

Sn-Ag계 무연솔더의 연구개발동향

김문일·신규식·정재필

Research Trends of Sn-Ag Based Pb-Free Solders

Moon-Il Kim, Kyu-Sik Shin and Jae-Pil Jung

솔더의 개발동향에 대해 기술하고자 한다.

1. 서 론

21세기에 접어들어 정보통신네트워크의 발전이 급속하게 진행되고 있으며, 정보통신기기는 소형화·고기능화에 의해 휴대성이 향상되고 있다. 정보통신기기의 제조에는 각종 마이크로 접합법이 활용되는데 저융점 재료인 솔더를 사용한 미세접합(마이크로솔더링)은 최근의 고기능 전자부품 실장의 핵심기술이며^{1,2)}, 솔더재료의 사용이 없이는 이들 기기의 제조는 불가능하다. 최근에는 미소 솔더볼을 이용한 범프접합에 의해 패키지가 단층으로 소형화 되어 그 접합부가 더욱 미세·미소화되어 있다³⁾.

솔더재료가 전자부품 실장에 불가결한 것은 융점이 적절하기 때문에 기판상에 부품실장시 부품의 열손실이 일어나지 않고, 수지류를 함유하는 기판의 변형이 적은 등 온도상 문제와 양호한 젖음성으로 인한 접합부의 양호한 품질확보에 기인한다. 그러나 최근의 고밀도 표면실장화의 진전에 따라 솔더이음부는 극히 열악한 열, 기계적 조건하에서의 사용이 증대되어 열피로특성의 개선등이 요구되어 왔다^{4,5)}.

한편 1990대 초반에 미국에서 전기전자제품에 사용되는 납 사용 규제가 검토된 일을⁶⁾ 계기로 무연솔더의 개발연구가 광범위하게 행해졌다. 더욱이 최근 일본에서 급진전되고 있는 무연솔더의 개발과 이를 사용한 전자제품의 생산은 금후 전자산업에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. 이러한 변화를 계기로 종래에 사용되어온 Sn-Pb공정합금은 점차 폐기되고, 이제는 납을 함유하지 않은 무연솔더로 점차 대체될 것이다. 이들 무연솔더들도 Sn-Pb 공정솔더에 버금가는 적절한 융점과 양호한 접합성이 요구된다.

본 고에서는 환경친화형 재료로서 금후 가장 유력한 무연솔더 후보 합금인 Sn-Ag계 합금을 중심으로 무연

2. 무연솔더의 정의

금속면간에 모재보다 융점이 낮은 비철금속을 모세관 현상에 의해 전체에 퍼지게 해서 금속끼리 접합시키는 방법을 솔더링이라 한다. 그리고 이 비철금속을 납재라 한다. 또, 융점이 450℃이상을 경납, 450℃ 이하를 연납이라 하며, 이 연납을 일반적으로 솔더라 한다⁷⁾.

종래의 Sn-37 Pb 공정합금(융점:183℃) 근방의 융점을 보이는 무연솔더는 Sn-8.8Zn(199℃공정온도), Sn-3.5Ag(221℃공정), Sn-0.7Cu(227℃공정) 등이다. 또한, 이들 합금의 융점강하를 위해 Bi, In을 첨가한 것이 무연솔더의 대표적인 후보합금으로 검토되어왔다⁸⁾. 그러나 Sn-Zn계는 젖음성이 아주 나쁘기 때문에 웨이브 솔더링에 부적합하며, 리플로 솔더링에 사용되는 솔더 페이스트에서도 플럭스와 분말의 반응속도가 빠르고 보존성과 성능의 안정성이 나쁘게다 구리와 반응성이 높아서 아직까지는 실용화에 개선해야 될점이 있다⁹⁻¹¹⁾.

현재 실용화에 가장 근접하여 있으며, 일부 실용화가 시작된 Sn-Ag계를 기본으로 한 무연솔더에 대하여 연구가 활발히 진행되고 있다.

3. Sn-Ag계 무연솔더의 종류와 특성

3.1 융점과 젖음성

3.1.1 Sn-Ag 솔더

순수한 Ag의 융점은 961℃이며, Sn은 232℃이다.

순수한 재료에 한가지 이상의 재료를 첨가하였을 때 그 합금의 융점은 낮아질 수 있으며, 열역학적인 반응에 의해서 새로운 상이 생겨나고 서로 공존하게 된다.

