

자동차 전자제품의 무연솔더 적용기술 및 솔더 접합부 열화거동

홍원식*[†] · 오철민*

*전자부품연구원 부품소재물리연구센터

Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead-free Automotive Electronics

Won Sik Hong*[†] and Chul Min Oh*

*Components and Materials Physics Research Center, Korea Electronic Technology Institute, Seongnam 463-816, Korea

[†]Corresponding author : wshong@keti.re.kr

Abstract

Due to ELV banning, automotive electronics cannot use four kinds of heavy metal element (Pb, Hg, Cd, Cr⁶⁺) from 2016. Therefore, this study was focused on degradation characteristics of Sn-3.0Ag-0.5Cu Lead-free solder joint with OSP and ENIG finish under various reliability assessment method, as like to thermal shock test and high temperature/high humidity test with test duration for cabin electronics. Also, we compared bonding strength degradation to other advanced research results of electronic control unit for engine room because of difference service temperature with mount location in automotive. Whisker growth phenomenon and mitigation method which were essentially consideration items for Pb-free car electronics were examined. Conformal coating is a strong candidate for mitigating whisker growth in automotive electronics. Necessary condition to adapt Pb-free in car electronics was shown.

Key Words : Automotive, Electronic control unit, Lead-free, Solder joint, Degradation, Whisker, Reliability

1. 서 론

전자제품에서의 무연솔더 적용은 이미 상용화 되어, 일반 가전제품 및 모바일 제품 등 우리 주변의 대다수 전자제품이 무연솔더를 적용하고 있다. 그러나 유럽의 특정유해물질관리지침(RoHS)에서 규제대상의 예외조항으로 분류된 제품군에서는 아직도 납(Pb)이 함유된 유연솔더를 사용하고 있다¹⁾. 그 중 가장 대표적인 사업군은 항공우주, 자동차²⁻³⁾ 및 반도체 내부에 사용되는 부품 및 제품이다. 이러한 예외조항의 공통점은 사용자의 안전에 영향을 미치거나, 현재의 기술로 해결할 수 없는 항목인 것이다. 최근 유럽의 폐차처리지침(End-of-Life Vehicles, ELV)은 자동차에 사용되는 모든 부품은 4대 중금속(납, 수은, 카드뮴, 6가 크롬)을 포함하는 자동차 부품의 사용 금지 규정을 결정하고 이를

EU 관보에 공고하였고²⁻⁴⁾, 2011년 4월 20일부터 개정안이 발효되었다. 이에 따라 자동차에 사용되는 전자제품 및 부품은 납이 함유되지 않은 무연부품 및 무연솔더를 적용하여야 한다. 그러나 전자제품은 Table 1 과 Table 2에서와 같이 자동차 사용환경의 특성상 일반 전자제품과는 전혀 다른 사용환경 조건에서 사용되고 있다. 소비자 사용기간도 일반 가전제품이 2 ~ 5 년을 사용하는 반면, 자동차는 5 ~ 10 년을 사용하고 있다. 솔더 접합부가 받는 스트레스 인자도 열, 습기 및 진동에 의한 다양한 복합스트레스를 지속적으로 받고 있으며, 반복적인 피로스트레스에 의한 솔더 접합부의 열화가 진행되는 것으로 보고되고 있다⁵⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 열충격시험, 고온고습동작시험 및 진동시험에 대해 시험시간에 따른 자동차 전자제품에 적용된 Sn-3.0Ag-0.5Cu 무연솔더 접합부의 접합강도

Table 1 Comparison for use environment of automotive electronics with consumer electronics⁵⁻⁶⁾

Items	Consumer electronics	Automotive electronics
Stress factors	Simple combined low stress (temperature, humidity, vibration, dropping)	Complex & combined high stress (high temperature, high humidity, high vibration, high impact)
Use temperature	(-30 ~ +85) °C	(-40 ~ +125) °C
Lifetime	(2 ~ 5) years	(5 ~ 10) years / 10 million. miles
Service Environment	Indoors, office	Outdoors (Paved & unpaved road)

Table 2 Warranty temperature condition of automotive electronics with mounting location

Mounting Position	Max. temp. of storage	Max. temp. of operation	Min. temp. of storage	Min. temp. of operation
Cabin	85°C	75°C	-40°C	-30°C
Engine room	125°C	115°C		
Outer Body	115°C	105°C		

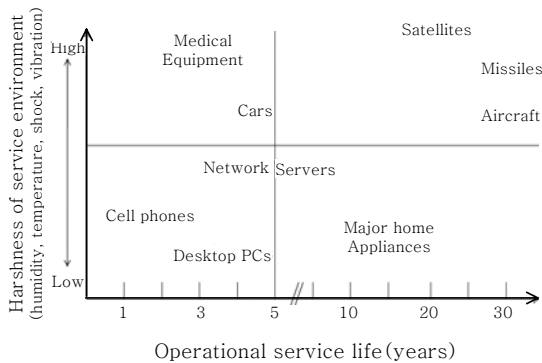


Fig. 1 Correlation between service environment and operational service lifetime for Pb-free automotive electronics⁴⁾

의 열화특성에 대해 연구하였다. 또한 전자제품의 차량 내 장착 위치에 따른 열화특성을 선행연구 자료와 비교하였다. 또한 전자제품에 무연솔더를 적용하기 위해 반드시 고려해야 할 휘스커 성장, 컨포멀 코팅 종류 및 억제방안, 전자용 전자부품의 요구조건에 대해 선행연구 자료분석을 기반으로 제시하였다.

2. 실험방법

자동차 전자제품에 무연솔더 적용 가능성 연구를 위하여 실내 전자제품 1종을 선정하였으며, 다음 그림 2와 같이 실험샘플을 준비한 후 내구신뢰성 검증을 진행하



Fig. 2 Photographs of digital clock mounted in cabin of automotive

였다. 대상 샘플은 실내 전자제품으로써, 사용 온도조건의 범위는 -40 ~ 85 °C로써 온도편차 $\Delta T = 125$ °C이다. 엔진룸에 사용되는 전자제품의 경우, 사용온도 범위는 -40 ~ 125 °C로써 온도편차 $\Delta T = 165$ °C이다. 따라서 실내 전자제품은 엔진룸 제품보다 40 °C 낮은 사용 온도편차를 가지고 있다.

