



## 의료전자기기 적용을 위한 Epoxy 솔더 접합부의 신뢰성 평가

전유재<sup>a</sup>, 강민수<sup>b\*</sup>

## Reliability Evaluation of Epoxy Solder Joints for Medical Electronic Devices

Yu-Jae Jeon<sup>a</sup>, Min-Soo Kang<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Department of medical rehabilitation science, Yeosu Institute of Technology<sup>b</sup> Division of Smart Automotive Engineering, Sunmoon University

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	23	February	2021
Revised	24	March	2021
Accepted	25	March	2021

## Keywords:

Medical electronic device  
Solder  
Epoxy solder  
Thermal shock test  
Shear test  
Metallography

## ABSTRACT

In this study, the bonding characteristics of epoxy solder joints for the manufacture of highly reliable medical electronic devices were investigated. A total of 2000 cycles of thermal shock tests were performed by simulating the heat generation of electronic devices on specimens manufactured using eutectic solders (SAC305 and Sn58Bi) and epoxy solders (SACE and Sn58BiE). After the thermal shock, the formation of internal cracking owing to the difference in the thermal expansion coefficients of dissimilar material solder joints and the deterioration of the bonding properties of the solder joints was analyzed. Consequently, in the case of the epoxy solder, the epoxy was cured outside the solder joint, suppressing thermal stress owing to a difference in thermal expansion coefficients and suppressing the internal cracking of the solder joint, thereby improving the bonding characteristics of the solder joint.

## 1. 서론

최근 전자 및 패키징 산업의 발달은 다양한 분야에서의 고집적화 된 전자기기 개발과 반도체 부품의 비중을 높이고 있다. 군사, 항공우주, 통신 및 의료기기 분야에서 사용되는 전자기기 및 반도체 패키징은 높은 신뢰성을 바탕으로 설계되어야 하며 지속적이고 안정적인 작동을 위해 장기 신뢰성이 확보되어야 한다<sup>[1]</sup>. 특히 의료분야에서의 신뢰성은 환자의 생명과 직결되기 때문에 의료 전자 기기의 높은 신뢰성은 필수 불가결한 요소라고 할 수 있다. 이러한 상황에서 전자 패키징 산업은 다양한 규제로 인해 신뢰성 확보에 어려움을 겪고 있다. 2010년대 이후 환경문제로 인해 납의 사용을 규제하여 기존의 상용 SnPb솔더를 대체하기 위한 다양한 무연 솔더에 대한 연구와 개발이 지속적으로 진행되어 왔다<sup>[2-5]</sup>. 신뢰성이

확보된 무연 솔더 개발을 위해 3원계 4원계 무연솔더 및 첨가물을 활용한 무연 솔더 개발을 진행해왔다. 최근 이러한 무연 솔더의 접합 특성 및 기계적 물성을 강화하기 위해 금속 계열 첨가물뿐 아니라, 탄소나노튜브(CNT) 및 그래핀을 혼합한 복합 소재 형태의 접합재료를 개발하고 연구를 진행하고 있다. 솔더 내부에 함유된 CNT는 고유의 뛰어난 물리적 특성으로 인해 솔더 접합부의 기계적 접합특성이 향상되는 것을 확인할 수 있다<sup>[6-7]</sup>. 또한 솔더 내부의 포함된 그래핀 산화 분말은 솔더 내부의 금속간화합물 성장을 억제하며, 솔더 접합부의 신뢰성을 높이는 결과를 보이고 있다<sup>[8-9]</sup>. 그러나 이러한 첨가물을 통한 솔더 접합부의 강화는 솔더 내부의 금속간화합물을 억제하며, 내부 금속 조직의 조밀화를 통해 신뢰성을 확보하는 방법이다. 이는 솔더 접합부 내부에서 발생하는 균열에 대한 대응은 쉽지 않다. 이러한 단점을 보완하기 위해

\* Corresponding author. Tel.: +82-41-530-8359

E-mail address: kang10101@sunmoon.ac.kr (Min-Soo Kang).