96.5Sn 3.5Ag의 조성을 가지는 합금은 마치 하나의 원소처럼 하나의 용점(221℃)을 갖게 되는데, 이를 공정점이라 한다. 합금이 공정점에서 벗어나면 액상선과 고상선으로 나뉘게 되는데, 액상선과 고상선의 중간영역을 머쉬 존(mushy zone)이라 부른다. 따라서, 머쉬 존에서는 고상과 액상이 공존하게 된다. 최근에는 이러한 머쉬 존에서의 솔더링도 보고된 바 있다^{12~16)}.

웨팅 밸런스 시험(wetting balance test)법에 의하여 솔더의 젖음력을 측정하면 솔더의 온도가 증가할수록 표면장력 및 접촉각이 모두 감소하는 경향을 보인다. Sn-Ag 솔더의 표면장력은 Sn-Pb에 비해 높고, 접촉각은 낮다^{17~19)}. 이것은 Sn-Ag솔더가 Sn-Pb 솔더에 비해 젖음특성이 떨어짐을 보여준다²⁰⁾. 이에 관하여서는 보고서에 따라 약간의 차이가 있지만, 대략 10%정도의 젖음특성 차이가 있다^{17~19)}.

3.1.2 Sn-Ag-Cu 솔더

Sn-Ag-Cu계 무연솔더에 동을 첨가하면 젖음성이 향상되며, Cu의 첨가량에 의해서 현저한 차이를 보이고 있다. Sn-Pb 공정솔더와 비교할 때, 웨팅 밸런스 시험을 실시한 결과 젖음시간(zero-cross time)이 길어지는 경향을 보였지만, 최대 인출력은 대체로 비슷한 값을 보인다.

3.1.3 Sn-Ag-Bi 솔더

Sn-Ag-Bi계 솔더에 있어서, Bi의 첨가량을 증가시키면 젖음성이 다소 개선되는 경향이 있다. Sn-Pb 공정솔더와 비교할 때, 웨팅 밸런스 시험을 실시한 결과 Bi 첨가량이 적은 경우는 젖음시간이 길어지며, Bi량이 7%이상일 때에는 표면장력이 증가하게 된다²¹⁾.

3.1.4 Sn-Ag-Bi-In 솔더

Sn-Ag-Bi-In계 솔더에서는 In량을 증가시키더라도 젖음성은 극히 조금만 개선된다.

3.2 미세조직

3.2.1. Sn-Ag 솔더²²⁾

Fig. 1은 Sn-Ag 2원계 합금의 상태를 나타낸다. Sn-Ag계 솔더는 0.04% 이하의 Ag가 함유된 거의 순수한 Sn상과 ε상(Ag₃Sn)으로 미세조직이 구성되어 있다. Sn 기지 상에 생성된 침상형태의 ε상은 Sn-Pb에서 관찰되는 층상 형태를 보이지 않고, 응고방향을 따라 성장한다. 또한, 솔더링 공정 중에 받게 되는 열의 강도가 높고 냉각속도가 빠르면 핵생성은 촉진되는 반면 ε상의 성장이 방해되어 미세하게 분산된 조직을 나

타내지만, 반대의 경우는 침상 형태로 성장하게된다.

Sn-3.5wt%Ag 공정 합금은 순수한 Sn에 가깝기 때문에, Sn에서 볼 수 있는 'whisker growth'와 'tin pest'가 일어나는 경향이 있다. 반면, 상태도에서 볼 수 있듯이 용점이 221℃로 비교적 높고, 인장강도 및 전단강도 등의 기계적 성질이 우수하여 자동차용 전자 부품과 같은 고온 분위기에 적용 가능하다.

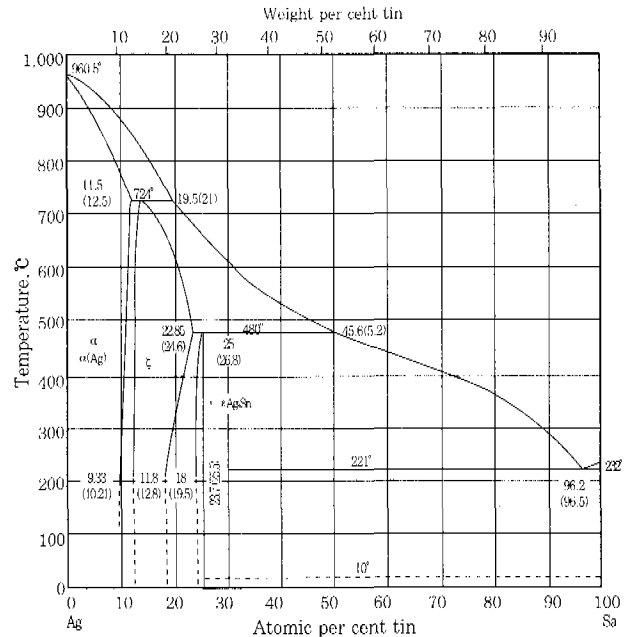


Fig. 1 Phase diagram of Sn-Ag binary alloy.

