

특집 : 나노복합SAC솔더페이스트 특성

나노 첨가제에 따른 Sn-Ag-Cu계 솔더페이스트의 젖음성 및 금속간화합물

서성민 · 스리 하리니 라젠드란 · 정재필[†]

서울시립대학교 신소재공학과

Wettability and Intermetallic Compounds of Sn-Ag-Cu-based Solder Pastes with Addition of Nano-additives

Seong Min Seo, Sri Harini Rajendran, and Jae Pil Jung[†]

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

(Received March 11, 2022: Corrected March 23, 2022: Accepted March 25, 2022)

초 록: 5G 시대를 맞아, 인공지능, 클라우드 컴퓨팅, 자율주행 차량, 스마트 제조 등의 기술 수요가 증가하고 있다. 전자기기의 고효율을 위해 고집적회로 및 패키징 연구는 중요하다. 전해도금된 솔더는 범프 조성의 균일성에 한계가 있다. 작은 크기의 솔더 파우더로 구성된 솔더 페이스트는 고집적 패키징에 일반적으로 사용되는 솔더 중 하나이다. 솔더 페이스트에 나노 입자를 첨가하거나 기판 표면 마감 처리를 하여 젖음성을 향상시키고, 금속 패드 계면에서 금속간화합물의 성장을 억제하는 연구가 진행 중이다. 본 논문은 나노 입자 첨가를 통한 솔더 페이스트의 젖음성 향상과 계면 금속간화합물의 성장을 억제하는 원리에 대하여 설명한다.

Abstract: In the era of Fifth-Generation (5G), technology requirements such as Artificial Intelligence (AI), Cloud computing, automatic vehicles, and smart manufacturing are increasing. For high efficiency of electronic devices, research on high-intensity circuits and packaging for miniaturized electronic components is important. A solder paste which consists of small solder powders is one of common solder for high density packaging, whereas an electroplated solder has limitation of uniformity of bump composition. Researches are underway to improve wettability through the addition of nanoparticles into a solder paste or the surface finish of a substrate, and to suppress the formation of IMC growth at the metal pad interface. This paper describes the principles of improving the wettability of solder paste and suppressing interfacial IMC growth by addition of nanoparticles.

Keywords: Sn-Ag-Cu solder paste, nano-composite solder, wettability, IMC growth

1. 서 론

5G의 시대로 오면서 인공지능, 클라우드 컴퓨팅과 자율주행차 같은 기술 수요가 증가하고 있다.¹⁾ 에너지 절약 및 고효율을 위해 전자부품은 소형화되고 이를 위한 고집적회로 및 패키징 연구가 중요시되고 있다. 솔더는 핵심 접합 소재로, 접합의 특성 및 신뢰성을 결정한다. 솔더 페이스트는 IPC에 따르면 솔더 파우더의 크기를 기준으로 type 1~8로 분류되고 주로 type 4(20-38 μm), type 5(15-25 μm), type 6(5-15 μm), type 7(2-11 μm)가 사용된다.^{2,3)} IPC의 스텐실 설계 지침표준에서 “5-ball” 규칙을 따르는 경우, 최대 크기의 솔더볼 5개가 가장 작은 스텐실 구멍의 너비에 맞을 수 있어야 하므로 솔더 파우더의

입자 크기가 작을수록 작은 스텐실을 이용할 수 있다.²⁾ 미세 범프 형성을 위해 주로 이용되는 전해도금은 범프 조성의 균일함, 범프 높이 및 2성 조성의 한계를 가지고 있지만 type 6나 type 7의 솔더 페이스트를 사용하는 것으로 해결이 가능하다.⁴⁾ European Union(EU)의 Restriction of Certain Hazardous Substances(RoHS)에 의해 유연 솔더의 사용 제한 이후, Sn-Pb계 유연 솔더의 대체재로 Sn-Ag-Cu계 무연 솔더가 주로 사용되고 있다.⁵⁾ Fig. 1과 같이 Sn-Ag-Cu계 솔더 페이스트는 전자산업에서 일반적으로 사용되는 대표적인 솔더이며, 이외에도 최근 관심이 높은 고성능의 LED 접합이나, 웨어러블 기기를 위한 Flexible PCB(FPCB)의 접합, smartphone을 활용한 structural health monitoring(SHM)를 위한 wafer level 범프

[†]Corresponding author
E-mail: jjung@uos.ac.kr

© 2022, 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.

