

## 무은 솔더의 신뢰성 평가에 관한 연구

김종민\* · 김기영\*\* · 김강동\* · 김선진\*\* · 장중순\*\*

삼성전기\* · 아주대학교 산업공학과\*\*

### A Study on Reliability Assessment of Ag-free Solder

Jong-min Kim\* · Gi-young Kim\*\* · Kang-dong Kim\* · Seon-jin Kim\*\* · Joong Soon Jang\*\*

Samsung Electro-Mechanics\* · Department of Industrial Engineering, Ajou University\*\*

#### Abstract

The solder is any of various fusible alloys, usually tin and lead, used to join metallic parts that provide the contact between the chip package and the printed circuit board. Solder plays an important role of electrical signals to communicate between the two components. In this study, two kinds of Ag-free solder as sample is made to conduct the thermal shock test and the high humidity temperature test. Low resistance is measured to estimate crack size of solder, using daisy chain. The low speed shear test is also performed to analyze strength of solder. The appropriate degradation model is estimated using the result data. Depending on the composition of solder, lifetime estimation is conducted by adopted degradation model. The lifetime estimated two kinds of Ag-free solder is compared with expected lifetime of Sn-Ag-Cu solder. The result is that both Ag-free composition are more reliable than Sn-Ag-Cu solder.

Keywords : Ag-free solder(무은솔더), Degradation model(열화모델), Low resistance measurement(저저항측정), Thermal shock test(열충격시험), High temperature humidity test(고온고습시험)

## 1. 서론

전자제품의 표면실장기술(Surface Mount Technology) 공정에서 필수적으로 사용되는 솔더 대하여 많은 관심이 발생하고 있다. 솔더는 인쇄기판과 실장하고자 하는 부품 사이에 도포되며, 열을 가하는 리플로우 공정을 거쳐 고체 형태로 변한다. 솔더는 인쇄기판과 칩 사이에 생성되어 두 부품 사이의 강력한 체결관계를 구축하며, 연결된 전자 부품들과 전기/전자적인 신호를 전송하는 통로 역할을 한다.

현재 솔더는 신뢰성이 검증된 Sn-Ag-Cu 계열을 사용하고 있지만, Ag 원자재 값의 상승으로 솔더 원가가 많이 상승하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 문제를 해결하고자 솔더의 Ag 함유량을 감소시키는 조성을 개발하기 위하여 많은 노력을 기울이고 있다. 현재 가장 많이 사용되는 Sn-Ag-Cu 계열 솔더는 Ag의 함유량이 3.0wt%이며, 최근 1.0wt% 수준까지 함유량을 줄인 솔더가 사용되고 있다. 하지만 Ag 성분 함유로 인하여 제조 단계에서 많은 비용을 초래하고 있는 실정이므로, Ag가 포함되지 않고 신뢰성을 가지며 원가가 저렴한 새로운 조성의 솔더를 개발하는 것이 요구되고 있다.

Sn-Ag-Cu 계열의 솔더에 대한 신뢰성과 기타 특성에 관하여 광범위하게 연구되었다. Kar et al.(2012)은 금속조성인 Sn-Ag-Cu에 폴리머 성분을 추가한 솔더에 대하여 신뢰성을 평가하였다. 진단시험과 낙하시험을 실시한 결과, 폴리머의 연성으로 인해 신뢰성이 증가함을 증명하였다(Hsu et al(2012)). Hsu et al.(2012)은 Sn/3.0Ag/0.5Cu 솔더와 63Sn/37Pb 솔더의 거칠기를 진단시험과 유한요소법을 이용하여 평가하였다(Kar et al(2012)). 하지만 다양한 솔더에 대한 평가 중 무은 솔더와 관련된 연구는 전무후무하다.