Fig. 2는 250℃-0.7m/min과 290℃-0.4m/min 조건에서의 Sn-3.5Ag의 초기접합 상태와 시효 후의 솔더 내부의 미세조직을 보여주는 SEM 사진이다. 250℃-0.7m/min 조건에 비해 290℃-0.4m/min 조건에

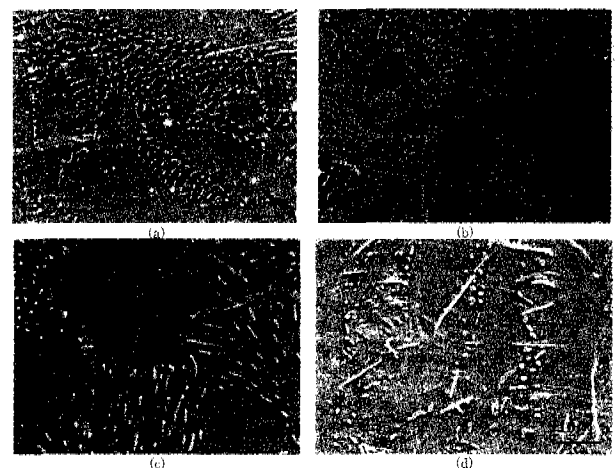


Fig. 2 SEM micrographs of Sn-3.5Ag solder reflowed at 250℃-0.7m/min(left) and 290℃-0.4m/min(right). The upper photographs are not aged, and the lower ones are aged at 100℃ for 600 hours.

서, 또 초기접합 상태보다는 시효 후의 솔더 내부에서 Ag_3Sn 상이 더 크게 성장하였음을 관찰할 수 있다. 이러한 원인은, 온도가 높고 유지시간이 길수록 원자의 확산이 많아지고, Ag_3Sn 상 성장에 의해 계면에너지를 낮출 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3은 Fig. 2와 동일한 조건에서의 접합부 계면을 보인 것이다. 계면에는 패드부(Cu/Ni/Sn) 위에 금속간화합물의 다중 이중 핵 생성(multi heterogeneous nucleation)에 의해 형성된 스킨(scallop) 형태의 금속간화합물이 존재한다²³⁾. 금속간화합물의 두께는 초기접합 상태의 경우 250℃-0.7m/min에서는 0.6~0.9 μ m, 290℃-0.4m/min 조건에서 1.6~2.0 μ m의 값을 나타내었다. 한편, 시효 후의 시편에서는 250℃-0.7m/min이 1.2~1.4 μ m, 290℃-0.4m/min이 1.8~2.2 μ m으로 성장한 것을 관찰할 수 있었다. 스킨의 형태는 초기접합 상태의 시편에서 250℃-0.7m/min 조건에서는 거의 반구형(hemi-spherical)의 스킨이 존재하는 반면, 290℃-0.4m/min 조건과 시효 후의 시편에서는 지름이 작아지면서 전체적으로 하나의 부드러운 경계를 유지한 형태를 보인다. 두 경우의 솔더링 공정조건은 공정 최고온도의 차이 뿐만 아니라, 솔더의 용점 이상에서의 유지시간도 2배 정도의 큰 차이를 보인다. 공정최고온도가 높으면, 확산의 구동력이 커서 더 많은 금속간 화합물이 성장할 수 있다. 또, 용점 이상에서의 유지시간이 길어질수록 확산이 용이하여 금속간화합물의 크기가 더 성장할 수 있다.

290℃-0.4m/min 조건과 시효 후의 시편에서는 지름이 작고 불룩한 형상의 스킨의 크기가 증가한 것을 확인할 수 있다.

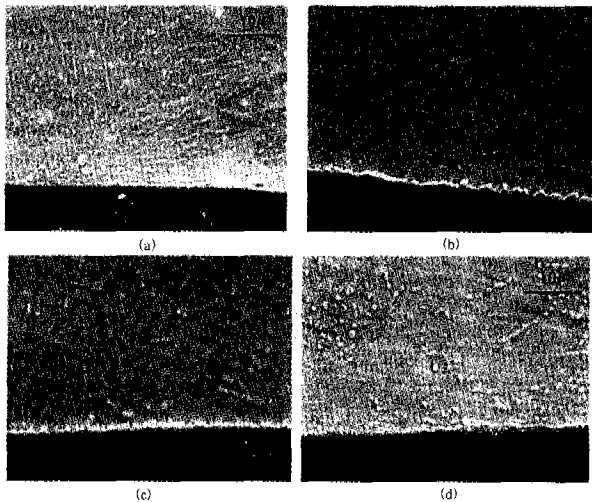


Fig. 3 SEM micrographs of the soldered joints using Sn-3.5Ag, which are reflowed at 250℃-0.7m/min(left) and 290℃-0.4m/min(right). The upper photographs are not aged and the lower ones are aged at 100℃ for 600 hours.

