

플럭스 활성도 및 In 첨가에 따른 Sn-0.3Ag-0.7Cu 솔더 조성의 젖음 특성 변화

유아미 · 김준기 · 김목순¹ · 현창용² · 이종현^{2,*}

한국생산기술연구원 용접 · 접합연구부/Microjoining Center,
¹인하대학교 신소재공학부, ²서울산업대학교 신소재공학과

Wettability Evaluation of Sn-0.3Ag-0.7Cu Solder Alloy with Different Flux Activity and Indium Addition

A-Mi Yu, Jun-Ki Kim, Mok-Soon Kim¹, Chang-Yong Hyun² and Jong-Hyun Lee^{2,*}

Advanced Welding and Joining R&D Department/Microjoining Center,
Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

¹School of Materials Science & Engineering, Inha University

²Department of Materials Science & Engineering, Seoul National University of Technology

초 록: 저 Ag 함유 Sn-Ag-Cu계 무연솔더 조성, 즉, Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성의 젖음 특성과 반응 특성을 Sn-1.0Ag-0.5Cu 및 Sn-3.0Ag-0.5Cu 합금 조성의 결과와 비교, 분석하였다. 또한 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성의 용융 특성을 시차주사열량계(differential scanning calorimeter, DSC)로 측정하고, 인장시험을 통한 응력-변형률 곡선을 관찰하였다. 아울러 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성의 젖음 특성을 향상시키기 위해 halide의 함유량이 많은 플럭스(flux)를 적용하거나 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성에 0.2wt.%의 In을 첨가하여 그 젖음 특성의 개선 정도를 분석해 보았다. 그 결과 halide 함유량이 높은 플럭스를 사용한 경우보다 미량의 In을 첨가한 경우가 230~240°C의 저온 영역에서 wettability의 향상에 보다 효과적임을 관찰할 수 있었다.

Abstract: In this paper, wetting and interfacial reaction properties for low Ag containing Sn-Ag-Cu Pb-free solder alloy, i.e., Sn-0.3Ag-0.7Cu were investigated and compared with those of Sn-1.0Ag-0.5Cu and Sn-3.0Ag-0.5Cu. Melting behavior and stress-strain curves of some Sn-xAg-xCu alloys were also measured using a differential scanning calorimeter(DSC) and a tensile test machine, respectively. In order to enhance insufficient wetting properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu alloy, the improvement of wetting properties were analyzed by applying fluxes containing higher content of halide or indium adding of 0.2wt.% into the solder alloy. It was concluded that the small addition of indium is more effective for the improvement of wettability in low temperature range of 230~240°C than applying flux containing higher content of halide.

Keywords: Pb-free solder, wettability, flux, halide, Indium

1. 서 론

지난 수년 동안 전기, 전자산업의 표준 무연 솔

더(solder) 조성으로는 Sn-3.0(wt.%)Ag-0.5(wt.%)Cu 합금이 널리 사용되어져 왔다.^{1,2)} 그러나 최근 무연 솔더 시장의 치열한 가격경쟁과 원자재 가격상승

*Corresponding author
E-mail: pljh@snut.ac.kr

으로 인해 솔더 조성에서 Ag의 함량을 낮추려는 시도가 활발히 진행되고 있다.^{3,5)} 3원계 Sn-Ag-Cu 무연 솔더 조성에서 Ag의 가장 우선적인 역할은 공정(eutectic) 반응 영역의 합금을 형성시킴으로써 액상선의 온도를 최소화하고, 이에 따라 솔더링 온도에서의 젖음성(wettability)을 개선시키는 것이다.^{6,7)} 따라서 Sn-Ag-Cu 조성에서 Ag의 양이 감소할수록 상용(homologous) 온도에서의 wettability는 비례하여 감소하게 된다.⁷⁾ 아울러 솔더 조인트(joint)의 기계적 특성 관점에서 Ag의 함량에 따른 특성 변화를 살펴보면, Ag 함량이 감소할수록 열 기계적 피로(thermal-mechanical fatigue) 수명은 감소하나 기계적 충격(mechanical impact)에 대한 수명은 증가되는 경향을 나타낸다.^{8,9)} 따라서 원료 가격 측면에서의 큰 이점에도 불구하고 Ag 함량이 매우 작은 무연 솔더 조성이 상업화되지 못하는 가장 큰 이유는 단편적인 기계적 특성이 아니라 wettability의 급격한 저하 때문이라고 말할 수 있다.

