

## 자동차 전장품용 무연솔더 접합부의 시리즈 시험 유효성

김 아 영\* · 오 철 민\* · 홍 원 식\*†

\*전자부품연구원 시스템로버스트연구센터

### Validation of sequence test method of Pb-free solder joint for automotive electronics

A Young Kim\*, Chul Min Oh\* and Won Sik Hong\*,†

\*Robust Components & System Research Center, Korea Electronics Technology Institute,  
Gyeonggi-do 463-816, Korea

†Corresponding author : wshong@keti.re.kr

(Received June 24, 2015, ; Accepted June 25, 2015)

#### Abstract

Due to environmental regulations (RoHS, WEEE and ELV) of the European Union, electronics and automotive electronics have to eliminate toxic substance from electronic devices and system. Specifically, reliability issue of lead-free solder joint have an increasing demand for the car electronics caused by ELV banning. The authors prepared engine control unit and cabin electronics soldered with Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305). To compare with the degradation characteristics of solder joint strength, thermal cycling test (TC), power-thermal cycling test (PTC) and series tests were conducted. Series tests were conducted for TC and PTC combined stress test using the same sample in sequence and continuously. TC test was performed at  $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$  and soak time 10 min for 1000 cycles. PTC test was applied by pulse power and full function conditions during 100 cycles. Combined stress test was tested in accordance with automotive company standard. Solder joint degradation was observed by optical microscopy and environment scanning electron microscopy (ESEM). In addition, to compare with deterioration of bond strength of quad flat package (QFP) and chip components, we have measured lead pull and shear strength. Based on the series test results, consequently, we have validated of series test method for lifetime and reliability of Pb-free solder joint in automotive electronics.

Key Words : Pb-free solder, Solder joint, Series reliability, Automotive electronics, Degradation

#### 1. 서 론

유럽연합 RoHS (restriction of the use of hazardous substances), WEEE (waste electrical and electronic equipment) 및 ELV (End-of-Life Vehicle) 등의 환경규제는 더욱 강화되고 있는 추세에 있다. 이로 인해 2006년까지 전자제품의 무연솔더 적용 공정개발 및 신뢰성 검증이 완료 되었다. 2016년부터 자동차 전장품에 대해서도 납(Pb) 사용규제가 확대 적용됨에 따라 Pb-free 적용기술 개발이 요구되고 있다.<sup>1-6)</sup>

자동차 전장품 경우, 전장품 제조기업 중심으로 Pb-

free 솔더적용 제품개발을 진행하고 있다. 그러나 일반 가전제품과 달리 실내 전장품은  $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  조건에서, 엔진룸은  $-40\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$  사용환경 조건에서 진동조건이 복합 된 가혹한 스트레스 조건에서 사용된다. 이러한 고온과 저온의 온도편차가 솔더 접합부의 주요 스트레스인으로 작용한다. 또한 솔더 접합부의 파괴 원인을 고온과 저온의 온도편차에 따른 열-기계적 피로파괴에 기인한다는 선행연구 결과에서도 잘 알 수 있다.<sup>7)</sup> 이에 따라 자동차 전장제품에 대한 무연솔더 접합부의 내구 신뢰 확보의 중요성이 증가하고 있다. 또한 무연솔더 적용 전장품의 내구신뢰성 검증을 위해 장시간이 소요됨에 따라 시험시간 및 비용에 대한 효율화가 요구되고 있다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.3(2015) pp25-31

<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.3.25>

따라서 본 연구는 실제 자동차에 적용되고 있는 무연솔더 (Sn-3.0Ag-0.5Cu, SAC305)를 사용한 실내 전장품과 엔진룸 전장품 모듈을 제조한 후 사용환경 조건에 따른 내구신뢰성 검증을 시리즈시험 방법으로 실시하였다. 또한 솔더 접합부의 주요 고장 메커니즘을 도출하였으며, 열싸이클 (TC) 시험과 파워싸이클 (PTC) 시험의 접합강도 열화정도를 비교 하였다. 이를 바탕으로 자동차 전장품용 무연솔더 접합부의 시리즈 시험방법에 대한 유효성을 확인하였으며, 기존의 개별적으로 수행된 시험방법을 시리즈시험 방법으로 대체 가능함을 검증하였다.

