



인듐 솔더의 젖음특성

김 대 곤* · 이 창 배** · 정 승 부*

*성균관대학교 신소재공학과

**오사카대학교

The Wetting Property of Indium Solder

*Dae-Gon Kim, **Chang-Bae Lee and *Seung-Boo Jung

*Advanced Materials and Process Research Center for IT, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

**Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan

Abstract

In the present study, the wettability and interfacial tension between (bare Cu, electroless Ni/Cu, immersion Au/Ni/Cu) substrates and indium solder were investigated as a function of soldering temperature, types of flux. The wettability of In solder increased with soldering temperature and solid content of flux. The wettability of In solder was affected by the substrate metal finish used, i.e., nickel, gold and copper. On the bare Cu substrate, In solder wet better than any of the substrate metal finishes tested. Intermetallic compound formation between liquid solder and substrate reduced the interfacial energy and improved wettability. For the identification of intermetallic compounds, X-Ray Diffraction(XRD) were employed. Experimental results showed that the intermetallic compounds, such as Cu₁₁In₉ and In₂₇Ni₁₀ are observed for different substrates respectively. The wetting kinetics is investigated by measuring wetting time with the wetting balance technique. The activation energy of wetting calculated for the In solder/Cu substrate and In solder/electroless Au/Ni/Cu substrate are 36.13 and 27.36 kJ/mol, respectively.

(Received May 10, 2002)

Key Word : Wettability, In solder, Interfacial energy, Wetting kinetics, Intermetallic compound

1. 서 론

전자부품 및 기기의 경박단소화 및 다기능화가 급속히 진행되고 있으며 이러한 요구를 만족시키기 위해 전자패키지는 다핀, 미세피치화의 방향으로 나아가고 있다¹⁻²⁾. 이러한 미세 패키지의 개발 있어 가장 중요하고 기본적인 것은 솔더와 기판(모재)과의 젖음성이며, 초기의 접합특성은 접합부의 장기적인 신뢰성에 큰 영향을 미치게 된다. 예를 들어 솔더와 모재간의 젖음성이 떨어지게 되면 접합부의 기계적특성이 저하되고 반대로 너무 젖음성이 좋은 경우는 브릿지(bridge) 등의 결함이 발생하기 쉽게 된다. 따라서 솔더의 젖음성의 평가는 솔더링 공정 중 초기의 접합특성에 영향을 미치는 가장 중요한 평가항목이 될 수 있다³⁾.

한편, Sn-Pb계 솔더는 접합특성, 경제성 및 작업성

이 양호하기 때문에 전자부품실장에 사용되어 왔지만, Pb에 의해 발생하는 환경문제로 인해 기존의 Sn-Pb계 솔더를 대체할 수 있는 새로운 솔더 합금 개발의 필요성이 제기되고 있다⁴⁻⁷⁾.

현재 많이 연구되고 있는 솔더는 대부분 Sn계 솔더가 주종을 이루고 있지만, Sn계 솔더와 비교해서 In계 솔더는 낮은 융점, 젖음성과 열피로 저항성 등이 매우 우수한 장점을 가지고 있다. 특히 인듐은 연성이 뛰어나 파괴없이 소성변형을 일으키므로 접합부에 크리프 특성이 요구되는 레이저 다이오드, 광 스위치와 같은 광소자디바이스의 접합재료로 가장 주목을 받고 있는 솔더 중의 하나다⁸⁻¹¹⁾.

그러나 In 솔더의 우수한 기계적 특성에도 불구하고 비교적 높은 가격과 제한적인 사용영역으로 인해 연구가 진행되고 있지 못한 실정이다.