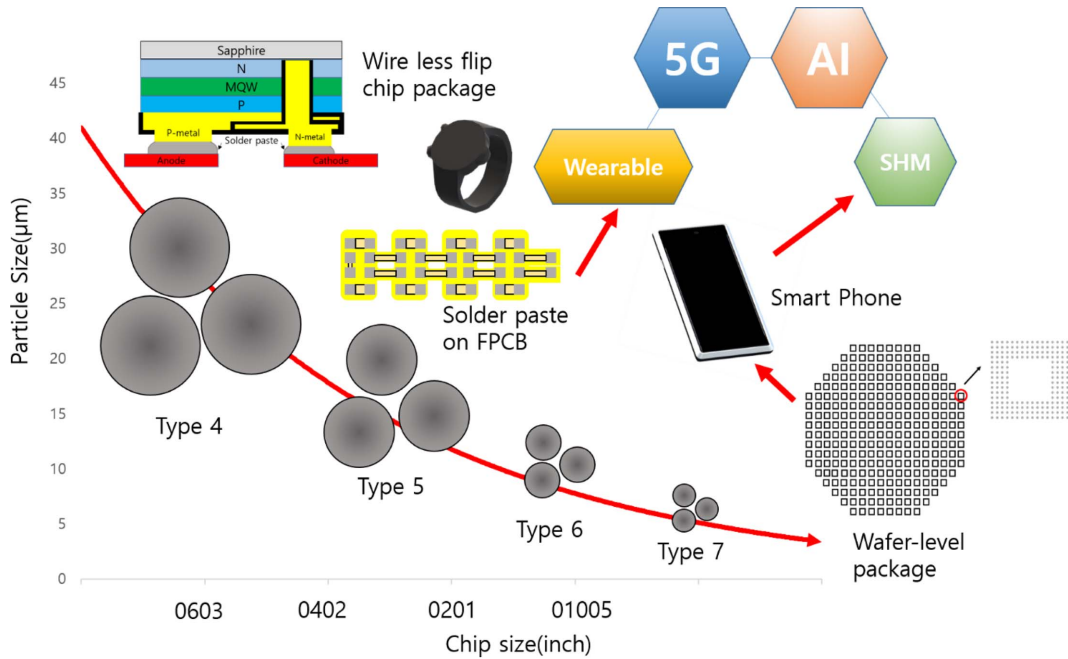


Fig. 1. Type of solder paste and its application.

형성 등 다양한 분야에서 이용된다.⁶⁻⁸⁾ 전자산업이 발전할수록 고성능, 고효율을 위한 고집적회로의 수요는 계속 증가하고 발열량 및 사용되는 전류밀도가 증가되므로 접합부의 신뢰성 향상 연구는 필수이다.⁹⁾ 솔더 접합부의 신뢰성에 영향을 미치는 요소로 기관과의 젖음성, 접합부 내 금속간화합물(intermetallic compound, IMC) 등이 있다. 많은 연구자들이 솔더와 반응하지 않는 금속 나노 입자, 세라믹 나노 입자, carbon nanotubes (CNT) 등을 솔더에 첨가하거나 organic solderability preservative(OSP), electroless nickel immersion gold(ENIG) 등의 표면마감처리를 통하여 젖음성을 향상시키고 IMC 성장을 억제하기 위한 연구를 진행 중이다.¹⁰⁾ 본 논문에서는 솔더 페이스트 내 나노 입자 첨가 효과 및 표면마감처리를 통한 젖음성 및 IMC 연구의 동향을 살펴보고자 한다.

2. 젖음성

젖음성은 용융된 솔더가 모재 금속, 기관에 퍼져나가는 현상으로, 솔더링 과정에서, 솔더 접합부의 작업성과 신뢰성에 많은 영향을 미치는 중요한 요소이다.¹¹⁾ 젖음성 측정은 주로 Wetting-balance 시험과 Spreading 시험으로 시행된다.¹²⁾ Wetting-balance 시험은 시간에 따른 젖음력을 측정하여 표면장력 및 솔더와 기관 사이의 접촉각 계산을 통해 젖음성을 평가하는 시험이다. 접촉각과 표면장력의 관계를 나타내는 식인 Young's Modulus 관계식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{LV}}{\gamma_{LV}} \tag{1}$$

여기서 θ 는 접촉각, γ_{SV} 는 고체와 기체 사이의 표면 장력,

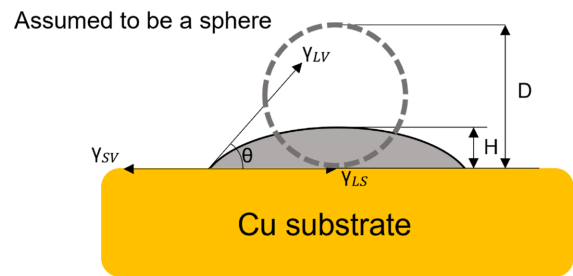


Fig. 2. Surface tensions in wetting state and spreadability parameters of molten solder.

γ_{LS} 는 액체와 고체 사이의 표면장력, γ_{LV} 는 액체와 기체 사이의 표면장력이다.

접촉각이 $0 < \theta < 30^\circ$ 일 때 젖음성이 우수하다고 평가된다.¹³⁾ Spreading 시험은 기관 위에서 솔더가 용융되며 퍼짐 면적, 퍼짐율, 접촉각을 통해 젖음성을 평가하는 방법이다. 퍼짐율은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$S = \frac{(D-H)}{D} \times 100\% \tag{2}$$

단, S 는 퍼짐율, D 는 구로 가정했을 때 솔더의 직경, H 는 퍼진 솔더의 높이이다.¹³⁾

젖음성을 평가하기 위한 요소는 Fig. 2에 정리하였다.