### 2. 실험 방법

Table 1은 본 실험에 사용된 무연솔더 합금과 부품을 나타내었다. 자동차의 장착 위치에 따라 사용 환경 조건이 서로 다른 안전 및 실내 전장품을 Fig. 1과 같이 제작하였다. PCB 재질 및 표면처리의 종류는 FR-4, Tg=145 °C, 4층 기판에 Sn 도금하여 사용하였다.

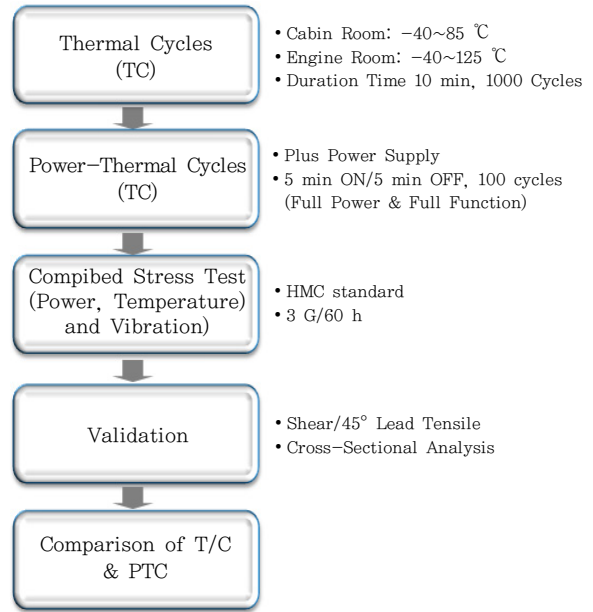
솔더 접합부의 열화특성 비교를 위해 열싸이클시험 (thermal cycle test, TC), 파워싸이클시험 (power-thermal cycle test, PTC) 및 복합환경시험 (combined stress test)을 동일 샘플을 사용하여 순차적으로 시리즈시험 방법으로 Fig. 2와 같이 실시하였다. TC 시험조건은 실내 전장품 조건인 경우 -40~85 °C, 안전 전장품은 -40~125 °C 조건에서, 각 온도 유지시간 10 min으로 1000 cycles 동안 각각 진행하였다

**Table 1** Solder material and test components of electronic control module

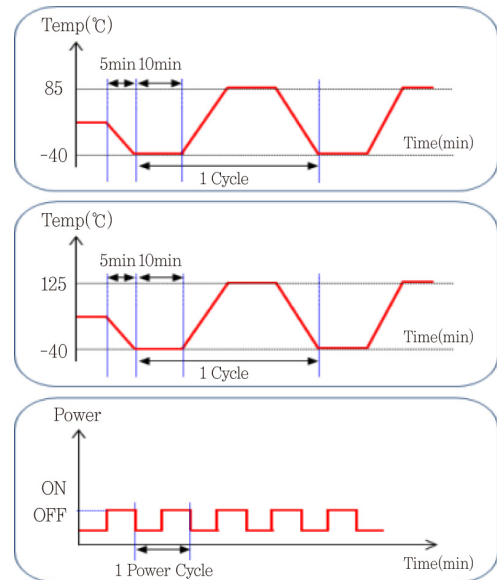
Solder alloy	Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305)
Test components	Chip resistor, chip capacitor, quad plate package (QFP)



**Fig. 1** Photograph of electronic control module soldered with SAC305 for engine control



**Fig. 2** Schematic diagram of series test procedure



**Fig. 3** Thermal cycling test conditions of (a) cabin and (b) engine room electronic modules. And (c) applied power condition of PTC test

(Fig. 3 (a)). TC 시험 완료 후 동일한 샘플을 이용하여 PTC 시험을 Fig. 3 (b)와 (c) 조건으로 각각 진행하였다. PTC 조건은 실전장품의 동일한 full power, full function 조건을 5분 간격으로 ON/OFF 하는 pulse 전원인가 방법으로 총 100 cycles 동안 실시하였다.

PTC 시험 후 복합환경시험은 실제 완성차 시험규격에 따라 3 Grms, 20 h, X/Y/Z축 조건에서 TC 1 cycle을 동시 진행하는 조건으로 실시하였다. 시험을 진행하는 동안 시뮬레이터를 사용하여 실시간 성능을

측정하고, 솔더 접합부의 고장 유무를 판단하였다.