솔더 페이스트에 에폭시가 혼합된 접합 재료에 대한 연구를 수행하고 있으며, 이러한 에폭시 솔더 페이스트는 솔더 외부에 에폭시가 경화하여 솔더 접합부를 보강하는 메커니즘을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 고신뢰성 전자기기 제조를 위해 솔더 접합부 내부의 미세 균열을 억제할 수 있는 에폭시 솔더 접합부에 대해 고찰하였다. 솔더 접합부 내부의 미세 균열은 반복적인 온도 변화에 따른 솔더 접합부의 이종재료 간 열팽창 계수 차이에 의해 발생한다<sup>[10-11]</sup>. 이러한 솔더 접합부의 결함을 모사하기 위해 열충격 시험을 수행하였으며, 에폭시 경화 효과가 솔더 접합부의 접합력 향상에 미치는 영향에 대해 비교 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험 시편 및 재료

본 연구를 위해 상용솔더 wt% 96.5Sn0.5Ag3.0Cu (SAC305) 및 wt% 42Sn58Bi (Sn58Bi)를 준비하였으며, SAC305, Sn58Bi 상용솔더에 에폭시 매트릭스를 함유한 에폭시솔더(SACE, Sn58BiE)를 준비하였다. 에폭시 매트릭스에는 에폭시, 경화제, 경화촉진제, 착색제, 첨가제로 구성되어 있으며, 솔더 파우더 분말에 따라 점성 및 에폭시 경화 온도와 시간을 조절하였다. 제조된 솔더 페이스트를 통해 실험 시편을 제작하였으며, 시편의 개수는 Table 1에 나타내었다.

본 연구에 사용된 전자 디바이스는 상용 저항 Chip (R3216)으로 길이 3.2 mm, 폭 1.6 mm, 높이 0.55 mm의 사이즈에 내부에는 저항 구조를 가지고 있으며, 외부 전극에는 Ag, Ni이 도금된 형상을 Fig. 1(a)에 나타냈다. 이러한 상용 저항 Chip을 서로 간섭이 발생하지 않도록 간격을 조절하여 설계된 PCB 위에 접합한 기본 시편은 Fig. 1(b)와 같이 제작하였다. PCB에 Cu pad를 형성하고, Organic Solderability Preservative (OSP) 마감처리하여 PCB를 준비하였으며, 준비된 PCB위에 스크린프린팅 공정을 통해 솔더 페이스트를 도포하였다. 도포된 솔더 페이스트 위에 R3216 chip을 위치시키고 온도프로파일을 통해 접합 공정을 수행하였다.

### 2.2 열충격 시험 및 전단 시험

반도체 및 전자 부품 작동 시 발열이 발생하게 되며 이러한

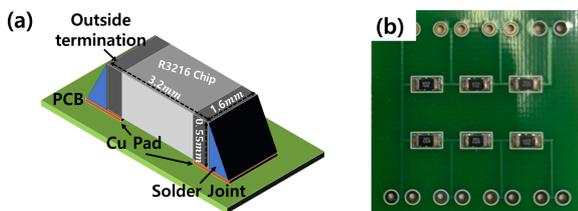


Fig. 1 Shape of the specimens

Table 1 Number of test specimens

Cycle	Test	Solder type			
		SAC305 (ea)	Sn58Bi (ea)	SACE (ea)	Sn58BiE (ea)
0	Cross section	6	6	6	6
	Shear test	30	30	30	30
500	Cross section	6	6	6	6
	Shear test	30	30	30	30
1000	Cross section	6	6	6	6
	Shear test	30	30	30	30
1500	Cross section	6	6	6	6
	Shear test	30	30	30	30
2000	Cross section	6	6	6	6
	Shear test	30	30	30	30
Total		180	180	180	180