2.1 솔더 젖음성에 미치는 나노 첨가제의 영향

솔더 내에 나노 입자 첨가 시, 나노 입자는 높은 표면 에너지로 인하여 결정의 표면에 흡착되어 γ_{LV} 를 감소시킨다.¹¹⁾ 용융된 솔더와 Cu 기관이 접촉하게 되면, 기관 쪽 용융 솔더 표면의 나노 입자는 γ_{LV} 를 감소시키고, Cu 기관에 흡착되려는 경향이 있어 젖음성을 향상시킨다.

Table 1. Effect of nano additives on contact angle and wettability of Sn-Ag-Cu solder pastes

Solder composition (wt%)	Nanoparticle additives	Contact angle	Spreading area	Content of nano additives (wt%)	Ref
Sn-3.0Ag-0.5Cu	TiO ₂	decreased	-	0.05, 0.1, 0.5, 1.0	14
	Al ₂ O ₃	-	Increased	0.05, 0.1, 0.3, 0.5	15
Sn-3.0Ag-0.7Cu	Al ₂ O ₃	-	Increased	0.015, 0.03, 0.06, 0.12, 0.25, 0.5	11
	ZnO	decreased	-	0.25, 0.5, 0.75, 1.0	16

삼중점 위치의 나노 입자는 γ_{LV} 를 감소시켜, 식 (1)에 의해 접촉각이 감소하여 넓은 퍼짐 면적을 얻을 수 있게 한다. Sn-Ag-Cu 계 솔더 페이스트에 나노 입자를 첨가하여 젖음성을 향상시키려는 연구는 Table 1과 같은 사례가 보고되었다.^{11,14-16)}

Sukpimai 등¹⁴⁾은 나노-TiO₂를 0.05, 0.10, 0.50, 1.00 wt% 첨가한 SAC305에 피크(peak) 온도 260°C로 리플로우하여 접촉각을 비교하였다. 접촉각은 0.5 wt% TiO₂ 첨가 시 9.27°로가 가장 작은 값이었고 1.0 wt% TiO₂ 첨가 시 약 12°로 증가하였다.¹⁴⁾ Tikale 등¹⁵⁾은 평균 입자 크기 20-30 nm의 나노-Al₂O₃ 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 wt% 첨가한 SAC305를 peak 온도 250°C로 리플로우하여 퍼짐 면적을 비교하였다. SAC305의 퍼짐 면적은 28 mm²에서 Al₂O₃ 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 wt% 첨가 시 약 각각 30, 34, 39, 40 mm²로 증가하였다.¹⁵⁾ Wu 등¹¹⁾은 평균 입자 크기 50 nm의 Al₂O₃ 나노 입자를 0.015, 0.03, 0.06, 0.12, 0.25, 0.5 wt% 첨가한 SAC0307를 peak 온도 250°C에서 리플로우하여 퍼짐 면적을 비교하였다. SAC0307의 퍼짐 면적은 37 mm²에서 Al₂O₃ 입자를 0.015, 0.03, 0.06, 0.12, 0.25, 0.5 wt% 첨가 시 각각 약 48, 62, 68, 79, 49, 41 mm²로 증가하다가 감소하였다.¹¹⁾ 0.25wt% 이상의 Al₂O₃ 첨가 시 퍼짐 면적 증가량이 감소함을 확인하였다.

한편, 솔더와 Cu 기판 사이의 접촉각 관련하여, Kanlayasiri 등¹⁶⁾은 평균 입자 크기 20-40 nm의 나노-ZnO 입자를 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 wt% 첨가한 SAC0307를 peak 온도 267°C로 리플로우하여 접촉각을 비교하였다. SAC0307의 접촉각은 22.24°에서 0.25 wt% ZnO 첨가 시 약 9.5°로 감소하였고 0.5, 0.75, 1.0 wt% ZnO 첨가 시 0.25 wt% ZnO 첨가 시 보다 증가하였다.¹⁶⁾ 0.25 wt%보다 초과하여 ZnO를 첨가한 경우 γ_{LV} 는 감소하지 않지만 SAC0307의 밀도인 4.15 g/cm³ 보다 ZnO의 밀도가 5.61 g/cm³로 크기 때문에 용융 솔더의 비중을 증가시켜 접촉각을 감소시킨 것을 확인하였다.¹⁶⁾ 솔더 페이스트에 나노 입자 마다 특정 함량(wt%)을 초과하여 첨가할 경우 접촉각은 증가하고, 퍼짐 면적은 감소하는데 이는 흡착될 수 있는 나노 입자의 양이 정해져 있기 때문이다. 흡착되지 못한 나노 입자가 표면 자유 에너지를 감소시키기 위해 크기를 키워 응집하려는 경향을 띄어 용융된 솔더의 젖음성을 저하시키는 것으로 보고되고 있다. 나노 입자의 젖음성 향상(Fig. 3(a, b))과 과량의 나노 입자 첨가 시 발생하는 젖음성 저하(Fig. 3(c))에 대하여 Fig. 3

에 도시하였다.