솔더 접합부의 열화특성 분석을 위해 광학현미경 및 환경주사전자현미경(ESEM, FEI Co.)을 사용 하였다. 또한 접합강도의 열화정도를 비교하기 위해 본당시험기(Dage 4000)를 사용하여 시리즈시험의 각 단계별 부품의 전단강도 및 45도 리드 인장강도를 측정하였다. 시리즈시험 방법의 유효성 검증을 위해 TC와 PTC 시험 후 각각의 부품에 대한 접합강도 및 접합계면의 파괴 메커니즘을 비교분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 솔더 접합부 접합강도 열화 거동

Fig. 4부터 Fig. 6은 TC, PTC 및 시리즈시험에 대한 시험 단계별 부품의 솔더 접합부에 대한 전단강도 및 45도 리드 인장강도 측정 결과이다.

Fig. 4 (a)는 엔진룸용 전장품의 부품에 대한 솔더 접합부 전단강도 값을 나타내었으며, 동종의 부품일 경우, 부품의 크기가 클수록 전단강도 값이 크게 나타났다. 부품 크기가 작은 경우, 전단강도 값은 약 10 kg·f 내외로 유사한 값을 나타내었다. 그러나 0805 칩 저항기 크기 이상의 큰 부품은 접합강도의 차이가 약 68 kg·f 이상 더 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. Fig. 4 (b)는 초기 접합강도 대비 전단강도와 인장강

도의 변화에 따른 열화율을 나타내었다. 그 결과 TC와 PTC 시험조건에 비하여 시리즈시험이 약 16~45% 정도 더 큰 접합강도의 열화율을 보였다. 작은 부품의 경우, 부품별 편차가 일부 나타났으나, 열화 정도가 작게 나타났다. 초기 대비 접합강도가 일부 증가한 것은 실험용 모듈의 솔더링시 편차에 의한 것으로 판단되며, 그 차이는 미비한 것으로 보인다.

Fig. 5는 엔진제어 전장모듈에 대한 시험조건별 솔더 접합부의 부품 전단강도 변화 값을 측정된 결과이다. 칩 부품의 크기가 클수록 전단강도 값이 크게 나타났으며, QFP 패키지의 경우, 리드의 수가 많고 두께가 얇을수록 인장강도 값이 낮게 나타났다. 내구신뢰성시험 후 초기 접합강도 대비 열화율로 환산한 결과, 시리즈 시험에서 부품 크기가 큰 C1206 칩 캐패시터에서 초기 대비 열화율이 59% 감소하였으며, 이것은 TC나 PTC 시험조건에 비하여 45% 이상의 더 많은 열화율을 보였다. 또한 QFP 부품의 결과에서도 시리즈시험의 열화율이 TC 시험조건에 비해 30%, PTC 조건에 비해 41%의 더 높은 열화율을 나타내었다.

Fig. 6 (a)는 실내 전장품인 멀티미디어 제품에 대한 시험조건별 전단강도를 측정된 결과이다. 엔진 전장품에서와 같이, 부품의 크기가 작은 부품은 유사한 전단강도 값의 변화를 보이나, 다른 샘플과 마찬가지로 부품 크기가 큰 부품일수록 높은 전단강도 값을 나타내

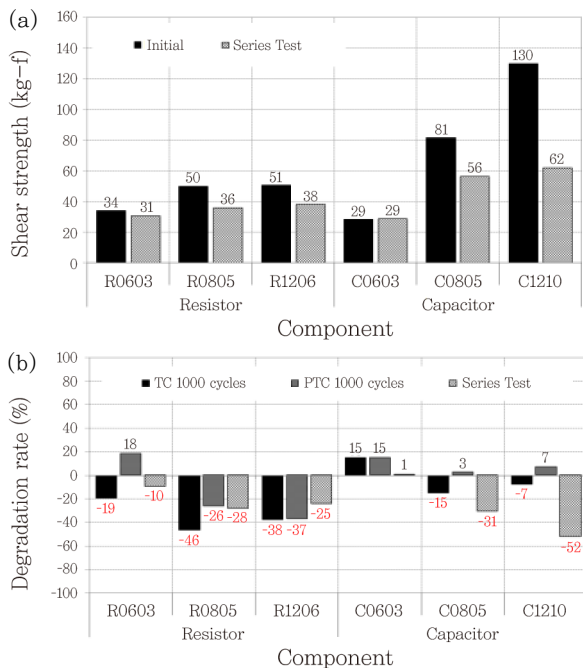


Fig. 4 Shear strength comparison of engine room electronics with TC, PTC and series test methods : (a) shear strength and (b) degradation rate of shear strength