따라서 본 실험에서는 In 솔더와 나동(bare Cu), 무

전해 Ni/Cu 및 무전해 Au/ Ni/Cu 3종류의 기판을 사용하여 플럭스의 종류 및 솔더링 온도에 따른 젖음 특성을 비교 하였으며 이때의 젖음 거동을 평가하여 젖음의 활성화 에너지 값을 구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 솔더는 99.99mass%순도의 In을 사용하였고, 젖음성 시험은 IPC(The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits Standard)-TM-650규격에 의한 메니스코그래프 젖음성 실험방법으로 구리시편을 7.0×30.0×0.2(mm)크기로 가공한뒤 사포 #1500으로 연마한 후 10% H2SO4 -90%CH3OH 용액으로 산세처리하여 표면의 산화피막을 제거하여 준비하였다. Ni-P/Cu, Au/Ni-P/Cu 도금층이 젖음성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 구리표면에 Ni-P 및 Au/Ni를 무전해 도금 하였으며 도금 조건은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용된 플럭스는 R type 2종류를 사용하였으며 각 플럭스의 물성은 Table 2에 나타내었다. 젖음성 시험은 웨팅 밸런스 시험기 (wetting balance tester : Rhesca Co. Ltd., SAT-5100)를 사용하였다. 이 방법은 표면장력 법이라고도 하며 젖음성을 정량적으로 표현할 수 있는 가장 신뢰성 있는 방법이다. 시험 전에 각 시편은 플럭스에 침지하였으며, 본 실험에 사용된 젖음성 시험조건은 Table 3에 나타내었다.

Table 1 The surface finish of specimens

Surface finish	Method	Ni thickness	Au thickness
Bare Cu	-	-	-
Ni plating	Electroless	5 ~ 7 μm	-
Au/Ni plating	Electroless	5 ~ 7 μm	0.14~0.16 μm

Table 2 Characteristics of flux used in the experiment

Type	Specific gravity(25℃)	Solid content(%)	Cleaning method
Flux A (R)	0.795	3.3	Non-clean
Flux B (R)	0.836	12	Non-clean

Table 3 Wetting balance test condition used in the experiment

Specimen size	7×30×0.2 (mm)
Atmosphere	Air
Immersion time	10 (sec)
Immersion depth	5 (mm)
Immersion speed	10 (mm/s)
Sensor	20 (mN)

3. 실험 결과

3.1 젖음성 시험 결과

웨팅 밸런스 시험을 통해 우리가 얻을 수 있는 정보는 크게 젖음력(wetting force)과 젖음시간(wetting time)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 젖음력이 크고 젖음 시간이 작을수록 솔더의 젖음성은 좋다고 판단한다. 일반적으로 용융 솔더와 substrate 계면에서의 평형관계는 Fig. 1와 같이 되며, Young의 식이 성립한다.

$$\cos(\theta) = (\gamma_{sf} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lf} \quad (1)$$

식(1)에서, γ_{sl} 는 기판(substrate)-플럭스(flux)의 계면장력, γ_{sl} 은 기판(substrate)-액상 솔더(liquid solder)의 계면장력 그리고 γ_{lf} 는 액상 솔더(liquid solder)-플럭스(flux)의 계면장력이다.

Fig. 2은 200℃에서 플럭스 B에 대한 전형적인 웨팅 밸런스 곡선(wetting balance curve)을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 나동(bare Cu) 기판의 경우 젖음성이 가장 양호하며, Ni/Cu 기판의 경우 In 솔더에 전혀 젖지 않음을 알 수 있다. 따라서 젖음성이 나쁜 Ni 기판 위에 Au를 도금을 함으로써 젖음성을 향상 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 3는 각각 솔더링 온도에 따른 젖음력 및 젖음 시간의 변화를 나타낸 것으로 솔더링 온도가 증가할 수