2.1 샘플의 기판, 표면처리 및 솔더링

자동차 전자제품에 사용되는 인쇄회로기판(printed circuit board, PCB)은 유리천이온도(Tg)가 145 °C이며, 두께 1.6 mm의 FR-4(glass fiber/epoxy resin)를 사용하였다. PCB의 표면처리는 OSP(organic solderability preservative)와 ENIG(electroless nickel immersion gold) 2종을 각각 제작하였으며, 표면처리에 따른 솔더 접합부의 열화특성을 비교분석 하였다. 샘플 제작을 위해 Sn-37Pb와 Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305, Senju Metal Co.) 무연솔더를 각각 사용하였다. 그림 3은 샘플 제작을 위해 사용된 최적 조건의 리플로우 온도 프로파일이며, 최고 온도는 245°C 이었다. 그림 4는 솔더링 후

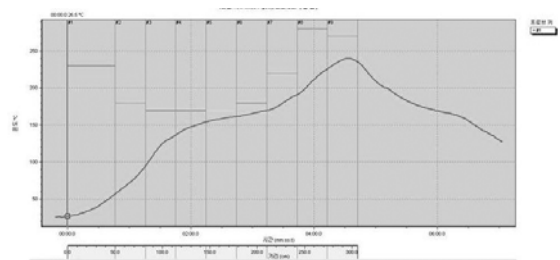


Fig. 3 Optimized temperature profiles for Reflow soldering

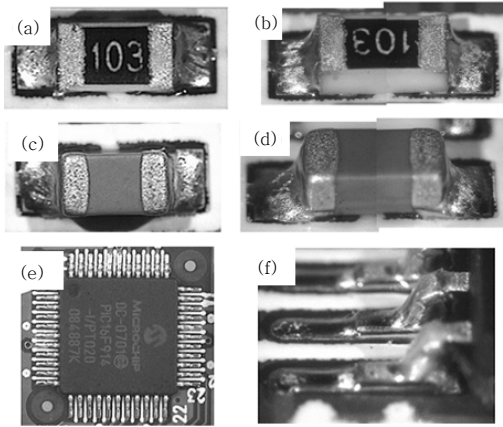


Fig. 4 Photographs of (a, b) 2012 chip resistor, (c, d) 2012 chip capacitor and (e, f) QFP components after as-reflowed soldering

부품의 광학현미경 사진이다. 솔더 접합부는 양호한 접합상태를 보이고 있다.

2.2 내구신뢰성 시험

유무연 솔더를 적용하여 제작된 실내 전장품의 솔더 접합부 열화특성을 비교분석 하기 위해 내구신뢰성시험을 진행하였다. 시험조건은 현재 완성차에서 적용되고 있는 검증조건과 동일한 시험조건을 적용하였다. 시험항목으로는 열충격시험과 고온고습시험을 실시하였다. 열충격시험 조건은 -40 ~ 85 °C, 각 온도에서 유지시간 10분, 온도변화 속도는 3분 이내로 하여 1,500 cycles 동안 실시하였다(그림 5). 고온고습시험은 85 °C, 85 %RH 조건에서 3,000 시간 동안 진행하였다. 실험 중 샘플의 동작을 위해 Stand-by ON 상태로 전원을 인가하며 진행하였다. 전원인가는 PCB에서 발생하는 이온 마이그레이션에 의한 고장발생에 대한 검증을 포함하는 의미에서 동작시험을 진행하였다. 내구신뢰성시험 후 3종의 대상부품에 대한 균열발생 및 접합강도를 측정하여, 시험시간에 따른 솔더 접합강도의 변화를 측정하였다.

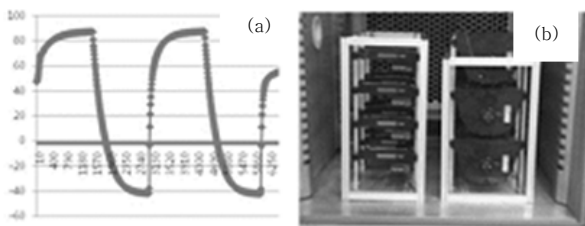


Fig. 5 (a) Temperature profile and (b) photograph of equipment set-up for thermal shock and temperature/humidity tests

2.3 솔더 접합강도 및 균열율 측정

실내 전장제품의 내구신뢰성 검증을 위한 대상부품은 2012 칩 저항기와 2012 칩 콘덴서 및 QFP 패키지를 선정하여 솔더 접합부의 전단강도 및 45° 리드 인장강도를 측정하였다. 또한 접합면의 균열발생 유무를 확인하기 위해 단면분석을 실시하였다. 접합면에 발생된 균열길이를 정량화 하기 위해 균열율(solder joint crack ratio, SCR)을 다음 식 1과 같이 정의하였다. SCR은 최단 거리의 접합면의 총 길이와 발생된 균열길이의 비율로써 계산할 수 있다.

$$SCR = \frac{\text{Crack length}}{\text{Min. Bonding length}} \times 100(\%) \quad (1)$$

3 결과 및 고찰

3.1 솔더 접합강도 열화 및 균열율(SCR)

열충격시험 1,500 cycles 후 칩 저항기, 칩 콘덴서 및 QFP에 대한 접합강도를 측정한 결과 다음 그림 6과 그림 7과 같다. OSP와 ENIG 표면처리 샘플 부품의 솔더 접합부에 대한 접합강도 측정결과, 초기 강도에 비해 칩 콘덴서는 12.6% (OSP), 18.3% (ENIG)