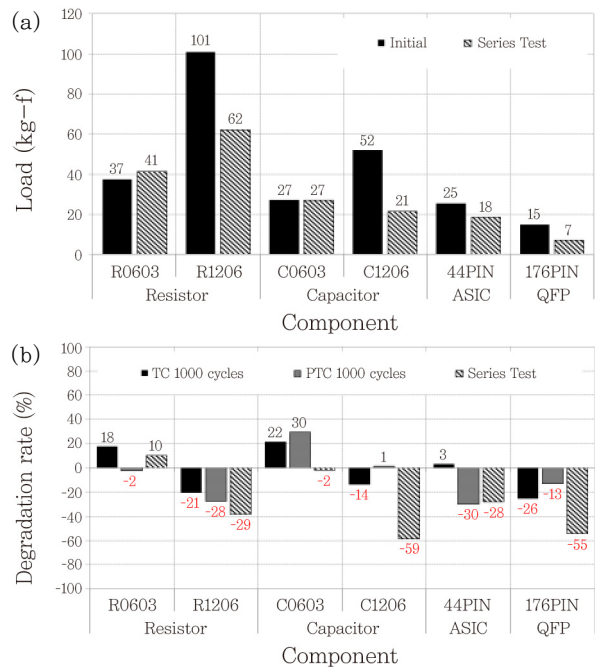


Fig. 5 Shear strength comparison of engine room electronics with TC, PTC and series test methods : (a) shear strength (kg-f) and (b) degradation rate of shear strength

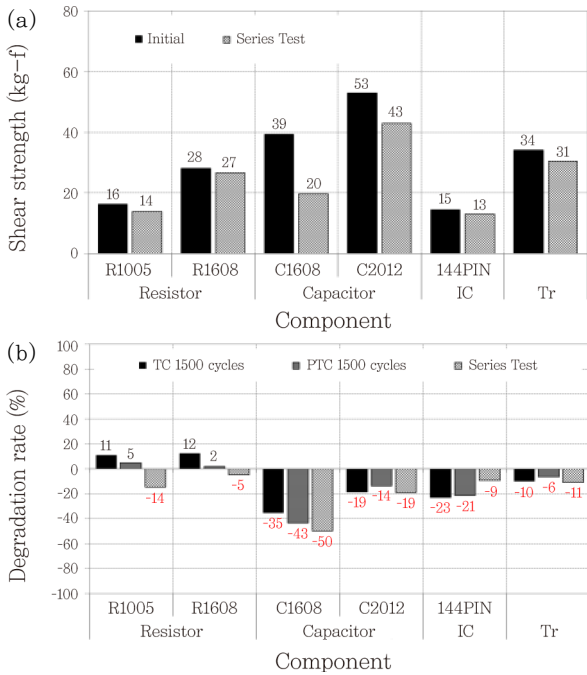


Fig. 6 Shear strength comparison of cabin room electronics with TC, PTC and series test methods : (a) shear strength and (b) degradation rate of shear strength

었다. 작은 부품인 칩 저항기 R1005, IC 144 PIN 및 QFP 부품의 경우, 시험조건에 상관없이 각 14~18 kg·f, 11~15 kg·f로 초기와 유사한 접합강도 값을 나타내었다. 그러나 큰 부품의 경우, 초기 접합강도 대비 시리즈시험은 약 19 kg·f 감소하였다. 실내전장품에서는 C1608 칩 캐패시터의 열화율이 35~50%로 가장 크게 나타났으며, TC 및 PTC 시험조건과 비교하였을 때, 각각 5%와 15% 정도 시리즈시험이 더 큰 열화율을 보였다. 칩 캐패시터의 경우, PTC 조건에서는 전원인가로 인해 부품 구동시 추가적인 발열이 발생하며, 이로 인해 솔더 접합부의 열화가 TC 시험조건보다 더 많이 발생된 것으로 판단된다. 그러나 일반적인 내구실험 중 전원인가 및 full function 동작을 하더라도 부품이 구동되지 않는 경우, 솔더 접합부의 열화는 TC 시험조건에서와 유사한 열화거동을 나타낼 수 있다. 따라서 PTC 시험이 TC 시험보다 열화가 더 빠르게 나타난다고 판단하기는 어려우며, 구동시 부품의 동작 여부에 따라 달라짐을 알 수 있었다.

