

특집 : SAC305 솔더와 나노복합

## SAC305 및 나노 입자 분산 솔더의 특성

김장백 · 서성민 · 강혜준 · 조도훈 · 스리 하리니 라젠드란 · 정재필<sup>†</sup>

서울시립대학교 신소재공학과

### Characteristics of SAC305 and Nano-Particle Dispersed Solders

Jang Baeg Kim, Seong Min Seo, Hye Jun Kang, Do Hoon Cho, Sri Harini Rajendran, and Jae Pil Jung<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

(Received March 8, 2021; Corrected March 26, 2021; Accepted March 30, 2021)

**Abstract:** Sn-3wt%Ag-0.5wt%Cu (SAC305) solder is most popular solder in electronics industry. However, SAC305 has also drawbacks such as growth of  $\beta$ -Sn phase, intermetallic compounds (IMCs) of  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$  and  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  which can result in deterioration of solder joints in terms of metallurgically, mechanically and electrically. Thus, improvement of SAC305 solders have been investigated continuously by addition of alloying elements, nano-particles and etc. In this paper, recent improvements of SAC solders including nano-composite alloys and related solderability and metallurgical and mechanical properties are investigated.

**Keywords:** Sn-3wt%Ag-0.5wt%Cu solder, nano-composite solder, wetting, microstructure, tensile property

#### 1. 서 론

최근 고성능 소형 전자기기, 플렉서블, 웨어러블 기기, 가상현실(VR, Virtual Reality)과 증강현실(AR, Augmented Reality) 기기들에 대한 관심이 높아지면서, 소형화된 전자 장비의 수요가 증가하고 있다. 이런 수요에 맞춰 전자 패키징의 흐름도 소형화, 고밀도의 패키징으로 트렌드가 이동하고 있다. 전자 산업에서 인체에 대한 위험성 때문에 납이 금지됨에 따라, 많은 무연 솔더의 조성들이 연구되었다. 제안되거나 사용되는 합금 조성으로는 Sn-Bi계, Sn-Ag계, Sn-Au계, Sn-In계, Sn-Sb계, Sn-Pd계, Sn-Ag-Cu 계 와 Sn-Zn계 등이 존재한다.<sup>1)</sup> 무연 솔더 합금에 대한 연구는 대부분 용점이 낮은 공정 합금 조성이 중심이다. 기존의 유연 솔더의 조성도 공정 조성인 Sn-37Pb (용점 183 °C)가 사용되었다. 플렉서블, 웨어러블 기기, 열충격에 약한 부품, 부품의 크기가 커서 열에 의해 변형이 커지는 부품들에 대한 대책으로, 저용점 솔더인 Sn-Bi, Sn-In 계 솔더가 있다. Sn-Bi 공정 합금은 용융점을 139 °C로 낮출 수 있지만, 고온 특성이 떨어지고 Bi상의 성장이 용이해서 취성이 증가되는 단점이 있다. Sn-In계 솔더는 공정합금 용점이 118 °C 정도로 매우 낮지만 가격이 높은 단점이 있다.

Sn-Pb계 유연 솔더의 대체재로 널리 사용되는 조성은 적절한 용점과 고온 성능이 개선된 Sn-3.0wt%Ag-0.5wt%Cu (SAC305)이다. SAC305는 Ag에 의해 생성된  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  석출 강화로, 우수한 고온강도와 열 피로 특성을 지닌다. 그러나 솔더 내에서 생성되는 지나치게 크게 성장하는  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ 상은 동일 크기의 균열과 비슷한 역할을 하므로  $\text{Ag}_3\text{Sn}$ 상의 크기를 적절히 제어해야 한다. 또한, Cu와 Sn의 반응에 의해 솔더와 Cu 계면에서 생성되는  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ 과  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 와 금속간 화합물(IMC, Intermetallic Compound)은 취성을 가지며 균열 전파의 통로가 되어, 접합부의 신뢰성 저하 문제를 유발할 수 있다.<sup>2)</sup>

이렇게 접합부의 신뢰성 저하를 일으키는 IMC의 형성을 억제하기 위해 솔더 내에 나노 입자를 분산시키는 방법이 제안되었다. 솔더 내에 첨가된 나노 입자는 솔더 내에 분산강화를 일으키고 조직의 미세화를 유도하여 전위의 움직임을 방해하여, 솔더의 기계적 특성을 향상시킨다. 첨가되는 나노 입자의 종류로는 금속, 솔더와 반응하지 않는 금속 화합물, 세라믹 등을 사용한다. 본 논문에서는 SAC305 솔더의 특성과 세라믹 나노 입자를 중심으로 한 SAC305의 연구 동향을 살펴보고자 한다.

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: [jjjung@uos.ac.kr](mailto:jjjung@uos.ac.kr)

© 2021, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 2. 리플로우 솔더링 공정

솔더링은 용접과 달리 모재를 용융하지 않고 솔더만 용융하여 접합하는 방식이다. 솔더가 용융되면, 모재에 웨팅 및 모세관 형상으로 침투하여 전자부품과 모재를 접합한다. 솔더링을 통해 양호한 접합부를 얻기 위해서는 솔더가 용융되어 흐르면서 모재 금속에 퍼져가는 젖음성(wettability)이 필요하다. 이때 솔더링이 진행된 모재와 솔더 사이에는 확산에 의해 반응층이 생기는데, 솔더 중의 Sn과 모재인 Cu 사이에는 IMC가 형성된다. Sn-Ag-Cu 솔더의 경우에도 Sn/Cu 사이에  $Cu_6Sn_5$ 와  $Cu_3Sn$  같은 취성이 있는 IMC가 형성된다. 또, 고온에서 장시간 유지시 Cu 전극측 계면에 Cu, Sn의 상호확산계수 차에 의한 공공(Kirkendall void)을 생성하여, 접합부의 신뢰성저하에 큰 영향을 준다.