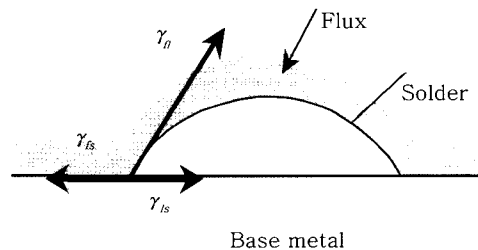


Fig. 1 Schematic of thermodynamic equilibrium in wetting

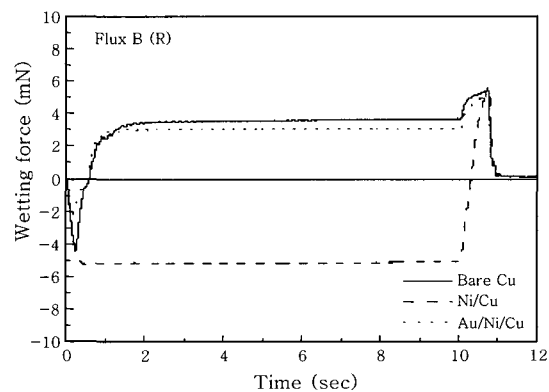


Fig. 2 The Wetting balance curve on in solder

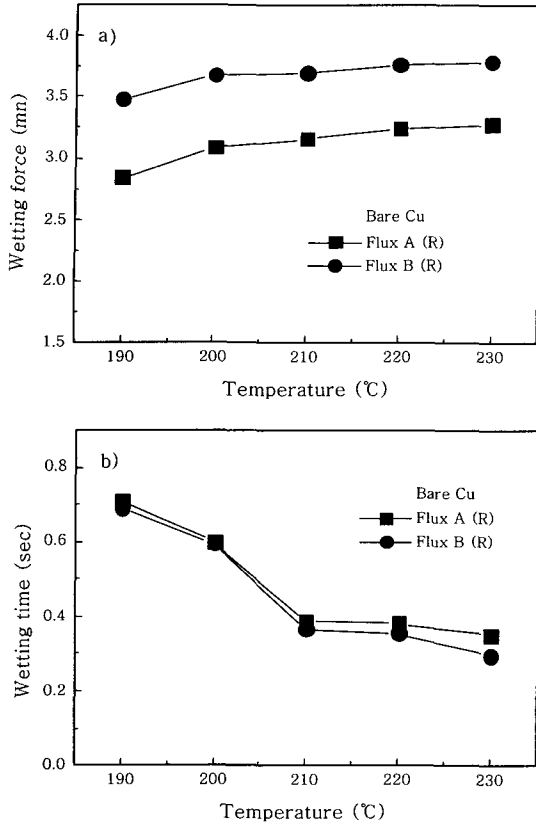


Fig. 3 Temperature dependency on a) wetting force, b) wetting time for flux A and B

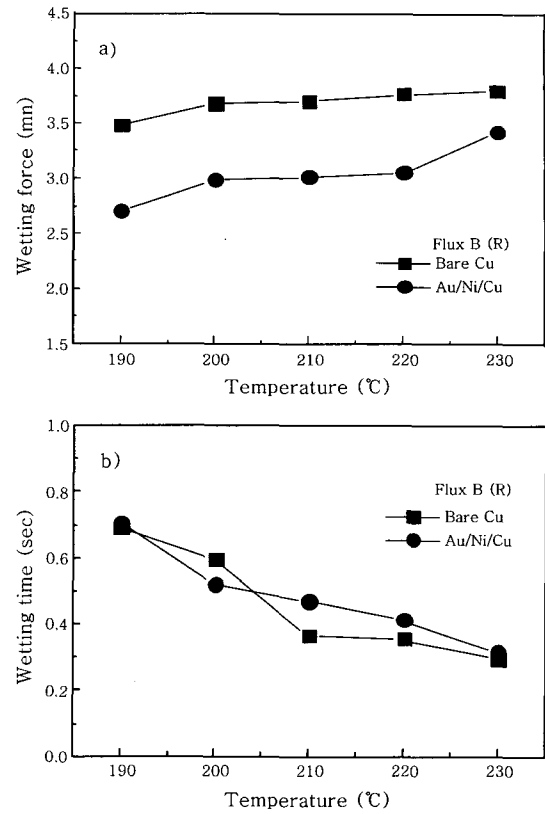


Fig. 4 Temperature dependency on a) wetting force, b) wetting time for various substrate types

록 젖음력은 증가한다. 또, 고형분이 낮은 플럭스(Flux A)를 사용했을 경우에 비하여 고형분이 높은 플럭스(Flux B)를 사용하였을 때 높은 젖음력을 나타내었다. 또한, 솔더링 온도가 증가할 수록 젖음 시간은 감소하였고, 고형분이 낮은 플럭스(Flux A)에 비해 고형분이 높은 플럭스(Flux B)일 경우 젖음 시간은 감소하였다. 이러한 젖음성의 향상은 보다 활성이 높은 플럭스의 작용에 의한 Cu 기판 표면의 산화물 및 오염물질의 제거에 의해 γ_{sf} (substrate-flux interfacial tension)가 증가하고 γ_{lf} (liquid solder-flux interfacial tension)가 감소하기 때문이라고 사료된다.

Fig. 4은 플럭스를 B로 고정하고 각각 솔더링 온도 및 도금층에 따른 젖음력과 젖음 시간의 변화를 나타낸 것이다. 솔더링 온도가 증가할수록 젖음력은 증가하고 젖음시간은 감소하며 나동(bare Cu) 기판의 경우 Au/Ni/Cu 기판에 비하여 높은 젖음력 및 짧은 젖음시간을 나타내었다. 210°C의 경우를 예로 들면, 나동(bare Cu) 기판을 사용하였을 경우 젖음력과 젖음시간은 각각 3.692mN, 0.364초 이고, Au/Ni/Cu 기판의 경우는 각각 3.004mN, 0.468초 이다.