### 3.2 시험조건별 솔더 접합부 계면 분석

Fig. 7은 엔진룸 전장품에 대한 TC, PTC 및 시리즈 내구실험 후 C1210 칩 캐패시터의 솔더 접합계면 분석 결과이다. 부품의 크기가 가장 큰 C1210

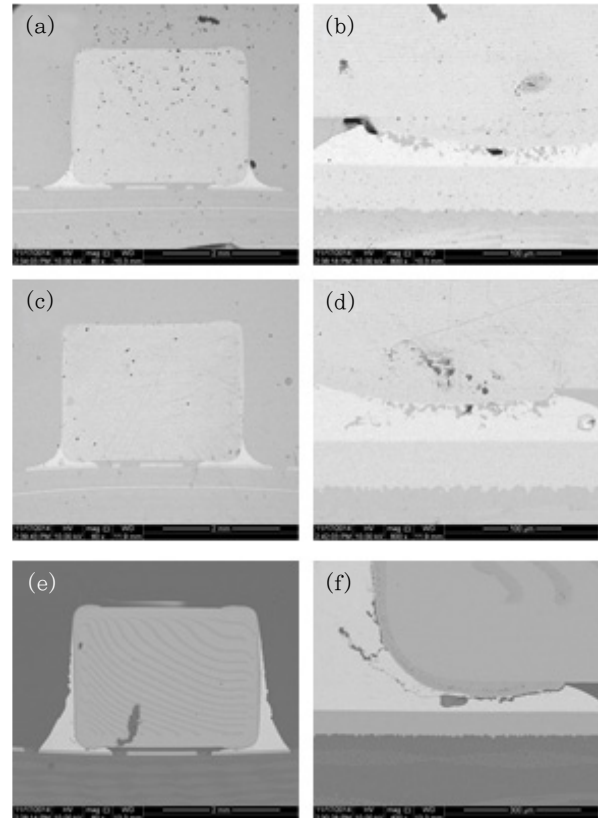
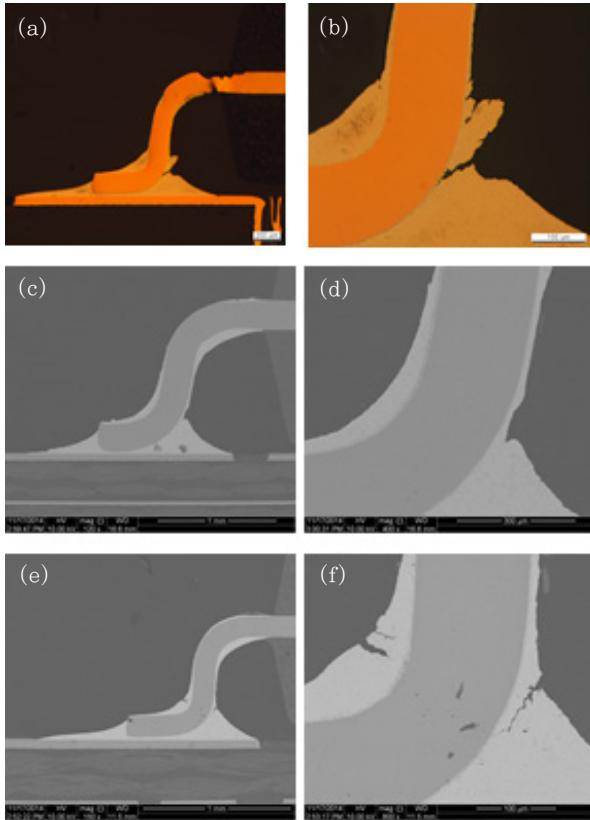


Fig. 7 Cross-sectional SEM micrographs of engine room electronics having a solder joint cracks after various reliability tests: (a, b) thermal cycle test, (c, d) power-thermal cycle test and (e, f) series test of 1210 chip capacitor

