

전자부품에서의 무연솔더

김미진 · 김문일 · 신규식 · 정재필
서울시립대 재료공학과

Lead-free Solders on the Electronics

Mi-Jin Kim, Moon-II Kim, Kyu-Sik Shin and Jae-Pil Jung
Dept. of Materials Science and Engineering, University of Seoul

1. 서 론

21세기에 접어들어 정보통신네트워크의 발전이 급속하게 진행되고 있으며, 정보통신기기는 소형·경량화와 고기능화에 의해 휴대성이 향상되고 있다. 정보통신기기의 제조에는 마이크로 접합법이 사용되고 있는데 저용점재료인 솔더를 사용한 마이크로 솔더링은 전자부품실장의 핵심 기술이다^{1,2)}. 최근에는 미소 솔더볼을 이용한 범프접합에 의해 패키지가 한층 소형박화 되어 그 접합부는 더욱 미세·미소화 되었다. 솔더재료가 전자부품실장에 불가결한 것은 용점이 적절하여 기관상에 부품실장시 부품의 열손실이 일어나지 않고 기관의 변형이 적은 것과 같은 온도 문제와 양호한 젖음성에 의한 접합부 품질 확보에 기인한다^{3,4)}.

종래의 모든 전자부품 실장에는 전기적, 화학적, 물리적, 열적, 기계적 성질이 적절히 조합된 Sn-37(wt%)Pb 공정솔더가 사용되어 왔다. 그러나 전자제품이 폐기되어 매립될 때 조립에 사용된 Sn-37Pb 솔더의 Pb 성분이 이온상태로 용출되는 환경적인 문제가 대두된 것을 계기로, 선진국에서는 Sn-37Pb 솔더 합금의 사용규제가 검토되고 무연솔더의 개발 연구가 활발히 진행되었다⁵⁻⁷⁾. 이러한 경향에 의해 종래에 사용되어 온 Sn-37Pb 공정합금은 점차 폐기되고, Pb를 사용하지 않는 무연솔더로 점차 변화되고 있다. Sn-37Pb 솔더 대체용 합금의 선정시에는 합금의 용융점, 젖음성, 경제성 등을 고려하여야 한다. 이러한 요구조건을 고려하여 지금까지 연구된 가장 유력한 환경친화형 무연솔더 재료로는 Sn-Ag, Sn-Zn, Sn-Bi, Sn-Cu, Sn-In계 등이 있다⁸⁻¹⁰⁾.

본 고에서는 현재까지 연구된 대표적인 무연솔더의

종류와 특성에 관하여 기술하고자 한다.

2. 무연솔더의 정의와 요구조건

모재보다 용점이 낮은 비철금속을 용융시키고, 이것을 금속면간에 충전시켜 금속끼리 접합시키는 방법을 솔더링이라 하며, 이때 사용된 비철금속을 솔더라 한다. 솔더의 용점은 450°C 이하이며 용점이 높은 것으로부터 낮은 순으로 Zn계, Au계, Pb계, Sn계, Bi계, In계 등으로 나누어진다¹¹⁾.

종래의 Sn-37Pb 솔더의 대체재 개발시 기본적인 요구조건과 특성은 다음과 같다. 즉, 기본적으로 합금 및 그 구성원소들은 환경무해 물질이어야 하고, 모재 또는 플럭스(flux)와의 조합시 Sn-37Pb에 비해 동등하거나 그 이상의 성능을 지녀야 한다. 특히 기존의 Sn-37Pb와 유사한 용점(183°C)을 지녀야 하며 솔더링 온도는 리플로우의 경우 약 230°C, 플로우의 경우 250°C 내외가 바람직하다. 또한, 적당한 전기전도성, 열전도성을 지녀야 하며 접합부의 결함발생을 감소시키기 위해 고상과 액상의 공존범위가 10°C 이하로 작아야 한다. 또, 젖음성이 좋아야 하며 Sn-37Pb에 해당되는 정도의 기계적인 강도와 신뢰성을 유지할 수 있어야 한다. 뿐만 아니라 대체솔더합금은 기존의 Sn-37Pb재와 비교하여 그 가격이 크게 상승하지 않아야 한다.

종래의 Sn-37Pb 공정합금(용점:183°C) 근방의 용점을 지니는 Sn계 이원 공정합금으로는 Sn-8.8Zn(공정 온도: 199°C), Sn-3.5Ag(공정 온도: 221°C), Sn-0.7Cu(공정 온도: 227°C) 등이 있다. 이들 이원계 합금에 용점강화와 성능보완을 위해 Bi, In 등의 원소를 첨가한 것이

무연솔더의 대표 후보 합금으로 검토되어 왔다¹¹⁾.