한편, Yao는 동일한 리플로 공정 조건에서 용융된 솔더를 각기 다른 냉각속도에서 응고시켜 미세조직을 관찰하였는데, 냉각속도가 빠른 수냉(water cooling) 조건인 경우 로냉(furnace cooling)에 비해 크기는 작고, 반구형의 형상을 갖는 스킨을 관찰하였다고 보고한 바 있다²³⁾.

3.2.2 Sn-Ag-Cu 솔더²⁴⁾

무연솔더의 대표적 후보 합금인 Sn-3.5Ag-0.7Cu는 Sn-3.5Ag 합금과 유사한 미세조직을 보인다. 그러나 극히 미세한 Ag_3Sn 상의 바깥에 Cu_6Sn_5 화합물이 존재하고, 또 β -Sn 상의 길이도 Sn-3.5Ag 2원계 합금보다 작지 않은 경향을 보인다. Cu 함유량이 증가하면 Cu_6Sn_5 화합물상이 조대화되는 경향을 보인다.

Table 1은 직경 0.3mm 솔더볼을 사용한 마이크로 BGA의 접합조건에 따른 접합가능성을 조사한 것이다.

Table 1에서 보듯이, 리플로 온도가 230℃인 경우에는 컨베이어 속도(기판이송속도) 0.7m/min. 이상에서 접합이 불가능하였으며, 240℃일 경우에는 0.9m/min.에서 접합이 불가능하였다.

Table 1 Results of reflow soldering for the solder ball of micro-BGA (Sn-3.5Ag-0.7Cu, ϕ 0.3mm)

	0.6m/min.	0.7m/min.	0.8m/min.	0.9m/min.
230℃	○	×	×	×
240℃	○	○	○	×
250℃	○	○	○	○
260℃	○	○	○	○

※ ○ : Bonded, × : Not bonded

접합 결과를 좀 더 자세히 조사하기 위하여 reflow peak 온도와 컨베이어속도에 따라 접합조건이 가장 좋을 때(260℃-0.6m/min)와 좋지 않을 때(250℃-0.7m/min)의 시편을 선정하여 SEM 사진을 찍어 금속간 화합물 및 시편내부의 조직을 관찰하였다.

Fig. 4는 관찰된 미세조직을 보인 것으로서, 1차 reflow 된 솔더볼의 전체 단면을 위에서부터 아래로 내려오면서 찍은 SEM 사진이다. 사진에서 보듯이 상부의 조대한 조직으로부터 하부의 미세한 조직까지의 금속조직 변화를 보여 주고 있다. 여기서 금속조직의 성장방향은 솔더의 상부표면으로부터 기판쪽으로 성장을 하였고 계면 근처의 금속조직은 등축형의 조직으로서 일반적인 금속의 주조직과 비슷한 형태를 갖고 있다.

검은색으로 나타난 영역은 초정의 Sn-rich상이며 상대적으로 밝은색으로 나타난 영역은 Ag-rich상이다.

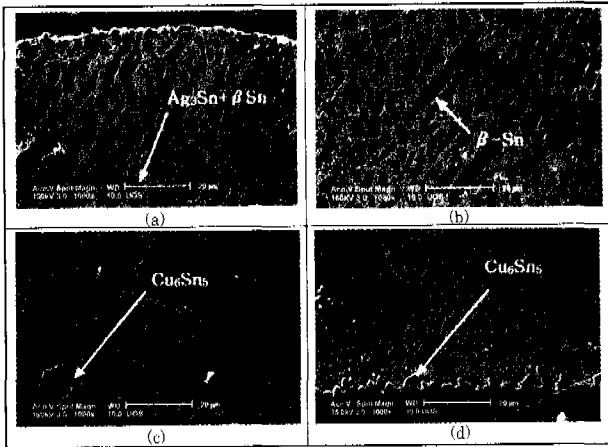


Fig. 4 Microstructure of Sn-3.5 Ag-0.7Cu solder joint. Top(a), middle(b,c), bottom(d)

Fig. 5는 Fig. 4의 솔더볼 단면에서 볼 수 있는 금속간 화합물의 성분과 형태를 보여주는 것으로서 EDS line분석을 한 결과이다. 솔더 내부에 존재하는 hexagonal형의 금속간 화합물은 Cu_6Sn_5 로 판명되었으며 이 금속간 화합물은 속이 비어있는 육각형의 rod형이다. 또한 그 내부는 솔더로 채워져 있다. 솔더볼과 Cu-pad사이의 계면에서 내부로 성장하는 형태의 needle형의 금속간 화합물은 Ag_3Sn 으로 판명되었다.

