

BGA 솔더 조인트의 전단강도에 미치는 Cu 첨가 솔더의 영향

신창근 · 정재필* · 허주열

고려대학교 공과대학 재료 · 금속공학부
*서울시립대학교 재료공학과

Effect of Cu Containing Solders on Shear Strength of As-soldered BGA Solder Joints

Chang-Keun Shin, Jae-Pil Jung* and Joo-Youl Huh

Division of Materials Science and Engineering, Korea University

*Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

초 록 : 금속간 화합물의 두께와 솔더와 금속간 화합물의 계면 거칠기가 Cu pad위의 BGA 솔더 조인트의 전단강도에 미치는 영향을 Sn (0, 1.5, 2.5wt.% Cu)와 Sn-40Pb (0, 0.5wt.% Cu) 솔더를 사용하여 알아보았다. 각각의 조성의 솔더를 사용하여 솔더링 반응을 1, 2, 4분 동안 한 후 전단강도를 측정하였다. Sn 솔더에 Cu 첨가는 초기 금속간 화합물의 두께를 증가시키는 결과를 가져오는 반면 Sn-40Pb 솔더의 경우에는 주로 금속간 화합물/솔더의 계면거칠기의 감소를 가져오게 된다. 최대 전단 강도값을 나타내는 금속간 화합물의 임계두께는 솔더의 물질에 따라 변하게 되는데, 본 실험에서는 Sn-Cu 솔더의 경우에는 $\sim 2.3 \mu\text{m}$, Sn-Pb-Cu에서는 $\sim 1.2 \mu\text{m}$ 정도로 측정되었다. 금속간 화합물의 임계두께는 금속간 화합물/솔더의 계면이 더욱 거칠어질수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 파단면 관찰에서 나타난 초기의 솔더내에서의 파괴가 금속간 화합물이 임계두께 이상으로 성장함에 금속간 화합물/솔더의 계면으로 이동하는 결과와 일치한다.

Abstract : Shear strengths of BGA solder joints on Cu pads were studied for Cu-containing Sn (0, 1.5, and 2.5 wt.% Cu) and Sn-40Pb (0 and 0.5wt.% Cu) solders, with emphasis on the roles of the Cu-Sn intermetallic layer thickness and the roughness of the interface between the intermetallic layer and solder. The shear strength test was performed for as-soldered solder joints with various soldering reaction times up to 4 min. The addition of Cu to the pure Sn solder results in an enhanced growth of the intermetallic layer whereas the effect of Cu addition to the Sn-40Pb solder is primarily on the reduction of the roughness of the intermetallic/solder interface. The critical thickness of the intermetallic layer for a maximum shear strength depends on the solder materials, which was measured to be $\sim 2.3 \mu\text{m}$ for Sn-Cu solders and $\sim 1.2 \mu\text{m}$ for Sn-Pb-Cu solders. The shear strength at the critical intermetallic layer thickness seems to increase as the intermetallic/solder interface becomes rougher. This is in accordance with the observation that the sheared fracture occurred initially within the solder tends to shift towards the intermetallic/solder interface as the intermetallic layer grows above the critical thickness.

1. 서 론

전자부품의 소형화와 고집적화에 따라 칩을 기판에 연결하는 방법에서도 늘어나는 입출력을 소화하기 위한 area array contact의 flip chip 기술이 활발히 연구

개발되고 있다.¹⁾ 이에 따라 칩 단위부피당 발열량은 증가하고 솔더 접합부의 단위면적은 감소하게 되어 칩과 기판간의 열팽창계수 차이로 인한 솔더 접합부의 열적 피로현상이 전자패키징의 신뢰성 미치는 영향이 증대되고 있다.²⁾ 열적 피로에 의한 솔더 접합부의 파괴는 솔

더와 금속간화합물의 계면에서 주로 발생하므로 솔더 접합부의 기계적 특성을 개선하기 위해서는 솔더 자체의 기계적 특성뿐 아니라 솔더링시에 생성되는 금속간화합물의 형상과 크기를 적절히 제어하는 것이 요구되고 있다.³⁻⁷⁾