3. 무연솔더의 종류와 특성

대체재료로 연구 개발되고 있는 무연솔더 합금들은 전술한 바와 같이 Sn을 주성분으로 한 것이 주축을 이루고 있다. 이때 Sn이 기지 금속으로 사용되는 이유는 다음과 같다. 즉, 환경 문제를 유발하지 않는 성분인 Sn은 매장량이 많아 경제적인 측면에서 유리하고, 용융온도가 232°C로 다소 높지만 합금화에 의해 낮출 수 있으며, 전기전도도 등이 우수하다는 점이다. 또한 여러 금속원소와의 반응성이 우수하여 접합 재료용으로 적합하다. 이러한 Sn이 추가 되는 솔더 합금 중 많은 연구에 의해 일부 실용화가 이루어지기도 한 무연솔더 후보합금은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

3.1 Sn-Ag계

① Sn-3.5Ag

Fig. 1은 Sn-Ag계의 이원계 상태도이다. 상태도에서

볼 수 있듯이 Sn-Ag계의 공정조성은 Sn-3.5Ag이며, 공정온도는 221°C로써 비교적 고온용 솔더에 해당된다. Sn-Ag 합금이 공정점에서 벗어나면 액상선과 고상선으로 나뉘게 되는데, 액상선과 고상선의 중간영역을 머쉬존(mushy zone)이라 하며 최근에는 이러한 머쉬존에서의 솔더 특성도 보고된 바가 있다¹²⁻¹⁴⁾. 그러나 용점이 가장 낮은 Sn-3.5Ag 공정 합금이 가장 활발히 연구가 진행되어 온 조성이며, 인장강도, 열피로, 크리프 등 기계적 특성이 종래의 Sn-Pb합금에 비해 우수하다는 장점이 있다. 접합부 강도가 특히 우수한 것으로 확인된 Sn-3.5Ag는 Fig. 2에 보듯이 PCB 기판의 epoxy와 Cu 전극사이의 강도 보다 높은 강도를 지녀 계면파괴(interfacial fracture) 모드를 지닌다¹⁵⁾. 이러한 기계적 특성은 Ag₃Sn과 같은 안정한 금속간 화합물이 Sn 내에 분산된 것에서 기인한다. Sn-Ag계 솔더는 0.04%Ag가 함유된 거의 순수한 Sn상과 ε상(Ag₃Sn)으로 미세조직이 구성되어 있다. Fig. 3¹⁶⁾은 Sn-3.5Ag 공정합금에서 Sn 기지에 미세한 Ag₃Sn이 분산되어 있는 전형적인 미세조직이다. Ag는 Sn 내 고용도가 거의 없으므로 일단 생성된 Ag₃Sn은 고온상태에서도 결정이 크게 조대화 되지 않아 높은 신

Table 1. 실용 가능한 무연솔더 후보합금의 분류 예

합금계	용융온도 (°C)													
	저온				중온				중고온				고온	
	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260
Sn-Pb계							Sn/Pb37				Sn100			
Sn-Bi계	Sn/Bi58													
	Sn/Bi20/Ag2.0/Cu0.5						Sn/Bi7.5/Ag2.0/Cu0.5							
Sn-In계	Sn/In52													
	Sn/Bi20/In10						Sn/Bi7.5/Ag2.0							
Sn-Ag계	Sn/Ag3.5													
	Sn/Ag3.0/Cu0.5													
	Sn/Ag2.5/Cu0.5/Bi1.0						Sn/Ag3.5/Cu0.5/Sb0.2							
Sn-Cu계	Sn/Cu0.7/Ni0.1													
	Sn/Cu0.9/Sb0.3													
Sn-Zn계	Sn/Zn9													
	Sn/Zn9/In5													
	Sn/Zn8/Bi3													
Sn-Sb계	Sn/Sb1													
	Sn/Sb/Cu													

되성을 나타낸다¹⁷⁾. 한편 Sn 기지 상에 생성된 침상형태의 금속간화합물 ε상은 용고 방향을 따라 성장하며 솔더링 공정 중 냉각속도가 빠르면 ε상의 핵성성은 촉진되고 성장은 방해되어 미세하게 정출된다. 그러나, 냉각속도가 느리고 솔더링 온도가 높으며 유지시간이 길어지면 ε상은 침상형태로 성장된다고 한다^{18,19)}.

Fig. 4²⁰⁾는 리플로 솔더링시에 솔더링 온도에 따른 ε정출상의 변화를 나타낸 사진이다. Fig. 5²¹⁾는 냉각속도가 ε정출상의 형상에 미치는 영향을 보인 사진이다. Fig. 4에 의하면 솔더링 온도가 증가함에 따라 ε상은 점차 조대화 되고 침상형을 띄는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 5에서는 Sn-3.5Ag 공정조성에서 냉각속도가 빠른 경우 ε상이 미세하게 정출되고 냉각속도가 느린 경우에는 크게 성장하였음을 보여준다.