Ag 함량이 작은 무연 솔더 조성 중 Sn-2.5Ag-0.5Cu, Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성의 경우, 솔더 불로가 공되어 일부 사용되고 있으나, 원료가격 절감에 비해 만족스럽지 않은 wetting 특성으로 인하여 솔더 페이스트 조성으로는 상업적으로 적용되지 못하고 있다. 그러나 최근 들어 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성 기반의 무연 솔더 페이스트가 일부 회사로부터 제품화되면서 Sn-0.3Ag-0.7Cu 합금에 대한 관심이 국내외적으로 급격히 증가되고 있다.^{3,4)} Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성 자체는 Ag 함량의 감소로 인하여 wetting 특성이 크게 떨어지는 것이 일반적이나, 제품화된 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성의 경우 Bi와 희토류 금속(rare earth metal)을 합금원소로 첨가하거나,³⁾ 솔더 페이스트에 사용되는 플럭스(flux)의 활성화도(activity)를 효과적으로 증가시킨 것으로 알려지고 있다.⁴⁾ 일반적으로 플럭스의 활성화도는 할로겐화물(halide)의 함유량을 증가시킴으로써 개선된다. 즉, 플럭스 내 halide 성분은 고온에서 플럭스의 활성화도를 오래 유지시킴으로써 궁극적으로 금속 산화막을 환원시키는데 있어 효과적인 역할을 수행하는 것으로 보고되고 있다.¹⁶⁾

따라서 본 연구에서는 Sn-0.3Ag-0.7Cu 저 Ag 함유 솔더 조성의 wettability 수준 및 용융, 응고 특성을 조사하고 인장 시험에 의한 기계적 물성을 평가함으로써 솔더 합금으로서의 기본 물성을 분

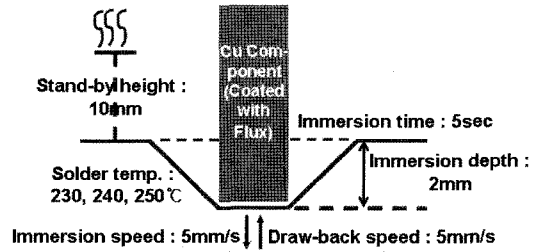


Fig. 1. Schematic diagram of wetting balance test

석해 보았다. Sn-0.3Ag-0.7Cu의 wettability의 수준은 Sn-1.0Ag-0.5Cu 및 Sn-3.0Ag-0.5Cu 조성에서의 결과와 비교하여 판단되었고, Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성 적용 시 halide 함량이 달라 활성도가 다른 플럭스를 각각 적용해봄으로써 플럭스에 의해 그 wettability가 향상되는 수준도 평가해 보았다. 또한 본 저자가 제안한 합금원소인 In을 0.2wt.% 수준으로 소량 첨가할 경우에서 그 wettability가 향상되는 수준을 측정함으로써 Sn-0.3Ag-0.7Cu 합금의 보다 효과적인 wettability의 향상 방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. Wetting balance test

본 연구에서는 JIS(Japanese Industrial Standard) Z 3198-4 규격에 따라 Fig. 1과 같이 평형법(wetting balance test)(model: SP-2, Malcomtech International Inc.)을 사용하여 솔더 합금의 wettability를 측정하였다.^{5,7,10)} 침지(dipping)를 위한 Cu 시험편(component)에는 A(halide 함유량: <20ppm), B(halide 함유량: 0.07%), C(halide 함유량: 0.22%) type의 3가지 종류의 플럭스를 도포하여 실험하였으며, 솔더조의 온도는 230, 240, 250°C(±3°C)의 3가지 조건에서 각각 실험을 실시하였다. 실험 시 Cu 시험편(component)의 대기 거리는 10 mm, 침지 및 이탈속도는 5 mm/sec, 침지 깊이는 2 mm, 침지 시간은 5 sec로 각각 설정하였다. 각 조건 당 10번의 시험을 실시한 후 젖음 시간(wetting time) 및 젖음력(wetting force) 값의 평균값을 조사하였다.