일반적으로 Sn계 솔더의 경우 Cu 기판에 비해 Au 도금을 하였을 경우 젖음성이 향상되는 것으로 보고되

고 있다^{12,13}. 그러나 본 실험의 In 솔더에 대해서는 Sn계 솔더와 달리 Au/Ni/Cu 기판은 bare Cu 기판에 비하여 젖음성이 저하됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 솔더와 기판의 반응 정도로부터 유추할 수 있다. 즉, 솔더링시 솔더와 기판은 계면반응에 의해 계면에 금속간 화합물을 형성하며 퍼지게 되는데 Cu는 Au 및 Ni에 비하여 In 솔더와 반응성이 높기¹⁴ 때문에 상대적으로 낮은 γ_{sl} 값을 갖게 된다.

3.2 솔더의 계면장력 측정 결과

솔더의 표면장력 및 젖음각은 Vianco¹⁵등이 제시한 다음의 식(2)와 식(3)으로부터 구할 수 있다.

$$\gamma_{lf} = \frac{\rho g}{4} \left[\frac{4F^2}{(\rho g P H)^2} + H^2 \right] \tag{2}$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{4F^2 - (\rho g P H^2)^2}{4F^2 + (\rho g P H^2)^2} \right] \tag{3}$$

여기서, ρ 는 솔더의 밀도, g 는 중력가속도, P 는 젖음성 시편의 주변길이(perimeter), H 는 메니스커스 높이(meniscus height), F 는 젖음력(wetting force)이다.

본 연구에서는 웨팅 밸런스 시험(wetting balance test)을 통하여 얻은 젖음력(F) 값과 메니스커스 높이(H)를 측정 후 식(2)와 (3)에 대입하여 솔더의 계면장력 및 젖음각을 계산하였고, 온도 및 플럭스의 종류와 도금층에 따른 계면장력의 변화를 측정하였다.

Fig. 5와 6은 온도 및 플럭스 변화에 따른 계면장력(γ_{lf} , $\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 5에서 온도가 증가할수록 계면장력(γ_{lf}) 값은 증가하는 경향을 나타내었으며, 플럭스 B, 플럭스 A 순으로 높은 계면장력(γ_{lf}) 값을 나타내었다. Eotvos의 법칙¹⁶⁾에 의하면 계면장력과 온도는 반비례하므로 온도가 증가할수록 원자의 열운동이 활발해져 낮은 계면장력(γ_{lf})을 갖게 되고, 낮은 계면장력(γ_{lf})은 식(1)에 의하여 낮은 젖음각을 갖게 된다.

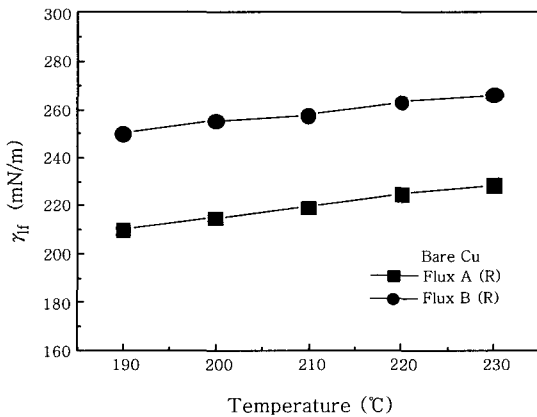


Fig. 5 Variations of lf with soldering temperature for In solder

그러나 식(1)에 의하면 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)은 $\gamma_{lf} \cos(\theta)$ 와 같은 값을 갖는다. γ_{lf} 는 식(2)에 의해 나타낼 수 있으며 젖음력(F)와 메니스커스 높이(H) 값에 따라 변화하고 특히 메니스커스 높이(H) 값에 따라 오차가 발생할 수 있지만, ($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$) 값은 젖음력에 의존하여 변화하고 γ_{lf} 와 $\cos(\theta)$ 의 조합에 의해 결정되기 때문에 계면장력(γ_{lf})값에 비하여 더욱 정확한 값이라고 할 수 있다. 즉, 메니스커스 높이(H) 값이 변함에 따라서 계면장력(γ_{lf})과 $\cos(\theta)$ 값이 동시에 변화하여 항상 일정한 값을 가지게 되므로 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$) 값은 변화하지 않게 된다. Fig. 6 (a)에서 온도가 증가함에 따라 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)은 증가하였고, 고형분이 낮은 플럭스 A에 비하여 고형분이 높은 플럭스 B를 사용하였을 경우 높은 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)을 가짐을 알 수 있었다.