### 2.1. 연속 리플로우

일반적으로 IR(infrared) 등 연속 일괄 리플로우 공정에는 예열, 열 흡수, 리플로우, 냉각의 4단계가 있다(Fig. 1 참조). 예열 영역(preheating zone)에서는 솔더 페이스트 중의 용매를 증발시키고, 열 흡수 영역(soaking zone)에서는 플럭스 중의 활성제가 활성화된다. 이때 PCB 위의 구리 패드와 리드, 솔더에 존재하는 산화막이 제거되기 시작한다. 다음 단계인 리플로우 영역(reflow zone)은 온도가 솔더의 액상선(liquidus)보다 20~40 °C 정도 높은 구간으로, 솔더가 용융되어 PCB 위의 구리 패드와 리드 사이에 금속 결합을 형성한다. 마지막 단계인 냉각 영역(cooling zone)은 열을 받은 기판을 냉각시키는 단계로, 서냉에 의한 과도한 IMC의 형성이나 급냉에 의한 열충격을 방지하기 위해 적절한 속도로 냉각한다.

### 2.2. 레이저 리플로우

미니, 마이크로 LED 등의 솔더링을 비롯하여, 최근 전자 산업에서 레이저 리플로우 방식은 솔더링 및 조립 공정에서 주목받고 있다. 또, 다품종 소량생산과 특수 전자 부품에 대한 마이크로 솔더링의 수요가 증가됨에 따라, 오븐에 의한 일괄 리플로우 방식에 비해 보다 유연하게 대처할 수 있는 레이저 솔더링 방법에 대한 요구도 증가하고 있다.<sup>3)</sup> 레이저 리플로우 방식이 주목받는 이유는 레이저의 특성에 의해 국부적으로 열을 가할 수 있다는 것과 리플로우 시간을 단축시킬 수 있다는 점이다.<sup>4)</sup> 또 다른 장점은 기존의 리플로우 방식에 비해 적은 입열량으로 IMC의 형성이 적어진다는 점이다. 구리 기판 위에 SAC 솔더가 용융되면 확산에 의해 솔더와 구리 계면 사이에 IMC가 형성이 되고, IMC의 두께는 접합부의 기계적 특성에 영향을 준다. Nishikawa 등은 레이저 리플로우 기법을 사용했을 시 이전의 리플로우 방식보다 IMC의 두

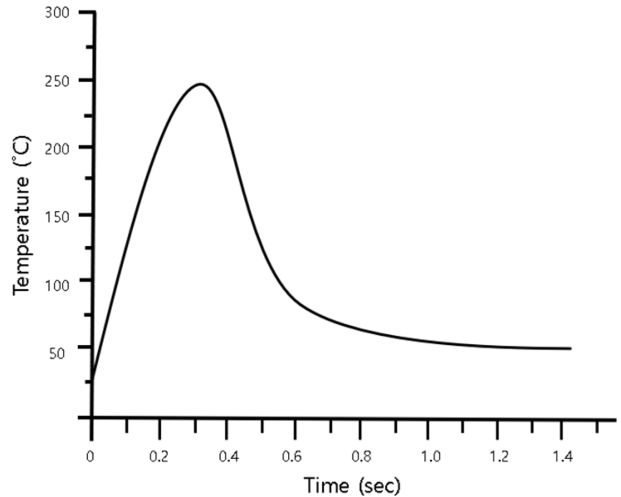


Fig. 2. Example of reflow temperature profile by Nd:YAG laser.

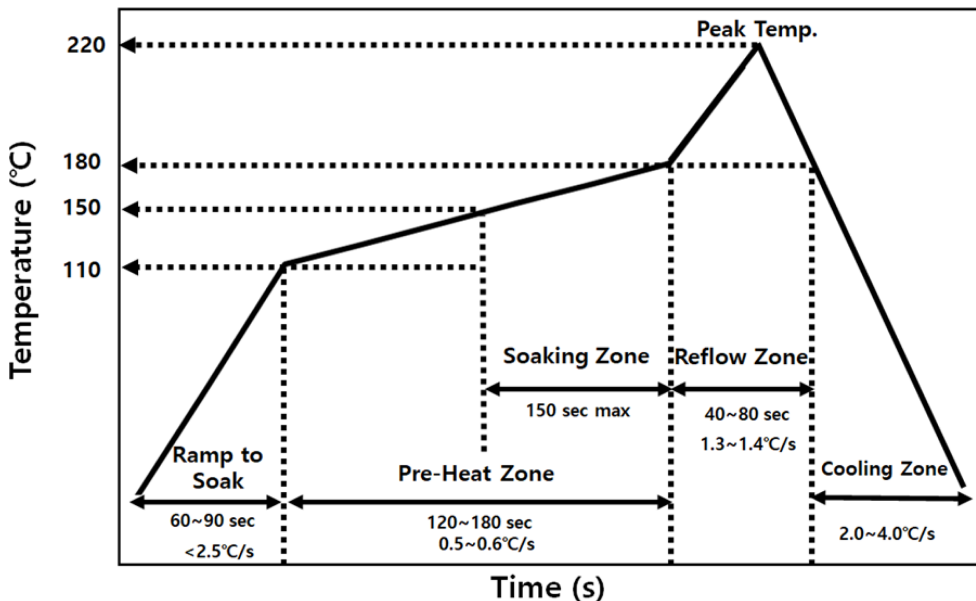


Fig. 1. Temperature profile of continuous oven reflow.