본 연구에서는 새롭게 개발된 무은 솔더에 대하여 저저항 측정을 통하여 평가를 실시한다. 무은 솔더 평가 결과를 바탕으로의 수명을 추정한다. 무은 솔더에 대한 평가 결과와 추정된 수명을 현재 사용하고 있는 Sn-Ag-Cu 계열의 솔더와 비교 평가하여 신뢰성 확보 여부를 판정한다.

## 2. 열화 시험 및 데이터 수집

개발된 무은 솔더의 신뢰성을 평가하기 위하여, 무은 솔더 페이스트 2 가지, Sn-Ag-Cu 계열 솔더 페이스트 1 가지를 포함하는 3 가지 조성의 솔더를 이용하여 시험을 실시한다. 사용되는 페이스트 파우더에 대한 세부적인 조성 및 표기는 <표 1> 과 같다. 2 가지 무은 솔더에 대하여 각각 AF-A, AF-B 로 표기하고, Sn-Ag-Cu 조성 솔더는 RF 라 표기한다. 무은 솔더 AF-A, AF-B 에 대한 솔더의 성분은 유사하지만, AF-A 의 경우는 니켈 성분이 추가적으로 함유된다. Sn-Ag-Cu 조성 솔더는 가장 많이 사용되고 있는 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성을 가진 솔더를 이용한다.

<표 1> 솔더 조성의 구분

조성 계열	세부조성	표기
Sn-Ag-Cu	Sn-1.0Ag-0.5Cu	RF
Ag Free	Sn-0.7Cu-1.0Bi-0.05Ni-0.05Ge	AF-A
Ag Free	Sn-0.7Cu-1.0Bi-0.05Ge	AF-B

개발된 무은 솔더의 신뢰성을 평가하기 위하여, 영하 40℃ 에서 30 분간 방치한 후 125℃ 에서 30 분을 방치하는 조건으로 열충격 시험을 실시한다. 열충격 시험은 기계적인 피로로 인하여 발생하는 크랙 사이즈를 평가하기 위하여 실시한다(Laurila et al(2007)). 또한 수분 입자가 고온에서 부품에게 미치는 영향을 확인하기 위하여, 85℃/85%RH 조건에서 고온고습 시험을 실시한 후 신뢰성 평가를 실시한다(Wong et al(2002)).

조성과 시험에 따른 세부적인 시료의 수는 <표 2> 와 같다. RF, AF-A, AF-B 조성에 따라 열충격 시험을 실시하기 위한 시료와 고온고습 시험을 실시하기 위하여 동일한 형태의 시료를 각각 40 개씩 제작한다. 시료는 <표 2> 와 같이 다이 칩 형태의 기판에 가로 10, 세로 10개로 총 100 개의 랜드를 만들고 좀 더 큰 상대편의 기판에도 동일하게 랜드를 만들어 해당 부분에 솔더 페이스트를 인쇄하여 리플로우 공정을 거쳐 제작한다. 이 100개 솔더는 하나의 링 형태로 연결하는 데이지 체인(Daisy Chain)을 구성하고, 시료에 대한 평가를 실시하기 위하여 저저항 측정법을 이용한 복원측정을 실시한다.

저저항 측정이란 1 ohm 미만 저항의 변화를 측정하는 것으로, 솔더의 크랙이 증가함에 따라 저저항 값이 증가하는 경향을 나타낸다(Luan et al(2003)). 저저항 측정시 발생하는 노이즈를 감소시키기 위하여, 시료를 특수 제작된 지그에 장착하여 4 단자 프로브 장비를 이용한다(Jeong et al(2009)). 일정 시험시간이 경과한 후에 측정된 시료는 다시 고온고습 또는 열충격 챔버에 넣어 계속 실험을 실시하고 저저항을 측정하는 복원측정을 실시한다.