Fig. 6 (b)는 플럭스 B를 사용하였을 때 온도와 도금층의 종류에 따른 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)의 변화를 나타낸 것이다. 솔더링 온도가 증가할수록 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)

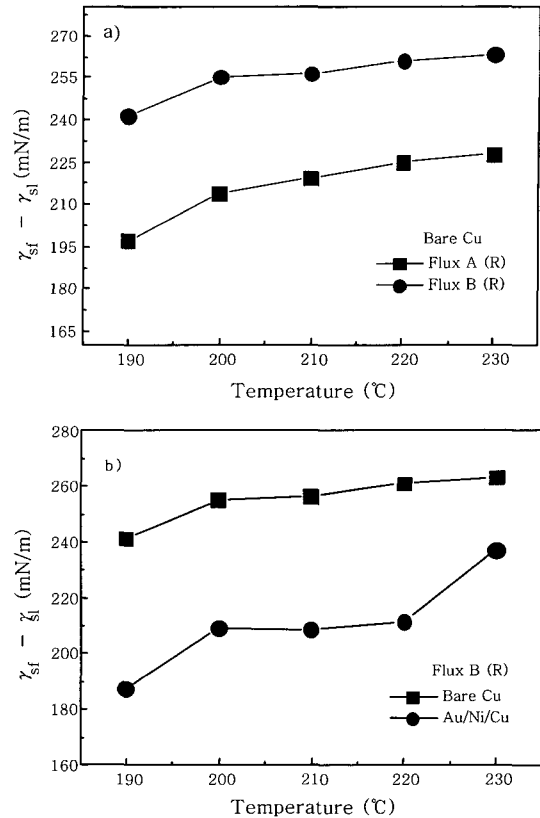


Fig. 6 Variations of $\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$ with soldering temperature for In solder

값은 증가하였고, 나동(bare Cu), Au/Ni/Cu 기판 순으로 높은 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$) 값을 나타내었다. 일반적으로 솔더링시 솔더와 기판 계면에서는 솔더와 기판 원소간의 상호확산에 의하여 금속간화합물이 형성되며, 이러한 자발적인 반응은 계 전체의 자유에너지를 감소시키게 된다. 따라서 계면에서 형성된 금속간화합물과 솔더 사이의 계면장력(γ_{il})은 기판과 솔더 사이의 계면장력(γ_{sl})보다 낮게 된다¹⁷⁾. 또한, 솔더링 온도가 높을수록 계면장력(γ_{sl}) 값의 감소 폭은 더 커지므로 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$) 값은 증가하게 된다.

3.3 솔더의 젖음 기구

기판 위에서 액상 솔더의 젖음 거동은 기판/액상 솔더, 기판/플럭스, 액상솔더/플럭스의 계면에 의존한다. 이 세 가지 계면 장력은 온도, 고체와 액체의 반응, 그리고 플럭스의 활성화도에 따라 달라지게 되고 일반적으로 젖음 기구는 다음 식으로 표현된다¹⁸⁾.

$$t_w = A_0 \exp(Q/RT) \tag{4}$$

여기서 t_w 는 젖음 시간이고 A_0 는 상수, R 은 기체 상수, T 는 절대온도, Q 는 젖음에 필요한 활성화 에너지

값이다. 이 활성화 에너지는 플럭스의 활성화도와 기판과 솔더의 반응에 의해서 제어된다.

이 식의 양변에 로그값을 취하면 다음과 같이 표현된다.

$$\ln(t_w) = Q/RT + \ln A_0 \quad (5)$$

젖음에 필요한 활성화에너지(Q)는 $\ln(t_w)$ 대 $1/T$ 의 그래프의 기울기를 선형회기분석하여 구하였다.