솔더링시 Sn계 솔더와 Cu 기판간에는 금속간화합물 (η -Cu₆Sn₅과 ϵ -Cu₃Sn)이 형성되는데,^{8,9)} 이것은 솔더와 기판간의 화학적 결합력을 제공하는 것으로 솔더 접합부의 형성에 필수적이다. 그러나 금속간화합물의 과도한 성장은 솔더 접합부의 취성을 증가시킬뿐만 아니라 전단응력 부과시에 불균일 변형의 발생으로 인한 접합부 전단강도의 감소를 초래하게 된다.^{5,7,10,11)} 즉 최대 전단강도를 갖는 금속간화합물의 임계두께가 존재하며, 이러한 금속간화합물의 임계두께는 솔더와 금속간화합물간의 계면거칠기(interface roughness)와 솔더 자체의 기계적 특성에 따라 변하는 것이라 알려져 있다.¹⁰⁾ 이에 솔더 조인트의 기계적 성질의 향상을 위해 미세한 석출상이 분산된 솔더합금에 대한 제조방법¹²⁾과 솔더 리플로우시 생성되는 금속간화합물의 성장을 제어하고자 하는 방안¹³⁾이 모색되고 있다.

금속간화합물의 성장은 솔더링 초기단계에서는 η 상 입자들 사이의 입계 channel를 통해 침투한 액상 솔더에 의해 Cu 기판의 Cu가 용해되어 확산하여 η 상이 성장하지만,¹⁴⁾ 그 후에는 $t^{1/2}$ 에 비례하는 입내확산에 의해 성장하는 것으로 알려져 있다.^{5,8)} 솔더링시에 생성된 η 상은 scallop형상을 가지나 솔더 용융점 이하에서의 시효처리에 의해 점차 계면에 평행한 형상으로 바뀌는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 이러한 솔더와 금속간화합물간의 계면거칠기는 또한 솔더에 기판재료인 Cu를 첨가한 합금솔더를 사용함에 의해서도 변화되는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 즉 순수한 Sn에 Cu를 첨가한 합금솔더를 사용한 경우 솔더링시 금속간 화합물의 성장이 억제되고 솔더와 금속간화합물간의 계면거칠기는 더욱 증가된다. 반면에 Sn-40Pb에 Cu를 첨가한 경우는 솔더와 금속간화합물간의 계면거칠기는 감소한다. 그러나 이러한 Cu가 첨가된 합금솔더를 사용함에 따른 금속간화합물의 두께와 형상 그리고 솔더의 미세조직 등의 변화가 솔더접합부의 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서는 현재 알려져 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 순수한 Sn과 Sn-40Pb 각각에 Cu 첨가한 솔더볼을 사용하여 Cu 기판과의 솔더링시 나타나는 미세조직의 변화와 솔더접합부의 기계적 특성과의 상관관계를 접합부의 전단강도 측정을 통해 조사하였다.

2. 실험방법

순수한 Sn과 Sn-40Pb에 Cu를 첨가함에 따른 BGA 솔더 조인트의 기계적 성질에 대한 영향을 조사하기 위해 본 연구에서 사용된 솔더합금과 솔더링 온도는 Table 1에 나타내었다. 석영관내에서 진공용해를 통해 솔더합금을 제조한 후 CEP(Centrifugal Emulsion Process) 방법으로 750 μm 의 직경을 갖는 균일한 크기와 조성의 BGA용 솔더볼을 제조하였다. 항온 유지와 내산화성 분위기를 위해 솔더링 반응은 Si-oil bath에서 행하였다. 이때 사용된 기판은 지름 570 μm 의 Cu pad를 갖는 PCB 기판을 사용하였다. 솔더링 전에 우선 기판을 10% H₂SO₄ 용액에 1분동안 담궈 Cu pad의 표면 산화막을 제거한 다음 RMA flux를 기판에 코팅하고 솔더볼을 Cu pad 위에 올려놓은 상태에서 항온유지된 Si-oil bath에 넣어 1, 2, 4분 동안 솔더링 반응을 실시하였다. 솔더링시 Si-oil bath의 온도 편차는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 였으며, 정해진 시간동안의 솔더링 반응 후에는 기판을 상온의 아세톤에 급냉하였다.

