

# 무연 솔더와 플립칩 신뢰성

이 글에서는 무연 솔더의 플립칩 적용시 나타나는 여러 신뢰성의 문제와 해결 방법에 대해 소개하고자 한다.

전 영 두 / 삼성전기 기판연구소, 책임연구원

e-mail : yd.jeon@samsung.com

## 플립칩용 무연 솔더 현황

유럽의 납사용규제계약 이후 Pb63Sn 솔더를 무연 솔더로 대체하고자 많은 연구가 진행되었다. Pb63Sn 솔더를 대체할 무연 솔더는 Pb63Sn 솔더가 갖는 물리적 기계적 성질과 가장 유사하면서 저가인 SnAg, SnAgCu, SnCu, SnAgBi, Sn 등과 같은 솔더들이 제안되어 왔다. 최근 이러한 무연 솔더 합금의 평가를 통해 SnAgCu 조성의 솔더가 Pb63Sn를 대체할 무연 솔더로서 가장 널리 사용되고 있다. SnAgCu 조성의 무연 솔더는 다른 무연 솔더에 비해 녹는점이 낮고(217~218℃) 우수한 기계적 성질을 보인다. 또한, 솔더 내 Cu로 인해 Cu 층과 반응시 금속간 화합물의 성장을 억제하고 Cu 층의 소모를 줄일 수 있다고 알려져 있다. SnAgCu 내 Ag와 Cu의 조성은 각각 2.0~4.0wt%, 0.5~0.8wt% 내에서 제어되고 있다. 플립칩 접착을 위한 무연 솔더는 까다로운 범프 형성 방법으로 인해 무연 솔더의 선택에 제약이 따른다. 스크린 프린팅 기술은 공정이 간단하고 저가이면서 다원계 무연 솔더의 사용이 용이한 장점이 있지만, 미세한 솔더 입자 구현과 플럭스의 선정이 까다로워 미세 패턴에는 적용하기 어려운 단점이 있다. 현재 스크린 프린팅 기술을 이용하는 경우 다양한 조성의 SnAgCu 계 무연 솔더가 적용되고 있으며 4원계 이상의 다양한 무연 솔더도 목적에 맞게 사용되고 있다. 전해 도금법을 사용할 경우, 다원계 및 원하는 조성의 무연 솔더를 형성하기가 매우 까다롭다. 이원계 Sn3.5Ag 조성의 솔더 도금시 3.5Ag 조성에서 조

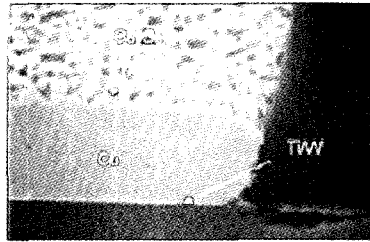
금만 벗어나더라도 솔더의 녹는점이 크게 높아지기 때문에 매우 정밀한 도금 공정의 관리를 필요로 한다. 현재 전해 도금법으로는 Sn 및 Sn3.5Ag의 일?이원계 솔더가 주로 사용되고 있으며, SnAg와 SnCu를 혼합하여 SnAgCu계를 형성하는 방법 등이 제안되고 있다.

일반적인 표면실장기술(SMT)에서 Pb63Sn 솔더를 무연 솔더로 대체할 때 가장 큰 문제는 공정 온도 상승에 따른 신뢰성의 저하 문제이다. 플립칩 접속에 있어서도 무연 솔더의 높은 용점으로 인한 공정 온도 상승이 신뢰성에 큰 영향을 미치며, 무연 솔더를 사용할 때 나타나는 여러 신뢰성의 문제를 해결해야 할 필요가 있다.