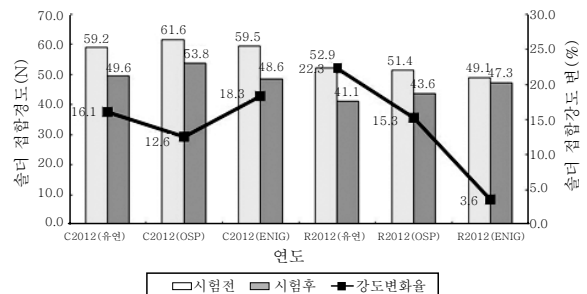


Fig. 6 Shear strength variation of chip components with OSP and ENIG finish after 1,500 cycles thermal shock test

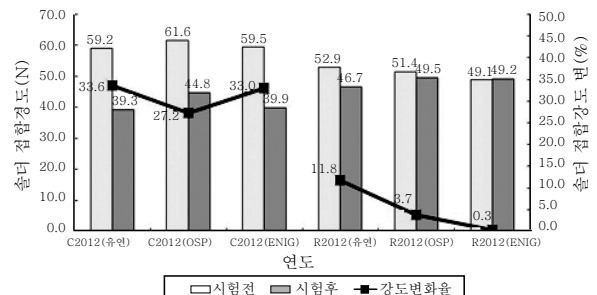


Fig. 7 Shear strength comparison of chip components with OSP and ENIG finish after 2,000 h temperature/humidity test

및 16.1% (SnPb)가 감소하였으며 칩 저항은 15.3% (OSP), 3.6% (ENIG) 및 22.3% (SnPb)가 감소하였다. 이 결과로 볼 때, 기존 유연솔더 제품에 비해 OSP와 ENIG 표면처리의 영향은 거의 유사한 것으로 나타났다. 일반적으로 ENIG 표면처리가 OSP 보다 우수한 접합 신뢰성을 갖는 것으로 알려져 있으나, 본 연구결과에서 접합강도로 비교하며, 거의 유사한 수준의 강도를 나타내었다. 동일한 크기의 칩인 경우, 초기 OSP와 ENIG는 각각 61.6 N과 59.5 N을 나타내었으며, 열충격시험 후 각각 53.8N과 48.6N을 나타내었다. 이러한 경향은 칩 저항기에서도 동일한 결과를 나타내었다. OSP가 ENIG 보다 초기 강도가 다소 높게 나타나는 것은 솔더 접합면에 발생하는 계면구조의 영향으로 생각된다. OSP의 계면에서는 Cu_6Sn_5 및 Cu_3Sn 의 금속간화합물(intermetallic compound, IMC)만 생성되는 반면, ENIG 계면에서는 Ni_3P , NiP , Ni_3Sn , Ni_3Sn_4 , $(Cu,Ni)_6Sn_5$, $(Ni, Cu)_3Sn$ 과 같은 매우 다양한 IMC가 생성되며, 이러한 계면구조의 불일치(misfit)으로 인한 변형에너지가 증가됨에 따라 접합강도가 OSP에 비해 낮은 것으로 사료 된다⁹⁻¹⁶⁾. 그러나 부품별 강도 저하에 대한 변화율의 차이가 발견되었다. 동일한 2012 크기의 칩 부품인 경우, 칩 콘덴서에 비해 칩 저항기의 접합강도가 다소 작게 나타났으며, 변화율의 크기는 칩 콘덴서가 큰 것으로 나타났다.

고온고습시험 후 접합강도 변화에서도 열충격시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 솔더 접합부의 접합강도는 OSP가 ENIG 보다 높게 나타났으며, 고온고습 2,000 시간 후 칩 콘덴서의 강도 변화율을 보면, OSP가 ENIG 보다 작게 감소하였으며, 칩 저항기에서는 강도변화가 3.7% (OSP)와 0.3% (ENIG)로 나타나 변화율이 거의 유사한 것으로 나타났다. 이것은 전체적으로 열충격시험에서 보다 고온고습시험에서 강도변화가 작게 나타났으며, 또한 칩 저항기가 칩 콘덴서 보다 강도 저하가 작게 나타났다. 이러한 부품별 강도 저하의 차이는 시험조건의 차이에 의해 변화율의 차이가 많이 나타나지 않은 것으로 생각된다. 솔더 접합부의 열화 및 균열발생에 따른 강도 저하를 가속시키는 인자는 고온고습 조건보다 열충격시험 조건이 보다 가혹한 스트레스를 인가할 수 있는 시험방법이며, 이러한 가속 인자의 차이로 인해 고온고습에서는 강도변화가 크게 나타나지 않는 것으로 사료된다. 그러나 자동차 전장품으로 사용되는 경우, ENIG와 OSP 표면처리 모두 유사한 접합강도 및 열화특성을 나타내는 것으로 나타나, OSP 표면처리에 대한 전장제품의 적용 가능성을 알 수 있었다.

열충격시험 후 OSP 및 ENIG 표면처리 기판의 솔더 접합부에 대한 균열발생 비율을 분석한 결과 Table 3 과 같은 결과를 얻었다. 칩 저항기의 경우, 유연부품의 최대 균열발생 길이는 277.8 μm 로 SCR은 41.7% 였다. 반면 OSP 및 ENIG 접합계면에서 최대 균열 발생 길이는 411.1 및 325 μm 로 나타났고, SCR을 비교하면 각각 56.1%와 43.4% 였다. 이 결과로 볼 때, 유연과 ENIG의 균열발생 길이가 유사한 것으로 나타났으며, OSP가 ENIG 보다 50% 정도 균열이 길게 나타났다. 그러나 칩 콘덴서의 경우, 칩 저항기와는 반대의 결과가 나타났다. 유연의 경우, SCR 평균은 68.0%, OSP는 14.0% 그리고 ENIG는 95.7%로 나타나 ENIG가 가장 긴 균열을 나타내는 것으로 보인다. 앞서 언급한 것과 같이, 부품간 균열발생 정도의 차이가 있는 것으로 보이며, 부품 자체의 소재에 따른 영향도 있는 것으로 사료된다. QFP 패키지의 경우 분석대상 부품에서 균열이 관찰되지 않았다.