2.2. DSC 측정

Ar 분위기의 시차주사열량기(differential scanning

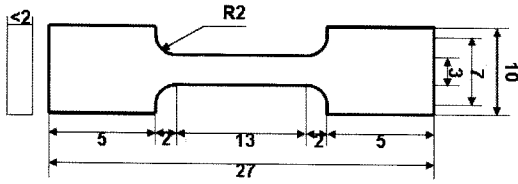


Fig. 2. Schematic diagram of a specimen for the tensile test (unit:mm).

calorimetry, DSC)(model: DSC-Q100, TA Instruments)에 총 14 mg 무게의 솔더를 장입한 후, 40°C에서 250°C까지 10 °C/min의 속도로 승온하여 솔더 조성에 따른 용융 과정에서의 흡열반응 특성을 조사하였다. 측정된 결과는 wetting 특성을 해석하는 자료로 고려되었다.

2.3. 인장 시험

Sn-Ag-Cu계 조성 합금의 기계적 특성을 평가하기 위하여 만능 재료시험기(model: Instron 4481, Instron)로 인장 시험을 실시하였다. KS B 0801 규격의 금속 재료 인장 시험 방법에 따라 제조된 인장시편(Fig. 2)을 사용하여 상온에서 1.0×10^{-2} /sec 의 strain rate로 인장 시험을 실시하였다.

2.4. 미세조직 관찰

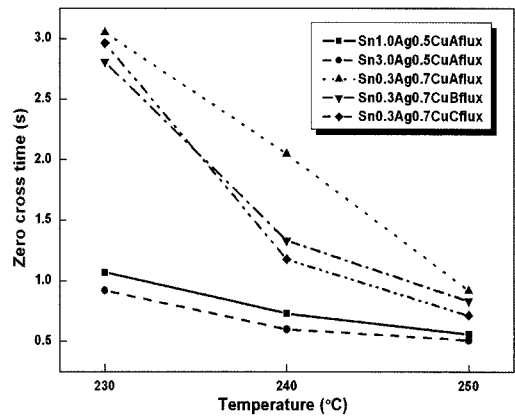
Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성의 솔더 합금 페이스트를 400 μm 지름의 organic solderability preservative(OSP)/Cu finish 패드(pad)가 형성된 보드(board)에 스텐실 인쇄(stencil printing) 장비(model: MK-878MX, Minami)로 인쇄한 후, 242°C의 peak 온도 조건의 oven(model: 1809UL, Heller)에서 리플로우(reflow)를 실시하여 솔더 범프(bump)를 형성하였다. 이후 시편은 다이아몬드 현탁액(diamond suspension)으로 정밀 연마한 후, 광학현미경과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM), 에너지분산분광기(energy dispersive spectroscopy, EDS)를 사용하여 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성 솔더 조인트의 단면 미세조직을 관찰, 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

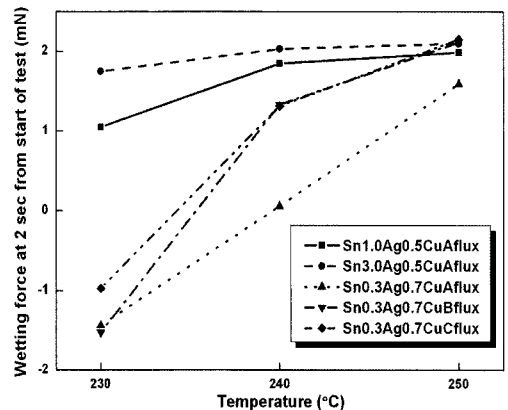
2.1. Sn-0.3Ag-0.7Cu 솔더의 젖음 특성

Wetting balance test 결과로서 zero cross time 또

는 time to buoyancy corrected zero value(T_0), test 시작에서부터 2초 후 wetting force(F_2), 최종 wetting force(F_{end}) 값들을 측정하였으며, 이를 평균값으로 정리하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3 (a)는 솔더 조성, 플럭스 종류 및 솔더 온도 변화에 따른 T_0 값의 변화를 보여준다. 예상할 수 있듯이 온도의 증가에 따라 모든 솔더 조성에서 T_0 값은 감소하였다. 아울러 솔더 내 Ag의 함량이 감소할수록 T_0 값은 감소하였는데, 특히 Ag의 함량이 0.3wt.% 수준으로 감소한 경우 솔더 온도가 저온일수록 T_0 값의 증가가 매우 큰 것으로 측정되어 wettability 관점에서



(a)



(b)

Fig. 3. Wetting balance test results as a function of solder temperature for the combination of several Sn-Ag-Cu alloys and flux activities: (a) zero cross time(time to buoyancy corrected zero) values and (b) wetting force values after 2 seconds form start of test.