계면에서 관찰된 scallop형의 금속간 화합물은 Cu_6Sn_5 의 금속간 화합물로 판명되었으며 솔더링부의 reliability와 밀접한 관계를 갖고 있다. 즉, 이 금속간 화합물층의 두께는 솔더볼 접합부의 전단강도와 밀접한 관계를 갖고 있으며 최고 전단강도 값은 금속간 화합물층 두께에 대체로 반비례 한다.

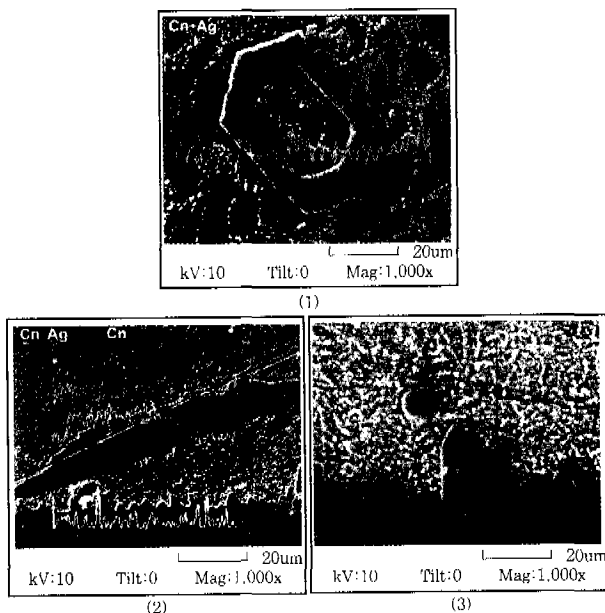


Fig. 5 Intermetallic compounds in Sn-3.5Ag-0.7Cu solder ball (1) hexagonal (Cu_6Sn_5) (2) needle (Ag_3Sn) (3) scallop (Cu_6Sn_5)

Fig. 6은 Sn-3.5Ag-0.7Cu 솔더와 Cu pad 사이의 접합계면의 금속간 화합물의 두께측정 결과를 보인 것이다. Fig. 6에서 보듯이, peak 온도를 $230^{\circ}C-0.7m/min$ 에서 $260^{\circ}C-0.6m/min$ 로 리플로 온도가 증가하고 컨베이어 속도가 감소할수록, 즉 솔더볼이 받는 열량이 증가할수록 금속간 화합물의 두께는 $4.2\mu m$ 에서 $4.4\mu m$ 까지 증가하였다.

Fig. 6에 보인 Sn-3.5Ag-0.7Cu에서의 금속간 화합물 두께($4.2\mu m \sim 4.5\mu m$)는 Sn-37Pb에서의 금속간 화합물 두께($1.13\mu m$ 에서 $1.45\mu m$, Fig. 5참조)보다 약 $3\mu m$ 정도 두꺼웠다. 이러한 원인 중 하나는 Sn-Ag-Cu의 경우 Sn-Pb에 비해 솔더링 온도가 높기 때문에 Cu-pad가 용융솔더로 용해되어 나오는 양이 많을 것이기 때문이다.

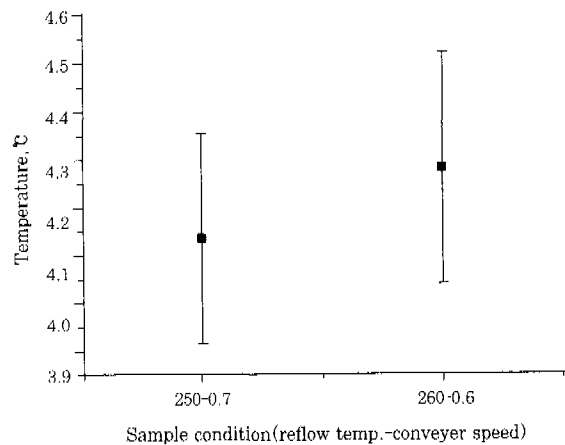


Fig. 6 Thickness of intermetallic compounds (Sn-3.5Ag-0.7Cu, $\phi 0.3mm$)

