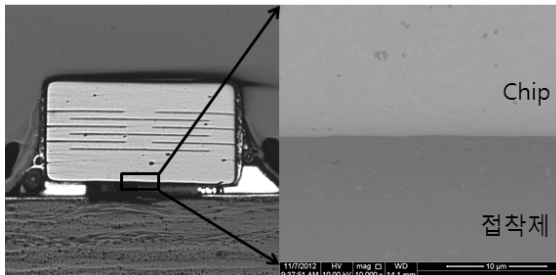


Fig. 4 Schematic illustration and plan view images on hybrid SMT processing

**Table 2** NCP formulation design

Recipe			
1	Resin	EP-828	EEW 187
2	Hardener	MHHPA	MW 168
3	Catalyst	2MZ-A	
4	Coupling	A-189	

**Fig. 5** Cross section image of chip on board after hybrid SMT processing and magnified image of interface between chip and NCP

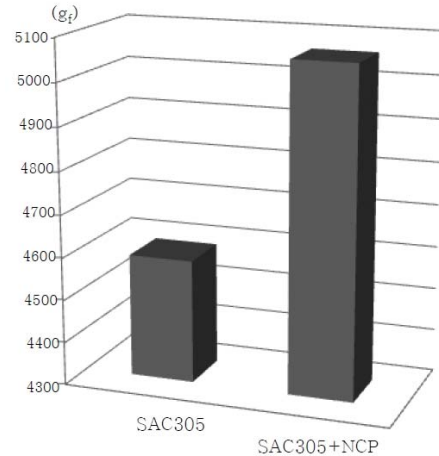
약어로 Table 2에 나타나 있다.

Hybrid SMT 접합 공정 후 단면과 NCP접합부의 단면 확대 이미지가 Fig. 5에 나타나 있다.

좌측 광학이미지의 오른쪽하단에 보여지는 것과 같이 에폭시 레진을 기반으로하는 NCP의 간섭으로 SAC305 particle이 일부 완전 용융되지 않은 모습을 나타내고 있으나, NCP와 Chip배면에 접착은 기공없이 매우 우수하게 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 잔여 particle image는 솔더 내부에 있는 flux와 에폭시 기반의 NCP가 상호작용하여 솔더에 대한 열전달이 충분히 이루어지지 않은 것으로 사료된다.

Hybrid SMT공정 후에 접합강도 측정은 전단높이 (shear height)  $50\mu\text{m}$ , 전단속도 (shear speed)  $200\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 평가하였다. 측정은 총 22회 측정하여 최대, 최소 측정값을 제외한 20회의 측정결과를 평균하여 평가하였다. 평가결과가 Fig. 6에 graph로 나타나 있는데 SAC305를 적용하여 수행한 표면실장의 전단강도는  $4588\text{gf}$ 이고, SAC305와 NCP를 결합한 hybrid SMT 공정을 적용한 표면실장의 전단강도는  $5063\text{gf}$ 로 가 약 8% 이상의 증가를 보였다.

이는 상기 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 솔더의 용융이 불완전하고 filet 형성도 chip의 상단부까지 모두 채워지지 않을 것을 감안하면 전단강도의 증가가 매우 높게 나타나고 있는 것이다. 향후의 연구를 통하여 에폭시 기반의 레진과 솔더내부의 플럭스 간섭을 차단하

**Fig. 6** Shear stress of 1005 chip joined by SAC305 SMT and hybrid SMT (SAC305+NCP)

고 일반 SMT의 공정을 변경하여 최적의 hybrid SMT 공정조건을 조정해야 하는 과제는 있으나 전단강도를 증가시켜서 장기적 신뢰성에 기여할 수 있는 가능성을 제시하는 것에는 충분하리라 사료된다. 또한 polymer 재료를 사용하여 진동흡수능이 일부 증진되리라는 기대도 함께 생각될 수 있어 이에 대한 연구가 진행될 것으로 사료된다.

## 5. 제 언

자동차 전장모듈에 적용하는 전자 패키징은 그 사용 환경이 열악한 것에 비교하여 공정과 소재가 재 평가되어야 한다. 가혹조건이 온도와 습도, 전기 전도량 등에 국한되지 않고 진동 등 가혹조건이 달라져야 한다는 것에 착안하여 기존의 무연솔더적용 가능여부를 판단해야 한다. 현재까지는 연구는 초기단계에 있으므로 새로운 고온솔더의 개발, 신공정의 적용 등이 지속적으로 연구 되어질 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 기고에서 hybrid SMT공정 data는 한미국제공동 연구의 일환으로 진행된 결과임으로 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. S. K. Kang and A. K. Sharkel, "Pb-free solders for Electronic Packaging", J. Electron. Mater., **23**(8), 701 (1994)
2. M. McCormack and S. Jin, "Improved Mechanical Properties in New, Pb-Free Solder Alloys", J. Electron. Mater., **23**(8), 715 (1994)

3. 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)**, 1879 (2007)
4. 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)**, 21 (2007)
5. 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)**, 43 (2004)
6. 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. Manufac.* **27(3)**, 164 (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. 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**, 638 (2008)
9. 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)
10. 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)**, 1292 (2002)



- 강명석
- 1985년생
- 과학기술연합대학원대학교
- 무연솔더범프, 플렉서블 기판
- e-mail : mskang@kitech.re.kr



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



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