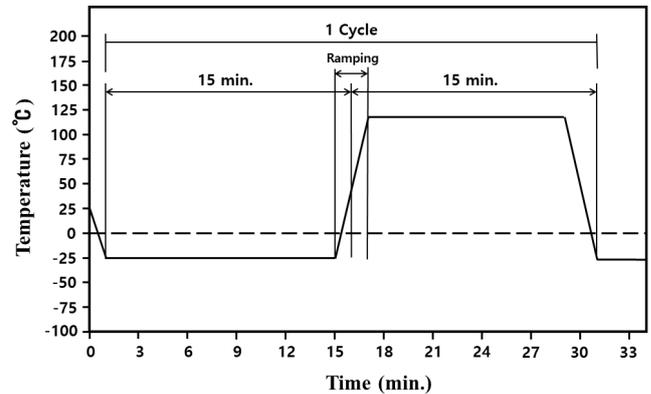


Fig. 2 Temperature profile of Thermal Shock Test

발열로 인해 전자기기들은 반복적인 온도 사이클에 노출되게 된다. 이러한 반복적인 온도 사이클은 이종재료 솔더 접합부의 열팽창 계수 차이에 의한 내부 균열 발생 등의 신뢰성 저하 요인이 된다. 이러한 솔더 접합부의 반복적인 온도 차이에 의한 신뢰성 저하 요인을 분석하기 위해 열충격 시험을 수행하였다. 시험에 사용된 시편은 열충격 시험을 수행하기 위해 열충격 시험은 JESD22-A106B 규격을 이용하여 -40°C ~ 125°C의 온도에서 수행되었으며, 저온(-40°C)과 고온(125°C)의 온도구간에서 각각 15 min.을 유지하여 1 Cycle에 총 30 min.이 되도록 설정하였다. 온도 차이에 따른 승온 구간은 2분 이내로 하여 급격한 온도변화에 의한 신뢰성 저하 요인을 검토하였다. 열충격 시험 온도 프로파일은 Fig. 2에 나타내었으며, 본 실험에서는 열충격 시험을 총 2000 Cycle인 1000 h; 42일을 수행하였다.

열충격 시험에 따른 솔더 접합부의 접합 특성을 비교 분석하기 위해 전단 시험을 수행하였다. 전단시험은 JIS Z 3198-7의 규격을 인용하여 실험시편의 1/4 높이 이하에서, 10 mm/s의 전단속도로

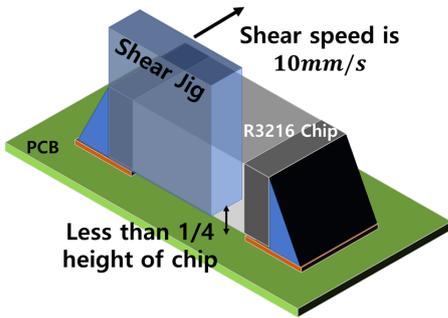


Fig. 3 Schematic diagram of shear test

Fig. 3과 같이 수행되었다. 이러한 전단력 측정을 통해 외력에 의한 솔더 접합부의 접합력을 평가할 수 있으며, 접합부의 전단 파면을 통해 접합력에 영향을 미치는 실질적 요인을 분석할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 열충격 시험에 따른 접합력 비교

열충격 시험 후 솔더 접합부의 접합 특성을 비교 분석하기 위해 저온(-40°C)과 고온(125°C)의 온도구간에서 각각 15 min.을 유지하고 총 30 min.을 1 Cycle로 하여 열충격 시험 전 0 Cycle 및 열충격 시험 후 500, 1000, 1500, 2000 Cycle을 수행한 시편에 전단 하중을 인가하여 전단 강도를 측정하고 변화된 전단강도를 통해 접합력을 산출하여 Fig. 4에 나타내었다. SAC305 솔더 접합부의 열충격 시험 전 접합력은 44.1 N으로 측정되었으며, 열충격 2000 Cycle 시험 후 23.3 N으로 47.1%의 접합력 저하를 확인할 수 있었다. Sn58Bi 솔더 접합부의 경우, 열충격 시험 전 52.5 N에서 열충격 2000 Cycle 시험 후 42.9 N으로 18.3%의 접합력 저하를 확인할 수 있었다. 일반적으로 SAC305 솔더는 Sn-Rich로 솔더 계면에서 Cu Pad와 반응할 수 있는 Sn의 양이 Sn58Bi 솔더보다 높기 때문에 초기 접합부에서 Sn-Cu계 금속간화합물의 성장이 많아 솔더 접합부의 인성이 낮아져 초기 전단력이 낮게 측정되는 것으로 분석할 수 있다<sup>[12]</sup>.

이러한 원인은 열충격 시험이 진행될수록 전단력 즉, 접합력의 저하가 크게 발생할 수 있다고 판단할 수 있다. 솔더 내부의 금속간화합물은 일반적으로 85°C 이상에서 원자의 고상확산이 활발하게 진행되어 급격히 성장하는 것을 확인할 수 있다<sup>[13-15]</sup>. 이는 본 연구에서 진행된 열충격 시험의 최고 온도가 125°C인 것을 고려한다면 고온에서 노출된 SAC305 솔더 접합부 내부에서 금속간화합물의 성장이 가속화 되어 열충격 2000 Cycle 시험 후 접합력이 크게 저하된 결과를 확인할 수 있다. 에폭시가 함유된 SACE 솔더 접합부의 경우, 열충격 시험 전 접합력은 102.9 N이었으며, 열충격 2000 Cycle 시험 후 89.3 N으로 13.2%의 접합력 저하가 나타났