께가 2  $\mu\text{m}$  적게 형성되었음을 보고하였다.<sup>5-6)</sup>

Fig. 2는 Nd:YAG laser에 의한 리플로우 솔더링 프로파일의 일례를 보인 것이다. 이 경우, 피크 레이저 솔더링 온도가 급격히 상승하여, 가열속도가 약 1000  $^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ 에 달하기도 한다. 따라서 급격한 가열에 의해 솔더에 포함된 용매의 빠른 팽창으로 미세한 솔더 볼이 발생할 위험이 있다. 이러한 위험을 회피하기 위해서는 펄스 레이저를 사용하는 등 입열량의 급격한 증가를 줄여 주는 방법이 필요하다.<sup>7)</sup>

### 3. SAC305 및 나노 복합재의 용점

Table 1은 SAC305 공정 솔더의 용점을 조사한 것으로 용점은 연구자들 마다 조금씩 다른데, 표에서 볼 수 있듯이 SAC305 솔더의 고상점은 216.4~217.5  $^{\circ}\text{C}$ , 액상점은 217.7~221.3  $^{\circ}\text{C}$  정도인 것으로 보고되고 있다. 액상선과 고상선의 중간영역에 위치하여 고상과 액상이 공존하는 영역을 머쉬존(Mushy zone)이라 하는데, 연구자들 마다 머쉬 존이 조금씩 다를 것을 보고하였다.<sup>8-10)</sup> 한편, Sn-Pb 공정 솔더의 용점 183  $^{\circ}\text{C}$ 에 비해 높은 용점을 가진 SAC305 솔더는 유연 솔더에 비해 열에 취약한 부품이나 웨어러블, 플렉서블 부품의 열손상이나 변형 문제 등 솔더링시 단점이 있다. SAC305 솔더의 용점 관련하여 합금 원소의 첨가나 복합화, 나노 크기의 물질에 대한 연구들이 보고되기도 하였다.<sup>11,12)</sup>

Gain 등<sup>8)</sup>은  $\text{ZrO}_2$  나노 입자를 0.5, 1.0, 3.0 wt% 씩 SAC305에 첨가하였다. 실험결과 고상선 온도는 SAC305의 217.0  $^{\circ}\text{C}$ 에 비해 약 0.1  $^{\circ}\text{C}$  이상 증가하였는데, 3.0 wt%의  $\text{ZrO}_2$ 를 첨가했을 때 0.25  $^{\circ}\text{C}$  증가한 217.25  $^{\circ}\text{C}$ 의 최대 값을 보였다. 액상선 온도는 SAC305의 221.33  $^{\circ}\text{C}$ 에서  $\text{ZrO}_2$  나노입자의 첨가량에 따라 약 0.3  $^{\circ}\text{C}$  이상 증가하는 추세를 보였는데, 3.0 wt%의  $\text{ZrO}_2$ 를 첨가하였을 때 최대인 221.95  $^{\circ}\text{C}$ 의 값을 보였다. Tang 등<sup>9)</sup>은  $\text{TiO}_2$  나노 입자를 0.05, 0.1, 0.6 wt% SAC305에 첨가하였다. 실험결과 고상선 온도는 SAC305의 216.4  $^{\circ}\text{C}$ 에서 큰 변화는 없었지만, 0.6 wt%를 첨가하였을 때 0.1  $^{\circ}\text{C}$ 정도 감소하였다. 액상선 온도는 SAC305의 217.7  $^{\circ}\text{C}$  보다 1~2도 정도 증가한 결과를 보였다. Srivalli 등<sup>10)</sup>은 NiO 나노 입자를 0.5, 1.5, 2.5 wt%를 첨가하였다. 고상선 온도는 SAC305의 217.5  $^{\circ}\text{C}$ 에서 큰 차이 없이 217  $^{\circ}\text{C}$  정도였고, 온도 감소는 없었다. 액상선 온도 또한 SAC305의 218.9  $^{\circ}\text{C}$ 에서 큰 차이가 없는 219  $^{\circ}\text{C}$ 정도를 보였다.

Table 1. Melting temperature of SAC305

Composition	Solidus ( $^{\circ}\text{C}$ )	Liquidus ( $^{\circ}\text{C}$ )	Mushy Zone ( $^{\circ}\text{C}$ )	Reference
Sn-3.0Ag-0.5Cu	217.0	221.33	4.33	8
Sn-3.0Ag-0.5Cu	216.4	217.7	1.3	9
Sn-3.0Ag-0.5Cu	217.5	218.9	1.4	10

Table 2. Difference of melting temperature by adding nanoparticles in SAC305<sup>8-10)</sup>

Nanoparticle	wt%	Solidus ( $^{\circ}\text{C}$ )	Liquidus ( $^{\circ}\text{C}$ )	Mushy zone ( $^{\circ}\text{C}$ )	Reference
$\text{ZrO}_2$	0	217.0	221.33	4.3	8
	0.5	217.08	221.63	4.6	
	1.0	217.12	221.65	4.5	
	3.0	217.25	221.95	4.7	
$\text{TiO}_2$	0	216.4	217.7	1.3	9
	0.05	216.6	219.1	2.5	
	0.1	216.7	219.6	2.9	
	0.6	217.3	222.1	4.8	
NiO	0	217.5	218.9	1.4	10
	0.5	217.8	219.0	1.2	
	1.5	217.9	219.3	1.4	
	2.5	218.1	219.7	1.6	

이들의 보고들로부터  $\text{ZrO}_2$  나노 입자를 첨가하여도 SAC305 솔더의 용점 저하는 큰 변화가 관찰되지 않았으며,  $\text{TiO}_2$  나노 입자를 첨가하여도 용점 저하가 관찰되지 않았고, 오히려 0.5~3.5  $^{\circ}\text{C}$  정도의 액상선 온도가 증가하는 경향을 보였다. Table 2는 위에 언급한 용점결과들을 정리한 것이다.

### 4. 젖음성

용융된 솔더가 모재 금속의 표면에 퍼지는 현상을 젖음(wetting)이라고 한다. 우수한 접합부를 얻기 위해서는 우수한 젖음성(wettability)이 필요하다. 양호한 젖음성을 얻기 위해서는 우선 모재 금속의 표면이 오염되지 않은 깨끗한 상태여야 하고, 용도에 따른 적절한 플럭스, 솔더, 가열 온도 등이 필요하다. 젖음성을 평가하는 방법으로는 우수한 재현성과 정량적 분석이 가능한 웨팅 밸런스 테스트(wetting balance test)를 주로 사용한다.