솔더합금과 솔더링 시간에 따른 솔더 조인트의 기계적 특성변화를 조사하기 위해 솔더볼이 접합된 기판을 아세톤으로 세척한 후 전단응력 시험장치(PTR-1000 banding tester)를 이용하여 전단강도를 측정하였다. 이때 기판과 팁과의 거리는 10 μm 그리고 팁의 이동속도는 초당 200 μm 으로 하였다. 리플로우 솔더링 반응 후 전단강도 값은 7개의 시편을 측정하여 제일 큰 값과 작은 값을 뺀 나머지 5개의 평균값을 사용하였다.

솔더 조인트의 미세조직은 솔더 조인트의 단면을 3 μm diamond paste와 0.04 μm SiC를 사용하여 단계적으로 연마하고 10%HCl + 90%H₂O 용액으로 5초간의 에칭한 후 전계방출 주사전자현미경(FESEM)을 사용하여 BEI(back-scattered electron imaging) 모드에서 관찰하였다. 솔더와 Cu pad의 계면에서 생성된 금속간 화합물의 두께와 형상은 FESEM에 장착된 영상분석기(image analyser, BMI plus)를 이용하여 분석하였다. 즉, 금속간화합물의 평균두께로는 계면화합물의 단면적을 솔더링 초기계면의 직선길이를 나눈 값을 그리고 솔더와 금속간화합물간의 계면거칠기로는 솔

Table 1. Solders and reflow temperature

Solder	Added Cu content (wt.%)	Reflow temperature (°C)
Sn	0, 1.5, 2.5	270
Sn-40Pb	0, 0.5	220

더와 금속간화합물간 계면의 폭면길이(l_i)를 솔더링 초기계면의 직선길이(l_0)로 나눈 값을 사용하였다. 또한 전단응력에 의한 솔더 조인트의 파단 양상을 조사하기 위해 SEM과 EDS를 이용한 파단면의 관찰을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Cu 첨가 솔더에 의한 솔더 조인트의 미세조직 변화

Fig. 1은 솔더 조성에 따라 1분간 솔더링 반응에 의해 생성된 계면 금속간화합물(Cu_6Sn_5 η 상)층의 두께와 형상의 변화를 보여주고 있다. 순수한 Sn 솔더에 Cu가 2.5wt.% 첨가된 경우 계면화합물층의 두께는 증가하고 형상은 기판에 평행한 판상형태로부터 scallop 형상으로 변화함을 알 수 있다. 또한 계면화합물층 부근의 솔더에는 조대한 η 상이 석출되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 계면화합물층 부근에 존재하는 불균일한 η 상 석출물은 270°C에서의 솔더링 반응후 냉각시 솔더에 과포화된 Cu가 η 상으로 석출함¹⁶⁾과 동시에 η 상과 액상솔더의 밀도차에 의한 중력편석 현상¹⁰⁾에 기인된 것으로 판단된다. Sn-40Pb 솔더에 Cu가 0.5wt.% 첨가

된 경우 계면화합물층의 두께는 거의 변화하지 않고 솔더와 계면화합물층간의 계면거칠기는 오히려 감소하며 공정조직의 솔더내에 η 상이 비교적 균일하게 석출된 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 솔더 조성과 솔더링 시간에 따른 계면화합물층의 두께와 형상 변화를 보여주는 것으로 형상은 앞에서 언급한 계면거칠기(l_i/l_0)로 정량화한 결과이다. Sn 솔더에 Cu를 첨가한 경우 계면화합물층의 두께는 솔더링 반응의 초기에는 증가하지만 솔더링 시간이 증가함에 따라 계면화합물층의 성장속도는 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 솔더에 Cu가 첨가된 경우 솔더링 반응 초기에는 솔더로 용해되는 Cu의 양이 감소함으로 인해 계면에 생성된 η 상의 성장이 촉진된다. 계면생성물의 η 상의 두께가 증가함에 따라 점차 계면화합물의 성장은 계면생성물층을 통한 Cu의 확산속도에 의해 결정되며 따라서 점차 입내확산보다는 입계확산의 영향이 증가하게 된다.⁸⁾ 솔더에 Cu가 첨가된 경우에는 솔더링 반응초기에 생성된 계면화합물의 입자크기가 증가하여 빠른 확산 경로인 입계의 밀도가 감소하는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 따라서 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 솔더에 Cu가 첨가됨으로 인해 솔더링 반응의 초기 단계 이후에는 계면화합물의 성장속도가 감소하는 현상은 계면