3.2.3 Sn-Ag-Bi 솔더²⁵⁾

Bi 농도가 고용한도 2% 이하의 경우, $\beta-Sn$ 상이 점차 작아지는데 이를 제외하고는 Sn-Ag합금의 조직과 크게 다르지 않다. Sn-3Ag-(3~15)%Bi 합금계의 경우 Bi 농도가 높기 때문에, 고용되지 않은 Bi상이 미세하지만 불균일하게 정출된다. 이처럼 불규칙한 형상의 제 2상은, 솔더의 기계적성질과 연성을 떨어뜨리는 요인이 된다. 또, 불규칙한 모양의 Ag_3Sn 상이 미세한 Ag_3Sn 입자를 함유한 $\beta-Sn$ 상의 주위에서 관찰된다.

3.2.4 Sn-Ag-Bi-In 솔더²⁶⁾

Sn에 고용되는 In양은 상온에서 약 8%이다. Sn-Ag-Bi-In계의 경우 보통 4% In을 첨가하면, In의 대부분은 모상인 $\beta-Sn$ 중에 고용된다. 이 경우 조직은 Sn-Ag-Bi계 3원 합금과 유사한데, $\beta-Sn$ 상중에 미세한 Ag_3Sn 입자와 소량의 Bi 입자상이 존재한다.

3.3 기계적 특성

3.3.1 Sn-Ag 솔더^{27,28)}

전단강도 시험은 측정 방법 및 작업자 등의 조건에 따라 그 값의 차이가 크지만, 접합부의 전단강도를 측정함으로써 리플로 공정상의 기판 상태, 플럭스, 솔더링의 문제점을 짐작할 수 있다.

Fig. 7은 직경 0.76mm인 Sn-3.5Ag 솔더볼을 사용하였을 때, 솔더링 최고온도 변화에 따른 솔더볼의 접합강도 변화 결과를 시효처리 유무에 따라 보인 것이다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 솔더볼의 전단강도는 상당한 변화폭을 가지고 있다.

Fig. 7(a)에서 Sn-3.5wt%Ag는 솔더링 온도가 240~280℃ 범위에 있을 때, 260℃에서 1,727 gf로 높은 값을 나타내었다.

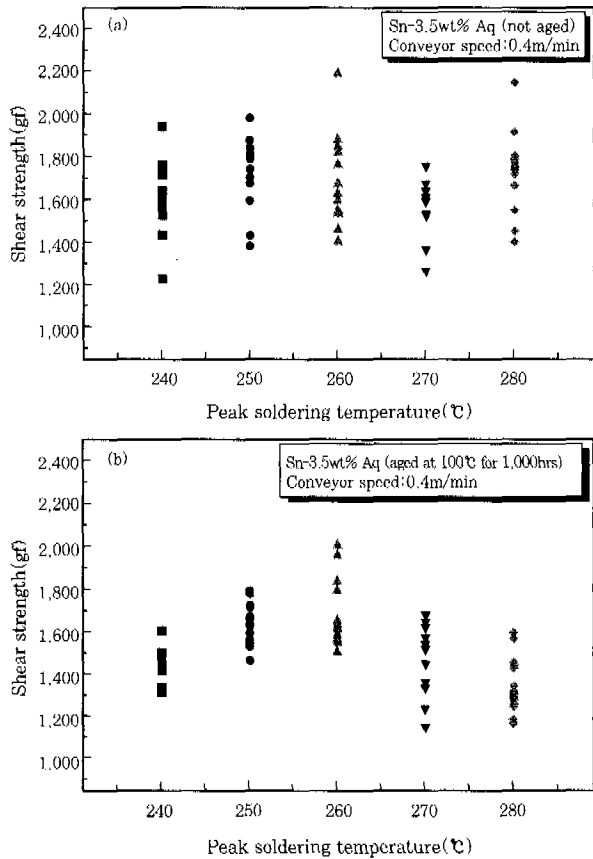


Fig. 7 Effect of peak soldering temperature(a), and aging treatment (b) on shear strength for Sn-3.5wt%Ag solder balls after reflow.

이러한 경향은 Fig. 7(b)에서 보였듯이 1,000 시간 시효 후에도 260℃ 시편이 1,650 gf로 높은 값을 나타내어 접합 초기와 동일하였다.

Sn-37wt%Pb와 Sn-3.5wt%Ag를 비교해 보면, 접합 초기와 1,000 시간 시효 후 시편에서 모두 Sn-3.5wt%Ag가 전체적으로 높은 강도값을 나타내었다.