솔더의 젖음성을 판단하는 지표 중의 하나로서, Fig. 3의 웨팅 밸런스 테스트의 곡선에서 젖음력이 음의 값에서 양의 값으로 변하는 지점의 시간(점 c), 즉 영점시간(zero cross time)이 있다. 영점시간은 솔더가 시편에 젖는 최소 시간을 나타낸다. 영점시간이 1.2초 미만일 경우 솔더가 양호한 젖음 시간을 가진다고 할 수 있고, 그보다 클 경우 느린 젖음 시간을 가진다고 볼 수 있다.<sup>13)</sup>

Fig. 3<sup>14)</sup>의 그래프에서 d점에서 e점까지의 평평한 부분의 값을 평형 젖음력(equilibrium wetting force) 혹은 최대 젖음력이라고 한다. 평형 젖음력은 솔더가 웨팅이 일어나는 힘을 정량화한 것으로, 양호한 값은 보통 4-5 mN의 크기를 가지며 평형 젖음력이 크면 웨팅이 잘 일어난다. 평형 젖음력을 이용하여 용융 솔더의 표면장력, 그리고 솔더와 시편의 접촉각을 측정할 수 있다.<sup>15)</sup>

Table 3은 Lee 등<sup>16)</sup>에 의한 SAC305솔더를 각각 250  $^{\circ}\text{C}$

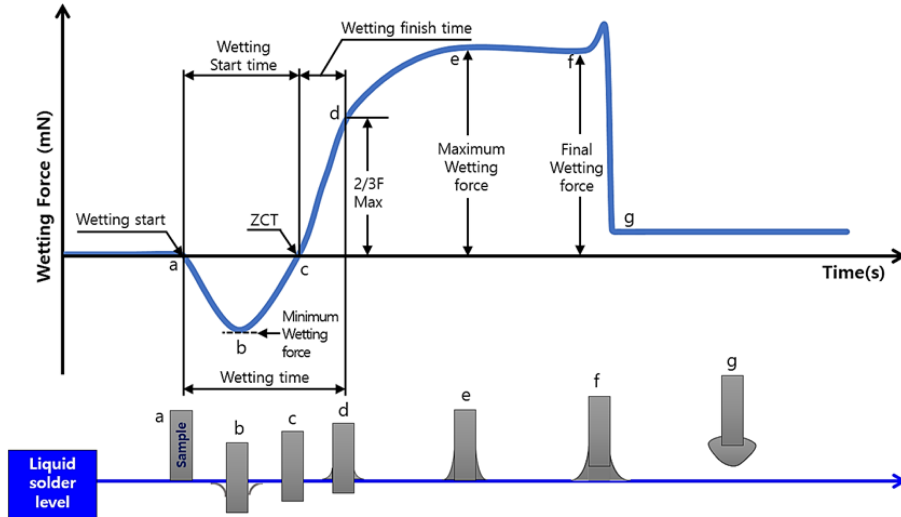


Fig. 3. Schematic of wetting balance test and its curve.<sup>14)</sup>

Table 3. Wetting angle of SAC305 on pure Cu substrate<sup>16)</sup>

Reflow Temperature	Cu substrate	Contact Angle (°)
250 °C	Unetched	44
	Etched	42
260 °C	Unetched	40
	Etched	39

와 260 °C에서 10초 리플로우 한 다음 구리판과 에칭한 구리판에서 용융 솔더의 웨팅시 접촉각을 측정한 결과이다. 온도가 260 °C로 높은 경우 250 °C에 비해 접촉각이 3-4° 감소됨을 알 수 있다.

Fallahi 등<sup>17)</sup>은 SAC 솔더에 대하여 Cu 및 Ni-P 기판에 대해 250 °C에서 젖음각 (wetting angle)을 조사하였다. Cu 기판에 대해 Sn-3.6Ag-0.9Cu, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.6 Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.2 Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.3Ce-1.73In 솔더의 젖음각은 각각 29.6°, 28.1°, 23.6°, 18° 임을 보고하였다. 즉 SAC 솔더에 대해 Fe, In-Ce을 미량 합금하면 젖음각이 감소하였는데, 특히 In-Ce을 첨가한 경우 약 60% 수준으로 젖음각이 감소하였다.

나노 입자의 첨가는 SAC305의 젖음성과 퍼짐성 (spreading) 특성을 향상시킨다고 알려져 있다. Li 등<sup>18)</sup>은 SAC305 솔더에 0~0.75 wt%의 TiO<sub>2</sub> 나노 입자를 첨가하여, TiO<sub>2</sub>가 SAC305의 젖음성을 향상시킴을 보여주었다. TiO<sub>2</sub>를 0.25 wt% 첨가 시, SAC305 젖음 시간의 53.7%로 감소시킬 수 있고, 젖음력은 37.6% 향상시킬 수 있음을 보고하였다. 그러나, 0.25 wt%보다 많은 양을 0.75 wt%까지 TiO<sub>2</sub>를 첨가 시 젖음 시간은 SAC305의 젖음 시간과 비슷하였고, 젖음력은 0.25 wt%일 때의 젖음력보다 감소했음을 보였다. Wang 등<sup>19)</sup>이 연구한 바에 따르면, SAC305의 젖음력이 3.87 mN일 때 0.05 wt%의 SiO<sub>2</sub> 나노 입자 첨가하면 4.09 mN으로 크게 증가함을 보고하였다. 또한 0.05 wt%이상의 SiO<sub>2</sub> 첨가는 오히려 SAC305보다 젖음력

을 감소시켰다. 젖음력이 감소하는 이유는 Cu의 SiO<sub>2</sub> 흡수가 젖음력에 영향을 주는데, 과량의 SiO<sub>2</sub>는 Cu 표면에 흡수되기 어려운 큰 입자로 뭉치기 쉽기 때문이다.<sup>19)</sup> Qu 등<sup>20)</sup>도 마찬가지로 SAC305의 접촉각이 22.11°일 때 ZnO를 2.0 wt% 첨가하면 5.5°로 감소했음을 보고하였다.