웨팅 밸런스 시험(Wetting Balance Test)법에 의하여 액상 솔더의 젖음력을 측정할 때 따르면, 솔더의 온도가 증가할수록 액상솔더의 표면장력 및 접촉각이 감소하는 경향이 있으며, Sn-3.5Ag 솔더는 Sn-37Pb에 비해 표면장력이 높고, 접촉각이 낮아 젖음성이 떨어진다는 보고가 있다²²⁾. 그러나 이러한 Sn-3.5Ag 합금계의 단점을 개선하기 위하여 Cu, Bi 등의 원소를 첨가하여 용점을 강하시키고, 젖음성도 개선시킨 삼원계 및 사원계 솔더가 개발되기도 하였다. Sn-3.5Ag 공정합금은 용점(221°C)이 비교적 높고 기계적 성질이 우수하여, 자동차용 전자부품의 고온용 솔더로 적용 가능하다.

② Sn-Ag-Cu계

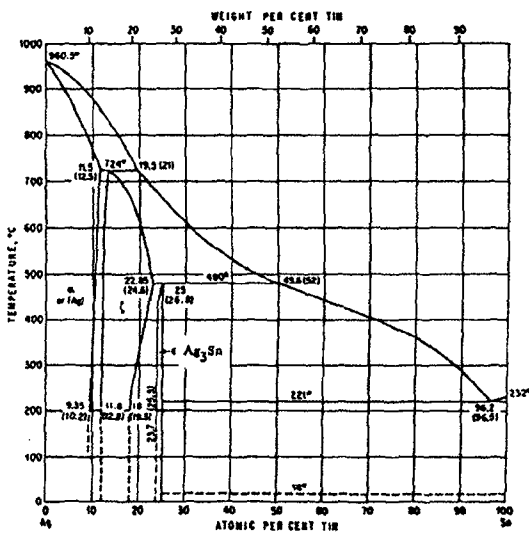


Fig. 1. Phase diagram of Sn-Ag system.

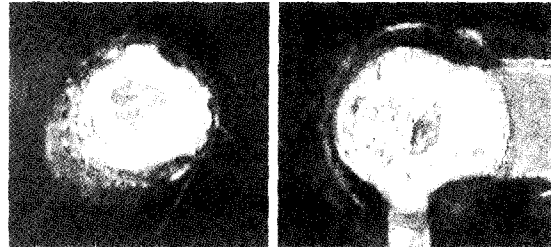


Fig. 2. An Interfacial Fracture on the Solder and PCB interface for a Sn-3.5Ag Solder Joint: Solder interface on the BGA (left) and Solder interface on the PCB (right).

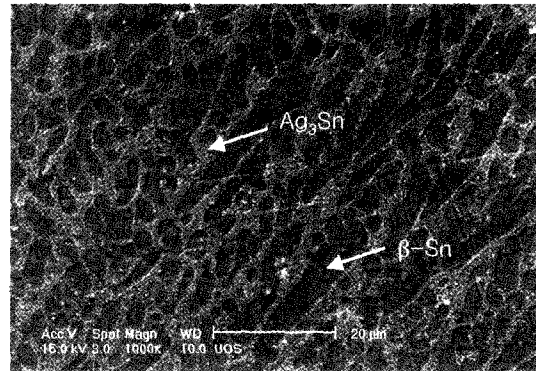


Fig. 3. A Typical microstructure of the eutectic Sn-Ag system.

Sn-3.5Ag 공정 솔더합금에 Cu를 첨가하면 용점을 낮출 수 있으며 또한 젖음성 및 강도가 개선되어 신뢰성이 향상되므로, Sn-Ag-Cu계는 최근 유력한 무연솔더 합금으로 관심을 끌고 있다. 이중 가장 유력한 3원 합금조성인 Sn-3.5Ag-0.7Cu(용점 217°C)는 Sn-3.5Ag와 유사한 미세조직을 갖고 있으나 솔더 내부에 Cu 함유량이 증가하면 Cu₆Sn₅ 금속간화합물이 조대화되는 경향이 있다. 또한 Cu 전극사이에서 용고시 Cu₆Sn₅와 Cu₃Sn 금속간화합물이 모두 형성된다. Fig. 6은 Cu 전극과 Sn-4.0Ag-0.5Cu솔더 사이에서 형성된 전형적인 금속간화합물 층을 보이는 것이다²³⁾. 이때 형성된 금속간화합물 층은 Sn계 솔더와 Cu 전극 사이에서 거의 나타나는 것으로서 기계적성질에 많은 영향을 미치는 것으로 밝혀지고 있다. 초기 금속간화합물은 접합부의 강도를 개선시키지만 시간 또는 온도 함수에 의해 금속간화합물이 두꺼워지면 열충격시험에 의한 전단강도 값은 금속간화합물의 두께에 따라 감소하는 경향을 보인다는 보고도 있다. 특히 금속간화합물 층은 취약하므로 열충격시험시 접합부의 균열(crack) 발생부가 된다고 한다²⁴⁾.