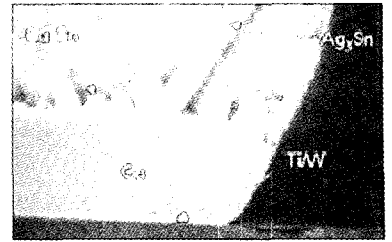
## 플립칩 신뢰성에 미치는 무연 솔더의 영향

일반적으로 무연 솔더의 높은 용점 및 물리 기계적 성질들은 플립칩 패키지의 신뢰성을 저하시키는 것으로 알려져 있다. 무연 솔더를 사용함으로써 PbSn에서 사용하던 하부 금속층(under bump metallurgy), 기판의 표면처리, 플럭스 재료 등과 같은 재료들을 다르게 사용해야 하며, 이들의 선택에 따라 플립칩 패키지의 신뢰성이 크게 좌우된다. 무연 솔더 사용시 나타나는 여러 가지 신뢰성의 문제들을 살펴보고 각각의 문제에 대한 해결 방안에 대해 소개하고자 한다.

계면 취성 파괴는 금속간 화합물의 성장과 큰 관련이 있으며, 이를 막기 위한 하부 금속층 및 무연 솔더의 선택이 매우 중요하다.



(1) Pb63Sn 솔더



(2) Sn3.5Ag 솔더

그림 1 Cu 층과 Pb63Sn, Sn3.5Ag 솔더와의 계면반응

- ▶ 빠른 계면 반응으로 인한 금속간 화합물의 성장과 하부 금속층의 소모

무연 솔더의 높은 융점은 공정 온도를 증가시키기 때문에 솔더와 금속층과의 반응이 빨라지며, 계면에서 나타나는 금속간 화합물의 성장이 빠르다. 높은 융점뿐만 아니라 금속과 반응하는 Sn 성분이

Pb63Sn에 비해 매우 많기 때문에(일반적으로 90wt% 이상) 금속간 화합물의 성장을 촉진시킨다.

그림 1은 Pb63Sn와 Sn 3.5Ag를 리플로(reflow)하였을 때, Cu 층과의 계면반응을 보여주고 있다. 약 30℃의 높은 융점과 많은 Sn 성분으로 인해 Sn3.5Ag 솔더에서 금속간 화합물의 성장이 빠르며, Cu 층의 소모가 매우 크다. 특히 Cu는 솔더 내의 Sn과 빠른 반응을 일으키는 금속이며, 무연 솔더 사용시는 하부 금속층의 소모, 기판 배선 층의 소모, 과도한 금속간 화합물로 인한 취성 파괴 등과 같은 신뢰성의 문제를 야기할 수 있다. 따라서, Cu 층의 급격한 소모와 금속간 화합물의 빠른 성장을 막기 위해 니켈과 같은 확산 방지층을 Cu 층 위에 형성하기도 한다. 솔더의 확산 방지 층으로서 무연 솔더에 니켈이 널리 사용되고 있으나 무연 솔더의 계면에서 나타나는 취성 파괴(black pad)를 방지하기 위한 도금 공정 관리가 요구된다.

니켈과 무연 솔더의 계면반응은 솔더의 구성에 따라 크게 다르게 나타난다. SnAg 계열에서는  $Ni_3Sn_4$  금속간 화합물이 형성되나 Cu를 포함한

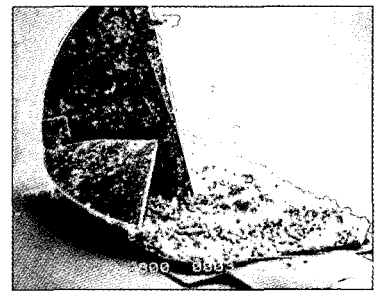
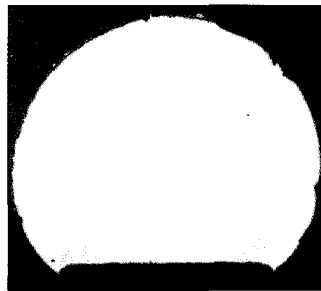