Yin 등<sup>21)</sup>은 SAC305 솔더에 Ni 나노 입자를 0.05 0.1 0.3 1.0 wt%를 첨가하여 퍼진(Spreading) 면적 변화를 관찰하였다. SAC305의 퍼진 면적이 60 mm<sup>2</sup>일때, Ni 0.1 wt%를 첨가하면 퍼진 면적이 83.3 mm<sup>2</sup>으로 38.8% 증가하여 최댓값을 보였다. 그러나 Ni를 0.3, 1.0 wt%를 첨가하였을 시, Ni를 0.1 wt%를 첨가한 경우보다 퍼진 면적이 감소하는 경향을 보였다. 그러나, Ni를 0.1 wt%보다 많이 넣을 수록 퍼진 면적은 Ni 0.1 wt%를 첨가한 경우보다 감소하는 경향을 보였다. 그 이유는 활성화되지 못하고 남은 Ni 나노 입자는 서로 뭉치는 성질을 가진다. 이렇게 뭉쳐진 Ni 입자는 Ni 나노 입자보다 낮은 표면 흡착력을 가진다. 이 때문에 Ni 입자가 IMC위에 나타나면 용융된 솔더의 움직임을 방해하고 이는 솔더의 젖음성을 저하시키기 때문인 것으로 판단된다.<sup>21)</sup>

### 5. 솔더 및 접합부의 미세 조직

SAC305 솔더의 미세 조직은 β-Sn 초정상과(β-Sn + Ag<sub>3</sub>Sn) 공정상으로 이루어져 있다. 이러한 미세조직은 나노 물질 첨가에 따라 크기가 미세화되는 것으로 알려져 있다. A. Sharma 등<sup>22)</sup>은 SAC305 솔더의 결정립 크기는 29.5 μm 이고, 1%의 나노 판형 그래핀을 첨가했을 때 19.8 μm로 그 크기가 감소하는 것으로 보고하였다.

SAC305 솔더부 및 Cu 기판과의 접합부의 신뢰성을 영향을 미치는 IMC는 Cu-Sn계, Ag-Sn계로 2종류가 있다. 아래의 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, Cu<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>의 Cu-Sn계 IMC는 주로 솔더가 구리와 같은 금속 전극에 적용될 때, 구리와 솔더 간 농도차에 따른 상호 확산에 의해 형

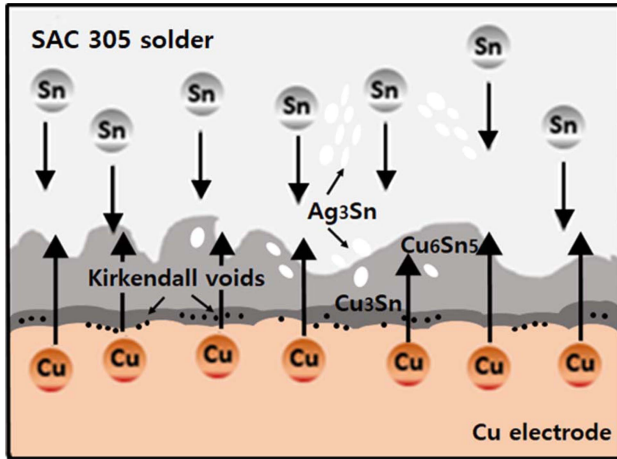


Fig. 4. IMCs formation at the solder/Cu interface.

성된다. 두 IMC 중  $Cu_6Sn_5$ 는 솔더 쪽에서 생성되고, Cu 전극쪽에는  $Cu_3Sn$ 가 생성된다. SAC 솔더 내에서는 Ag와 Sn간의 상호 반응에 의해  $Ag_3Sn$ 상이 형성된다.

IMC들 중 솔더/Cu 계면에서 생성되는  $Cu_3Sn$ 과  $Cu_6Sn_5$ 는 두겹게 형성될 경우 접합부의 강도를 감소시킨다. Fallahi 등<sup>17)</sup>은 SAC 솔더에 대하여 Ni-P 기판과 솔더 계면의 IMC 두께 및 전단강도에 대하여 보고하였다. Sn-3.6Ag-0.9Cu, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.2 Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.3Ce-1.73In, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.6 Fe 솔더에 있어서, IMC 두께는 각각 1.25, 1.16, 0.91, 0.45  $\mu m$  이고, 이때의 전단강도는 각각 27.8, 27.4, 41, 49.6 MPa의 값을 보였다. 합금원소의 영향도 일부 있겠지만 IMC 두께 감소에 따라 접합부의 전단강도가 증가함을 알 수 있다. 또한, 상기 SAC 솔더 순서대로 파괴변형율(fracture strain)은 각각 2, 13, 17, 15%를 보였는데, 대체로 IMC가 두꺼운 쪽이 파괴변형율이 적음, 즉 연성이 적음을 알 수 있다. 이는 취성을 가진 IMC가 두꺼울수록 솔더의 취성파괴에 더 많은 영향을 미친 때문이라고 Fallahi 등<sup>17)</sup>은 보고하였다.