그림 8과 그림 9는 SCR 계산을 위해 측정한 칩 저항기의 단면분석 SEM 사진 (b)와 (c)에서 보는 것과 같이, 부품 단자의 도금부위에서 lift-off 현상이 발생하

Table 3 Solder joint crack ratio (SCR) comparison with OSP and ENIG finish after 1,500 cycles thermal shock test. R and C mean resistor and capacitor, respectively

Solders	Eutectic		SAC305			
	SnPb		OSP		ENIG	
Finish	SCR	length	SCR	length	SCR	length
Items	SCR	length	SCR	length	SCR	length
R1	23.1	133.3	0	0	30.3	212.2
R2	38.3	255.6	51.6	355.6	26.2	201.1
R3	0	0	56.1	411.1	0	0
R4	41.7	277.8	28.9	244.4	5	42.2
R5	14.9	111.1	41	355.6	14	118.9
R6	43.1	341	26.6	94.4	43.3	325.6
Resistor Average	26.9	186.5	34.0	243.5	19.8	150.0
C1	6.6	55.6	0	0	9.8	86.67
C2	19.1	100	0	0	0	0
C3	0	0	0	0	0	0
C5	0	0	6.18	61.1	0	0
C6	10.9	77.8	0	0	58.4	467.8
C7	31.4	117.8	7.8	70	27.5	186.7
Capacitor Average	68.0	351.2	14.0	131.1	95.7	741.2
QFP	0	0	0	0	0	0
QFP	0	0	0	0	0	0
QFP Average	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

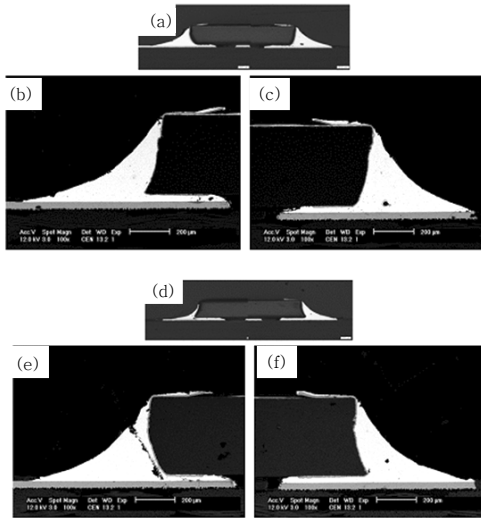


Fig. 8 SEM micrographs of 2012 chip resistor with (a-c) SnPb/eutectic and (d-f) OSP/SAC305 solder joint after 1,500 cycles thermal shock test: (b,c) termination lift-off and (e) solder matrix crack

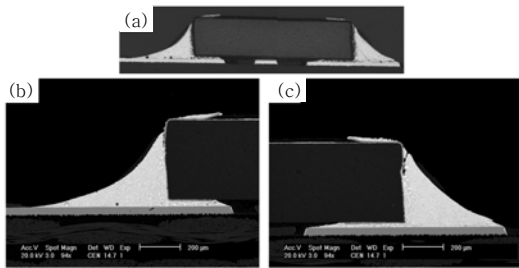


Fig. 9 SEM micrographs of 2012 chip resistor with SnPb/eutectic solder joint after 1,500 cycles thermal shock test

였다. 또한 그림 9 (b)와 (c)는 칩 단자 옆면 상단 부위에서 균열이 발생하여 솔더 접합부 내부로 균열이 진전되고 있는 것을 알 수 있다. 균열이 시작되는 부위는 칩의 상단부 또는 칩 밑부분에서 응력집중으로 인한 균열이 시작되고, 내부로 균열이 진전되는 양상을 나타내고 있다. 또한 그림 8 (e)에서 보는 것과 같이 솔더 접합부에서 균열이 발생된 것을 알 수 있다. 이와 같은 솔더 matrix에서 발생하는 균열은 전형적인 열-기계적 피로균열에 의한 것임을 알 수 있다. 시험조건이 $-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$ 로써 온도편차 $\Delta T = 125 \text{ }^\circ\text{C}$ 임에도 불구하고, 시험시간이 장시간 경과함에 따라 솔더 접합부의 열-기계적 피로균열이 발생된 것을 알 수 있다¹⁷⁻¹⁹⁾. 이러한 현상은 일반 전자제품의 경우, 시험시간이나 시험조건이 약한 것에 비해, 전장품 조건은 매우 장시간 사용함에 따라 가혹한 조건이 된다. 이로 인해 동일 부품이 전자제품 조건에서 발생되지 않는 현상이 자동차 사용조건에서 관찰되는 것으로 보인다.

3.2 고온/고진동 사용환경에서 솔더 접합부 열화특성¹⁹⁻²²⁾

전장제품 중 엔진룸에 사용되는 ECU(electronic control unit) 모듈은 고온, 고진동 조건에서 사용된다. 특히 엔진 주변에서는 사용 중 보드 온도가 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도 상승함에 따라 솔더 접합부에도 급속한 열화가 발생된다¹⁹⁾. 또한 일반적으로 주행시 발생하는 진동은 3-20 G 정도의 환경에서 사용되고 있다. 이러한 고온, 고진동은 복합적으로 결합되어 솔더 접합부의 열화를 가속화 시킨다¹⁹⁻²⁰⁾.