2.2 기판의 레이저처리가 젖음성에 미치는 영향

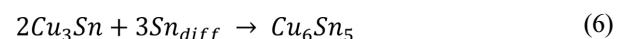
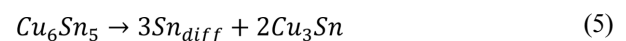
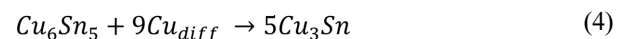
기판 표면의 산화물은 젖음성을 저하시키는 요인 중 하나이다. 레이저를 이용하여 기판 표면의 산화물을 제거하려는 연구가 진행되고 있다. Hlinka 등^{17,18)}은 파장이 1064 nm인 Nd:YAG 레이저를 100~2500 W의 다른 출력 세기로 Cu 표면을 처리하여 SAC305의 접촉각을 비교하였다. 레이저로 표면처리를 하지 않은 경우 SAC305의 접촉각은 26.2°를 보였다. 그러나 레이저로 기판 표면을 스캐닝 처리한 경우, 레이저 출력 세기가 600, 700, 800, 1000, 1200, 1500, 1750, 2500 W의 레이저 출력으로 Cu 표면 처리 시 접촉각은 각각 24.9°, 24.1°, 23.7°, 22.9°, 22.1°, 21.4°, 21.1°, 19.2°로 감소하였다. 다만, 100, 200, 300, 400 W에서는 SAC305의 접촉각이 각각 26.5°, 27.5°, 29.1°, 29.2°로 증가하였다.¹⁷⁾

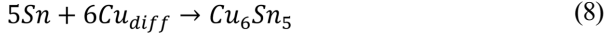
레이저 출력 세기를 100~400 W로 표면 처리 시 Cu 표면이 용융되지 않고, 열로 인한 결정립 성장만 발생하여 젖음성을 저하시킨 것으로 판단된다. 600 W 이상의 레이저 출력 세기로 표면 처리 시 Cu 표면이 용융되고 오염물 증발로 인해 젖음성이 향상되었고, 레이저 출력 세기가 더욱 증가될수록 용융된 Cu 양이 더 증가하고 더 많은 오염물이 증발되어 젖음성이 향상되었음을 확인하였다.¹⁸⁾

3. 금속간화합물

3.1 솔더/Cu 계면에서의 Cu-Sn IMC 형성

Sn 기반의 솔더 페이스트는 Cu 기판 위에서 리플로우 시 Cu 계면에서 Sn과 Cu의 확산으로 인해 Cu₃Sn과 Cu₆Sn₅ 등의 IMC 층을 형성한다.¹⁹⁾ 전자부품이 소형화되면서 이에 사용되는 솔더 접합부의 부피가 감소하여 접합부내 IMC 비율이 증가하여 기계적 특성 및 신뢰성 저하에 더 많은 문제를 유발할 수 있다. Cu₃Sn와 Cu₆Sn₅ IMC 층은 각각 아래의 반응식 (3)-(5) 및 (6)-(8)에 의해 형성된다.²⁰⁾





계면 IMC 성장은 원자의 확산으로 진행되어 아래의 식 (eq 9, 10)으로 표현될 수 있다.²¹⁾ X는 Cu-Sn IMC의 두께 (m), D는 성장도를 정하는 확산 원자의 확산 계수(m²/s), t는 aging 시간(s)이다.²²⁾

$$X = \sqrt{Dt} \quad (9)$$

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (10)$$

여기서, Q는 활성화 에너지(J/mol), D₀는 상호확산상수 (m²/s), R는 기체상수(8.314 J/mol), T는 절대온도(K)이다.²³⁾

활성화에너지 Q는 ln(D)와 1/T 식에서의 기울기로 아래의 식 (11)으로 표현된다.

$$\ln(D) = \ln(D_0) + \left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

식 (9)-(11)을 이용한 계산을 통해 확산 계수와 활성화 에너지를 얻어 계면에서의 IMC 성장을 방해하는 합금이나 입자의 효과를 분석할 수 있다. Gain 등²⁴⁾은 활성화에너지가 56.45 kJ/mol인 Sn-58Bi 솔더 페이스트에 Ag 나노 입자를 1 wt% 첨가 시 60.73 kJ/mol로 증가하여 IMC 성장을 억제하였음을 확인하였다. Tang 등²⁵⁾은 Cu₆Sn₅의 활성화에너지가 14.91 kJ/mol, Cu₃Sn의 활성화에너지가 85.51 kJ/mol인 SAC305 솔더 페이스트에 TiO₂ 나노 입자 0.1 wt% 첨가한 경우 각각 20.95 kJ/mol, 86.23 kJ/mol로 증가함을 확인하였다.

3.2. 나노 첨가제와 IMC 성장 억제

표면 활성 물질인 나노 입자는 높은 표면 자유 에너지로 인해 Cu₆Sn₅ 결정 표면에 흡착되는 경향이 있다.²⁶⁾ 결정립에 흡착된 나노 입자의 양은 다음과 같은 식 (12)으로 표현된다.¹¹⁾

$$\Gamma^K = -\frac{c}{RT} \frac{d\gamma^K}{dc} \quad (12)$$

단, Γ^K 는 표면 K에 흡착된 나노 입자의 양, c는 나노 입자 농도, T는 절대온도, R은 Planck 상수, γ^K 은 결정 표면 K의 표면장력을 나타낸다.