Sn-3.5Ag-Cu계는 Sn-3.5Ag 공정솔더와 마찬가지로

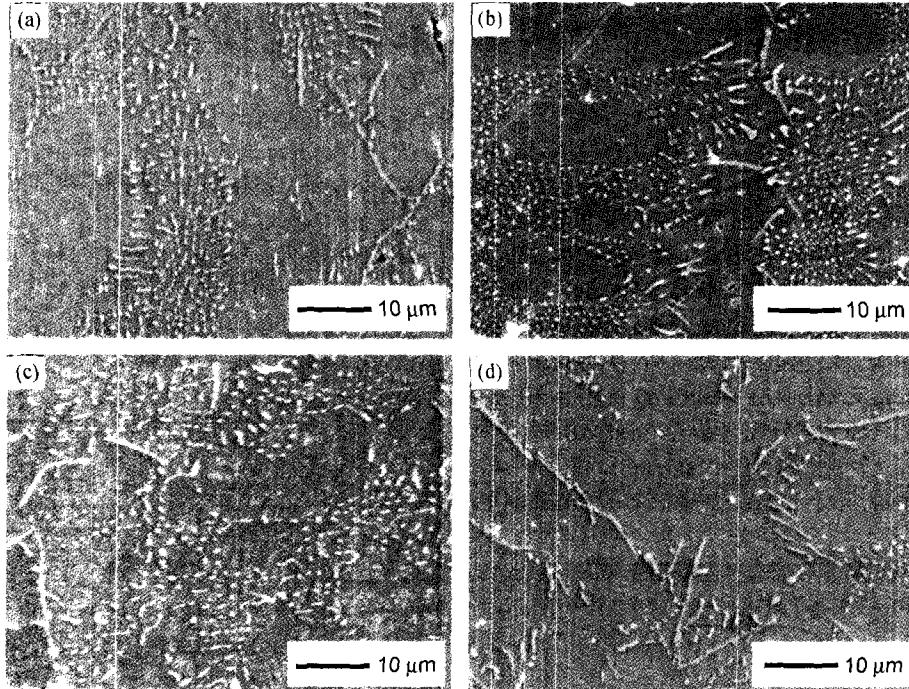


Fig. 4. Effect of soldering temperature on SEM micro-graphs of Sn-3.5wt%Ag microstructure. The soldering conditions are 250°C (a), 260°C (b), 270°C (c) and 280 (d)-0.4 m/min.

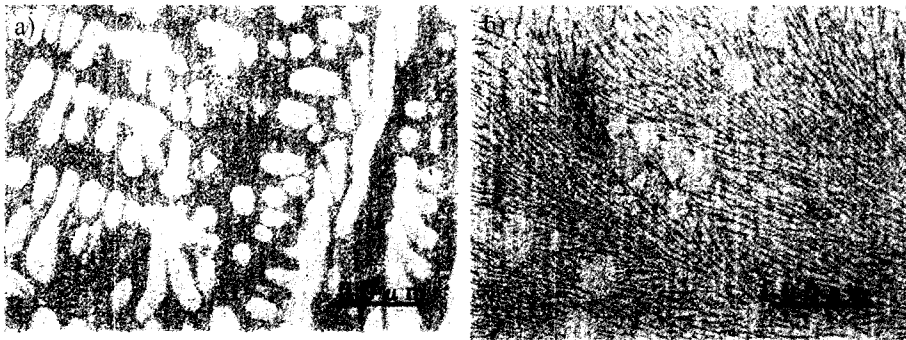


Fig. 5. Effect of cooling speed during solidification on SEM micrographs of Sn-3.5wt%Ag microstructure: a) slow, b) rapid cooling.

인장강도, 열피로, 크리프 특성 등 기계적 성질이 종래의 Sn-37Pb 합금보다 우수하다. Fig. 7²⁵⁾은 Cu기판에서 무연솔더 및 Sn-Pb계 합금조성에 따른 접합강도를 나타낸 그래프이다. Fig. 7에서 보듯이 Sn-3.5Ag-0.5Cu 솔더의 접합강도가 Sn-37Pb에 비해 높은 것을 알 수 있다. 그러나 브릿지 발생율은 Sn-3.5Ag-Cu계에서 Cu농도의 증가에 따라 증가하며 특히 Cu-3.5Ag-2.0Cu는 Sn-3.5Ag의 3배 정도라는 보고가 있다. 또한 용점이 Sn-37Pb보다 높아서 내열성이 낮은 부품이 실장된 PCB에서의 사

용은 불가능한 단점이 있다. 이러한 Sn-Ag-Cu 3원 합금계는 미국, 유럽, 일본 등에서 매우 관심을 갖고 있는 조성으로서 각 나라에 따라 약간의 조성비 차이는 있지만 실용화 상의 특성 차는 크지 않은 것으로 보고되었다.