솔더 내에 적절한 양의 Ag는 매우 필수적인 것임을 관찰할 수 있었다.⁷⁾ Ag의 함량이 0.3wt.% 솔더 조성에서 halide 함량이 많아 활성도(activity)가 우수한 B 또는 C type 플럭스를 사용한 경우에서도 240°C의 온도 조건에서는 눈에 띄는 T_0 값의 감소 효과가 관찰되었으나 여전히 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성에는 미치지 못하였고, 특히 230°C에서의 T_0 값 변화는 매우 미미한 것으로 관찰되어 230~240°C의 저온 영역에서 플럭스의 활성도 증가에 의한 저 Ag 함유 솔더의 T_0 값 개선은 한계를 가지는 것으로 분석되었다. 이상과 같은 halide 활성화제(activator)의 효과는 특정 온도까지는 온도가 증가할수록 플럭스의 활성도가 지속적으로 증가한다는 이론과 잘 부합된다고 할 수 있다.¹⁷⁾

Fig. 3 (b)는 솔더 조성, 플럭스 종류 및 솔더 온도 변화에 따른 F_2 값의 변화를 보여준다. 역시 온도의 증가에 따라 모든 솔더 조성에서 F_2 값은 증가하는 경향을 나타내었으나, Ag의 함량이 0.3wt.% 수준으로 감소할 경우 230~240°C의 저온 영역에서의 F_2 값은 크게 감소하는 경향이 관찰되었다.⁷⁾ 즉, Ag 함량이 0.3wt.% 수준으로 감소되면, 230~240°C의 저온 영역에서 T_0 값이 매우 증가되고 F_2 값은 매우 감소되면서 Sn-3.0Ag-0.5Cu 및 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성에 비해 wettability가 크게 저하됨을 관찰할 수 있었다.⁷⁾ Ag의 함량이 0.3wt.% 솔더 조성에서 halide 함량이 많은 B 또는 C type 플럭스를 사용한 경우에서도 240°C의 온도 조건에서는 눈에 띄는 F_2 값의 증가 효과가 관찰되었으나 여전히 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성보다는 작은 값을 나타내었고, 특히 230°C에서의 F_2 값 개선 효과는 매우 미미한 것으로 관찰되어 230~240°C의 저온 영역에서 플럭스의 활성도 증가에 의한 저 Ag 함유 솔더의 wettability 향상은 한계를 가지는 것으로 분석되었다.

Reflow 오븐(oven)의 온도를 250°C 부근으로 설정한다고 해도, 부품의 종류, 크기 및 배치에 의해 PCB 보드(board)의 특정 부위의 온도가 250°C까지 가열되지 않는 상황을 고려할 때, 이러한 저온 영역에서의 wettability 감소는 실제 양산 공정에서의 접합 수율 저하를 의미한다고 하겠다. 요컨대 플럭스의 활성도를 크게 증가시키면 일반적으로 wetting 특성을 다소 개선시킬 수는 있으나, 230~240°C의 온도 영역에서의 측정된 wetting 특

성은 여전히 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성에도 미치지 못하는 것으로 분석되어, 단순한 플럭스의 활성도 증가만으로는 Sn-0.3Ag-0.7Cu를 저온에서의 고수율 표면 실장 공정이 요구되는 모바일(mobile) 제품용 솔더 페이스트 조성으로 사용하기에는 다소 무리인 것으로 분석되었다.