나노 입자가 표면 K에 흡착되면, 표면장력은 식 (13)과

같이 감소한다.¹¹⁾

$$\gamma_c^K = \gamma_0^K - RT \int_0^c \frac{\Gamma^K}{c} dc \quad (13)$$

여기서, γ_c^K 은 나노 입자 흡착 시 결정 면의 표면장력, γ_0^K 는 나노 입자가 흡착될 결정면의 표면장력이다.

$$\sum_K \gamma_c^K A_K = \sum_K \left(\gamma_0^K - RT \int_0^c \frac{\Gamma^K}{c} dc\right) A_K \quad (14)$$

$$\sum_K A_K \int_0^c \frac{\Gamma^K}{c} dc \quad (15)$$

단, A_K는 결정 면의 면적을 나타낸다.

전체 결정 면의 표면장력은 식 (14), (15)에 의해 나노 입자가 최대치로 흡착될 때 가장 작다. Cu₆Sn₅ 결정립계의 나노 입자 흡착량이 증가하게 되면, 표면장력이 감소하고 이로 인해 IMC 성장이 감소하게 된다.²⁷⁾ Sn-Ag-Cu 계열의 솔더 페이스트에 금속 및 세라믹 나노 입자와 CNT를 첨가하여 IMC 성장 억제 효과 분석을 위한 연구는 Table 2와 같은 사례가 보고되었다.^{11,16,21,23,28-32)}

Yakymovych 등²⁸⁾은 0.5, 1.0, 2.0 wt% 나노-Ni를 첨가한 Sn3.0Ag0.5Cu(SAC305) 솔더 페이스트를 peak 온도 249.85°C의 리플로우 하여 IMC 두께를 비교하였다. SAC305/Cu의 IMC 두께가 약 4.0 μm에서 0.5 wt% Ni 첨가 시 약 2.5 μm로 감소하였음을 확인하였다.²⁸⁾ Chellvarajoo 등²⁹⁾은 평균 입자 크기 35.24 nm의 나노-NiO를 SAC305 솔더 페이스트에 0.5, 1.5, 2.5 wt% 첨가하여 IMC 두께를 비교하였다. 0.5, 1.5 wt% NiO 첨가 시 IMC 두께가 6.213 μm에서 각각 3.970 μm, 2.572 μm로 감소함을 확인하였다.²⁹⁾ 2.5 wt% 첨가 SAC305의 IMC 두께는 1.5 wt% 첨가 SAC305의 IMC 두께와 비슷하였는데 이는 리플로우 과정에서 NiO 입자가 솔더 matrix에 내장 되어있지 않고 배출되었기 때문으로 보고하였다.²⁹⁾

저자 등²¹⁾은 type 4 SAC305 솔더 페이스트에 70-90 nm의 나노-ZrO₂와 5-15 nm의 ZrO₂를 0.2 wt%씩 첨가하여 연구를 진행하였다. 5-15 nm 입자 크기의 ZrO₂와 70-90 nm 입자 크기의 ZrO₂ 첨가 SAC305의 IMC 두께는 각각 2.6, 1.7, 2.1 μm에서 온도 175°C, 256 시간 aging 시 IMC 두께는 각각 16.2, 9.6, 10.2 μm로 증가하였다.²¹⁾ 이를 통해 나노 입자의 크기가 작을수록 IMC 성장 억제 효과가 증가함을 확인하였다.²¹⁾ Ismail 등²⁶⁾은 SAC305 솔더 페이

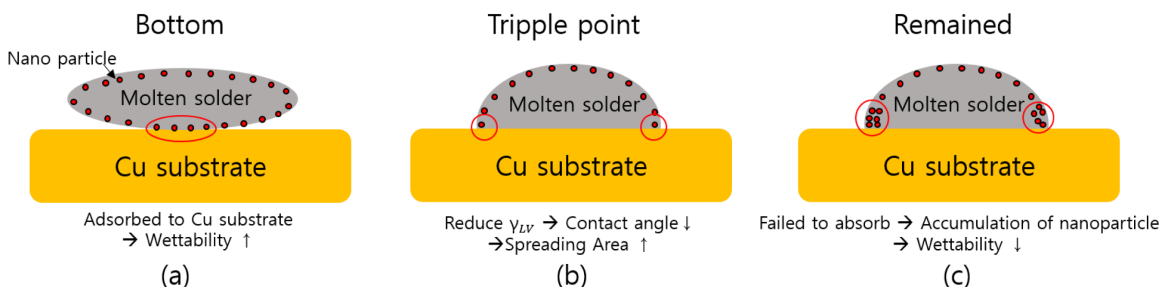


Fig. 3. Effect of nanoparticle on wettability.

Table 2. Effect of nano additives on the Studying IMC growth of Sn-Ag-Cu solder paste.