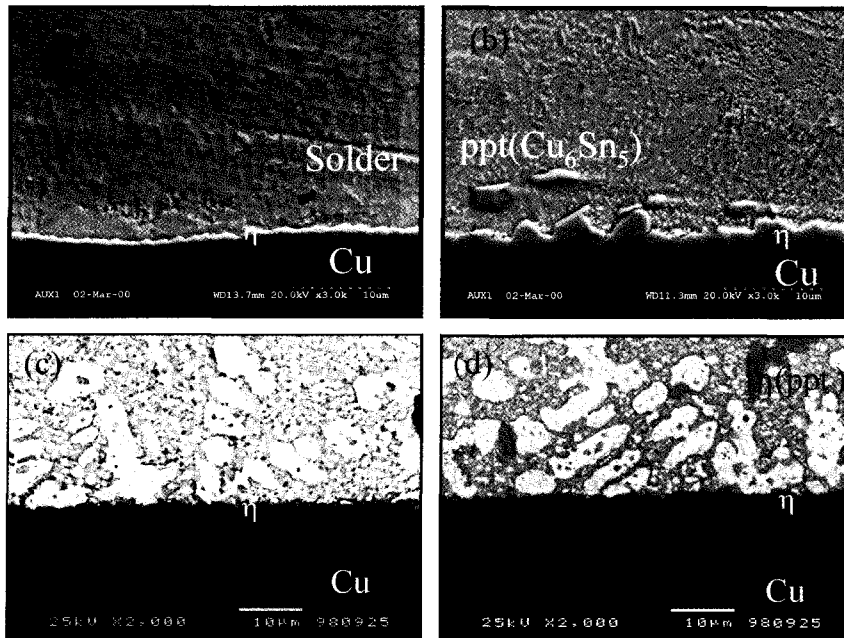


Fig. 1. Cross-sectional SEM(BEI) micrographs showing the intermetallic compound (Cu_6Sn_5 η) layers formed at the interface between the solder and Cu pad after the soldering reaction time for 1 min: (a) Pure Sn, (b) Sn-2.5Cu, (c) Sn-40Pb, and (d) Sn-39.5Pb-0.5Cu.

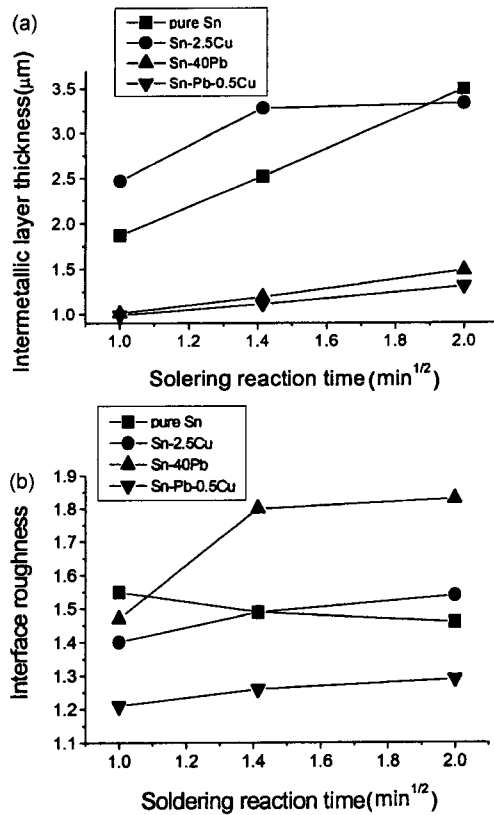


Fig. 2. Plots of (a) the intermetallic layer thickness and (b) the roughness of the intermetallic/solder interface as functions of the soldering reaction time for various solders.