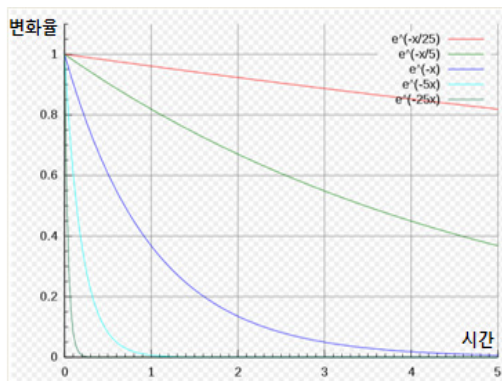
<표 2> 저저항 측정 시료 수

조성	열충격 시험	고온고습 시험	시료 형태	평가방법
RF	40 개	40 개		저저항 측정 (복원 측정)
AF-A	40 개	40 개		
AF-B	40 개	40 개		

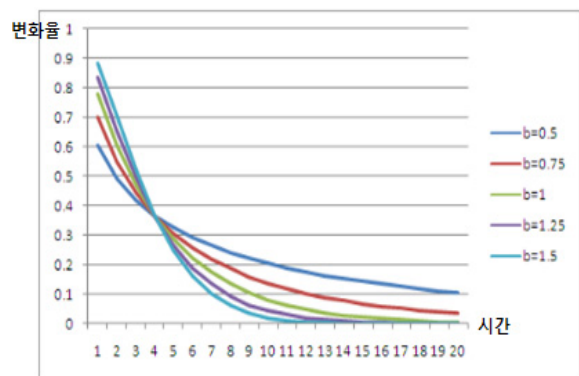
### 3. 열화 시험 데이터 분석 및 수명 추정

열충격 시험과 고온고습 시험에서 어떠한 형태로 저저항 측정 데이터가 어떠한 형태로 변화하는지 확인하여야 한다. 대표적인 열화모델인 선형모델, 지수모델, power 모델, log 모델, Gompertz 모델, Lloydlipow 모델을 이용하여 1차적인 적합성 분석을 실시한다. 다양한 모델 중 지수모델에 관한 적합성이 가장 높은 것으로 확인되고, 대부분의 열화데이터가 지수적인 형태로 증가한다. 그러므로 적합성이 좋은 지수모델로 알려진 확장형 지수모델(Stretched Exponential Model)을 이용하여 분석을 실시한다(Alam et al(2007)). 확장형 지수모델의 경우 일반적으로 사용되는 지수모델에 비하여 1 개 증가된 모수를 가지므로 더 많은 정보를 제공할 수 있지만, 복잡성이 증가하여 데이터 피팅이 어려운 단점이 있다. 그러므로 각 시료에 대하여 소프트웨어 툴을 이용하여 커브 피팅 및 모수 추정을 실시하는 것이 효과적이다. 확장형 지수모델은 식(3.1) 과 같으며 OLED 의 열화수명 분석에 널리 사용되는 모델이다. 본 연구에서 사용되는 확장형 지수모델에서  $P_0$  는 초기 저저항 값이고,  $P$  는 특정 시간에 측정된 저저항 값이다. 모수  $\alpha$  는 열화커브의 열화의 속도를 나타내는 척도모수로, 그래프의 기울기를 의미하는 값이다. 모수  $\beta$  는 열화커브의 전체적인 형태를 나타내는 형상모수이다. <그림 1> 은 척도모수  $\alpha$ , 형상모수  $\beta$  의 값이 변함에 따라 그래프의 기울기 또는 형태가 변하는 것을 나타낸 것이다. 척도모수  $\alpha$  의 절대값이 증가함에 따라 기울기가 커지는 것을 알 수 있으며, 형상모수  $\beta$  의 값이 변함에 따라 형태가 변하는 것을 알 수 있다.  $t$  는 저저항이 측정되는 시점 또는 사이클을 의미하는 값이다.