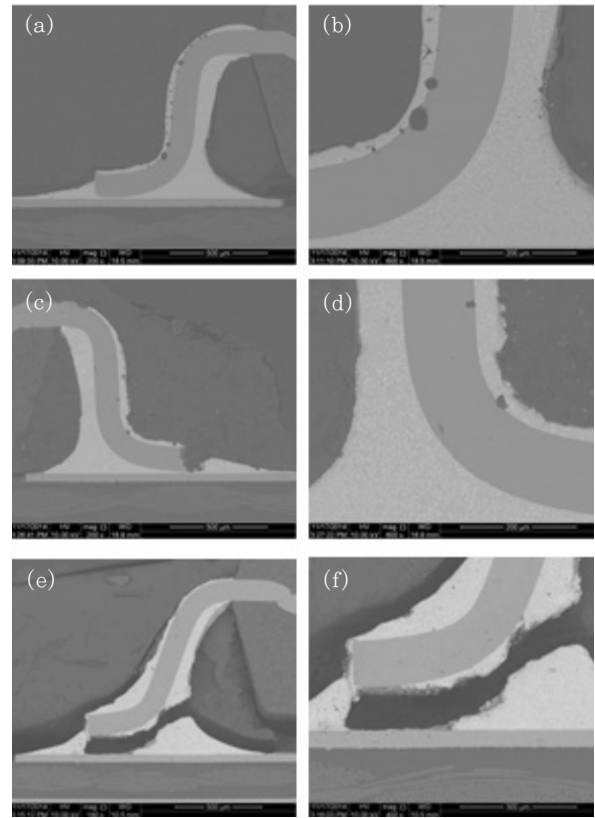
칩 캐패시터에서 솔더 접합부의 균열이 가장 크게 나타났으며, 균열의 발생 및 진전 경로는 솔더 접합부의 필렛 (fillet) 부위에서 균열이 발생되어 모재 내부로 진전되고 있음을 알 수 있다. 솔더 필렛 부위에서 균열이 시작된 것은 TC나 PTC 시험 중 고온과 저온의 반복적인 시험으로 인해 열-기계적 피로 스트레스가 솔더 접합부에 인가되며, 이로 인한 피로균열이 원인임을 알 수 있다.<sup>8)</sup> TC, PTC 및 시리즈시험 순서로 균열의 진전 양상이 달라지는 것을 확인하였다. 시리즈시험의 경우, TC 시험조건에서 발생된 균열이 다음 단계로 진행되는 PTC와 복합환경시험에 의해 더 진전됨을 확인할 수 있었다. 따라서 시리즈시험을 하는 경우, TC 시험으로만 균열발생을 검출하기 어려운 부분의 검출능력이 향상됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 실내 전장품인 멀티미디어 제품에 대해 TC, PTC 및 시리즈시험 후 솔더 접합부 계면을 분석한 SEM 사진이다. QFP 부품의 리드에 대한 접합계면 분석으로 TC와 PTC 시험조건에 비해 시리즈시험 조건에서 솔더 접합부의 균열이 더 많이 진전됨을 확인 할





**Fig. 8** Cross-sectional SEM micrographs of engine room electronics having solder joint cracks after various reliability tests: (a, b) thermal cycle test of IC 68 pin., (c, d) power-thermal cycle test of 68 pin QFP and (e, f) series test of 144 pin QFP



**Fig. 9** Cross-sectional SEM micrographs of cabin room electronics having solder joint cracks after various reliability tests: (a, b) thermal cycle test, (c, d) power-thermal cycle test, and (e, f) series test of 54 pin TSOP

수 있었다. 또한 시리즈시험의 경우 Fig. 7 (e)와 같이 리드 아래쪽 굽힘 부분의 전후면 모두에서 균열이 관찰되었다. 리드의 솔더 접합부의 솔더에서 균열이 발생되어 리드와 솔더의 접합계면 방향으로 균열이 진전되고 있음을 확인할 수 있었다. 이것은 균열발생 초기 열-기계적 피로 스트레스에 의해 솔더 모재에서 균열 발생 후, 금속간화합물과 솔더의 접합계면 방향으로 균열이 진전되고 있음을 알 수 있었다.