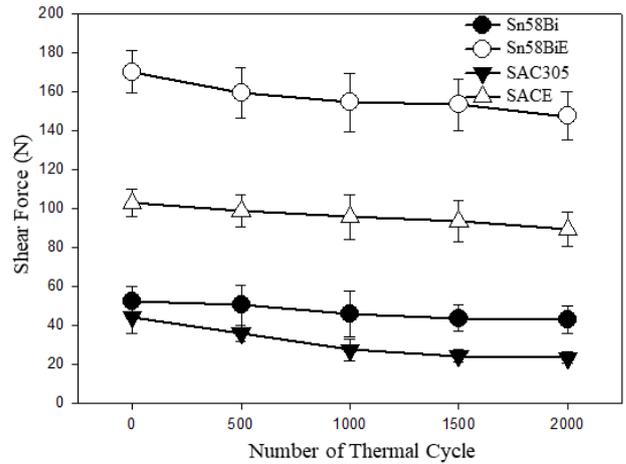


Fig. 4 Shear force according to thermal shock test

다. Sn58BiE 솔더 접합부는 열충격 시험 전 170.1 N에서 열충격 2000 Cycle 시험 후 147.3 N으로 13.4%의 접합력 저하를 확인할 수 있었다. 에폭시가 함유된 솔더의 경우 솔더 접합부 외부에 경화된 에폭시로 인해 상용솔더(SAC305, Sn58Bi) 보다 전단력이 더 높게 측정된 것을 확인할 수 있으며, 열충격 시험 후에도 상용솔더보다 상대적으로 접합력 저하가 크지 않다는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.2 솔더 접합부 단면관찰

열충격 시험이 진행됨에 따라 솔더 접합부 내부의 변화를 관찰하기 위해 Fig. 5와 같이 열충격 시험 500 Cycle 마다 단면관찰을 수행하여 솔더 접합부를 관찰하였다. SAC305 솔더 접합부는 Fig. 5(c)와 같이 열충격 시험 1000 Cycle의 단면에서 초기 균열이 형성되는 것을 확인할 수 있었으며, 열충격 시험이 진행됨에 따라 Chip 하단부 솔더 접합부에서 균열이 발생하여 솔더 접합부 내부로 성장하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 솔더 내부의 균열은 PCB의 Cu pad/솔더 계면에서 (Ni,Cu)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, (NiCu)<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub>의 금속간화합물이 형성되어 취성의 계면이 성장하고 솔더 접합부 내부의 인성을 저하시켜 외력에 취약해져 균열이 형성되는 것으로 분석할 수 있다<sup>[12-15]</sup>. Fig. 6의 SACE 솔더 접합부는 솔더 외부에 경화된 에폭시 층을 확인할 수 있으며, Chip 하단 PCB 사이에도 에폭시가 경화되어 접합부를 보강하는 것을 확인할 수 있다<sup>[16-18]</sup>. SACE 솔더 접합부는 Fig. 6(e)와 같이 열충격 2000 Cycle 시험 후 단면에서 초기균열이 관찰되었다. 이러한 원인은 경화된 에폭시 층이 솔더 접합부의 이종재료 간 열팽창을 억제하여 솔더 접합부 내부의 균열을 억제하는 것으로 판단할 수 있다.

Sn58Bi솔더 접합부의 경우, Fig. 7와 같이 열충격 1000 Cycle 시험 후 단면에서 솔더 필렛 부분 및 Chip 하단의 솔더 접합부에서 초기균열이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이후 솔더 접합부 내부로 균열이 성장하는 것을 확인할 수 있다. Sn58Bi의 내부 균