화합물의 성장이 단순한 확산속도의 성장이 아닌 입계 확산의 중요성을 대변하고 있다고 볼 수 있다. Sn 솔더에 비해 Sn-40Pb 솔더의 경우에는 솔더링 반응초기에 생성된 계면 화합물의 두께에 미치는 Cu 첨가의 영향이 적은 것은 Sn-40Pb의 Cu의 용해한이 Sn에 비해 낮은 것에 기인된 것으로 생각된다. Sn-40Pb 솔더에 Cu를 첨가한 경우 역시 계면화합물층의 성장속도는 감소하지만 그 영향은 Sn 솔더의 경우에 비해 작은 것을 알 수 있다. 한편 Fig. 2(b)로부터 계면거칠기에 미치는 Cu 첨가의 영향은 Sn 솔더에 비해 Sn-40Pb의 경우가 매우 뚜렷함을 알 수 있다.

3-2. 리플로우시 솔더 조인트의 전단강도 변화

Fig. 3은 솔더 조인트의 전단강도에 미치는 솔더링 반응시간과 솔더 조성의 영향을 보여주고 있다. Sn 솔더에 Cu가 첨가된 경우를 보여주는 Fig. 3(a)에서 순수한 Sn 솔더의 경우는 2분간의 솔더링 반응에서 최대 전단

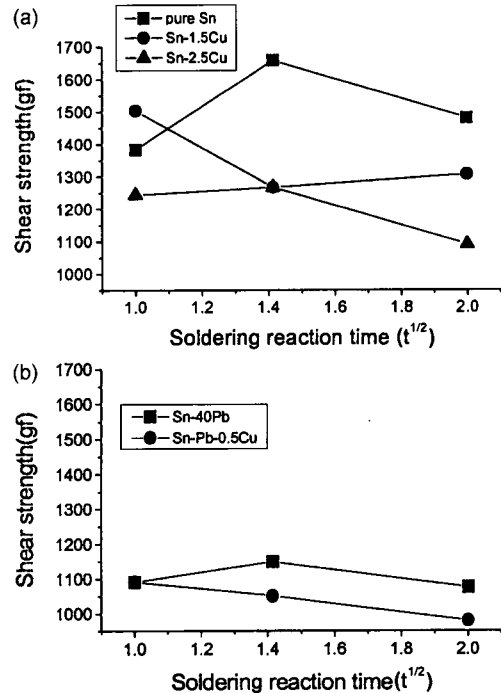


Fig. 3. The shear strength of solder joints formed by various soldering reaction times: (a) Sn-Cu solders and (b) Sn-Pb-Cu solders.

강도값을 가지다가 반응시간이 증가하면 전단강도값이 감소하며, Sn-1.5Cu와 Sn-2.5Cu 솔더의 경우 전단강도값은 1분 이상의 솔더링 반응시간에 따라 대체로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이 때 1분간의 솔더링 반응에서는 Sn-1.5Cu 솔더의 경우가 가장 높은 전단강도값을 나타낸다. 이러한 솔더링 시간에 따른 전단강도값의 변화는 최대 전단강도값을 갖는 계면화합물층의 입계두께의 관점에서 이해될 수 있다. 즉, 순수한 Sn 솔더의 경우 계면화합물층의 입계두께는 2분 정도의 솔더링 반응에 의해 도달하지만 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 Sn-1.5Cu와 Sn-2.5Cu 솔더의 경우는 1분간의 솔더링 반응에 의해 이미 입계두께 이상으로 계면화합물층이 성장한 것으로 판단된다. 또한 Sn-2.5Cu 솔더가 Sn-1.5Cu 솔더에 비해 본 연구에 사용된 모든 솔더링 반응시간에서 더욱 낮은 전단강도값을 나타내는 것은 솔더내에 석출된 η 상이 계면화합물층 주위에 조대하게 편석되고 이것이 전단응력 부가시에 응력이 집중되는 곳으로 작용하여 crack 발생이 쉽기 때문으로 생각된다.