솔더내 및 계면에 존재하는 IMC들은 경도가 높고 취약하기에 과도하게 성장하는 것은 억제하여야 한다. Lotfian 등<sup>23)</sup>에 의하면 Sn-3.9Ag-0.7Cu 솔더에 대해 실온에서 Cu, Sn-rich 상, 공정 상,  $Cu_6Sn_5$ ,  $Cu_3Sn$ 의 나노인덴테이션에 의한 경도는 각각 1.8, 0.31, 0.58, 6.7, 6.7로서,  $Cu_6Sn_5$ ,  $Cu_3Sn$  IMC는 Sn-rich상에 비해 경도가 약 22배 높고, Cu에 비해서는 약 3.7배 높다고 보고하였다. 또한, IMC 층은 용접이 높고 솔더의 젖음성을 떨어뜨리는 단점도 가지고 있다.

이러한 IMC를 솔더내에서 미세화 하거나, 기판과의 계면에서 성장을 억제하기 위해 나노 입자를 첨가하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. Fouzder 등<sup>24)</sup>은  $SrTiO_3$  나노 입자를 SAC305 솔더에 0.5 wt% 첨가 시 IMC 두께가 감소함을 보고하였다. SAC305 IMC 두께 2.1  $\mu m$ 일 때,  $SrTiO_3$  0.5 wt% 첨가함에 따라 IMC는 1.7  $\mu m$ 로 감소하였다. Srivalli 등<sup>10)</sup>은 NiO 나노 입자를 첨가한 경우, NiO

를 0부터 2.5 wt%까지 증가시킴에 따라, IMC 두께가 크게 감소함을 보였다. 즉, NiO 나노 입자를 0.5, 1.5, 2.5 wt%를 첨가하였을 때 IMC 두께가 각각 36%, 58.6%, 60% 감소함을 보였다. Wang 등<sup>19)</sup>의 연구에 따르면 SAC305의 IMC 두께는 2.5  $\mu m$ 인데, 0.05 wt%  $SiO_2$ 를 첨가한 경우는 1.5  $\mu m$ 로 가장 많이 감소했음을 보고하였다. Qu 등<sup>20)</sup>의 연구에 의하면, ZnO를 0부터 1.5 wt% 첨가 시 IMC의 두께가 감소했지만 1.5 wt% 이상에서는 두께가 1.5 wt% 첨가 경우의 두께보다 오히려 증가하였다. Qu 등<sup>20)</sup>은 ZnO 나노 입자를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 wt%를 첨가했을 때의 확산 계수를 계산하여, IMC 두께가 확산 계수와 선형적인 관계가 있음을 보였다. 즉, IMC 두께가 확산 식(eq. (1))에 의해 지배됨을 보인 것이다. eq. (1)에서  $d$ 는 IMC의 두께,  $d_0$ 는 리플로우 후 초기 IMC의 두께,  $D$ 는 확산계수, 그리고  $t$ 는 유지 시간을 의미한다.

$$d - d_0 = \sqrt{Dt} \quad (1)$$

Qu 등<sup>20)</sup>에 의하면 나노 ZnO의 높은 표면 에너지에 의해 솔더/Cu 계면에 나노 ZnO 분말이 묻혀지기 쉬워서 기판으로부터 Cu 원자의 확산을 막는다. 이로 인해 IMC가 생성되기 위한 반응인  $Cu + Sn \rightarrow Cu_6Sn_5$ 가 억제되어 IMC 성장을 억제할 수 있다고 설명하였다.<sup>20)</sup>

## 6. 인장강도 특성

Table 4에 SAC305 벌크 솔더 및 이들의 냉각 속도에 따른 최대인장강도(UTS), 항복강도 및 연신율을 나타내었다. Cheng 등<sup>25)</sup>에 의하면 SAC305는 40 MPa의 인장강도와 58%의 연신율을 가지고 있다. Chen 등<sup>26)</sup>은 3.0/s, 0.1/s, 0.03/s의 다른 냉각속도에 따른 SAC305의 기계적 성질의 변화에 대해 보고하였다. 인장강도는 각각 47.86 MPa, 38.10 MPa, 25.94 MPa를 보였고, 항복강도는 각각 29.48 MPa, 18.12 MPa, 16.9 MPa를 보였다. 그리고 연신율은 각각 57%, 35%, 15%를 보였다.

또한, Fallahi 등<sup>17)</sup>은 Cu 기판의 중첩 접합부(overlap joint)에 대하여, Sn-3.6Ag-0.9Cu, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.3Ce-1.73In, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.6 Fe, Sn-3.6Ag-0.9Cu-0.2 Fe 솔더의 전단강도는 각각 31.32, 43, 43.7, 48.65 MPa의 값을 보고하였다. 즉 0.2wt%의 적정량의 Fe 첨가로 가장 높은 접합부 전단강도를 얻었다. 이때의 파괴연신율은 각각 13.6, 37, 16, 19.5%로서, 0.3Ce-1.73In를 첨가한 경우 가장 우

Table 4. Mechanical Properties of SAC305 solder

Composition	UTS (MPa)	YS (MPa)	Elongation (%)	Reference
Sn-3.0Ag-0.5Cu	40	N/A	58	25
Sn-3.0Ag-0.5Cu (3.0/s)	47.86	29.48	57	26
Sn-3.0Ag-0.5Cu (0.1/s)	38.10	18.12	35	26
Sn-3.0Ag-0.5Cu (0.03/s)	25.94	16.9	15	26



수한 연신율을 보였다.