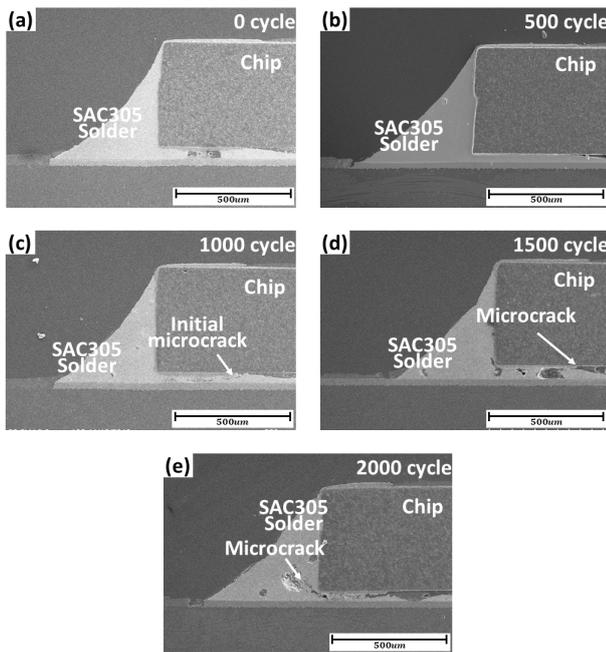


Fig. 5 Cross-sectional image of SAC305 solder joint

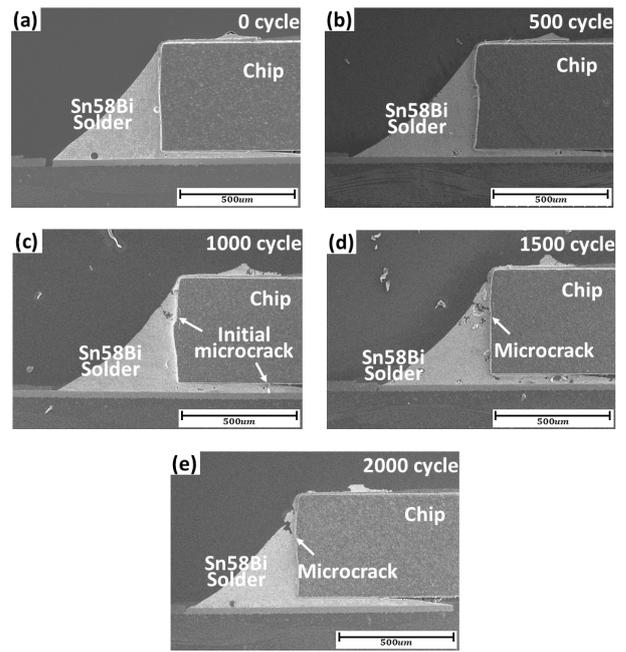


Fig. 7 Cross-sectional image of Sn58Bi solder joint

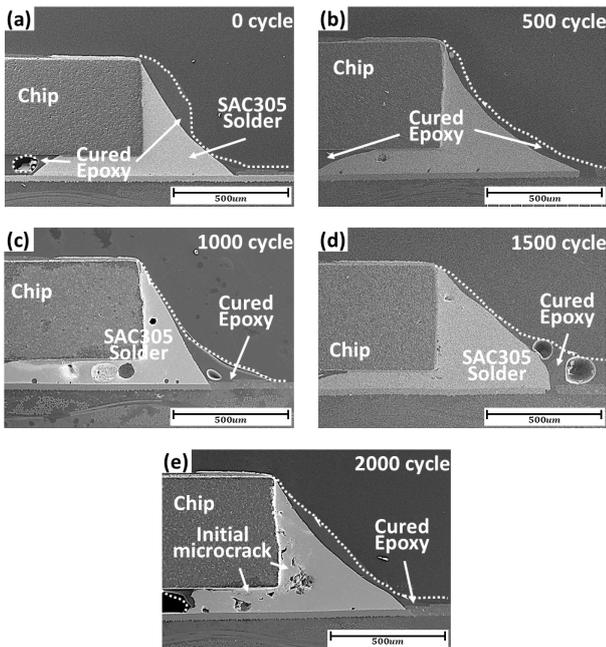


Fig. 6 Cross-sectional image of SACE solder joint

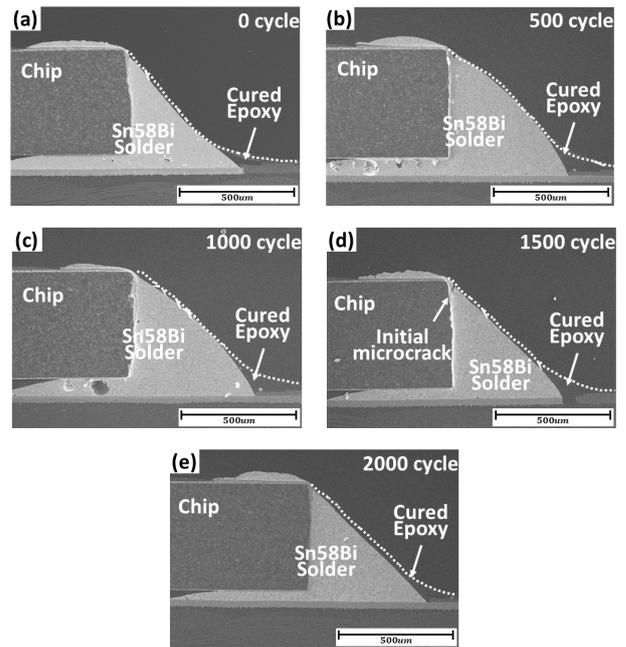


Fig. 8 Cross-sectional image of Sn58BiE solder joint

열은 SAC305 솔더 접합부와 마찬가지로, Cu pad와 솔더의 Sn이 반응하여  $(Ni,Cu)_6Sn_5$ ,  $(NiCu)_3Sn_2$ 의 금속간화합물이 형성되어 솔더 접합부 계면에 따라 균열이 신장하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8의 Sn58BiE 솔더 접합부에서는 에폭시 경화에 의해 솔더 접합부 내부에 큰 균열이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다. SAC305 솔더 접합부가 Sn58Bi 솔더 접합부보다 균열이 더 크게 나타나는 이유를 분석하면, 상온에서 Chip 외부에 도금된 니켈