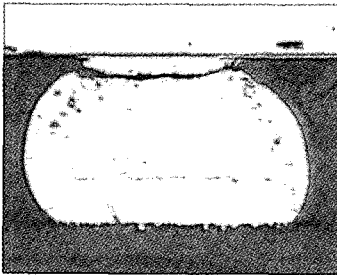
그림 2 SnAgCu 솔더 범프의 리플로 후, Ag<sub>3</sub>Sn 상의 비정상적인 성장

SnAgCu, SnCu 계열의 무연 솔더에서는  $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 와  $(Ni, Cu)_3Sn_4$ 의 3원계 금속간 화합물이 형성되며, 열처리 온도 및 시간에 따라 상변화가 나타난다. 계면반응 속도는 솔더 내의 Cu에 의해 형성되는 3원계 금속간 화합물로 인해 니켈 층의 소모를 크게 줄일 수 있으며, 따라서 니켈 층이 사용될 경우 SnAgCu와 SnCu와 같은 Cu를 포함한 무연 솔더를 적용하는 것이 유리하다. 이와 같이 열처리 공정, 무연 솔더 재료 등과 같이 제품마다 다른 공정 조건에 따라 계면 반응 및 신뢰성에 이상적인 특성을 갖는 하부 금속층 및 표면 처리의 선택이 매우 중요하다.

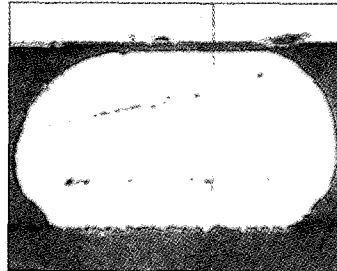
Ag를 3.0wt% 이상 포함하고 있는 무연 솔더의 경우 솔더 범프 내에 비정상적으로 성장한  $Ag_3Sn$  상이 관찰되기도 한다. 리플로와 같은 열처리 조건도 이러한 상의 형성에 큰 영향을 미친다. 그림 2에서는 솔더 범프의 크기까지 비정상적으로 성장한  $Ag_3Sn$  상과  $Ag_3Sn$  상과 솔더의 계면을 따라 균열이 전파되어 파괴가 나타난 솔더 조인트를 보여주고 있다. 따라서, Ag를 포함한 SnAg, SnAgCu와 같

은 무연 솔더의 사용시 문제가 될 수 있으므로 솔더 내 Ag 함량을 줄이고 빠른 냉각 조건을 설정하는 것이 유리하다.