Fig. 7은 기판과 플럭스에 따른 활성화 에너지 값을 나타낸 것이다. 나동(bare Cu) 기판에 대해서 플럭스 A와 B를 사용하였을 경우 젖음에 필요한 활성화에너지 값은 각각 36.13, 44.38 kJ/mol로 계산되었다. Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 플럭스 A를 사용할 경우 젖음 시간은 190°C에서 0.709sec, 230°C에서 0.340sec 로서 젖음 시간은 0.369sec 감소되는 반면 플럭스 B의 경우 190°C에서 0.689sec, 230°C에서 0.294sec 로 0.395sec 감소되었다. 활성화에너지 값은 $\ln(t_w)$ 대 $1/T$ 의 그래프의 기울기를 의미하므로 결국 높은 활성화에너지 값은 실험온도 범위 내에서 온도에 대한 의존성이 더욱 큼을 의미한다.

또한 Fig. 7(b)로부터 Au/Ni/Cu 기판의 경우 Cu 기판을 사용하였을 경우보다 젖음에 필요한활성화에너지

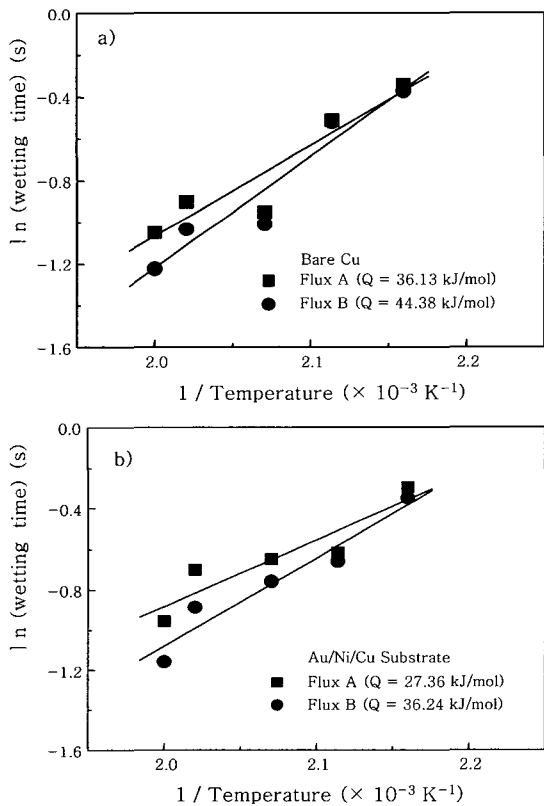


Fig. 7 The Arrhenius plot of the wetting versus temperature for the interaction between a) bare Cu substrate, b) Au/Ni/Cu substrate and In solder

가 낮음을 알 수 있다. Cu 기판에 비해 상대적으로 낮은 활성화에너지는 젖음 과정이 플럭스의 화학적 작용보다는 주로 솔더/기판 계면에 형성되는 반응생성물(금속간화합물)에 의해 결정됨을 의미한다.

Fig. 8은 솔더 부분만을 선택적으로 에칭하여 제거한 후, 금속간화합물 표면에 대한 XRD(X-Ray Diffractometry)를 분석 한 결과이다. Cu 기판과 솔더 계면에 형성되는 금속간화합물은 $Cu_{11}In_9$ 이며, Au/Ni/Cu 기판 위에서 형성되는 금속간화합물은 $In_{27}Ni_{10}$ 임을 확인하였다.