(Ni)의 열팽창계수는  $13.1 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 이며, PCB pad의 구리(Cu)는  $16.4 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ , SAC305 솔더는  $20.0 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ , Sn58Bi 솔더는  $14.0 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ 로 열팽창 계수가 각각 다르다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 이종재료 접합부에서 서로 열팽창 계수의 차이가 가장 큰 SAC305 솔더 접합부에서 초기균열이 더 빠르게 발생하는 것으로 분석할 수 있다.

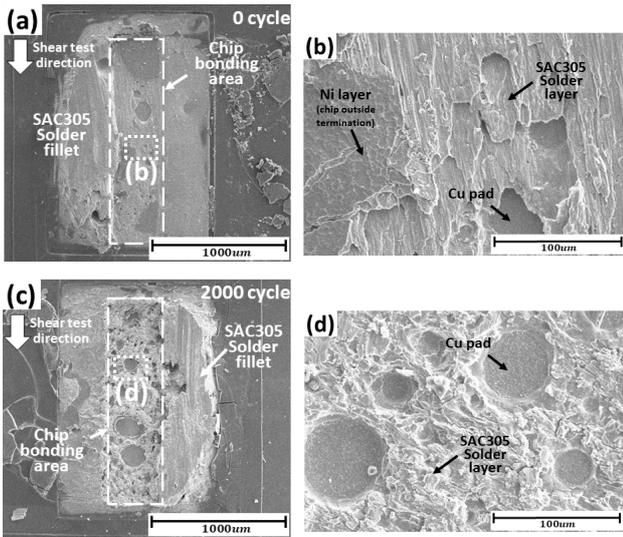


Fig. 9 Shear test fracture surface of SAC305 solder joint

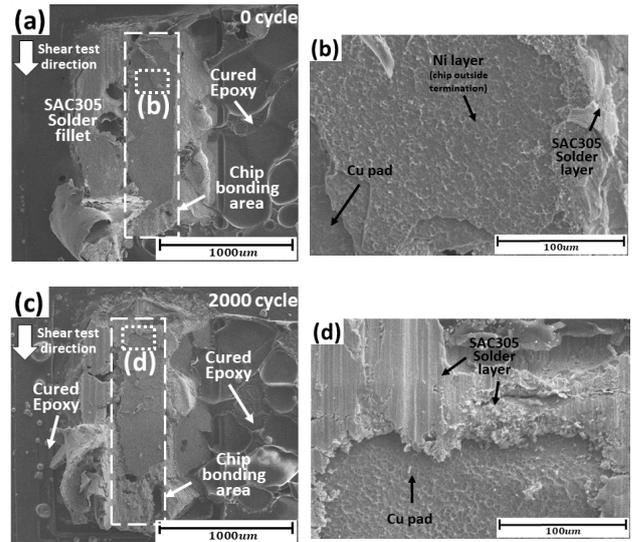


Fig. 10 Shear test fracture surface of SACE solder joint

### 3.3 전단시험을 통한 파면 분석

전단시험으로 형성된 파면 분석을 통해 솔더 접합부의 접합력과 파면형상의 상관관계를 분석하였다. Fig. 9의 SAC305 솔더 접합부의 열충격 시험 전 파면은 전단시험의 하중 방향에 따라 솔더 접합부 파면 형상이 일정한 방향으로 형성된 것을 확인할 수 있다. 이러한 변형 파괴는 하중 방향을 따라 다량의 소성 변형의 증거를 보여주며 전단력이 가해질 때, 연성 파괴가 발생했음을 의미한다<sup>[19-21]</sup>.