Fig. 4는 세 종류 Sn-Ag-Cu 합금을 DSC로 가열하는 동안 측정된 흡열 피크를 나타낸 것이다. 공정 조성 근처의 Sn-3.0Ag-0.5Cu 조성을 제외한 Sn-1.0Ag-0.5Cu와 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성은 완전히 분리된 2개의 흡열 피크를 뚜렷이 나타내었는데, 낮은 온도의 것은 고상선을 높은 온도의 것은 액상선을 각각 나타내는 것으로 분석되었다.⁷⁾ 따라서 측정된 모든 Sn-Ag-Cu 조성에서 고상선 온도는 218°C로 일정하게 관찰되나, 액상선 온도 및 관련된 흡열 피크의 크기는 조성에 따라 변화하게 된다.⁷⁾ 따라서 공정 조성으로부터 가장 떨어져 있는 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성의 경우에서 가장 높은 액상선 온도와 가장 큰 흡열 피크가 관찰되었다. 이와 같이 높은 액상선 온도를 나타내는 조성의 높은 분율은 앞서 언급된 바와 같은 230~240°C의 저온 영역에서 wettability 감소의 직접적인 원인으로 분석되었다.⁷⁾ 즉, 솔더의 젖음 또는 퍼짐(spreading) 반응은 표면 에너지 향으로 정리된 아래 식을 만족하는 경우에 가능하게 되는데, 융점 이상으로 온도가 증가할수록 γ_{LV} 가 감소하는 금속의 물리적 특성에 의해 일반적으로 온도가 증가할수록 γ_{SL} 은 증가하고 최종적인 젖음 각도는 감소하

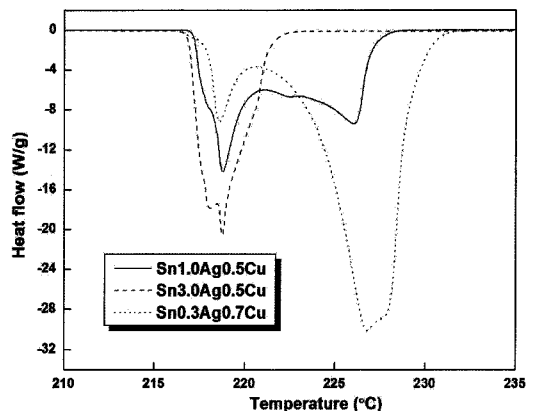


Fig. 4. DSC endothermic curves of several Sn-Ag-Cu alloys.

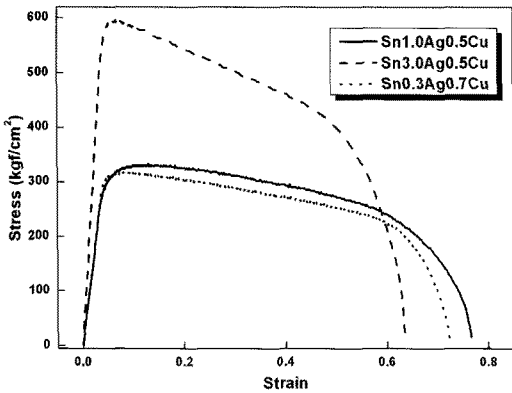


Fig. 5. Stress-strain curves of several Sn-Ag-Cu alloys at room temperature. Strain rate was 1.0×10^{-2} /sec.

게 된다.¹⁶⁾

따라서 낮은 액상선 온도를 나타내는 조성의 비율이 많은 합금일수록 동일 온도에서 솔더링 시 상대적으로 우수한 wettability를 나타내게 된다.

$$\gamma_{sv} > \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos\theta$$

여기서, γ_{sv} 는 고체/기체 계면에서의 표면장력
 γ_{sl} 는 고체/액체 계면에서의 표면장력
 γ_{lv} 는 액체/기체 계면에서의 표면장력

Fig. 5는 세 종류 Sn-Ag-Cu 합금을 상온 인장하였을 경우 측정된 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)을 보여준다. Sn-3.0Ag-0.5Cu 조성은 상대적으로 우수한 강도값을 나타낸 반면, Sn-1.0Ag-

0.5Cu와 Sn-0.3Ag-0.7Cu 조성은 강도값은 떨어지나 신장(elongation)은 다소 향상되는 거동을 나타내었다.¹¹⁾ 따라서 솔더 내 Ag의 함량은 합금의 강도 및 elongation을 변화시키는 주요 인자로 분석되었다. 한편 Sn-0.3Ag-0.7Cu의 경우 Sn-1.0Ag-0.5Cu 합금과 거의 유사한 강도와 elongation 특성을 나타내어 합금의 기계적 물성 측면에서 잉여로 첨가된 Cu가 Ag 역할을 보완하는 것으로 분석되었다.¹¹⁾ 따라서 Sn-0.3Ag-0.7Cu 합금이 솔더 접합부 형성 시 Sn-1.0Ag-0.5Cu에 근접하는 열-기계적(thermo-mechanical) 피로 수명을 나타낼 것으로 기대되었다.