Jung 등<sup>27)</sup>은 AlN나노 입자를 SAC305에 0.03, 0.12, 0.21, 0.6 wt%를 첨가하였다. 그 결과 인장강도는 0.21 wt% AlN을 첨가하였을 때 최대의 인장강도인 69.14 MPa를 얻었고, 이때의 연신율은 13.8%를 보였다. 또, 0.12 wt% AlN일 때 연신율의 최대값인 14.08%이 얻어졌다. 또, Rui 등<sup>28)</sup>은 TiO<sub>2</sub> 나노 입자를 0.5, 1, 1.5, 2 wt%를 첨가하였을 때, SAC305의 전단강도는 29.9 MPa에서 증가하여 각각 31.2, 31.8, 34.6, 36.7 MPa 값을 가진다고 보고하였다. El-Daly 등<sup>29)</sup>은 SAC305의 인장강도와 항복강도가 각각 40.6 MPa, 38.6 MPa 일때, SiC 나노 입자를 SAC305에 0.7 wt% 첨가하였을 때 인장강도는 4 MPa 증가하여 44.6 MPa, 항복강도는 5.2 MPa가 증가하여 43.8 MPa를 보였다. A. Sharma 등<sup>22)</sup>은 Graphene 나노 입자를 0.01, 0.03, 0.05, 0.1 wt%를 SAC305에 첨가하였다. 그 결과, 0.1 wt%의 Graphene 나노 입자를 첨가했을 때 인장강도가 58.2에서 74.5 MPa로 28%정도 크게 증가하였다. 연신율은 0.05 wt% Graphene 첨가 시 최대의 값인 13.9%를 보였다. 결국, 나노 입자 첨가로 SAC 솔더의 강도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

## 7. 결 론

본 고에서는 대표적인 무연 솔더인 SAC305 및 세라믹 나노 입자를 첨가한 SAC305와 관련하여, 그 특성과 최근의 연구 동향에 대하여 보고하였으며, SAC305 솔더의 용점, 젖음성, 미세 조직, 기계적 특성에 대해 정리하였다. SAC305는 솔더 중에 포함된 Ag<sub>3</sub>Sn의 석출강화를 통해 비교적 우수한 강도와, 연성이 있는 Sn기반 기지에 의해 양호한 연신율 등의 연성을 가진다. 그러나, 전자기기 사용 중 솔더 벌크내 β-Sn 결정립과 Ag<sub>3</sub>Sn의 입도 성장, 접합 계면의 취성 있는 금속간 화합물인 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn 등의 과도한 성장 문제는 솔더부의 특성을 저하시킬 우려가 있어, 연구 및 산업계에서 관심의 대상이 되고 있다. 이러한 문제점을 개선하는 방법 중 하나로, SAC305에 합금원소의 첨가, 나노 물질의 첨가 방법에 대해 본 고에서 술하였다. 나노 물질의 첨가는 솔더의 젖음성, 결정립 미세화, 강도, 연신율 등을 상당부분 개선하여 SAC305 솔더의 특성을 향상시킨다. 다만, 첨가하는 나노분말의 양이 많지 않은 원인도 있어서, 솔더 용점 측면에서는 SAC305와 거의 유사한 수준이며, 용점 저하는 거의 일어나지 않는 것으로 보고되고 있다. 금후에도, 전자산업에서 접합부가 더욱 미세화 되고 가혹한 환경에서 사용되는 경향이 증가되고 있기 때문에, SAC305를 포함한 솔더의 특성을 개선하는데 많은 관심과 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가

관리원(KEIT)의 소재부품기술개발사업 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다(과제번호 및 과제명; ‘20010580’, 미니-LED 미세전극 접합을 위한 도전성 나노소재 기술 개발).

## References

1. M. Abtew, G. Selvaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics", *Material Science and Engineering: R: Reports*, 27(5), 95-141 (2000).
2. T. J. Swanson, "Properties of Mixing SAC Solder Alloys with Bismuth-containing Solder Pastes for a Low Reflow Temperature Process", *Master Thesis*, pp.22-25, Rochester Institute of Technology, New York, US (2018).
3. H. Nishikawa, N. Iwata, "Improvement of Joint Reliability of Sn-Ag-Cu Solder Bumps on Cu by a Laser Process", *Mater. Trans.*, 56, 1025-1029 (2015).
4. L. A. Wentlent, M. Genanu and T. Alghoul, "Effects of Laser Selective Reflow on Solder Joint Microstructure and Reliability," 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, USA, 425-433 (2018). doi: 10.1109/ECTC.2018.00070.
5. H. Nishikawa, N. Iwata, "Formation and growth of intermetallic compound layers at the interface during laser soldering using Sn-Ag Cu solder on a Cu Pad", *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 6-11 (2015).
6. H. Nishikawa, N. Iwata, H. Kubota, "Microstructure of lead-free solder bumps using laser reflow soldering", *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 61, 012038 (2014). doi: 10.1088/1757-899X/61/1/012038.
7. J. O. Kim, J. P. Jung, J. H. Lee, J. Suh and H. S. Kang, "Effects of Laser Parameters on the Characteristics of a Sn-3.5 wt.%Ag Solder Joint", *Met. Mater. Int.*, 15(1), 119-123 (2009).
8. A. K. Gain, Y. C. Chan, W. K. C. Yung, "Effect of additions of ZrO<sub>2</sub> nano-particles on the microstructure and shear strength of Sn-Ag-Cu solder on Au/Ni metallized Cu pads", *Microelectronics Reliability*, 51, 2306-2313 (2011).
9. Y. Tang, C. Pan, and G. Li., "Influence of TiO<sub>2</sub> Nanoparticles on Thermal Property, Wettability and Interfacial Reaction in Sn-3.0Ag-0.5Cu-xTiO<sub>2</sub> Composite Solder", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 24(5), 1587-1597 (2016).
10. C. Srivalli and M. Z. Abdullah., "Microstructure and Mechanical Properties of Pb-free Sn-3.0Ag-0.5Cu Solder Pastes Added with NiO Nanoparticles after Reflow Soldering Process", *Materials & Design*, 90, 499-507 (2016).
11. Y. Shen, S. Zhou, J. Li, C. Yang, S. Huang, S. Lin, H. Nishikawa, "Sn-3.0Ag-0.5Cu/Sn-58Bi composite solder joint assembled using a low-temperature reflow process for PoP technology", *Materials and Design*, 183(108144), 1-9 (2019).
12. J. Chen, S. Lo, S. Hsu and C. Hsu, "Fabrication and Characteristics of SnAgCu Alloy Nanowires for Electrical Connection Application", *Micromachines*, 9(664), 1-8 (2018).
13. D. H. Jung, D. U. Lim, B. G. Baek, S. H. Yim, J. H. Yonn, J. P. Jung, "Wettability Analysis of Solders using Wetting Balance Test (in Kor.)", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 24(2), 1-9 (2017). <https://doi.org/10.6117/kmepps.2017.24.2.001>
14. J. W. Kang, J. P. Jung, "Low Temperature Solder of Sn-Bi