Fig. 9(d)와 같이 열충격 2000 Cycle 시험 후 파면은 전단 방향과 관계없이 다양한 방향의 조직파괴가 관찰되었으며, 취성 파괴가 주를 이루고 있다. 이러한 취성 파괴는 Cu pad와 솔더 계면에 형성된 금속간화합물에서 시작되는 경우가 많다. 따라서 솔더 접합부 내부에 반복적인 열응력에 의해 균열이 발생하고 전단시험 시 균열 면을 따라, 취성 파괴의 현상을 나타내는 것으로 분석할 수 있다. 이는 열충격 시험 전 연성파괴에서 열충격 2000 Cycle 시험 후 취성파괴로 변화되며, 접합력 저하에 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

Fig. 10의 SACE 솔더 접합부 파면을 확인한 결과, (a), (c) 모두 솔더 접합부 외부 및 Chip의 아래 부분에 경화된 Epoxy 층을 확인할 수 있었다. 이렇게 경화된 Epoxy는 Chip 및 솔더 접합부를 고정하여 외력에 대한 저항성을 증가시켜 SAC305 솔더 보다 같은 조건에서 접합력이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10(b)의 열충격 시험 전 시편의 파면을 관찰한 결과, Ni 층이 확인 되었으며, 이는 솔더 접합부의 파손이 아닌 Chip의 외부 도금막 계면에서 파괴가 발생한 것으로 판단할 수 있다. Fig. 10(d)의 열충격 2000 Cycle 시험 후 파면을 관찰한 결과, 전단시험 방향과 동일한 방향의 솔더 슬립이 발생하였으며, 솔더 접합부

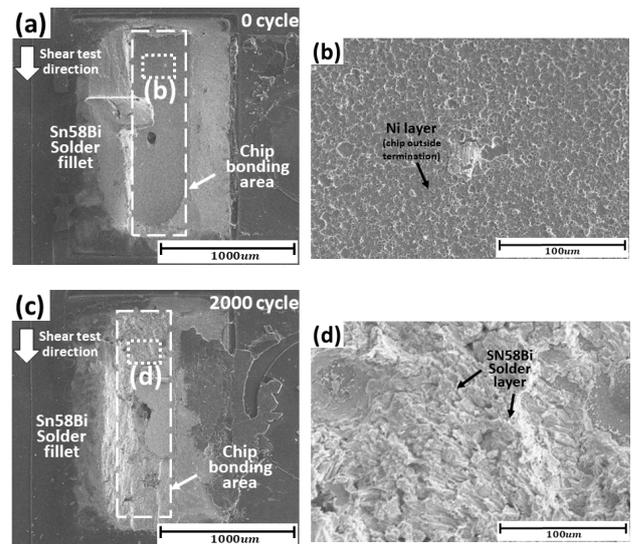


Fig. 11 Shear test fracture surface of Sn58Bi solder joint

의 연성 파괴가 나타났다. 따라서 열충격 시험 전 SACE 솔더는 전단시험을 통해 솔더 접합부 파괴가 아닌 모재파괴 형상을 나타냈으며, 이는 에폭시 경화 효과에 따른 높은 접합력을 확보한 결과라 판단할 수 있다<sup>[22-23]</sup>. 또한, 열충격 2000 Cycle 시험 후 열충격 시험 전인 SAC305 솔더와 같은 연성파괴의 형상을 보였지만, 솔더 접합력에서는 SACE 솔더가 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11, Fig. 12의 Sn58Bi 및 Sn58BiE 솔더 접합부의 파면을 관찰한 결과, Fig.11(b), Fig. 12(b)와 같이 열충격 시험 전 전단시험을 통한 파면에서 Ni 층이 확인되었다. 열충격 2000 Cycle 시험 후 Fig. 11(d)의 Sn58Bi 솔더 접합부의 파면은 취성 파괴가 관찰되었다. 따라서 솔더 접합부 내부의 균열 면을 따라 형성된 파괴를 확인할 수 있었다. Fig. 12(d)에 따라 열충격 2000 Cycle 시험