3.3.2 Sn-Ag-Cu 솔더²⁴⁾

Fig. 8은 직경 0.3mm의 Sn-3.5Ag-0.7Cu 솔더볼을 사용하여 컨베이어 속도를 0.6m/min로 고정시키고, 솔더링 peak 온도변화에 따른 전단강도 변화를 나타낸 그림이다. Reflow peak 온도를 230℃에서 260℃로 증가시키에 따라 전단강도는 227gf에서 603gf로 증가하였으며, 최고강도는 250℃에서의 617gf이다.

Fig. 8로부터 솔더링의 최적온도는 250℃인 것으로 판단되어, peak 온도를 250℃로 고정시키고 컨베이어 속도를 변화시키며 솔더볼의 접합실험을 행한 결과, Sn-3.5Ag-0.7Cu 솔더볼의 접합부 전단강도는 컨베이어 속도를 0.6m/min에서 0.9m/min으로 증가시키에 따라 617gf에서 189gf로 감소하였다. 이것은 솔더볼이 받는 열량이 적어짐에 따라 솔더가 충분히 패드와 반응할 만큼 용융되지 못하여 접합강도가 떨어지는 것으로 판단된다.

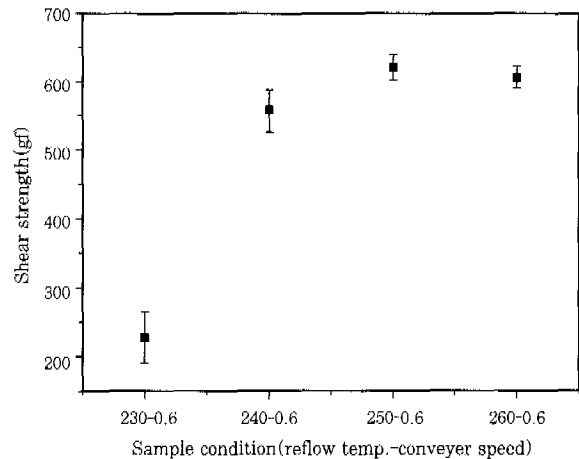


Fig. 8 Shear strength of Sn-3.5Ag-0.7Cu solder joints as reflow peak temperature

이상에서 Sn-Ag계 무연솔더의 연구개발 동향에 관하여 간략히 살펴 보았다. 이들 합금들은 아직 Sn-37Pb 기준 솔더 합금과 동등한 수준은 아니라고 할지라도 대체 솔더로는 가장 유력한 것들 중의 하나라고 할 수 있을 것이다. Sn-Ag계 솔더의 가격이 Sn-37Pb에 비해 다소 비싼 것이 결점이지만 페이스트 솔더의 경우 가격의 상승정도가 10~15% 내외라는 보고가 있다. 또한, 무연솔더 사용시 질소가스 장입으로 인해 질소가스 비용이 들지만, 로의 보수비용 절감, 플로우 솔더링의 경우 드로스(dross)의 감소로 비용상승을 줄일 수 있으리라는 추측도 있다. 무연솔더 및 솔더링에 관한 문제는 전자산업에 미치는 영향이 지대하므로 금후에도 지속적인 연구·개발이 필요하리라고 생각된다.

참고 문헌

1. R. J. Klein Wassink : Soldering in Electronics, 2nd

Ed., Electrochem. Pub., Scotland(1989), pp.1~2

2. 신영의, 임승수, 정재필 : 솔더링 기술 실무, 삼성실업(1999)
3. 한현주, 안현기, 박재용, 정재필, 신영의, 강춘식 : "Sn-Pb 및 Sn-Ag 공정 솔더를 이용한 리플로 솔더링 특성, 대한용접학회 추계대회 강연집", p.141~142(1998)
4. D. R. Frear : Solder Mechanics, A state of the art Assessment, Ed., by D. R. Frear, W.B. Jones, K. R. Kinsman, A publication of TMS, Pennsylvania(1991), p. 191.
5. J. W. Morris et al.: Solder Joint Reliability-Theory and Applications, Ed., by J. H. Lau, Van Nostrand Reinhold, New York(1991) p.225.
6. B. R. Allenby et al.: Circuit World, Vol. 19(1993), No. 2, 18-24.
7. 신영의, 정재필 : "마이크로 솔더링의 기초", 원창 출판사(1998)
8. 竹本 正 : まてりあ, Vol. 35(1996), No. 4, 320.
9. M. E. Loomans, S. Vaynman, G. Ghosh and M. E. Fine : J. Electronic Materials, Vol. 23(1994), No. 8, 741-746.
10. M. McCormack, S. Jin and H. S. Chen: J. Electronic Materials, Vol. 23(1994), No. 7, 687-690.
11. 한현주, 정재필, 신영의, 박재용, 정재필 : 전자산업에서의 마이크로 솔더링 기술, 대한금속학회 회보, Vol.12, No.6(1999), p. 677~687
12. Jae Yong Park, Jun Seok Ha, Moon Il Kim, Kyu Sik Shin, Jae Pil Jung, Choon Sik Kang : Study on the Soldering in Partial Melting State(1)-Analysis of surface tension and wettability, J. of Electronic Materials, Vol.29, No.10(2000)
13. Jun Seok Ha, Jae Yong Park, Jae Pil Jung, Choon Sik Kang : "Application of Soldering in Partial Melting Zone to Grid Area Packaging Using Pb Free Hyper-Eutectic Solder", Annual Meect. of TMS, TN, USA, p. 20, Feb.(2000)
14. 김문일, 신규식, 정재필, 박재용, 하준석, 강춘식 : "부분용융상태에서의 솔더링에 관한 연구-표면장력 및 젖음성 특성 분석-" 대한용접학회 춘계 학술발표대회 개요집, 제 35권, p.199-202(2000)
15. 하준석, 박재용, 강춘식, 김문일, 신규식, 정재필 : "부분용융상태에서의 솔더링에 관한 연구-미세조직과 생성기구 해석-" 대한용접학회 춘계 학술발표대회 개요집, 제 35권, p.203 - 206(2000)