Sn-40Pb에 Cu를 첨가하는 경우에 전단강도값의 변화는 Fig. 3(b)에 나타내었다. Sn 솔더의 경우에 비해

Cu 첨가의 영향은 적으며, 솔더링 시간에 따른 전단강도값의 변화도 매우 적음을 보여준다. 이것은 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 Cu 첨가가 계면화합물층의 두께에 크게 영향을 주지 못하고 또한 반응시간에 따른 계면화합물층의 두께변화도 미약한 것에 기인한 것으로 생각된다. 특히 주목되는 점은 2분 이후의 솔더링 반응 후의 전단강도값은 Sn-40Pb이 경우가 Sn-Pb-0.5Cu의 경우보다 크다는 것이다. 이것은 계면 거칠기가 금속간

화합물의 두께와 솔더내의 미세조직이 비슷할 경우 솔더 조인트의 전단강도에 중요하게 작용할 수 있다는 것을 보여준다 하겠다. 즉 파괴가 솔더와 금속간 화합물의 계면에서 발생할 경우 계면 거칠기가 증가하는 것은 crack이 진행하는데 저항이 커지게 되고¹⁷⁾ 솔더 조인트의 전단강도값도 증가할 것이라 생각된다. Fig. 2(b)에서 보듯 계면거칠기는 전 솔더링 반응시간에 대해 Sn-40Pb의 경우가 Sn-Pb-0.5Cu보다 큰 것을 알 수 있다.

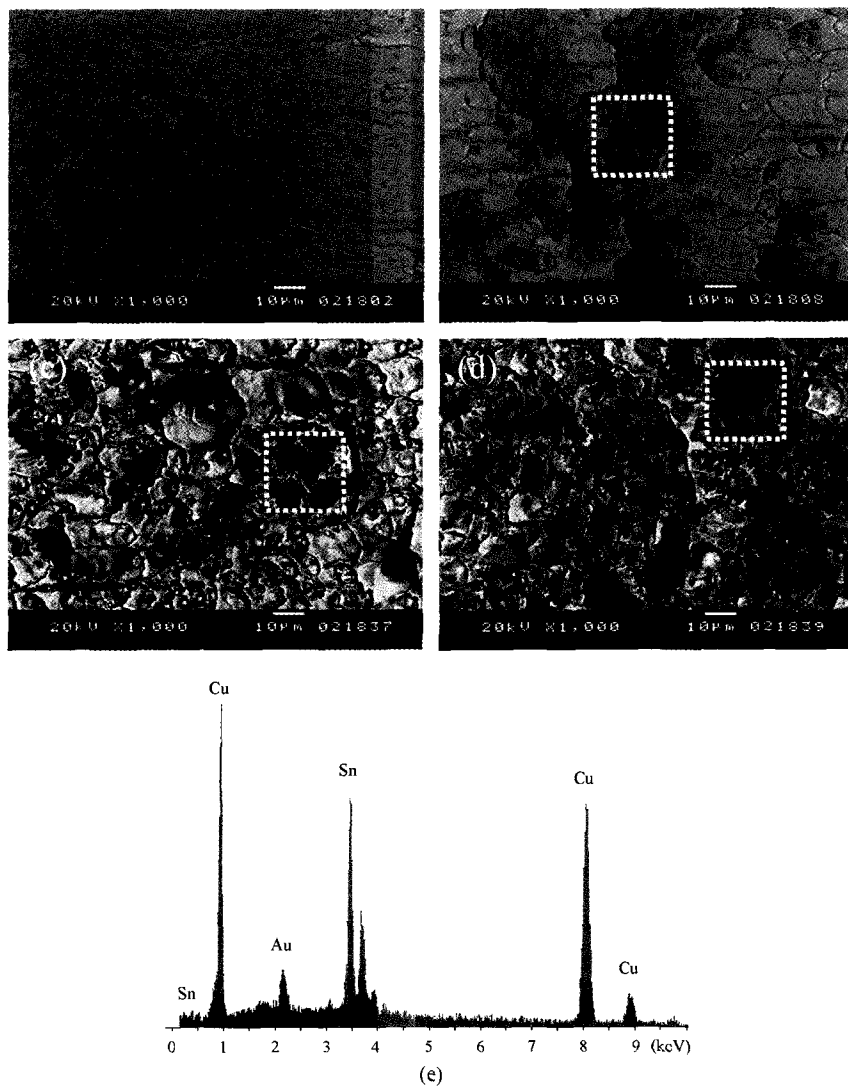


Fig. 4. SEM(BEI) fractographs of the sheared fracture surfaces (the side of Cu pad) of the solder joints formed using different solders and soldering reaction times: (a) pure Sn for 1 min, (b) pure Sn for 4 min, (c) Sn-2.5Cu for 1 min, and (d) Sn-2.5Cu for 4 min. (e) EDS spectrum obtained from the marked region in (b), indicating the exposure of the intermetallic η layer to the fracture surface. Au peak in the spectrum results from the conductive Au coating for SEM observation. EDS spectra similar to (e) could also be obtained from the marked regions in (c) and (d).