Solder composition (wt%)	Nano-particle additives	IMC thickness	Content of nano additives (wt%)	Ref
Sn-3.0Ag-0.5Cu	Ni	Decreased	0.5, 1.0, 2.0	28
	NiO	Decreased	5, 1.5, 2.5	29
	ZrO ₂	Decreased	0.2	21
	CNT	Decreased	0.02, 0.04	26
	Au-CNT	Decreased	0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005	30
Sn-0.3Ag-0.7Cu	Al ₂ O ₃	Decreased	0.015, 0.03, 0.06, 0.12, 0.25, 0.5	11
	ZnO	Increased (0.25-0.75) Decreased (1.0)	0.25, 0.5, 0.75, 1.0	16
	MWCNT	Decreased	0.05	31
Sn-1.0Ag-0.5Cu	Al	Decreased	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4	32
		Decreased	0.1	23

스트에 10 nm 직경의 CNT를 0.02, 0.04 wt% 첨가하여 peak 온도 260°C에서 리플로우 후, 500 G, 1000 G의 폭발과 조건에서 IMC 두께를 비교하였다. 500 G의 경우 0.04 wt% CNT를 첨가한 SAC305의 IMC 성장 억제력이 30%로 non-blast 조건과 비슷함을 확인하였다.²⁶⁾ Plevachuk 등³⁰⁾은 SAC305 페이스트에 15-20 nm의 직경을 가진 Au-coated CNT를 0.001, 0.003, 0.005 wt% 첨가하였다. CNT 0.005 wt% 첨가 SAC305의 Cu₆Sn₅ 두께가 6.9 μm였지만, Au-coated CNT 0.005 wt% 첨가 SAC305의 Cu₆Sn₅ 두께는 6.3 μm로 감소하여 Au 원자가 Cu₆Sn₅의 확산을 억제하였음을 확인하였다.³⁰⁾ Wu 등¹¹⁾은 0.015, 0.12, 0.5 wt%의 α-Al₂O₃를 첨가한 Sn-0.3Ag-0.7Cu(SAC0307)를 peak 온도 280°C로 리플로우하여 IMC 두께를 비교하였다. α-Al₂O₃ 0.015 wt% 첨가 SAC0307의 IMC 두께는 4.94 μm에서 α-Al₂O₃ 0.12 wt% 첨가 시 2.87 μm로 감소하였으나, α-Al₂O₃ 0.5 wt% 첨가 시 3.66 μm로 감소하여 IMC 성장 억제 효과가 감소함을 확인하였다.¹¹⁾

또한, Kanlayasiri 등¹⁶⁾은 SAC0307에 나노-ZnO를 0.25, 0.50, 0.75, 1.0 wt% 첨가하여 연구를 진행하였다. SAC 0307의 IMC 두께는 약 3.3 μm에서 0.25, 0.5, 0.75 wt% ZnO 첨가 시 IMC 두께는 약 3.7, 3.6, 3.5 μm로 증가하고 1.0 wt% ZnO 첨가 시 약 3.1 μm로 감소하였다.¹⁶⁾ 이를 통해 나노-ZnO가 IMC 상을 만드는 핵 생성 장소를 억제하여 0.75wt%까지는 Cu₆Sn₅의 두께가 증가하였지만 1.0 wt%에서는 ZnO 나노 입자가 Cu₆Sn₅의 표면 에너지를 감소시켜 성장을 억제하였음을 확인하였다.¹⁶⁾ Tikale 등³¹⁾은 직경이 10-25 nm인 multi-walled carbon nanotubes (MWCNT)를 SAC0307에 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 wt% 첨가하여 peak 온도 약 260°C로 리플로우하여 연구를 진행하였다. SAC0307의 경우 리플로우 한 번 진행시 IMC의 두께가 6 μm에서 리플로우 여섯 번 진행시 11 μm로 증가하였다. MWCNT 0.05 wt% 첨가한 SAC0307의 IMC 두께는 한 번 리플로우시 약 4.2 μm에서 여섯 번 리플로우 진행시 약 7.7 μm로 증가하였다. 이를 통해 MWCNT가 여러 번의 리플로우에도 IMC 성장 억제 효과가 있음을 확

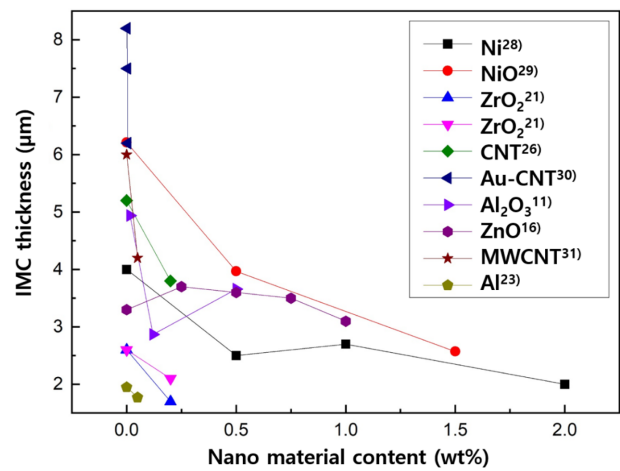


Fig. 4. Effect of various nano-particles on the thickness of IMC.