Fig. 6은 reflow soldering 직후 관찰한 Sn-0.3Ag-0.7Cu 솔더 접합부의 미세조직을 보여준다. 초기 솔더 내의 0.7wt.%의 Cu 함량은 reflow 과정에서 pad로부터 공급되는 Cu 원자가 더해짐에 따라 공정 조성을 초과할 수 있으며,^{6,11,12)} 따라서 냉각 과정에서 공정 응고 조직 형성 이전에 Cu_6Sn_5 조성의 석출상을 먼저 형성하는 것으로 분석되었다. 이러한 석출상은 Fig. 6 (a) 및 (b)에서 관찰되듯이 공정 응고 조직에서의 Cu_6Sn_5 석출상에 비하여 매우 조대한 형태를 나타내게 된다.⁷⁾ 한편 Cu pad와의 계면에서는 scallop 형태의 Cu_6Sn_5 반응층이 형성되어 Sn-3.0Ag-0.5Cu 및 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성의 경우에서와 동일한 반응 거동이 관찰되었다.¹³⁾

3.2. In 첨가에 의한 젖음 특성 변화

Fig. 7은 3원계 Sn-Ag-Cu 조성에 0.2wt%의 In을

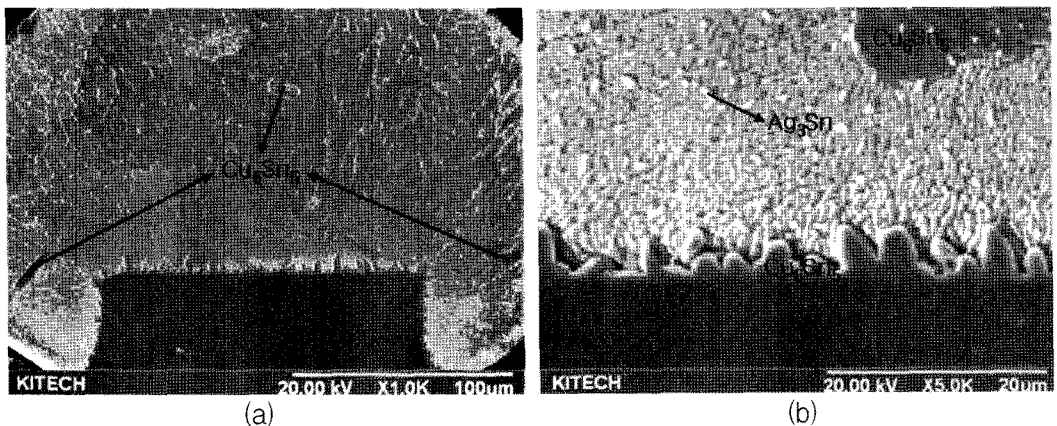


Fig. 6. Cross-sectional SEM images of the solder joint fabricated on Cu pad by using Sn-0.3Ag-0.7Cu solder paste: (a) low magnification($\times 1,000$) and (b) high magnification($\times 5,000$).

첨가한 4원계 Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.2In 합금의 wetting 특성을 측정하여 이전의 3원계 Sn-Ag-Cu 조성에서의 값과 비교한 결과를 보여준다. 이 경우 사용한 플럭스는 halide를 포함되지 않은 A type이었다. Fig. 7 (a)는 솔더 온도에 따른 T_0 값의 변화를 보여준다. Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.2In 조성은 Ag 함량이 0.3wt.%임에도 불구하고 모든 온도 영역에서 T_0 값이 크게 떨어지는 현상이 관찰되었는데, 특히 240°C에서의 T_0 값의 향상 효과는 매우 괄목할만하였다.⁵⁾ Fig. 7 (b)는 솔더 온도에 따른 F_2 값의 변화를 보여준다. 마찬가지로 Sn-0.3Ag-0.7Cu-

0.2In 조성은 모든 온도 영역에서 F_2 값을 크게 증가시켰으며, 특히 240°C에서의 F_2 값은 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성에 근접할 만큼 wettability가 크게 개선되는 것으로 관찰되었다.⁵⁾ 이러한 wettability의 향상은 In의 첨가량이 매우 소량임을 고려할 때, 액상선 온도의 저하 효과보다는 In 원소 자체가 가지는 우수한 wetting 특성에 기인한다고 할 수 있다.⁵⁾