$$P = P_0 \exp(-\alpha t^\beta) \tag{1}$$



Alpha : Scale parameter

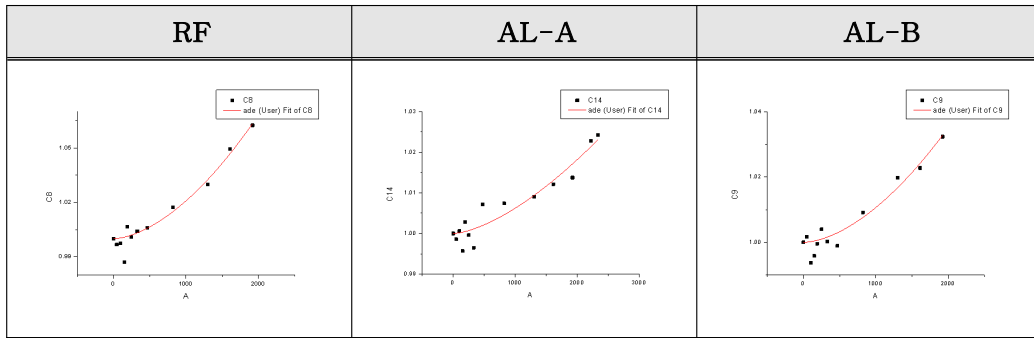


Beta: Shape parameter

<그림 1> 모수 값의 변화에 따른 그래프의 변화

일부 데이터에 대하여 피팅된 그래프는 <그림 2> 와 같다. 피팅된 그래프 형태 및 모수를 확인한 결과, 열충격 시험의 경우 대부분이 convex curve 형태로 저항이 증가하는 경향을

보인다. 모델의 적절성을 확인하기 위하여 각 시료에 대하여 선정된 모델을 선형 변환하여 회귀분석을 실시한다. RF의 경우에는 Adj. R-square의 값이 최소 0.81495에서부터 최대 0.99267의 값을 가지므로 선정된 모델이 적합하다. AF-A, AF-B의 경우에는 일부 시료에 대하여 Adj. R-square 값이 0.68939, 0.43267과 같이 작은 경우 또는 -0.13172와 같이 음의 값을 가지는 경우가 발생한다. 이러한 결과는 선정된 모델이 수집된 데이터에 대하여 부적절하다는 것을 의미한다. 해당 데이터들은 분석에서 제외하였으며, 원인은 저저항 측정값 자체에서 발생하는 편차, 시험 또는 측정 과정에 오류 등에서 찾을 수 있다.