인하였다.³¹⁾

한편, Sun 등^{23,32)}은 열 충격 시험에 따른 나노 복합 솔더의 IMC를 측정하였다. 즉, 나노-Al 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 wt%를 Sn1.0Ag0.5Cu(SAC105)에 첨가하여 peak 온도 245°C로 Cu 기판상에 리플로우 하였다. SAC105의 IMC 두께는 1.96 μm에서 나노-Al 0.1 wt% 첨가 시 1.68 μm로 감소하였고, 0.1 wt% 보다 많은 Al 첨가 시 IMC 두께 감소량이 감소하였다.³²⁾ 열 충격 시험 관련하여서는, 0.1 wt% Al을 첨가한 SAC105를 peak 온도 255°C로 리플로우하고 -55 ~ 125°C, 유지 시간 15분, 12°C/min 온도 증가감소율로 1500회 열 충격 시험을 진행하였다.²³⁾ SAC105의 IMC 두께는 2.10 μm에서 열 충격 시 6.1 μm로 4 μm 증가하였고, Al 0.1 wt% 첨가한 SAC105의 IMC 두께는 1.84 μm에서 5.56 μm로 3.72 μm 증가하였다. 이를 통해 나노-Al이 열 충격 내성 향상에 효과가 있음을 확인하였다.²³⁾ 첨가된 나노 입자 별 IMC 두께를 Fig. 4와 같이 정리하였다.

4. 결 론

본 논문에서 Sn-Ag-Cu계 솔더 페이스트에 나노입자

첨가 및 Cu 기판의 레이저 처리에 따른 젖음성, 계면에 서의 IMC에 관하여 정리하였다. 나노 입자를 적정량 솔더에 첨가하면 솔더 표면에 흡착되어 젖음성을 향상시킨다. 또한 레이저 표면처리를 통해서도 금속 기판 표면의 불순물을 제거하여 젖음성을 향상시킬 수 있다. 솔더 페이스트에 첨가된 금속, 세라믹, 탄소나노튜브 등의 나노 입자는 Cu_6Sn_5 표면에 흡착되고, 적정량의 나노 입자 첨가는 Cu_6Sn_5 및 Cu_3Sn 의 성장을 억제하며, 이는 솔더링부의 신뢰성 향상에 기여할 수 있다. 금후에도, 전자기기의 고밀도화, 고성능화를 위해 전자부품의 접합부는 더욱 미세화 되는 경향이 진행되는데, 이에 적용되는 솔더 페이스트의 특성 향상을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 소재부품기술개발사업 연구비 지원에 의한 연구 결과입니다(과제번호 및 과제명; '20010580', 미니-LED 미세전극 접합을 위한 도전성 나노소재 기술 개발).

References

1. J. H. Lau, "Recent advances and trends in advanced packaging", *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 12(2), 228-252 (2022)
2. T. Lentz and F. C. T. Assembly, "Size matters: the effects of solder powder size on solder paste performance", *SMT007 Mag.*, 32-55 (2019).
3. M. S. Kim, W. S. Hong and M. Kim, "Flip Chip-Chip Scale Package Bonding Technology with Type 7 Solder Paste Printing", *JWJ*, 39(4), 359-367 (2021).
4. V. B. Sharma, S. Tewari, S. Biswas, B. Lohani, U. D. Dwivedi, D. Dwivedi, A. Sharma and J. P. Jung, "Recent Advancements in AI-Enabled Smart Electronics Packaging for Structural Health Monitoring", *Metals*, 11(10), 1537 (2021).
5. X. Gu, H. Bai, D. Chen, L. Zhao, J. Yi, X. Liu and J. Yan, "The influences of reactive nanoparticles alloying on grain boundary and melting properties about Sn3.0Ag0.5Cu solder". *Intermetallics*, 138, 107346 (2021).
6. M. Schmid, A. Zippelius, A. Hanß, S. Böckhorst and G. Elger, "Investigations on High-Power LEDs and Solder Interconnects in Automotive Application: Part I-Initial Characterization", *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, (2022).
7. Y. Shi, Y. Wang, D. Mei, B. Feng and Z. Chen, "Design and fabrication of wearable thermoelectric generator device for heat harvesting", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 3(1), 373-378 (2017).
8. S. Kumar, S. Mallik, N. Ekere and J. P. Jung, "Stencil printing behavior of lead-free Sn-3Ag-0.5 Cu solder paste for wafer level bumping for sub-100 μm size solder bumps", *Met. Mater. Int.*, 19(5), 1083-1090 (2013).
9. S. Zhang, X. Xu, T. Lin and P. He, "Recent advances in nano-materials for packaging of electronic devices", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 30(15), 13855-13868 (2019).
10. S. Rung and R. Hellmann, "Laser-Induced Period Surface Structures to Improve Solderability of Electrical Solder Pads", *Appl. Sci.*, 12(1), 80 (2022).
11. J. Wu, S. Xue, J. Wang, M. Wu and J. Wang, "Effects of α - Al_2O_3 nanoparticles-doped on microstructure and properties of Sn-0.3Ag-0.7Cu low-Ag solder", *J Mater Sci: Mater Electron* 29, 7372-7387 (2018).
12. E. E. M. Noor, N. F. M. Nasir and S. R. A. Idris, "A review: lead free solder and its wettability properties", *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 28, 125-132 (2016).
13. S. J. Zhong, L. Zhang, M. L. Li, W. M. Long and F. J. Wang, "Development of lead-free interconnection materials in electronic industry during the past decades: structure and properties", *Mater. Des.*, 110439 (2022).
14. K. Sukpimai, W. Suwannakrue and K. Kanlayasiri, "Wettability and printability of SAC305-xTiO₂ Pb-free solder paste on Cu substrate", 10th International Conference on Mechatronics and Manufacturing(ICMM), Bangkok, 635(1), 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.(2019)
15. S. Tikale and K. N. Prabhu, "Effect of Multiple Reflow Cycles and Al_2O_3 Nanoparticles Reinforcement on Performance of SAC305 Lead-Free Solder Alloy", *J. Mater. Eng. Perform.*, 27(6), 3102-3111 (2018).
16. K. Kanlayasiri and N. Meesathien, "Effects of zinc oxide nanoparticles on properties of SAC0307 lead-free solder paste", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2018, 1-10 (2018).
17. J. Hlinka, M. Berczeli, G. Buza and Z. Weltsch, "Wetting properties of Nd: YAG laser treated copper by SAC solders", *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 29(2), 69-74 (2017).
18. J. Hlinka, Z. Fogarassy, Á. Cziráki and Z. Weltsch, "Wetting properties, recrystallization phenomena and interfacial reactions between laser treated Cu substrate and SAC305 solder", *Appl. Surf. Sci.*, 501, 144127 (2020).
19. C. E. Ho, S. P. Yang, P. T. Lee, C. Y. Lee, C. C. Chen and T. T. Kuo, "IMC microstructure modification and mechanical reinforcement of Sn-Ag-Cu/Cu microelectronic joints through an advanced surface finish technique", *J. Mater. Res. Technol.*, 11, 1895-1910 (2021).
20. Z. Zhang, J. Chen, J. Wang, Y. Han, Z. Yu, Q. Wang, P. Zhang and S. Yang, "Effects of solder thickness on interface behavior and nanoindentation characteristics in Cu/Sn/Cu micro-bumps", *Weld. world*, 1-11 (2022)
21. S. H. Rajendran, S. J. Hwang and J. P. Jung, "Shear strength and aging characteristics of sn-3.0 ag-0.5 cu/cu solder joint reinforced with zro2 nanoparticles", *Metals*, 10(10), 1295 (2020).
22. G. Ban, F. Sun, Y. Liu and S. Cong, "Effect of nano-Cu addition on microstructure evolution of Sn0.7Ag0.5Cu-BiNi/Cu solder joint", *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 29, 92-98 (2017).
23. L. Sun, M. H. Chen, C. C. Wei, L. Zhang and F. Yang, "Effect of thermal cycles on interface and mechanical property of low-Ag Sn1.0Ag0.5Cu (nano-Al)/Cu solder joints", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 29(12), 9757-9763 (2018).
24. A. K. Gain and L. Zhang, "Effect of Ag nanoparticles on microstructure, damping property and hardness of low melting point eutectic tin-bismuth solder", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28(20), 15718-15730 (2017).
25. Y. Tang, S. M. Luo, K. Q. Wang and G. Y. Li, "Effect of Nano-TiO₂ particles on growth of interfacial Cu_6Sn_5 and