▶ 무연 솔더의 크리프 강도 증가로 인한 계면 취성 파괴 문제

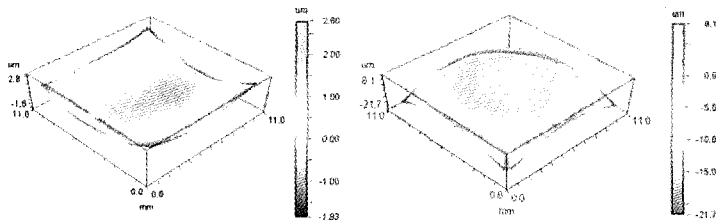


(1) PbSn 솔더 조인트의 피로파괴



(2) SnAgCu 솔더 조인트의 취성 파괴

그림 3 PbSn 솔더와 SnAgCu 솔더 조인트에서의 파괴거동



(1) 언더필 도포 전

(2) 언더필 경화 후

그림 4 언더필 전후의 Si 칩의 휘어짐 변화

매우 큰 연성을 갖는 납의 배제로 인해 대부분의 무연 솔더는 Pb63Sn에 비해 우수한 기계적 특성을 갖는다. 솔더 범프의 전단 실험 등을 통해 나타난 기계적 강도는 우수하더라도 실제 플립칩 접속시 신뢰성의 문제를 일으킬 수 있다. 리플로를 통해 Si 칩과 기판이 접속된 후, 냉각 과정 중에 Si와 기판의 열팽창 계수의 차이로 인해 기판의 수축 크게 일어난다. 이때, Si 칩과 기판을 연결하고 있는 솔더 조인트의 전단 변형(shear deformation)이 원활하지 못하면 기판의 휘어짐이 발생하며, 기판 휘어짐으로 인한 응력 집중으로 솔더 조인트의 취성 파괴로 이어질 수 있다. 대부분의 무연 솔더는 Pb63Sn 솔더에 비해 높은 탄성 계수와 높은 크립 강도를 갖고 있기 때문에 솔더의 전단 변형이 쉽지 않아 PbSn

솔더에서 문제가 되지 않았던 솔더 조인트의 취성 파괴가 발생할 수 있다. 리플로 시 높은 열처리 온도도 온도 변화를 크게

무연 솔더의 높은 크리프 강도에 의해 언더필 전 기판의 휘어짐이 크게 나타나며, 계면 취성 파괴의 원인이 될 수 있다. 계면 취성 파괴 저항성을 높일 수 있는 무연 솔더 및 하부 금속층 등의 재료선택이 매우 중요하다.

하여 더 큰 열응력을 유발시킨다. 그림 3에서는 PbSn와 SnAgCu 솔더를 사용하였을 때 다르게 나타나는 솔더 조인트의 파괴 거동을 보여주고 있다. PbSn의 경우는 솔더 내부의 피로파괴가 나타나는 반면, SnAgCu의 경우는 하부 금속층과 Si 사이의 계면에서 취성 파괴가 나타난다. 이러한 솔더 조인트의 취성 파괴는 Si 칩의 크기, 기판의 물성, 솔더 조인트의 접속 길이 등과 같은 인자에 더 큰 영향을 받는다. 하지만, 이러한 인자들을 조절하기 어려운 경우 솔더

조인트의 취성 파괴를 해결할 수 있는 방법으로 솔더 조인트의 높은 응력 집중을 견딜 수 있는 하부 금속층의 선택, 리플로 등의 열처리 조건 최적화, 연성이 뛰어난 무연 솔더 합금의 선택 등이 제안될 수 있다. 일반적으로 무연 솔더 내의 연성을 부여할 수 있도록 Ag와 Bi가 적게 포함된 무연 솔더가 취성 파괴 방지 측면에서 유리할 것으로 여겨진다.

솔더 조인트의 취성 파괴는 언더필 공정 전에 쉽게 관찰되며, 언더필 후에는 언더필에 의한 전단 변형 및 솔더 조인트의 응력 감소로 취성 파괴를 크게 줄일 수 있다. 일반적으로 언더필 후 무연 솔더 조인트의 신뢰성은 무연 솔더의 높은 크리프 강도에 의해 향상되는 것으로 알려져 있으며, 실제 여러 열충격, 열사이클 등의 신뢰성 테스트에서 무연 솔더의 경우

가 PbSn에 비해 높은 신뢰성을 보여주고 있다.

하지만, 언더필 후에도 기판의 휘어짐 및 무연 솔더 조인트의 응력 집중으로 인한 계면 취성 파괴 또한 여전히 보고되고 있다. 그림 4와 같

이 언더필 후에는 Si과 기판이 크게 휘어져 있기 때문에 온도 변화에 따른 기판의 휘어짐 변화로 인한 응력이 솔더 조인트에 가해진다. 무연 솔더의 경우 변형이 쉬운 PbSn에 비해 응력이 크게 걸려 계면 취성 파괴가 발생할 수 있다.