③ Sn-Ag-Bi계¹⁷⁾

Sn-3.5Ag에 Bi가 첨가되면 용점이 낮아지는 효과가 있으며 강도가 향상되고 젖음성도 저하되지 않는 장점이 있다. 특히 Bi 함량이 2%까지는 고용강화, 2~5%에

서는 고용강화 및 분산강화효과에 의해 강도는 크게 개선된다. 그러나 Bi 첨가량이 많은 경우 Sn 내에 고용되지 못한 Bi는 냉각 중 솔더 내에 미세하게 석출되어 취성을 띄고 연성을 저하시키기도 한다. 또한 Bi 첨가는 액상선이 낮아지는 효과는 있지만 용융범위가 넓어지면서 결국 lift-off 불량을 일으키는 원인이 되기도 한다²³⁾. Bi 첨가량이 3%인 경우, 용융온도범위가 약 10°C이므로 Sn-3.5Ag-Bi계에서 Bi의 첨가는 3% 이내로 한다. 미세조직은 Sn-Ag-Bi 합금계 역시 Sn-3.5Ag 합금의 Ag₃Sn 미세 분산조직이 유지되며 Bi 첨가량에 따라 Ag₃Sn상이 조대화 되는 경향을 보인다. 이와 같은 Sn-3.5Ag-Bi 합금은 In을 첨가하여 용점을 낮추거나 젖음성을 약간 향상시킬 수 있다.

④ Sn-Ag-Zn계²⁶⁾

Sn-Ag-Zn계 중에서 개발된 유력한 합금조성은 Sn-3.5Ag-1Zn이며 용융점은 약 217°C이다. Zn은 상호 고용도가 낮은 Sn-3.5Ag 솔더 내에서 Sn에는 고용도가 거의 없으나 Ag에는 고용이 잘 되어 강도 및 내크립성을 증가

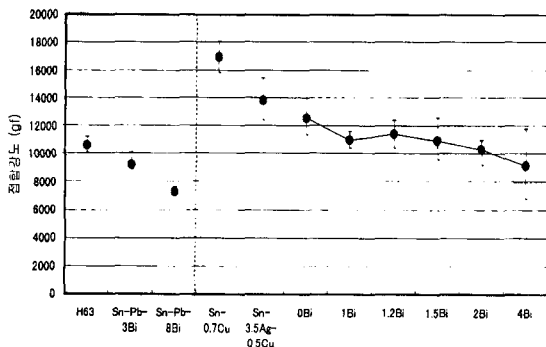


Fig. 6. Peel strength of various solders on the Cu substrate (soldering temperature: 250°C, H63Sn-37Pb).

시킬 수 있지만, 대기 중에서 산화가 용이하여 젖음 특성을 저해하고 내식성이 약하기 때문에 솔더링에서의 사용이 제한되어 왔다. 그러나 최근 질소가스 분위기의 솔더링과 플럭스의 발달로 Zn의 산화 문제가 해결될 수 있어서 그 적용 가능성은 높다. 또한 Sn-3.5Ag에 Zn를 첨가하면 수지상(dendrite)의 형성이 억제되고 Ag₃Sn이 미세화 되어, 젖음력이 Sn-3.5Ag와 대등한 수준을 유지하면서 최대인장응력이 48%정도 향상되는 장점이 있다.

3.2. Sn-Cu계^{17,26)}

Sn-0.7Cu는 용융점이 227°C인 공정솔더 합금계이다. 크리프 특성이 종래의 솔더에 비해 떨어지지만 기계적 강도가 양호하고 가격이 낮은 장점이 있다. 그러나 용점이 높아서 솔더링 온도도 높아지므로 플로(flow)솔더링 및 와이어(wire)용으로 한정된다. 공정합금의 조직은 β-Sn 초정과 이것을 둘러싸고 Cu₆Sn₅ 미립자와 Sn 공정조직이 넓게 형성된다. Cu₆Sn₅는 Cu 전극과 솔더의 반응으로 인해 조대한 정출물로 형성되기도 하여 기계적 성질을 감소시키므로 이 합금의 Cu₆Sn₅를 미세화하기 위해 Ag, Ni, Au등의 제 3원소를 미량 첨가하기도 한다. Sn-0.7Cu-0.3Ag 합금 조성의 플로솔더링 시 lift-off는 Pb를 함유한 도금층에서는 lift-off가 다소 발생하지만, Pb를 함유하지 않은 도금층에서는 그 발생률이 적다고 보고되었다.

3.3. Sn-Bi계¹⁶⁾

Sn-58Bi는 138°C의 비교적 낮은 용점을 갖는 저온 솔더 합금이다. Sn에 대한 Bi의 최대 고용도는 138°C에서 21%로서 높지만, 온도가 낮아질수록 고용도가 낮아지므로 응고시 Bi가 조대한 석출물을 형성하여 기계적 성질에 악영향을 미칠 수 있다. 공정조성이 아닌 Sn-Bi계 솔더의 경우, 실용화에 있어서 가장 큰 문제점은 190°C