결과적으로 In을 첨가한 4원계 Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.2In 합금의 저온 영역(230~240°C)에서의 wetting 특성은 앞서 언급된 halide를 다량 포함한 플럭스를 사용한 경우보다 우수한 것으로 분석되어 실제 양산 공정에서도 보다 높은 수율을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로 플럭스의 halide의 함량이 증가할 경우 soldering 후 부식성 잔사(residue)량이 이에 비례하여 증가함으로써 잔사가 완전히 세척되지 않는다면 수분 환경에 장기간 노출되는 전자 제품의 사용 환경에서 접합부가 부식되거나 이온 유동(ion migration)에 의한 전기적 통전이 야기되는 위험성을 가지게 된다.^{14, 15)} 또한 세척 공정 역시 환경 문제를 유발시킬 수 있고, 추가적인 비용이 소모된다는 측면에서 매우 까다로운 공정으로 인식되고 있다. 따라서 In이 소량 함유된 4원계 Sn-Ag-Cu-In 조성의 솔더를 적용하는 방법은 halide 함유량이 높은 플럭스를 적용하는 방법에 비해 보다 안전하고 우수한 성능으로 저 Ag계 무연솔더 조성을 상용화할 수 있는 접근법으로 분석되었다.

이와 같이 소량 첨가된 In은 Cu pad와의 계면 반응에는 참여하지 않고, 솔더 내 Ag_3Sn 상에서만 관찰되어 $(Ag, In)_3Sn$ 의 형태로만 존재하는 것으로 확인된 바 있다.⁵⁾ 따라서 소량의 In 첨가에 의한 솔더 조인트의 급격한 물성 변화는 일어나질 않을 것으로 판단되었다.

4. 결 론

Sn-0.3Ag-0.7Cu 합금은 매우 적은 Ag 함량에도 불구하고 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성과 유사한 기계적 물성을 나타내었으나, 솔더 재료로서 요구되는 가장 중요한 특성인 wetting 특성이 매우 저하되었으며, 특히 230~240°C 저온 영역에서의 wetting 특성 저하가 두드러지게 관찰되었다. Sn-0.3Ag-0.7Cu 솔더에 halide 함량이 높은 플럭스를 적용할 경우

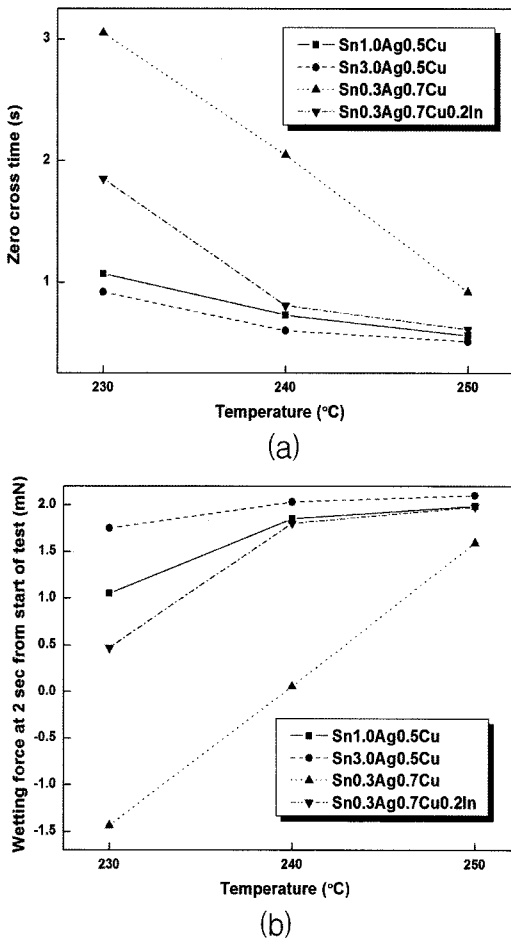


Fig. 7. Wetting balance test results as a function of soldering temperature for the Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.2In alloys: (a) zero cross time(time to buoyancy corrected zero) values and (b) wetting force values after 2 seconds form start of test.