Yong-Ho Ko¹⁹⁾의 연구결과는 다음 그림 9와 같다. 열충격과 열싸이클 시험의 온도범위는 자동차의 사용환경인 $-40 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$, 각 온도에서 유지 시간은 각 10분으로 하여 1 cycle 시간은 25분 이므로 설정 후 각각 1500 사이클까지 진행하였다¹⁹⁾. 실험결과 1,500 cycles 후 모든 시험에서 접합강도의 열화가 급속히 나타나는 것을 알 수 있다. 고¹⁹⁾의 실험에 사용된 무연솔더는 Sn-3.5Ag, Sn-0.7Cu 및 Sn-5.0Sb이 사용되었으며, SAC305 조성과 절대적인 비교는 어려울 수 있으나, Sn-base 솔더에 Ag 또는 Cu가 함유된 무연솔더 임으

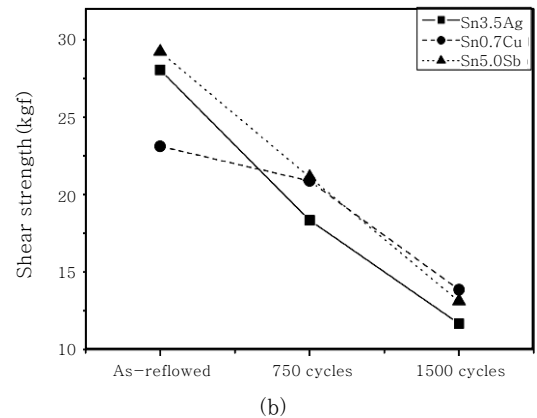
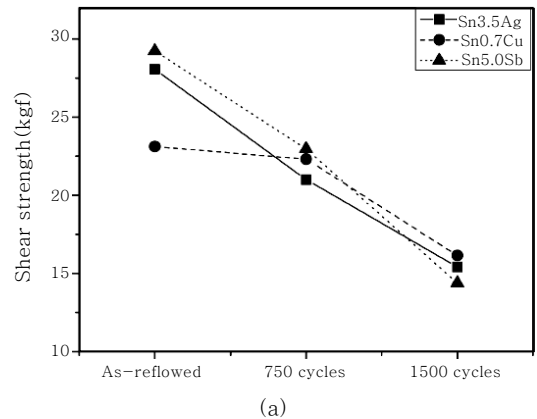


Fig. 10 Shear strength variation of the three lead-free solders after 1,500 cycles (a) thermal shock and (b) thermal cycling¹⁹⁾

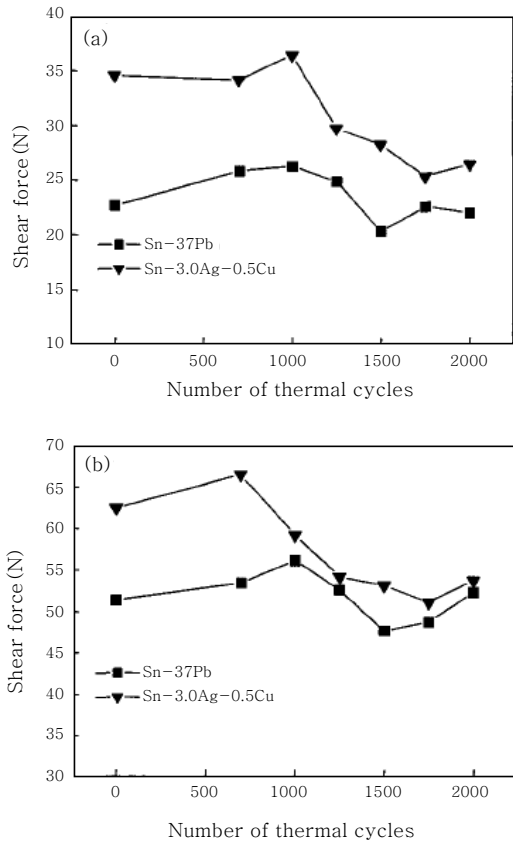


Fig. 11 Variation of the shear force of the Sn-37Pb and SAC305 solder/Cu joint with thermal shock cycles: (a) MLCC 0603 and (b) MLCC 0805²¹⁾

로 대략적 열화 경향을 파악할 수 있다.

그림 11²¹⁾은 Ha와 Jung²¹⁾의 자동차 전자제품에 사용되는 칩 콘덴서의 SAC305 솔더 접합부 접합강도 변화에 대한 연구결과이다. -40~125 °C, 각각의 온도에서 유지시간 29분의 조건에서 열충격시험 2,000 cycles 후의 접합강도 열화특성을 연구한 결과이다. 솔더 접합부는 대략 1,000 cycles 경과 후 접합강도의 열화를 나타내었으며, 이것은 접합계면에 형성되는 IMC의 성장과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다²¹⁾. 또한 초기 접합강도의 증가는 모재에 형성되는 Ag₃Sn IMC의 생성에 기인하며, 이후 강도 저하는 Ag₃Sn의 조대화 및 계면에 생성되는 Cu-Sn IMC의 성장에 기인한 것으로 보고하고 있다.

그림 12²²⁾은 3216 칩저항기와 44 pin QFP 패키지의 접합강도 열화특성에 대한 Hong et al의 연구결과이다. 이 연구에서는 열충격시험을 -40~ +125 °C의 온도범위에서 각각 고온과 저온에서 10분간 유지하며, 각 온도에서 변화속도는 5분 이내로 하여 총 2,000 사이클 동안 시험을 진행하였다²²⁾. 그 결과, 열충격시험을 이용하여 칩 부품과 SMD형 QFP 부품의

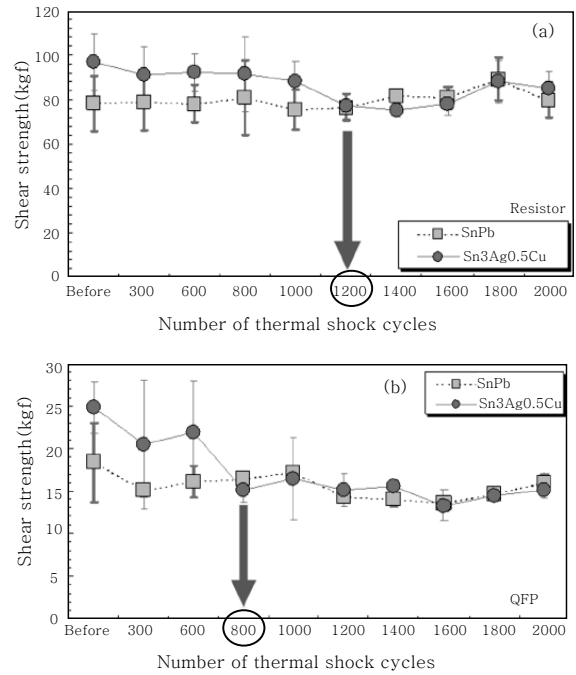


Fig. 12 Shear strength variation of (a) 3216 chip resistor and (b) 44 pin QFP under thermal shock cycles²²⁾

SAC305 무연솔더 접합부 열화특성은 수동부품은 최소 1,200 cycles부터 능동부품의 경우에는 800 cycles 이후 열화가 나타난다고 보고하고 있다²²⁾.