이러한 계면 거칠기의 차이가 솔더조인트의 전단강도의 차이에 중요한 역할을 한 것으로 생각된다. 이는 리플로우 솔더링의 시간이 증가하면 파괴는 점차 솔더 내부와 솔더와 금속간 화합물의 계면에서 혼합된 형태로 일어나는 결과와 일치하는 결과이다.

Fig. 4는 Sn과 Sn-1.5Cu 솔더를 사용한 경우 반응시간에 따라 전단파단 후 Cu pad쪽 파단면을 SEM의 BEI 모드에서 관찰한 것이다. Sn 솔더의 경우 계면화합물층이 임계두께까지 성장하기 전인 1분간 반응시간에서는 솔더 내부에서 파괴가 일어나며 임계두께 이상으로 성장한 4분간 반응후에는 파단면에 계면화합물층이 부분적으로 나타나고 있음을 알 수 있다. Sn-2.5Cu에서는 1분간의 반응후에도 파단면에 계면화합물층이 관찰되는 것으로부터 이미 계면화합물층이 임계두께 이상으로 성장하였다는 Fig. 3(a)의 전단강도 측정결과와 일치함을 알 수 있다. 즉, 계면화합물층이 임계두께 이상으로 성장함에 따라 전단파괴의 파단경로(fracture path)가 솔더 내부로부터 점차 솔더와 계면화합물층의 계면으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. Sn-Pb계 솔더의 경우에도 전단파괴는 주로 솔더 내부에서 일어났으며 솔더링 시간이 4분으로 증가함에 따라 파단경로가 계면화합물층의 계면쪽으로 변화하는 경향을 확인할 수 있었으며, 주어진 반응시간에 대해 Sn-Pb와 Sn-Pb-0.5Cu 솔더의 파단면은 큰 차이를 보이지 않았다. 이로부터 본 연구에 사용된 Sn-Pb계 솔더의 임계두께는 Sn계 솔더 경우의 $\sim 2.3 \mu\text{m}$ 보다 작은 값으로 1~4분간의 솔더링 반응에 의해 생성된 $1.2 \mu\text{m}$ 내외인 것으로 추정되며, 이는 Sn-70Pb 솔더를 사용하여 보고된⁷⁾ 임계두께 $\sim 1.2 \mu\text{m}$ 와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

순수한 Sn 솔더와 Sn-40Pb 솔더 각각에 솔더링 기판 재료인 Cu를 첨가함에 따라 솔더링 반응시에 나타나는 미세조직의 변화와 이러한 미세조직의 변화가 솔더 조인트의 전단강도에 미치는 영향을 조사하였다. 순수한 Sn 솔더에 Cu를 첨가한 영향은 계면화합물층의 빠른 성장으로 나타났으며 Cu 첨가에 따른 솔더/계면화합물층 계면거칠기의 변화는 미약하였다. 따라서 순수한 Sn 솔더의 경우는 2분간의 솔더링 반응에 의해 솔더 조인트가 최대 전단강도값을 갖는 계면화합물층의 임계두께($\sim 2.3 \mu\text{m}$)에 도달함에 비해 Cu를 첨가한 경우는 1분간의 솔더링 반응에 의해 이미 계면화합물층이 임계두께까지 성장한 것으로 나타났다. 이에 반해 Sn-40Pb 솔더에 Cu를 첨가한 영향은 솔더/계면화합물층 계면거

칠기의 큰 감소로 나타났으며 Cu 첨가에 따른 계면화합물층 두께의 변화는 미약하였다. Sn-40Pb계 솔더의 경우 최대전단강도값을 갖는 계면화합물층의 임계두께는 약 $1.2 \mu\text{m}$ 이며 이때의 최대 전단강도값은 계면거칠기가 낮아짐에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같이 Sn-40Pb계 솔더의 경우에 Sn계 솔더의 경우에 비해 낮은 계면화합물층의 임계두께를 갖는 것은 솔더 자체의 낮은 강도값에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 솔더 자체의 기계적 특성과 임계두께간의 상관관계는 계면화합물층이 임계두께 이상으로 성장함에 따라 전단파괴의 파단경로가 솔더 내부로부터 점차 솔더와 계면화합물층간의 계면으로 이동하는 파단면 관찰 결과와 잘 일치하고 있다.