16. 김문일, 신규식, 정재필, 하준석, 박재용, 강춘식 : 과공정 Pb-free 솔더를 이용한 부분 용융상태 솔더링의 Grid Area Package에의 적용, 대한금속학회 춘계 학술대회 개요집(2000), p. 138
17. J. Glazer : Microstructure and Mechanical Properties of Pb-free Solder Alloys for Low-cost Electronic Assembly, JEM, Vol. 23, No.8(1994), p.673~700
18. I. Artaki, A. M. Jackson, P. T. Vianco : evaluation of Lead-Free Solder Joints in Electronic Assemblies, JEM, Vol. 23, No. 8(1994), p.757~764
19. H. Takao, H. Hasegawa, T. Tsukada, M. Mizuno, K. Yamada, S. Yamamoto : Development of Contact Angle Measurement in Meniscograph Method(1)-Application to Tin-based solder alloys, 2nd Symp. Microjoining and Assembly Technology in Electronics, Osaka(1996), p. 101~106
20. Jae Yong Park, Jae Pil Jung, Choon Sik Kang : The Analysis of the Withdrawal Force Curve of the Wetting, IEEE, Trans. Component and Packaging Technology, Vol. 22, No.3(1999)
21. Edwin Bradley, III and Jasmina Hranisavljevic : Characterization of the Melting and Wetting of Sn-Ag-X Solders, Electronic Components and Technology conference(2000), p. 1443~1448
22. 한현주, 박재용, 정재필, 강춘식 : 리플로 공정변수가 BGA 솔더링 특성에 미치는 영향, 마이크로 전자 및 패키징 학회지, Vol. 6, No. 3(1999)
23. Daping Yao and Jian Ku Shang, "Effect of Cooling Rate on Interfacial Fatigue-Crack Growth in Sn-Pb Solder Joints", IEEE Transactions on CPMT-Part B, 19(1), p.154~164(1996).
24. 신규식, 김문일, 정재필, 신영의, K. Fujimoto : Sn-3.5Ag 0.7Cu micro-BGA의 Soldering성 연구, 마이크로 전자 및 패키징 학회지 Vol. 7, No. 3, p.55~61(2000)
25. 須賀 唯知: 鉛フリーはんだ技術(1999), pp. 86~91
26. 谷義治, 香川裕秀, 大塚正久, 第 4回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム(Mate '98) 論文集(1998), p. 253
27. 한현주 : Reflow 공정변수에 따른 BGA Soldering 특성에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위 논문(2000), p. 52~54
28. 한현주, 정재필, 신영의, 박재용, 강춘식 : BGA용 Sn-3.5Ag 발의 리플로 솔더링 특성, 대한용접 학회지, 18권 6호(2000)



- 김문일(金汶日)
- 1975년생
- 서울시립대학교 재료공학과
- 솔더링, 브레이징
- e-mail : whiteday@sidae.uos.ac.kr



- 신규식(莘奎植)
- 1974년생
- 서울시립대학교 재료공학과
- 솔더링, 브레이징
- e-mail : karionsks@netsgo.com



- 정재필(鄭在弼)
- 1959년생
- 서울시립대학교 재료공학과
- 솔더링, 브레이징
- e-mail : jpjung@uoscc.uos.ac.kr