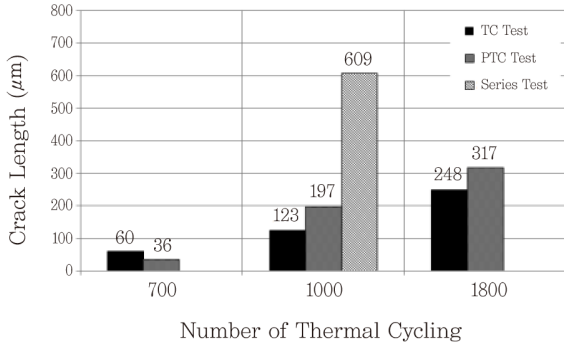
실내 전장품에 대한 솔더 접합부의 내구신뢰성시험 후 TSOP 부품의 접합계면에 대한 단면분석 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 리드 접합부에서는 전형적인 피로균열이 발생된 것을 확인 할 수 있었다. 이것은 TC에 의해 솔더 모재에서 발생된 균열이 PTC와 복합환경 시험의 시리즈 시험에 의해 접합면 전체로 진전된 것을 확인할 수 있었다.

이러한 솔더 접합부의 균열 발생은 전장품과 같이 고온, 저온의 온도편차가 큰 사용환경에서 부품, 솔더 및 기관의 열팽창계수 차 (CTE, coefficient of thermal expansion) 차이로 인하여 균열이 생성된 후 접합계면

을 따라 진전된 양상으로 나타난 것으로 판단된다.<sup>9)</sup> 또한 QFP 부품의 솔더 접합부 균열은 솔더의 필렛 (fillet) 부위에서 발생되어 내부로 진전되었으며, 리드 부위로 진전됨에 따라 접합부 중 가장 취약한 접합계면을 따라 진전되고 있음을 알 수 있었다. 또한 시험방법에 따라 균열발생 길이의 차이는 있으나, TC, PTC 및 시리즈 시험에 의해 균열이 발생된 사이트와 진전된 경로가 동일하였으며, 이로부터 균열이 발생된 고장발생 메커니즘은 동일하다고 판단 할 수 있었다. 또한 동일한 균열발생 메커니즘에서 생성된 균열은 TC, PTC 및 시리즈 시험에 따라 균열발생 시간과 접합강도 열화율이 다른 것으로 보아 시험에 따른 가혹도가 다르며, 이 중 시리즈시험 방법이 가장 열화가 빠르게 발행할 수 있는 시험방법임을 알 수 있었다.

### 3.3 솔더 접합부의 균열길이 분석

각각의 내구신뢰성시험 후 솔더 접합부의 균열 길이를 측정하여 비교한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. TC 시험 사이클이 증가됨에 따라 솔더 접합부의 균열길이



**Fig. 10** Maximum crack length comparison with TC, PTC and series test conditions

가 증가하며, PTC 시험조건에서도 동일하게 균열의 길이가 증가하고 있는 것을 알 수 있다. TC 1800 사이클에서 균열길이의 감소가 일부 나타나는 것은, 시험대상부품의 크기와 종류에 따른 차이가 있는 것으로 생각된다. TC와 PTC 1000 사이클 경과 후 솔더 접합부의 균열길이를 비교해 보면, TC의 경우 평균 123 µm의 균열 길이를 보였으며, PTC는 평균 197 µm의 균열 길이를 보였다. 시리즈의 경우, 평균 609 µm의 균열 길이가 관찰되었다. 이것은 TC 시험조건에서 약 500 µm, PTC 조건 보다 약 400 µm 균열이 더 진전되었음을 알 수 있었다. 이러한 균열 발생 길이의 차이는 TC, PTC 및 복합환경시험을 시리즈시험으로 진행함에 따라 균열 길이가 개별 단위 시험에 비해 더 길게 진전된 효과라 볼 수 있다.

**4. 결 론**

자동차 전자제품의 무연솔더 접합부에 대한 내구성 검증 시험시간 단축을 위해 TC, PTC 및 복합환경시험을 시리즈시험으로 진행하였으며, 접합강도 및 균열발생 길이에 대한 비교를 통해 시리즈시험의 유효성을 검증하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) TC와 PTC 1000 사이클 시험을 각각 진행한 후 접합강도 열화율을 비교한 결과, 전원인가에 의한 발생되는 부가적 발열로 인한 솔더 접합부의 열화율은 미비한 것으로 나타내었다. 단, 칩 캐패시터와 같은 구동부품의 경우 일부 솔더 접합부의 열화가 증가한 것을 확인하였다.