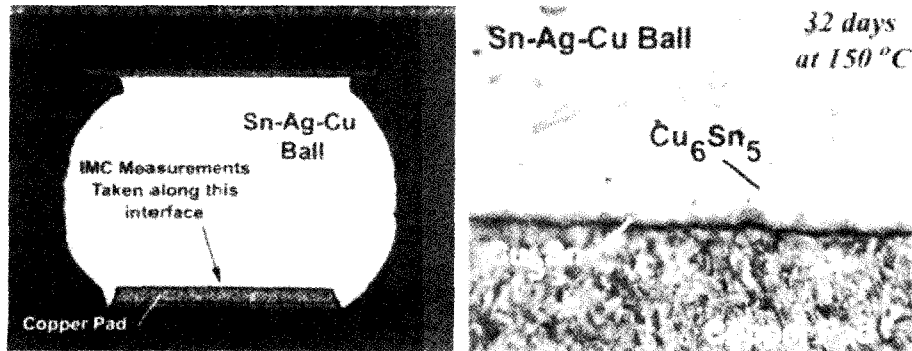


Fig. 7. Micrograph of a Sn-4.0Ag-0.5Cu solder joint(left) and interface of the copper pad and a Sn-4.0Ag-0.5Cu ball after 32 Days of aging at 150 (right).

부근에서 솔더링시 고/액 공존영역(mushy zone)이 상당히 커지므로 이러한 영향은 응고 편석으로 나타나 lift-off(fillet-lifting)를 발생시키는 요인이 되는 것이다(그러나 Sn-58Bi 공정 조성에서는 이와 같은 lift-off는 발생하지 않는다). Fig. 8은 이러한 응고 편석에 의한 전형적인 lift-off 발생을 보인 것이다. 따라서 솔더링 특성 등을 고려하여 Bi의 첨가량을 5%이하로 하거나 제 3원소의 합금화에 따라 미세 분산시킬 필요가 있다. 브릿지 발생률은 Sn-37Pb 솔더와 동일한 수준으로 브릿지 발생이 적은 합금인 것으로 확인되었다.

3.4 Sn-Zn계¹⁷⁾

Sn-8.8Zn는 198°C의 공정온도를 갖는 것으로서 Sn-37Pb 공정솔더와 용융점이 가장 유사하다. 이 합금은 강도와 크리프 특성 및 내열피로성이 우수하고 경제적이지만, Cu에 대한 젖음성이 좋지 않고 브리지(bridge), 공공(void)등의 결함이 발생한다. 또한 Zn은 활성화되어 안정한 산화물을 형성하므로, 플로(flow)솔더링 등 산화되기 쉬운 조건에서는 질소분위에서 사용하여야 한다. 한편 최근 개발된 솔더 페이스트에 의해 대기중에서도 220°C 정도의 리플로 실장이 가능해 지고 있다. 상태도에 의하면 Sn-Zn계는 Sn과 Zn의 상호 고용도가 거의 없어서 응고 후 미세조직은 Sn-rich 초정과 Zn-rich상으로 구성된 lamellar를 관찰할 수 있다. 또 Sn과 Zn은 둘 다 Cu 전극과 반응하여 금속간화합물을 형성한다. 따라서 고온솔더링시 Cu 전극에 대해서는 Ni/Au등의 barrier 도금을 할 필요가 있다. 이와같은 Sn-8.8Zn 공정솔더는 In을 첨가하여 젖음성을 개선하거나 크리프 변형속도를 감소시킬 수도 있다. 또한, Bi를 첨가하면 용점이 낮고 비용이 낮아지므로 비내열 부품에 응용 가능하다.

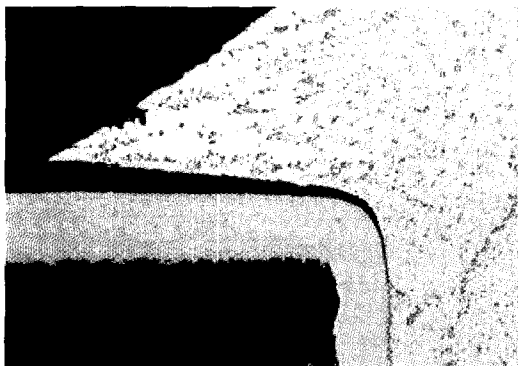


Fig. 8. A typical cross-section of lift-off arisen from the segregation of low melting-point liquid.

3.5. Sn-In계²⁰⁾

Sn-In계는 In-49.1Sn이 공정조성이고 공정온도는 117°C로써 용점이 가장 낮고 연성과 젖음성이 우수한 저온용 솔더이다. 그러나 In의 가격이 비싸고 전단강도가 낮으며 드로스(dross) 발생률이 높아 Sn-37Pb의 공정솔더의 대응으로 상용화되기에는 어려움이 있다. 대체로 SMT에 응용되는 조성은 In-48Sn이다. Sn-In 합금계에서는 In-rich(44.8wt%Sn)의 β 상과 Sn-rich(77.6wt%Sn)의 γ 상과 같은 금속간화합물이 생성된다.