3.3 전자제품의 휘스커(Whisker) 성장²³⁻²⁵⁾

자동차 전자제품의 무연솔더 적용을 위한 또 하나의 문제점은 장기 내구신뢰성 확보 측면에서 휘스커의 생성 및 성장이다. 휘스커와 관련된 많은 선행 연구가 이루어졌으며, 발생 메커니즘이 규명되고 있으나, 확정적 메커니즘이 제안되지 않은 상태이다. 전자제품에서 휘스커의 발생은 성장에 의한 위험성 외에 성장된 휘스커가 자동차 운행 중 진동에 의해 절단된 휘스커가 전자장보드 위에서 움직이며 발생하는 전기적 단락(shhort) 현상을 유발하는 것이다. 휘스커의 성장 억제를 위해 무연솔더를 사용하는 경우, 부품 도금은 matte-Sn 도금 및 Ni 하지도금을 하는 것을 권장하고 있으며, 커넥터 및 FPC 등에는 금(Au) 도금을 권장하고 있다. 그림 13은 AC305 적용 실내 전자제품에 대한 열충격시험 1,500 h 후 관찰된 휘스커 성장 SEM 사진이다. 부품도금이 무연화 됨에 따라 부품의 단자부위에서 휘스커가 성장되는 것이 관찰되었다. 또한 무연솔더를 적용하면서, 무연솔더의 필렛이 부품 단자부 전체에 젖음이 발생하지 않음에 따라, 부품 도금부위에서 휘스커가 성장하는 것으로 나타났다. 따라서 무연부품을 사용하

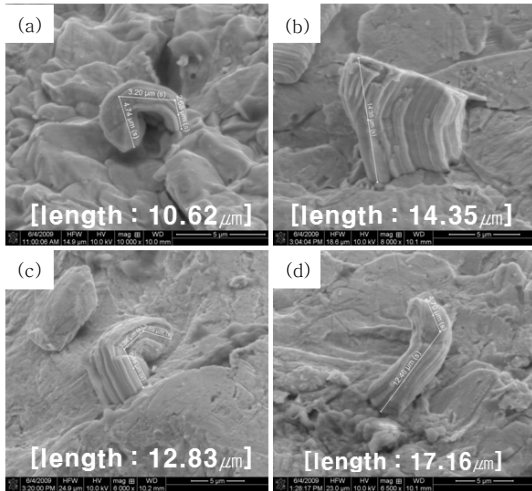


Fig. 13 SEM micrographs of whisker growth around topside edge area of 2012 chip resistor termination after 1,500 h thermal shock test

는 경우, 휘스커에 대한 억제 가능한 도금 상태임을 확인하여야 할 것으로 판단된다. 또한 부품에서 휘스커가 관찰되지 않더라도, SAC305 무연솔더를 이용하여 부품을 실장하는 경우, 무연솔더 자체에서 휘스커가 성장하는 것이 관찰되었다²³⁾. 이러한 무연솔더 부위에서 발생, 성장하는 휘스커는 부품도금을 관리함으로써 회피할 수 있는 문제가 아닌 것이다. 따라서 자동차 전장제품의 무연화에 따른 휘스커 발생 억제 및 2차적인 고장발생을 억제하기 위해서는 다양한 성장 억제 방법이 제안되고 있다²⁴⁻²⁵⁾. Sn 도금층의 미세조직을 equiaxed grain으로 형성하는 방안, 도금 후 박막 코팅을 하는 방법, 솔더링 후 열처리를 통한 잔류응력 제거 방안 및 컨포멀 코팅(conformal coating) 방법 등이 제안되고 있다²³⁻²⁵⁾. 이 중 컨포멀 코팅은 상용화 측면에서 전장 제품에 적용 가능성이 높은 억제방안이다.

그림 14²³⁾는 무연솔더링 된 전장보드의 표면에 아크릴과 실리콘 재질로 컨포멀 코팅 후 3,500 h 고온고습시험 후 코팅 층을 뚫고 성장한 휘스커의 성장 사진이다²³⁾. Pb-free 부품 및 솔더로 실장된 보드의 표면에 컨포멀 코팅 처리를 하더라도 휘스커는 성장할 수 있다는 단적인 사례를 보여 준다. 이러한 이유로 인해, 컨포멀 코팅이 휘스커 억제방안으로 유용하지 않은 것은 아니다. 컨포멀 코팅된 보드는 자동차 운행 중 절단된 휘스커가 보드 위를 움직이며 유발하는 2차적인 단락에 의한 고장은 회피할 수 있기 때문이다. 그러나 컨포멀 코팅재의 종류에 따라 내구성의 차이가 있으므로 코팅재의 선정과 도포 공정에 주의가 필요할 것으로 보인다.