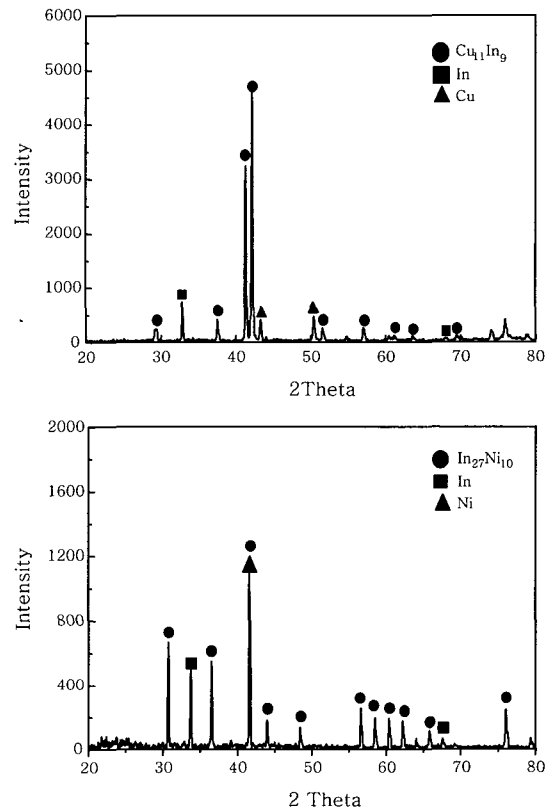


Fig. 8 The X-ray diffraction pattern of $Cu_{11}In_9$ and $In_{27}Ni_{10}$

Table 4는 젖음 반응에 대한 활성화에너지 값을 나타낸 것이다. 솔더의 조성, 플럭스의 종류, 실험온도 구간 및 계면에 생성되는 금속간화합물의 종류 등에 따라서 다른 활성화에너지 값을 가짐을 알 수 있다. Chen과 Lin¹⁹⁾은 250–325°C 온도구간에서 In-Sn솔더와 Ni-Cu-P가 증착된 기판의 젖음 반응에 대해 연구한 결과 온도 변화에 따라 두개의 젖음 기구로 나누어진다고 보고하였다. 예를 들어 80In-20Sn 솔더의 경우 250–275°C 구간에서는 97.8 kJ/mol의 활성화에너지 값을, 275–325°C 구간에서는 40.0kJ/mol의 활성화에너지 값을 가지며 계면에 생성되는 금속간화합물은 두 종류의 In-Ni화합물(In_3Ni_2 , $In_{27}Ni_{10}$)이라고

Table 4 The activation energy of the wetting reaction

Solder/substrate	Flux	Temperature(°C)	Intermetallic compound	Activation energy (kJ/mol)	Ref
20In-80Sn/Ni-Cu-P	C	250-275	Ni ₃ Sn ₄ , In ₃ Ni ₂	103.5	Chen et al. ¹⁸⁾
		275-325	In ₃ Ni ₂ , In ₂₇ Ni ₁₀ (*)	35.4	
20In-80Sn/Ni-Cu-P		250-275	In ₃ Ni ₂ , In ₂₇ Ni ₁₀	89.3	
		275-325	In ₃ Ni ₂ , In ₂₇ Ni ₁₀ (*)	37.8	
20In-80Sn/Ni-Cu-P		250-275	In ₃ Ni ₂ , In ₂₇ Ni ₁₀	97.8	
		275-325	In ₃ Ni ₂ , In ₂₇ Ni ₁₀ (*)	40.0	
100In/Cu	A	190-230	Cu ₁₁ In ₉	36.13	This work
100In/Cu	B	190-230	Cu ₁₁ In ₉	44.38	
100In/Au/Ni/Cu	A	190-230	In ₂₇ Ni ₁₀	27.36	
100In/Au/Ni/Cu	B	190-230	In ₂₇ Ni ₁₀	36.24	

보고하였다. 또한, 두 온도구간에서의 활성화에너지 값의 차이는 275°C 이상의 고온에서 In₂₇Ni₁₀ 화합물이 주된 생성상이기 때문으로 보고하였다.

본 연구에서 In솔더/Cu 및 In솔더/Au/Ni/Cu 계면에 생성되는 금속간화합물은 각각 Cu₁₁In₉ 및 In₂₇Ni₁₀로서 활성화에너지 값의 차이는 서로 다른 화합물의 생성에 기인한 것으로 판단된다. 또한, In-Sn계 솔더/Ni-Cu-P 계면에서는 In₃Ni₂, In₂₇Ni₁₀ 화합물이 생성된다고 보고되었지만 본 실험의 경우 190-230°C의 온도구간에서 In₂₇Ni₁₀만이 생성되었다.

4. 결 론

In 솔더를 사용하여 솔더링 온도(190°C-230°C), 플럭스(A:고형분3.3%, B:고형분12%) 및 기판(Cu, Ni/Cu, Au/Ni/Cu)의 종류에 따른 젖음성 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 젖음성 시험 결과, 210°C의 경우 Bare Cu 기판을 사용하였을 경우 젖음력은 3.692mN이었고, Au/Ni/Cu 기판일 경우에는 3.004mN의 젖음력을 나타내었다. 그러나 Ni/Cu 기판의 경우는 플럭스와 온도 변화에 따라 전혀 젖지 않았다. 따라서 젖음성이 낮은 Ni 기판 위에 Au를 도금을 함으로써 젖음성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