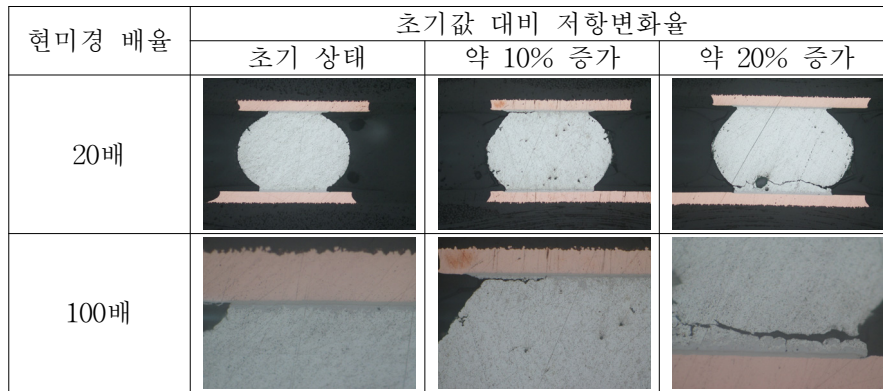
<그림 2> 저저항 변환 데이터 및 커브 피팅

저저항 측정을 실시하여 얻어진 데이터는 한 개의 시료를 복원 측정된 것이므로 개별적인 시료에 대한 열화모델의 모수를 먼저 추정한다. 추정된 개별적인 시료에 관한 모수들이 따르는 분포를 확인하여 최종적인 열화모델의 모수를 선정한다. 예를 들어, 모수의 분포가 정규분포를 따르는 경우에는 평균값을 이용하여 최종적인 열화모델의 모수를 도출하고, 와이블 분포를 따르는 경우에는 중앙값을 이용한다. 제거된 데이터 외 나머지 데이터를 이용하여 확장형 지수모델의 모수  $\alpha, \beta$ 에 대한 분포 추정을 실시한다. 통계 데이터 프로그램에서 제공하는 확률지와 상관계수를 이용하여 모수  $\alpha, \beta$ 에 대하여 지수분포, 와이블분포, 정규분포, 대수정규분포 중 어떠한 분포가 가장 적절한지 확인한다. 그 결과 두 가지 모수  $\alpha, \beta$ 는 모두 와이블 분포를 따름을 확인할 수 있으므로, 각 모수에 대한 대표 파라미터 값은 중앙값을 이용한다. 선정된 중앙값을 이용하여 조성별 솔더에 대한 수명 추정을 실시하며, 추정된 모델은 <표 3>와 같다.

<표 3> 저저항 측정에 대하여 추정된 조성별 열화모델

조성	열충격 시험	고온고습 시험
RF	$P = P_0 \exp\{(5.44 \times 10^{-8}) \times t^{1.761}\}$	$P = P_0 \exp\{(2.99 \times 10^{-7}) \times t^{1.454}\}$
AF-A	$P = P_0 \exp\{(2.89 \times 10^{-7}) \times t^{1.498}\}$	$P = P_0 \exp\{(7.60 \times 10^{-7}) \times t^{1.328}\}$
AF-B	$P = P_0 \exp\{(1.42 \times 10^{-8}) \times t^{1.888}\}$	$P = P_0 \exp\{(1.56 \times 10^{-6}) \times t^{1.221}\}$

도출된 모델을 이용하여 저저항 측정에 일반적으로 사용되는 고장 판정기준인 10% 변화 시점을 <표 4> 와 같이 추정한다. 추정된 저저항 값의 10%, 20% 변화 시점에서 발생한 크랙의 크기는 <그림 3> 과 같다. 솔더 크랙 관찰결과 기관의 낮치 부분에서 솔더 크랙이 초기 값 대비 10%이상의 저항 값 증가 시 확인할 수 있다.



<그림 3> 저저항 증가에 따른 시료의 크랙 사이즈

RF 솔더와 비교하였을 때, AF-A, AF-B 솔더가 모두 더 좋은 특성을 가진다. 열충격 시험에 관하여 RF 솔더의 저저항 값이 10% 증가하는 시점이 3516 사이클이지만, AF-A, AF-B 솔더는 각각 4834 사이클과 4123 사이클로 더 좋은 특성을 나타낸다. 고온고습 시험에 대하여 추정된 저저항 10% 증가 시점이 RF 솔더의 경우 6106 시간인 반면, AF-A, AF-B 솔더는 각각 6,890 시간, 8,349 시간으로 뛰어난 특성을 나타낸다. 그러므로 열충격 시험과 고온고습 시험에서 재현되는 스트레스로 인한 크랙의 성장은 현재 사용되고 있는 RF 솔더에 비하여 AF-A, AF-B 솔더의 신뢰성이 더 우수하다.

<표 4> 10% 저항 변화 예측 시간

조성	추정 수명 cycle 수 (열충격 시험)	추정 수명 시간 (고온고습 시험)
RF	▶ 3516.219 ≈ 3516 사이클	▶ 6,106.3446 ≈ 6,106 시간
AF-A	▶ 4834.803 ≈ 4834 사이클	▶ 6,890.4970 ≈ 6,890 시간
AF-B	▶ 4123.134 ≈ 4123 사이클	▶ 8,349.5428 ≈ 8,349 시간

RF 솔더와 비교하였을 때, AF-A, AF-B 솔더가 좋은 특성을 가지는 이유는 첨가되는 금속 성분으로 인한 것으로 추정된다. 금성성분 중 비스무스(Bi) 가 함유되어 솔더의 강도가 상승하여, 수명이 길어지는 결과를 도출한 것이다. 열충격 사이클 시 소량으로 첨가되는 게르마늄(Ge), 니켈(Ni)로 인하여 금속 조직의 조대화가 저하되고, 조직자체가 세밀하게 유지되는 장점 때문인 것으로 예측된다. 다양한 금속첨가물의 영향으로 인하여 결과적으로 크랙의 발