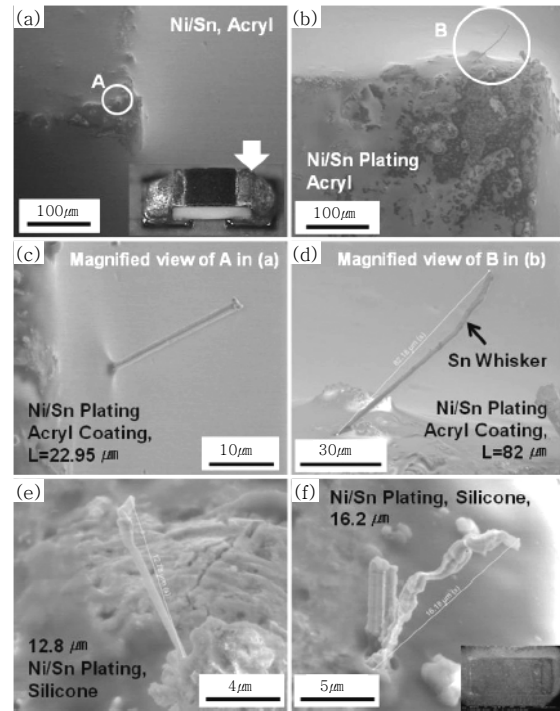


Fig. 14 Whisker growth through (a -) acrylic and (e, f) silicone conformal coating layer after 3500 h of high-temperature/humidity storage on Ni/Sn-plated chip resistor²³⁾

컨포멀 코팅은 일반적으로 25 ~ 200 μm 두께로 디핑(dipping), 브러쉬(brushing), 스프레이(spraying), 디스펜싱(dispensing) 등의 코팅 공정을 이용하여 도포된다²⁶⁾. 주로 사용되는 컨포멀 코팅재료로는 아크릴(acrylic), 실리콘(silicone), 우레탄(urethane), 파릴렌(parylene) 계열이 있으며, 각 코팅 재질에 따른 장단점이 있으며, 이를 잘 파악하고 사용해야 할 것이다. Table 4는 IPC 규격에서 제안하고 있는 각 코팅재료별 장단점을 정리한 표이다²⁶⁾.

3.4 기타 고려사항

자동차 전장제품의 무연화를 위해서는 무연솔더의 선정, PCB 표면처리, 공정 최적화 등이 요구된다. 이외에 앞서 언급한 것과 같이 휘스커 억제방안에 대한 방안이 수립되어야 할 것이다. 또한 무연솔더링 공정으로 인해 실장공정의 온도가 상승함에 따라 IC 부품류의 습도 민감도(moisture sensitivity level, MSL)에 대한 검증이 요구된다. 유연솔더링 공정에서는 발견되지 않는 패키지 부품의 박리(delamination)과 같은 고장이 발생하므로, IC 부품에 대한 MSL 관리 및 솔더링 후 박리 검사가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

Table 4 Advantage and disadvantage comparison of conformal coating material²⁶⁾

Coating	Advantage	disadvantage
Acrylic	<ul style="list-style-type: none"> · Ease of rework · Simple drying · Good moisture resistance 	<ul style="list-style-type: none"> · High VOC · Viscosity variation · Flammability
Silicone	<ul style="list-style-type: none"> · Stable (-40 ~ 200°C) · Flexibility · Good moisture resistance 	<ul style="list-style-type: none"> · Short pot life · Require humidity to cure · Low abrasion resistance
Urethane	<ul style="list-style-type: none"> · Good moisture resistance · Good dielectric properties · Solvent resistance 	<ul style="list-style-type: none"> · Moisture affects cure · Health and safety concern · Long cure time
Parylene	<ul style="list-style-type: none"> · Excellent uniformity · Low permeability · Low environmental impact process 	<ul style="list-style-type: none"> · Masking required · Require vacuum chamber · Limited UV resistance

4. 결 론

자동차 전장제품에 SAC305 무연솔더 적용을 위해 실내 전장품 샘플을 제작하여 솔더 접합부 열화율 및 균열발생 비율을 내구신뢰성 시험조건에 따라 분석하였다. 엔진룸용 전장제품의 경우, 선행 연구결과를 바탕으로, 솔더 접합강도의 열화 특성을 비교 분석하였다. 또한 무연화 전장제품에서 발생 가능한 휘스커 발생 및 억제방안에 대해 조사하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1) 열충격시험 1,500 cycles 후 솔더 접합부의 접합강도는 OSP가 ENIG 표면처리 보다 높게 나타났으며, 고온고습 2,000 h 후 칩 콘덴서의 접합강도 변화율은 OSP가 ENIG 보다 작게 감소하였고, 칩 저항기에서는 변화율이 초기 대비 유사한 것으로 나타났다. 이 결과로 볼 때, SAC305 무연솔더는 자동차 실내 전장제품으로 적용 가능할 것으로 사료되며, 이 때 PCB 표면처리는 OSP와 ENIG가 유사한 것으로 나타났다.

2) 실내 전장제품과 엔진룸용 전장제품의 파괴모드 및 메커니즘은 열-기계적 피로파괴로 나타났다. 사용환경에 따라 최고/최저 온도편차가 다르지만, 솔더 접합부의 열화 모드는 유사하며, 엔진룸 사용조건($\Delta T=165^\circ\text{C}$)이 솔더 접합부의 열화를 보다 가속화 시키는 것으로 판단된다. 따라서 엔진룸에 사용되는 무연솔더는 SAC305 이외에 고온/고진동 조건에서 금속학적 안정성이 확보된 무연솔더의 개발이 요구된다.

3) 전장제품에서 발생하는 휘스커의 직접적인 고장발생의 위협보다 진동에 의해 2차적으로 휘스커가 파손된

후, 사용 중 진동에 의해 파손된 휘스커가 보드 표면을 이동하며 전기적 단락을 유발할 수 있다. 따라서 전장제품에는 휘스커 성장 및 휘스커 파손에 의한 2차 고장유발을 억제하기 위해 컨포멀 코팅이 필요할 것으로 판단되며, 이 때 적절한 코팅재의 선정 및 코팅 두께를 최적화 하는 것일 필요할 것으로 사료된다.

4) 전장제품의 사용조건은 고온, 고진동 조건에서 장시간 사용됨에 따라 일반 전자제품에서 발견되지 않는 전자부품의 고장이 발생된다. 특히 반도체 부품에 대한 delamination 발생 억제를 위한 MSL 관리 및 MSL Level 강화 방안이 요구될 것으로 판단된다.