참고문헌

1. P. A. Totta, Subash Khape, N. G. Koopman, and M. J. Shaeffer: *Microelectronics Packaging Handbook*, R. R. Tummala, E. J. Rymaszewski, and A. G. Klopfenstein, Eds., 2, 138(1997).
2. D. R. Frear, Dennis Grivas, and J. W. Morris, Jr., "Thermal Fatigue in solder joint," *J. Met.*, 40, 18(1988).
3. J. O. G. Parent, D. D. L. Chung, and I. M. Bernstein, "Effects of intermetallic formation at the interface between copper and lead-tin solder," *J. Mat. Sci.*, 23, 2564(1988).
4. A. C. K. So and Y. C. Chan, "Reliability Studies of surface mount solder joints- Effect of Cu-Sn intermetallic compounds," *IEEE Transactions on components, packaging, and manufacturing technology-part B*, 19, 661(1996).
5. Y. C. Chan, A. C. K. So, and J. K. L. Lai, "Growth kinetic studies of Cu-Sn intermetallic compound and its effect on shear strength of LCCC SMT solder joints," *Mat. Sci. Eng. B.*, 55, 5(1998).
6. D. Yao and J. K. Shang, "Effect of cooling rate on interfacial fatigue-crack growth in Sn-Pb solder joints," *IEEE Transactions on components, packaging, and manufacturing technology-part B*, 19, 154(1996).
7. S. F. Dirnfeld and J. J. Ramon, "Microstructure investigation of copper-tin intermetallics and the influence of layer thickness on shear strength," *Weld. J.*, 373(1990).
8. Y. G. Lee and J. G. Duh, "Interfacial morphology and concentration profile in the unleaded solder/Cu joint assembly," *J. Mat. Sci.*, 10, 33(1999).

9. K. N. Tu and R. D. Thompson, "Kinetics of interfacial reaction in bimetallic Cu-Sn thin film," *Acta metall.*, 30, 947(1982).
10. 허정나, 이종현, 박대진, 신동혁, 김용석 "in-situ 법으로 제조된 BGA 전자 패키지용 복합 솔더의 특성," 대한금속 학회지, 37, 1117(1999).
11. D. Yao and J. K. Shang, "Effect of aging on fatigue crack growth at Sn-Pb/Cu interfaces," *Metall. Mater. Trans. A.*, 26A, 2677(1995).
12. H. S. Betrabet, S. M. McGee, and J. K. Mckinlay, "Processing dispersive-strengthening Sn-Pb solders to achieve microstructural refinement and stability," *Scripta Metall. et Mater.*, 25, 2323(1991).
13. Y. Wu, J. A. Sees and C. Pouraghabagher, "The formation and growth intermetallics in composite solder," *J. Electron. Mater.*, 22, 769(1993).
14. H. K. Kim and K. N. Tu, "Kinetic analysis of the soldering reaction between eutectic Sn-Pb alloy and Cu accompanied by ripening," *Phys. Rev. B.*, 53, 16027(1996).
15. 강대웅, 허주열, "리플로우 솔더링시 솔더/Cu 계면반응속도에 미치는 Cu-첨가 솔더의 영향," 대한금속·재료학회지, 38, 180(2000).
16. L. E. Felton, K. Rajan, P. J. Ficalora, " η -Cu₆Sn₅ precipitates in Cu/Pb-Sn solder joint," *Scripta Metall. et Mater.*, 25, 2329(1991).
17. J. K. Shang and Daping Yao "Effect of interface roughness on fatigue crack growth in Sn-Pb solder joints," *Trans. ASME J. Electron. Packag.*, 118, 170(1996).