4. 대체 솔더합금의 문제점 및 대책

지금까지 Sn-37Pb 솔더의 대체재에 관한 연구개발 동향과 그 후보합금계의 종류에 대하여 살펴 보았다. 현재 대체 솔더로 개발된 합금들은 Sn-37Pb가 지닌 특성과 동등하지 않지 않더라도 그 문제점을 알면 대책을 찾을 수 있을 것이다. 무연솔더가 Sn-Pb와 비교해서 젖음성이 좋지 않은 이유는 다음과 같다¹¹⁾.

① 솔더의 표면장력: 무연솔더의 표면장력이 Sn-37Pb 솔더에 비해 크다(결과적으로 용융 솔더/플럭스의 계면장력이 크다).

② 솔더의 산화특성: Sn, Bi, In, Zn등은 Pb에 비해 안정한 산화물을 형성하는 원소이다.

③ 솔더/모재간의 전위차: 무연솔더의 전극전위가 모재 Cu와 비교해서 좋지 않다. 그래서 안정한 산화피막을 형성하는 원소가 선택 용해되지 않고 특정 원소만이 우선 용해된다.

④ 솔더/모재간의 금속간화합물 형성: 계면에 형성되는 금속간화합물이 달라서 솔더/모재간의 계면장력이 크게된다. 이와 같은 문제점 중 ①에 대해서는 플럭스의 개발, ②에 관해서는 질소 등의 저산소 분위기, ③,④에 대해서는 표면처리를 하는 등의 방법이 있다.

5. 경제성 및 요약

무연솔더의 실용화에 있어서 비용증가에 따른 문제를 피할 수는 없다. 그러나, 솔더페이스트에서는 합금의 비용이 줄어들기 때문에, Sn-37Pb와 비교하여 솔더페이스트 사용시의 소재비용 상승은 10~15% 정도라는 보고가 있다¹¹⁾. 또한 무연솔더의 젖음성 개선을 위해 플로 솔더링시에 사용하는 질소가스에 의한 비용상승은 드로스 발생 억제와 관련된 결함발생 저감, 또는 이음부 보수비용 및 로의 유지비용 경감 등에 의해 상쇄시킬 수 있을 것으로 보인다. 따라서, 무연솔더는 종합적으로 볼 때

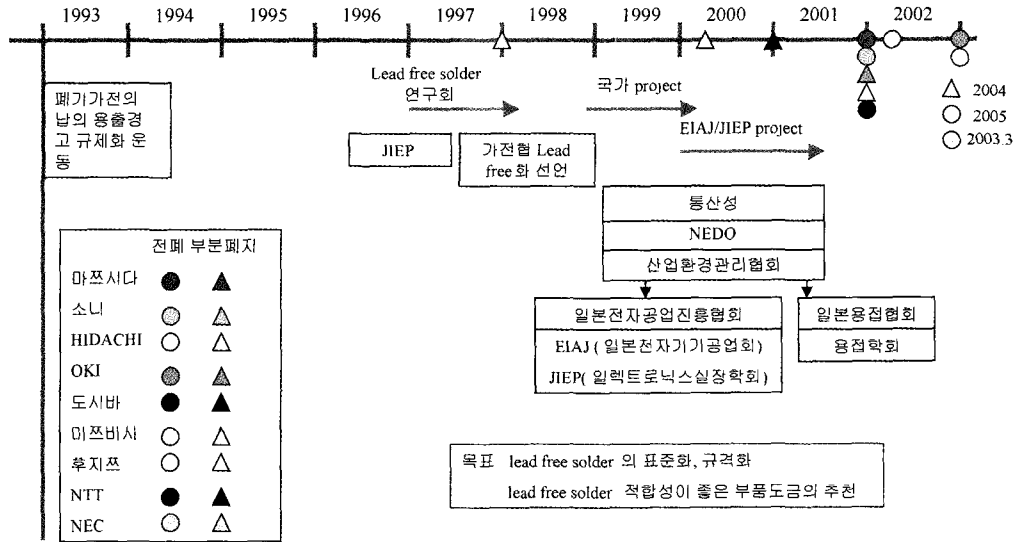


Fig. 9. Schedule of Pb-free solder research and application in Japan.

Sn-37Pb에 비해 그다지 높은 비용상승은 없을 것으로 추측되기도 한다.

더욱이 현재 개발된 솔더 합금조성 중 실용화 될 가능성이 가장 큰 Sn-3.5Ag계는 Sn-37Pb 공정과 비교할 때, 우수한 열피로 특성을 가지고 있고, 마이그레이션 감수성이 낮으므로 솔더링 후 이음부 신뢰성이 우수하여 제품의 수명을 늘리게 된다. 따라서 Sn-3.5Ag계와 같은 경우, 이미 BGA, CSP용 무연솔더로 사용되기도 하였다.