2) 솔더링 온도가 증가함에 따라 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)은 증가하였고, Au/Ni/Cu 기판에 비하여 bare Cu기판을 사용하였을 경우 높은 계면장력($\gamma_{sf} - \gamma_{sl}$)값을 가짐을 알 수 있었다. 왜냐하면 Cu는 Au 및 Ni에 비하여 In 솔더와 반응성이 높기 때문에 상대적으로 낮은 γ_{sl} 값을 갖기 때문이다

3) In 솔더/Cu 및 In 솔더/Au/Ni/Cu 계면에 생성되는 금속간화합물은 각각 Cu₁₁In₉, In₂₇Ni₁₀이며, 젖음 반응에 대한 활성화에너지 값은 In 솔더/Cu와 In 솔더/Au/Ni/Cu에 대하여 각각 36.13 및 27.36

kJ/mol이었다. 젖음 반응에 대한 활성화에너지 값은 솔더의 조성, 플럭스의 종류, 실험온도구간 및 계면에 형성되는 금속간화합물의 종류 등에 따라 다른 값을 가짐을 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국과학재단(목적기초연구, 과제번호 : R01-2000-000-00227-0)의 지원 하에 이루어진 것으로 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. J. H. Lau : BGA Technology, McGraw-Hill, NY, 1995
2. J. H. Lau : Flip Chip Technologies, McGraw-Hill, NY, 1996
3. F. J. Yost, F. M. Hosking and D R. Frear : The mechanics of solder alloy wetting and spreading, (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993) 37-38
4. P. T. Vianco and F. J. Yost : Sandia Report, SAND92-0211, Sandia Nat. Lab., April (1992) 1-9
5. J. Glazer : Metallurgy of low temperature Pb-free solders for electronic assembly, International Materials Reviews, **40** (1995) 65-93
6. J. A. Kern, M. W. Weiser, C. A. Drewien, F. J. Yost and S. Sackinger : Sandia Report, SAND96-1431, Sandia Nat. Lab., June(1996) 1-5
7. W. B. Hampshire : Some Problems in Switching to Lead-free Solders, **9** (1997) 11-12
8. Y. C. Chen, C. C. Lee, Indium-copper multilayer composites for fluxless oxidation-free bonding, Thin Solid Films **283**(1996) 243-246
9. I. Shohji, S. Fujiwara, S. Kiyono, K. F. Kobayashi, Intermetallic Compound Layer Formation Between Au and In-48Sn Solder, Scripta Materialia, **40**(1999) 815-820
10. Y. M. Liu, T. H. Chuang, Interfacial Reactions between In10Ag Solders and Ag Substrates, J. Electron. Mater. **29** (2000) 1328-1332

11. F. S. Shieu, C. F. Chen, J. G. Shen, Z. C. Chang, Intermetallic phase formation and shear strength of a Au-In microjoint, *Thin Solid Films* **346** (1999) 125-129
12. Chang-Bae Lee, Seung-Boo Jung, Young-Eui Shin and Chang-Chae Shur : The Effect of Bi Concentration on Wettability of Cu Substrate by Sn-Bi Solder, *Materials Transactions*, **42**(2001), 751-755
13. Jeong-Won Yoon, Chang-Bae Lee, Chang-Chae Shur, Seung-Boo Jung : The Wetting Property of Sn-3.5Ag Eutectic Solder, *J. KWS*, **20-1** (2002) 91-96(in Korean)
14. Ning-Cheng Lee : Reflow Soldering Process and Troubleshooting : SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies, Newnes, 2002
15. P. T. Vianco and D. R. Frear : Issues in the Replacement of Lead-Bearing Solders, *JOM*, **45** (1993) 14-19
16. A. W. Adamson and A. P. Gast : Physical chemistry of surface Sixth Edition, A WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, 51
17. A. J. Sunwoo, J. W. Morris and G. K. Lucey : Solderability of Pre-Tinned Cu Sheet, *J. Electron. Mater.*, **21** (1992) 549-557
18. R. J. Klein Wassink : Soldering in Electronics (Ayr, Scotland : Electrochem. Pub. Ltd, 1989) Ch. 5.
19. Chen-Jen Chen and Kwang-Lung Lim : Wetting Interactions Between the Ni-Cu-P Deposit and In-Sn Solders, *IEEE Trans. Packag. Manufact. Technol.*, **20-3**(1997)211-216