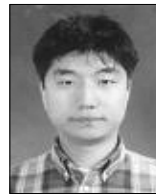
참 고 문 헌

1. EU Council, Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council, Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment : The european parliament and the council fo the european union (2003)
2. Commission Directive 2011/37/EU amending Annex II to Directive 2000/53/EC on end-of-life vehicles(ELV Directive), 2011, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:085:0003:0007:EN:PDF> (2011)
3. EU ELV Directive Bibliographic notice, [http://eur-lex.europa.eu/Notice.do?val=236993:cs&lang=en&list=236993:cs,&pos=1&page=1&nbl=1&pgs=10&hword s=\(2011](http://eur-lex.europa.eu/Notice.do?val=236993:cs&lang=en&list=236993:cs,&pos=1&page=1&nbl=1&pgs=10&hword s=(2011)
4. Carmine Meola : Pb-free Electronics Research Manhattan Project - Phase I, ACI Technology Inc. (2009)
5. IPC 9701, Performance test methods and qualification requirements for surface mount solder attachments, (2002), 4
6. Won Sik Hong, Gi-Young Goo and Un Hee Hwang : Verification Guideline of Pb-free Solder Joint Reliability for Military Electronics, Journal of KWJS, **30-3** (2012), 44-50
7. Chulmin Oh, Nochang Park, Changwoon Han1, Mansoo Bang, and Wonsik Hong : The Interfacial Reactions and Reliability of SnAgCu Solder Joints under Thermal Shock Cycles, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **47-8** (2009), 500-507 (in Korean)
8. Chulmin Oh, Nochang Park, and Wonsik Hong : Solder Joints Fatigue Life of BGA Package with OSP and ENIG Surface Finish, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **46-2** (2008), 80-87 (in Korean)
9. 3. Anon : Copper-Tin Intermetallics, Circuit Manufacturing, **20-9** (1980), 56-64
10. B. G. Le, and R. A. Baraczykowsi : Intermetallic Compound Growth on Tin and Solder Plating on Cu Alloys, Wire J. Int., **18-1** (1985), 66-71
11. R. Strauss : SMT Soldering Handbook(2nd Edition), Newnes, Oxford (1998), 37-39
12. H. A. H. Steen : Aging of Component Leads and

- Printed Circuit Boards, Research Report IM-1716, Swedish International for Metals Research (1982)
13. A. Gangulee, G. C. Das, and M. B. Bever : An X-Ray Diffraction and Calorimetric Investigation of the Compound Cu_6Sn_5 , Metal Transaction, **4** (1973), 2063-2066
 14. W. S. Hong, and K. B. Kim : Tafel Characteristics by Electrochemical Reaction of SnAgCu Pb-Free Solder, Korea Journal of Materials Research, **15-8** (2005), 536-542 (in Korean)
 15. JEITA : Lead Free Soldering Technologies-From Basic Matters to Measures for Solder Joint Lift-Off, Corona Publishing Co., Tokyo (2004), 26-29 (in Japanese)
 16. Won-Sik Hong, Whee-Sung Kim, Noh-Chang Park and Kwang-Bae Kim : Activation Energy for Intermetallic Compound Formation of Sn-40Pb/Cu and Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu Solder Joint, Journal of KWJS, **25-2** (2007), 49-55 (in Korean)
 17. Chulmin Oh, Nochang Park, and Wonsik Hong : Solder Joints Fatigue Life of BGA Package with OSP and ENIG Surface Finish, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **46-2** (2008), 80-87
 18. Sanghun Jin, Namhyun Kang, Kyung-mox Cho, Changwoo Lee and Wonsik Hong : Behavior of Vibration Fracture for Sn-Ag-Cu-X Solders by Soldering, Journal of KWJS, **30-2** (2012), 169-173 (in Korean)
 19. Yong-Ho Ko, Sehoon Yoo and Chang-Woo Lee : Evaluation on Reliability of High Temperature Lead-free Solder for Automotive Electronics, Journal of the Microelectronics & Packaging Society, **17-4** (2010), 35-40 (in Korean)
 20. R. W. Johnson, J. L. Evans, P. Jacobsen, J. R. Thompson, and M. Christopher, "The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics" IEEE Trans. Electron. Pack. Manu., **27-3** (2004), 164
 21. Sang-Su Ha, Seung-Boo Jung, et al : Thermo-Mechanical Reliability of Lead-free Surface Mount Assemblies for Auto-Mobile Application, Journal of KWJS, **24-6** (2006), 21-27 (in Korean)
 22. Won Sik Hong, Whee Sung Kim, Byeong Suk Song and Kwang-Bae Kim : Thermal Shock Cycles Optimization of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/OSP Solder Joint with Bonding Strength Variation for Electronic Components, Kor. J. Mater. Res., **17-3** (2007), 152-159 (in Korean)
 23. Won Sik Hong, Chul Min Oh, and Do Seop Kim : Mitigation and Verification Methods for Sn Whisker Growth in Pb-Free Automotive Electronics, Journal of Electronic Materials, **42-2** (2013), 332-347
 24. K. S. Kim, K. Hamasaki, K. J. Lee, A. Baated, K. Sugauma, M. Tsujimoto : Effects of the Sn plating structure and surface coating layer on Sn whisker growth, Proc. 19th Micro-Electronic Symposium, Fukuoka, Japan (2009), 65-68 (in Japanese)
 25. K.S. Kim, K. Sugauma, Y. Yorikado, K.J. Lee, A. Baated, M. Tsujimoto : Effect of Substrate Materials on Sn Whisker Growth, J. Japan Research Institute for Advanced Copper-base Materials and Technologies, **49** (2010), 112-115 (in Japanese)
 26. IPC-HDBK-830 : Guidelines for Design, Selection and Application of Conformal Coatings (2002)



- 홍원식
- 1968년생
- 전자부품연구원
- Pb-free Soldering, Interconnection, Lifetime Prediction
- e-mail : wshong@kети.re.kr



- 오철민
- 1976년생
- 전자부품연구원
- Low temp. bonding, Packaging, Pb-free Soldering
- e-mail : cmoh@kети.re.kr