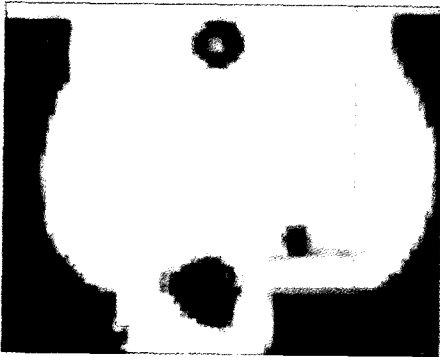
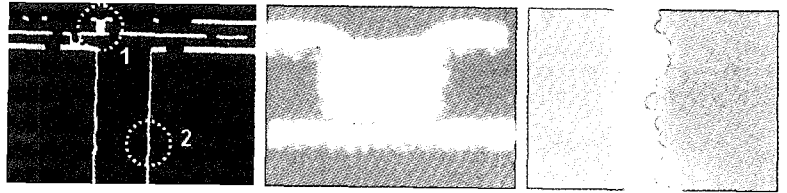


그림 6 무연 솔더 내 공공 형성

▶ 높은 리플로 온도에 의한 기판의 신뢰성 저하 문제

무연 솔더의 높은 리플로 온도는 솔더 조인트의 신뢰성뿐만 아니라 기판의 신뢰성에도 큰 영향을 준다. 높은 온도에 견딜 수 있는 내열성이 뛰어나고 열응력을 유발하지 않도록 열팽창 계수가 작은 재료를 선정해야 한다. 또한, 온도 변화에 의한 기판 휘어짐이 커지면서 기판 내부에서 via의 균열, Cu 배선 균열 등과 같은 신뢰성의 문제가 나타날 수 있다 (그림 5). 또한, 무연 솔더 사용에 따라 적절한 표면 처리를 고려해야 한다. 무전해 니켈/금 처리의 경우 높은 리플로 온도로 인해 계면 취성 파괴(black pad) 현상이 나타날 수 있으며, OSP의 경우는 무연 솔더와의 낮은 젖음성, 높은 리플로 온도에 의한 OSP층 분해 등의 현상이 나타날 수 있다.



(1) Via 균열

(2) PTH Cu 배선 균열

그림 5 기판 내 휘어짐에 따른 기판 내부 신뢰성 저하의 예

▶ 플럭스에 의한 범프 내 공공(void) 형성 문제

무연 솔더의 경우는 많은 Sn 함량으로 인해 SnO로의 산화가 빠르게 나타난다. SnO 및 표면처리 층의 산화막을 제거하기 위해 플럭스가 사용된다. 이때, 플럭스 내의 H 또는 COOH기와 산화막의 O층이 반응해 H<sub>2</sub>O가 생성되고 높은 온도에서의 기화를 통해 솔더 내부에 공공을 형성한다. 무연 솔더의 많은 Sn 함량에 의해 PbSn보다 더 많은 H<sub>2</sub>O 공공이 형성된다. 또한, 무연 솔더용 플럭스의 개발이 현재까지 완벽하지 않기 때문에 플럭스의 잔존(residue)으로 인해 공공이 형성될 수 있다. 이러한 공공은 솔더 조인트의 접합 면적을 줄이고 균열 전파를 빠르게 해 신뢰성을 저하시킨다. 공공 형성을 막기 위해서 적절한 무연 솔더 플럭스 개발, 솔더 내의 공공이 쉽게 빠져나갈 수 있는 구조 형성, 진공 리플로 등의 방법이 제안되고 있다.

▶ 그 외의 문제들

무연 솔더의 퍼짐성(젖음성) 저하 문제 : 무연 솔더의 높은 표면 장력은 PbSn에 비해 리플로 후 퍼짐성과 젖음성이 떨어진다. 특히 패턴이 작아질수록 낮은 젖음성으로 인한 문제가 발생하기 쉽기 때문에 하부 금속층 및 기판의 표면처리를 무연 솔더와의 젖음성이 뛰어난 재료를 선택해야 한다.

Whisker 문제 : Sn이나 SnCu에서 보고되고 있으며, 플립칩 접속시 언더필에 의해 큰 문제가 되진 않으나 이후 하위 기판에서 무연 솔더 적용 표면실장시 심각한 문제가 될 수 있다.