- Cu₃Sn layers in Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu_xTiO₂ solder joints”, *J. Alloys Compd.*, 684, 299-309 (2016).
26. N. Ismail, A. Jalar, M. Abu Bakar, N. S. Safee, W. Y. Wan Yusoff and A. Ismail, "Microstructural evolution and micro-mechanical properties of SAC305/CNT/CU solder joint under blast wave condition", *Solder. Surf. Mt. Technol.*, 33(1), 47-56. (2021).
27. N. Jiang, L. Zhang, Z. Q. Liu, L. Sun, M. Y. Xiong and K. K. Xu, "Influences of doping Ti nanoparticles on microstructure and properties of Sn58Bi solder", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 30(19), 17583-17590 (2019).
28. A. Yakymovych, P. Švec, L. Orovcik, O. Bajana and H. Ipser, "Nanocomposite SAC Solders: The Effect of Adding Ni and Ni-Sn Nanoparticles on Morphology and Mechanical Properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu Solders" *J. Electron. Mater.*, 47, 117-123 (2018).
29. S. Chellvarajoo and M. Z. Abdullah, "Microstructure and mechanical properties of Pb-free Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder pastes added with NiO nanoparticles after reflow soldering process", *Mater. Design*, 90, 499-507 (2016).
30. Y. Plevachuk, O. Tkach, P. Švec, A. Yakymovych and L. Orovcik, "Nanocomposite solders: An influence of un-coated and Au-coated carbon nanotubes on morphology of Cu/Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/Cu solder joints", 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Ukraine, IEEE Components, 722-725 (2019).
31. S. Tikale and K. N. Prabhu, "Performance of MWCNT-Reinforced SAC0307/Cu Solder Joint Under Multiple Reflow Cycles", *Trans. Indian. Inst. Met.*, 71(11), 2693-2698 (2018).
32. L. Sun, L. Zhang, L. Xu, S. J. Zhong, J. Ma and L. Bao, "Effect of nano-Al addition on properties and microstructure of low-Ag content Sn-1Ag-0.5Cu solders", *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 27, 7665-7673 (2016).



- 서성민
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - 반도체패키징, 접합
 - email : smseo@uos.ac.kr
-



- Sri Harini Rajendran
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - 반도체패키징, 접합
 - email : harini.phys@gmail.com
-

- 정재필
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - 반도체패키징, 접합
 - email : jppjung@uos.ac.kr
-