Fig. 9는 일본에서의 무연 솔더에 관한 연구진행과 대표적인 기업의 무연 솔더 폐지 일정을 정리한 것이다. 그룹에서 보듯이 일본의 주요기업들은 2002년 말 경까지 대부분 유연 솔더를 폐지할 계획을 가지고 있다. 국내 관련기업에서도 이에 관한 대비가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. R. J. Klein Wassink: "Soldering in Electronics", 2nd Ed. Electronchem. Pub. Scotland, pp 1-2 (1989).
2. 신영의, 임승수, 정재필: "솔더링 기술 실무" (1999).
3. D. R. Frear: "Solder Mechanics", Astate of the art Assessment: Ed. by D. R. Frear. W. B. Jones. K. R. Kinsman. A publication of TMS. Pennsylvania, pp. 191 (1991).
4. J. W. Morris et al: "Solder Joint Reliability-Theory and Applications", Ed. by J. H. Lau, Van Nostrand Reinhold. New York, pp. 225 (1991).
5. J. Glazer: "Mertalurgy of Low Temperature Pb-free

- Solders for Electronic Assembly", Int. Mater. Review, 40, 2, pp. 65 (1995).
6. Rumam. R. D: "Review of Cology of Inorganic Lead", A.m. Ind. Hyg. Assoc. J. 47, 11, pp. 700 (1986).
7. Yoshihiro, Taicase: "Dissolution Mechanism of Lead from Tin-Lead Solder alloys under Acid rain", MES'97, 7회, pp. 49 (1997).
8. 潮憲樹: "Elektrotroniks 實裝技術", 16, 9, pp. 19 (2000).
9. 鈴木元治, 河野, 英一, 酒井浩: "NECにおける鉛フリーはんだ 實用化 狀況と 課題", Elektrotroniks 實裝技術, 臨時増刊號, pp. 26 (1999).
10. Mulugeta Abteu, Guna Selvaduray: "Lead-free solders in microelectronic", Mater. Sci and Eng, 27, pp. 95 (2000).
11. 竹本 正: "溶接學會誌", "The Recent Situation of Lead-Containing Solder Regulation and Replacement to Environmetally compatable Lead-free solder" 69, 2, pp. 6 (2000).
12. Jun-Seok Ha, Jea-Yong Park, Jae-Pil Jung, Choon-Sik Kang: "Application of Soldering in Partial Melting to Grid Area Packaging Using of Pb free Hyper-Eutectic Solder", Annual Meet of TMS. TN. USA, Feb, pp. 20 (2000).
13. 김분일, 신규식, 정재필, 박재용, 하준석, 강춘식: "부분용융상태에서의 솔더링에 관한 연구-표면장력 및 젖음성 특성 분석", 대학용접학회, 춘계학술대회 개요집, 35, pp. 199 (2000).

14. 하준석, 박재용, 강춘식, 김문일, 신규식, 정재필: “부분용융상태에서의 솔더링에 관한 연구-미세조직과 생성기구 해석”, 대학용접학회, 춘계학술대회 개요집, 35, pp. 203 (2000).
15. Patrick. R et al.: “Impact of Intermetallic Growth on the Mechanical Strength of Lead-Free BGA Assemblies”, Presented at ICP SMDMA Council APEXSM 2001, www.GoAPEX.org.
16. 신규식, 김문일, 정재필, 신영의, Kozo Fujimoto: “Sn-3.5Ag-0.7Cu Micro-BGA의 Solderbility성 연구”, Microelectronics & Packaging Society, 17, 3, pp. 55 (2000).
17. Sawamura Tadashi: “무연솔더의 현상과 과제”, LG 생산기술, 3, 7, pp. 20 (2000)
18. J. Glazer: “Microstructure and Mechanical properties of Pb-Free Solder Joints in Electronic Assemblies”, JEM, 23, 8, pp. 673 (1994).
19. I. Artaki, A. M. Jackson, P. T. Vianco: “Evaluation of Lead- Free Solder Joints in Electronic Assemblies”, JEM, 23, 8, pp. 757 (1994).
20. 한현주: “Reflow 공정변수에 따른 BGA Soldering 특성에 관한 연구”, 서울시립대 석사학위 논문, , pp. 18 (2000).
21. 村田 透: “鉛フリ-はんだの 技術動向”, エレクトロニクス 實装技術, 臨時増刊號, pp. 54-68 (1999).
22. J. Y Park, J. P. Jung, C. S. Kang: “The Analysis of the withdrawal Force Curve of the wetting”, IEEE Trans. Com. Pack. Tech, 22, 3, pp. 54 (1999).
23. Marconi Materials Technology: “BE-1994 IDEALS Synthesis Report”, <http://www.al-phametals.com/products/techarticles/leadfree>.
24. 谷口 芳邦, 阿部, 二朗, 小管, 克也: “鉛フリ-はんだ～ソニ-における 開發事例”, Electronic Packaging Technology, 臨時増刊號, pp. 38 (1999).
25. N. M Poon, C. M. Lawrence Wu, Joseph K. L.Lai, and Y. C.Chan: “Residual Shear Strength of Sn-Ag and Sn-Bi Lead-Free SMT Joint After Thermal Shcok”, IEEE Trans. Advanced Pack, 23, 4, pp. 708 (2000).
26. Frear. D. R: “The Mechanics of Solder Alloy Interconnections”, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 42 (1994).