wetting 특성은 다소 향상되나, 230~240°C 온도 영역에서의 wetting 특성은 여전히 큰 문제로 관찰되어 높은 실장수율이 요구되는 표면 실장용 솔더 페이스트 조성으로 사용되기에는 무리가 있는 것으로 분석되었다. 한편 3원계 Sn-Ag-Cu 조성에 0.2wt%의 In을 첨가한 4원계 Sn-0.3Ag-0.7Cu-0.2In 솔더의 경우, 240°C 부근의 온도에서도 Sn-1.0Ag-0.5Cu 조성에 유사한 wetting 특성이 관찰되어 halide 함량이 높은 플럭스를 사용하는 방안에 비해 보다 효과적인 저 Ag 함유 무연솔더의 wettability 개선법으로 분석되었다.

참고문헌

1. E. Bradley, C. Handwerker, and J. E. Sohn, "NEMI Report: A Single Lead-free Alloy is Recommended", Surface Mount Technology(SMT), Jan. 24-25 (2003)
2. J. W. Evans, A Guide to Lead-free Solders, Springer, London (2006)
3. U.S. Patent No. 4,929,423
4. www.ecojoin.co.kr
5. A. M. Yu, C. W. Lee, M. S. Kim, and J. H. Lee, "The Effect of the Addition of In on the Reaction and Mechanical Properties of Sn-1.0Ag-0.5Cu Solder Alloy", Met. Mat. -Int., 13(6), 517-520 (2007)
6. I. Ohnuma, M. Miyashita, K. Anzai, X. J. Liu, H. Ohtani, K. Kainuma, and K. Ishida, "Phase Equilibria and the Related Properties of Sn-Ag-Cu Based Pb-free Solder Alloys", J. Electron. Mater., 29(30), 1137-1144 (2000)
7. J. H. Lee, A. M. Yu, J. H. Kim, M. S. Kim, and N. Kang, "Reaction Properties and Interfacial Intermetallics for Sn-xAg-0.5Cu Solders as a Function of Ag Content", Met. Mat. -Int., 14(5), 649-655 (2008)
8. M. Amagai, Y. Toyota and T. Tajima, "High. Solder Joint Reliability with Lead Free. Solders", Proc. of 53th Electronic Components and Technology(ECTC) Conference, 317-322, IEEE (2003)
9. S. Terashima, Y. Kariya, T. Hosoi, and M. Tanaka, "Effect of Silver Content on Thermal Fatigue Life of Sn-xAg-0.5 Cu Flip-chip Interconnects", J. Electron. Mater., 32(12), 1527-1533 (2003)
10. M. J. Rizvi, Y. C. Chan, C. Bailey, H. Lu, M. N. Islam, and B. Y. Wu, "Wetting and Reaction of Sn-2.8Ag-0.5Cu-1.0Bi Solder with Cu and Ni Substrates", J. Electron. Mater. 34(8), 1115-1122 (2005)
11. K. S. Kim, S. H. Huh and K. Sugauma, "Effects of Cooling Speed on Microstructure and Tensile Properties of Sn-Ag-Cu Alloys", Mater. Sci. & Eng, A333, 106 (2002)
12. L. Wang, Z. Zhao, X. Xie, Q. Wang, J. Lee, and T. Lee, "Cross-section of Different Pad Finishes in SMT Joints and Its Effect on Board Level Reliability", Proc. on IMAPS 40th International Symposium on Microelectronics, IMAPS (2007)
13. K. S. Kim, S. H. Huh, and K. Sugauma, "Effects of Intermetallic Compounds on Properties of Sn-Ag-Cu Lead-free Soldered Joints", J. Alloys Compd., 352, 226-236 (2003)
14. W. J. Ready and L. J. Turbini, "The Effect of Flux chemistry, Applied Voltage Conductor Spacing, and Temperature on Conductive Anodic Filament Formation", J. Electron. Mater., 31(11), 1208-1224 (2002)
15. L. J. Turbini, B. A. Smith, J. Brokaw, J. Williams, and J. Gamalski, "The Effect of Solder Paste Residues on RF Signal Integrity", J. Electron. Mater., 29(10), 1164-1169 (2000)
16. J. S. Hwang, Modern Solder Technology for Competitive Electronic Manufacturing, McGraw-Hill, New York (1996)
17. R. J. K. Wassink, Soldering in Electronics, Electrochemical Publications Ltd., Scotland (1984)