- Series and Its Properties (in Kor.)”, *Electronics Packaging and Surface Mount Technology*, 16, 41-50 (2020).
15. W. S. Jeon, S. H. Rajendran and J. P. Jung, “Wettability Evaluation by Wetting Balance Test and Wetting Characteristics of Solders (in Kor.)”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26(3), 1-6 (2019)
  16. J. H. Lee, Y. M. Kim, J. H. Hwang, Y. H. Kim, “Wetting characteristics of Cu-xZn layers for Sn-3.0Ag-0.5Cu solders”, *Journal of Alloys and Compounds*, 547, 10-13 (2013).
  17. H. Fallahi, M. S. Nurulakmal, A. Fallahi, J. Abdullah, “Modifying the mechanical properties of lead-free solder by adding iron and indium and using a lap joint test”, *J Mater Sci: Mater Electron.*, 23, 1739-1749 (2012).
  18. Y. Li, X. Zhao, Y. Liu, Y. Wang and Y. Wang, “Effect of TiO<sub>2</sub> Addition Concentration on the Wettability and Intermetallic Compounds Growth of Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu-xTiO<sub>2</sub> Nano-composite Solders”, *J Mater Sci: Mater in Electron.*, 25(9), 3816-3827 (2014).
  19. Y. Wang, X. Zhao, X. Xie, Y. Gu, and Y. Liu, “Effects of Nano-SiO<sub>2</sub> Particles Addition on the Microstructure, Wettability, Joint Shear Force and the Interfacial IMC Growth of Sn<sub>3.0</sub>Ag<sub>0.5</sub>Cu Solder”, *J Mater Sci: Mater in Electron.*, 26(12), 9387-9395 (2015).
  20. M. Qu, T. Cao, Y. Cui, F. Liu and Z. Jiao, “Effect of Nano-ZnO Particles on Wettability, Interfacial Morphology and Growth Kinetics of Sn-3.0Ag-0.5Cu-xZnO Composite Solder”, *J Mater Sci: Mater in Electron.*, 30(21), 19214-19226 (2019).
  21. Z. Yin, M. Lin, Q. Li and Z. Wu, “Effect of Doping Ni Nanoparticles on Microstructure Evolution and Shear Behavior of Sn-3.0Ag-0.5Cu(SAC305)/Cu-2.0Be Solder Joints during Reflowing”, *J Mater Sci: Mater in Electron.*, 31(6), 4905-4914 (2020). <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-020-03054-x>.
  22. A. Sharma, H. R. Sohn and J. P. Jung, “Effect of Graphene Nanoplatelets on Wetting, Microstructure, and Tensile Characteristics of Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC) Alloy”, *Metallurgical and Materials Transactions, A* 47(1), 494-503 (2016).
  23. S. Lotfian, J. M. Molina-Aldareguia, K. E. Yazzie, J. Llorca, N. Chawla, “Mechanical characterization of lead-free Sn-Ag-Cu solder joints by high-temperature nanoindentation”, *Journal of Electronic Materials*, 42, 1085-1091 (2013).
  24. T. Fouzder, I. Shafiq, Y. C. Chan, A. Sharif and W. K. C. Yung, “Influence of SrTiO<sub>3</sub> Nano-particles on the Microstructure and Shear Strength of Sn-Ag-Cu Solder on Au/Ni Metallized Cu Pads”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509(5), 1885-1892 (2011).
  25. F. Cheng, H. Nichikawa, T. Takemoto, “Microstructural and mechanical properties of Sn-Ag-Cu lead-free solders with minor addition of Ni and/or Co”, *Journal of Material Science*, 23, 3643-3648 (2008).
  26. G. Chen, X. H. Wang, J. Yang, W. L. Xu, Q. Lin, “Effect of micromorphology on corrosion and mechanical properties of SAC305 lead-free solders”, *Microelectronics Reliability*, 108, 113634 (2020).
  27. D. H. Jung, A. Sharma, D. U. Lim, J. H. Yun and J. P. Jung, “Effects of AlN Nanoparticles on the Microstructure, Solderability, and Mechanical Properties of Sn-Ag-Cu Solder”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 48(9), 4372-4384 (2017).
  28. M. Rui, X. Lu, S. Chen, L. Ye, J. Liu, “TiO<sub>2</sub> Nanoparticles Functionalized Sn/3.0Ag/0.5Cu Lead-free Solder”, *IEEE International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, Guilin, China, 203-207 (2012).
  29. A. A. El-Daly, W. M. Desoky, T. A. Elmosalami, M. G. El-Shaarawy, A. M. Abdraboh, “Microstructural modifications and properties of SiC nanoparticles reinforced Sn-3.0Ag-0.5Cu solder alloy”, *Materials & Design*, 65, 1196-1204 (2015).
- 
- 
  - 김장백
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 반도체패키징, 접합
  - email: jangbaek21@naver.com
- 
- 
  - 서성민
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 반도체패키징, 접합
  - email: smseo@uos.ac.kr
- 
- 
  - 강혜준
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 마이크로반도체패키징, 접합
  - email: uoslab609@naver.com
- 
- 
  - 조도훈
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 마이크로전자패키징, 접합
  - email: ecurit96@uos.ac.kr
- 
- 
  - Sri Harini Rajendran
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 마이크로반도체패키징, 접합
  - email: harini.phys@gmail.com
- 
- 
  - 정재필
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 마이크로반도체패키징, 접합
  - email: jppjung@uos.ac.kr
-