생이 감소하게 된다. 열충격 시험에서 AF-A, AF-B 의 차이는 미세하지만 니켈(Ni)의 함유로 인하여 A보다 B의 조직이 조밀하여 수명이 보다 좋은 것으로 생각할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 2 가지 조성의 무은 솔더를 개발하고, 이를 현재 사용 중인 Sn - Ag-Cu 계열의 솔더와 비교 평가를 실시하였다. 먼저 3 가지 조성의 솔더를 이용하여 인쇄기판에 도포하고, 리플로우 공정을 거쳐 고체화 한다. 3 가지 솔더의 신뢰성을 평가하기 위하여 열충격 시험과 고온고습 시험을 실시한다. 두 가지 가속 열화 시험을 통한 솔더의 신뢰성을 평가하기 위하여 저저항 측정을 실시하고, 결과값을 이용하여 데이터 분석을 실시한다.

저저항 측정 데이터에 관한 분석을 실시한 결과, RF 에 비하여 새롭게 개발된 AF-A, AF-B 솔더의 저항변화가 작게 나타난다. 열충격 시험과 고온고습 시험을 통하여 재현된 스트레스에 대하여, AF-A, AF-B 가 더 좋은 신뢰성을 가지고 있다. 그러므로 데이터 분석을 통해 도출된 열화모델을 이용하여 수명을 추정하였을 때, AF-B, AF-A, RF 순서로 좋은 특성을 나타낸다. 솔더의 종류에 따라 첨가되는 금속인 비스무스(Bi), 게르마늄(Ge), 니켈(Ni)의 영향으로 인하여 강도 및 조대화의 진행 수준에 따라 추정되는 수명이 상이한 것을 확인할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] E. H. Wong, S. W. Koh, K. H. Lee, and R. Rajoo(2002), "Comprehensive treatment of moisture induced failure-recent advances", IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, VOL. 25, NO. 3, Page(s): 223 - 230.
- [2] Hsu, C.-M., Hung, T.-P., Lin, A.-D., Kuang, J.-H(2012), "An investigation on the shear toughness for Sn/3.0Ag/0.5Cu and Sn/37Pb solder ball joints", Advanced Materials Research 476-478, pp. 2455-2458.
- [3] Kar, Y.B., Hui, T.C., Agileswari, R., Lo, C.(2012), "Comparison study on reliability performance for polymer core solder balls under multiple reflow and HTS stress tests", Microelectronics Reliability 53 (1), pp. 164-173.
- [4] Luan J, Tee TY, Pek E, Lim CT, Zhong ZW(2003), "Modal analysis and dynamic responses of board level drop test", In: Proceedings of the 5th electronics packaging technology conference, p. 233 - 43.
- [5] M.A. Alam, H. Kufluoglu, D. Varghese, S. Mahapatra(2007), "A comprehensive model for PMOS NBTI degradation: Recent progress, Volume 47, Issue 6, Pages 853 - 862.
- [6] Seongcheol Jeong, Naokazu Murata, Yuki Sato, Ken Suzuki, Hideo Miura(2009),

“Effect of the Formation of the Intermetallic Compounds between a Tin Bump and an Electroplated Copper Thin Film on both the Mechanical and Electrical Properties of the Jointed Structures”, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 2, No. 1, P 91-97.

- [7] T. Laurila, T. Mattila, V. Vuorinen, J. Karppinen, J. Li, M. Sippola, J.K. Kivilahti(2007), “Evolution of microstructure and failure mechanism of lead-free solder interconnections in power cycling and thermal shock tests”, Volume 47, Issue 7, Pages 1135 - 1144.