2) 시리즈시험 결과, 동일한 시험 사이클 조건에서 TC나 PTC 시험보다 솔더 접합부의 접합강도 열화가 2~8배 더 빠르게 발생한 것을 확인하였으며, 이것은 시리즈시험에 의해 균열이 더 길게 진전됨에 따른 것으로 판단된다. 이것은 동일한 시험조건에서 TC나 PTC 보다 시리즈시험의 균열검출 능력이 더 큰 것을 알 수

있었다.

3) TC와 PTC 시험을 1,000 사이클 동안 진행한 결과, TC보다 PTC 시험조건에서 균열발생 길이가 더 긴 것으로 나타났다. 그러나 시험시간이 증가함에 따라 TC와 PTC의 시험조건에 따른 균열발생 길이의 차이는 감소함을 알 수 있었다.

4) 결과적으로 기존 TC와 PTC 1,500 사이클시험을 (TC→PTC) 시리즈시험으로 진행할 경우, 기존의 시험시간을 30% 정도 단축시키며, 균열발생 검출능력은 증가됨을 알 수 있었다.

**References**

1. A. A. El-Daly, A. E. Hammad, Enhancement of creep resistance and thermal behavior of eutectic Sn-Cu lead-free solder alloy by Ag and Inadditions, *Materials and Design*, 40 (2012), 292-298
2. K. Sukanuma, S. J. Kim and K. S. Kim, High-Temperature Lead-Free Solders : Properties and Possibilities, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 61(1) (2009), 64-71
3. C. M. CHUANG, T. S. LUI and L. H. CHEN, The Characteristics of Vibration Fracture of Pb-Sn and Lead-Free Sn-Zn Eutectic Solders, *Journal of Electronic Materials*, 30(9) (2001)
4. G. Whitten, Lead-free solder implementation for automotive electronics, Proc. 50th Electron. Comp. Tech. Conf. (Piscatawny, NJ: *IEEE Publications*, 2000), 1410-1415.
5. Y. H. Ko, S. Yoo and C. W. Lee, Evaluation on Reliability of High Temperature Lead-free Solder for Automotive Electronics, *Journal of KMEPS*, 17(4) (2010), 35-40 (in Korean)
6. W. S. Hong and C. M. Oh, Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead-free Automotive Electronics, *Journal of KWJS*, 31(3) (2013), 22-30 (in Korean)
7. R. Wayne Johnson, John L. Evans, Peter Jacobsen, James R. (Rick) Thompson, and Mark Christopher, The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics, *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 27(3) (2004), 164-176
8. I. I Ho Kim, T. S. Park, S. Y. Yang and S. B. Lee, A Comparative Study of the Fatigue Behavior of SnAgCu and SnPb Solder Joints, *Key Engineering Materials*, 297-300 (2005) 831-836
9. G. Leen and D. Heffernan, Expanding automotive electronic systems, *IEEE Computer*, 35(1) (2002), 88-93

10. Y. H. Ko, Ju. H. Bang, J. H. Kim and C. W. Lee, Evaluation of Property and Reliability of Sn3.5Ag and Sn0.7Cu Pb-free Solder Joint by Complex Vibration for Application of Automobile Electric Module, *Journal of KWJS*, 31(1) (2013), 6-10 (in Korean)

11. S. S. Ha, J. W. Kim, J. H. Chae, W. C. Moon, T. H. Hong, C. S. Yoo, J. H. Moon and S. B. Jung, Thermo-Mechanical Reliability of Lead-Free Surface Mount Assemblies for Auto-Mobile Application, *Journal of KWJS*, 24(6) (2006), 21-27 (in Korean)



- 김아영
- 1985년생
- 전자부품연구원
- 전자 및 전장분야 무연솔더 접합기술
- e-mail : rnfmadkdud@naver.com



- 오철민(吳哲旼)
- 1976년생
- 전자부품연구원
- 고상/상온접합, 전자패키지 접합
- e-mail : cmoh@keti.re.kr



- 홍원식
- 1968년생
- 전자부품연구원
- 친환경 소재 및 접합기술, 무연솔더
- e-mail: wshong@keti.re.kr