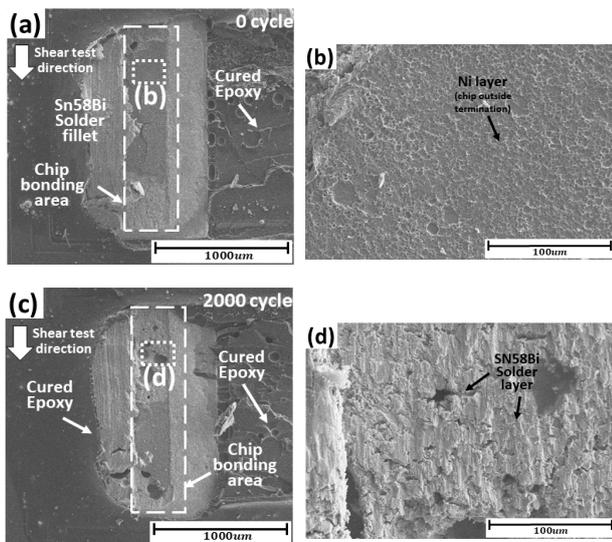


Fig. 12 Shear test fracture surface of Sn58BiE solder joint

후 Sn58BiE 솔더 접합부의 파면은 솔더 계면의 연성 파괴를 확인할 수 있다. 따라서, 열충격 시험 전 Sn58Bi, Sn58BiE 솔더 모두 Ni 층이 확인 되면서 솔더 파괴가 아닌 모재 파괴를 확인할 수 있었으며, 열충격 2000 Cycle 시험 후 Sn58Bi 솔더는 취성파괴를 Sn58BiE 솔더는 연성파괴 형상을 확인할 수 있었다. 또한, 열충격 2000 Cycle 시험 후 Sn58Bi 솔더 보다 Sn58BiE 솔더의 접합력이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 솔더 접합부 주변에 경화된 Epoxy에 의해 내부에 균열 및 결함을 억제하여 우수한 접합력을 확보한 것으로 판단할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 열충격 시험 전, 후 전단시험을 통해 솔더 접합부의 접합력을 측정된 결과, SAC305 솔더는 47.1%, Sn58Bi 솔더는 18.3%의 접합력이 저하되었으며, SACE 솔더는 13.2%, Sn58BiE 솔더는 13.4%의 접합력이 저하된 것을 확인할 수 있었다. 접합력에 영향을 미칠 수 있는 요인을 분석하기 위해 단면관찰 및 파면 형상을 분석한 결과, 상용솔더 모두 열충격 1000 Cycle 시험 후 솔더 접합부 내부에서 초기 균열이 발생하고 신장하는 것을 확인할 수 있었으며, SAC305 상용솔더는 열충격 시험 전 연성 파괴 형상에서 열충격 2000 Cycle 시험 후 취성파괴 형상으로 변화하였다. SACE 솔더는 열충격 2000 Cycle 시험 후 초기 균열이 발생하였으며, Sn58BiE 솔더 접합부는 균열이 발생하지 않았다. 그리고, SACE 솔더는 열충격 시험 전 모재파괴 형상에서 열충격 2000 Cycle 시험 후 연성파괴 형상을 나타냈으며, Sn58Bi 상용솔더 및 Sn58BiE 솔더 모두 열충격 시험 전 모재파괴 형상에서 열충격 2000 Cycle 시험 후 Sn58Bi 상용솔더는 취성파괴 형상을

Sn58BiE 솔더는 연성파괴 형상을 나타냈다.

예폭시 경화 효과가 솔더 접합부 열응력에 미치는 분석을 통해 전자부품이 받는 반복적 열응력에 효과적으로 대응할 수 있으며 향후 고용량, 고집적화 된 의료전자기기 등의 솔더 접합부 설계 시 내부균열을 억제할 수 있는 소재 및 형상을 최적화할 수 있는 고신뢰성 접합부를 형성할 수 있다.

#### References

- [1] Venkatadri, V., Yin, L., Xing, Y., Cotts, E., Srihari, K., Borgesen, P., 2009, Accelerating the Effects of Aging on the Reliability of Lead Free Solder Joints in a Quantitative Fashion, 59th Electronic Components and Technology Conference, 398-405, <https://doi.org/10.1109/ECTC.2009.5074045>.
- [2] Kim, H. D., Yoon, D. Y., 2007, A Study on Thermal Stress Analysis of Plastic-Core Solder Balls, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 16:6 159-162.
- [3] Kang, M. S., Kim, D. S., Shin, Y. E., 2019, Evaluation of Bonding Properties of Epoxy Solder Joints by High Temperature Aging Test, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., 32:1 6-12, <https://doi.org/10.4313/JKEM.2019.32.1.6>.
- [4] Jung, S. W., Kang, M. S., Jeon, Y. J., Kim, D. S., Shin, Y. E., 2016, A Study on the Degradation Characteristics of MLCCs SAC305 Lead-free Solder Joints and Growth IMCs by Thermal Shock Test, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., 29:3 152-158, <https://doi.org/10.4313/JKEM.2016.29.3.152>.
- [5] Jeon, Y. J., Son, S. I., Kim, D. S., Shin, Y. E., 2010, A Study of Thermal Shock Characteristics on the Joints of Automotive Application Component using Sn-3Ag-0.5 Cu Solder, J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., 23:8 611-616, <https://doi.org/10.4313/JKEM.2010.23.8.611>.
- [6] Yim, B. S., Lee, B. H., Kim, J., Kim, J. M., 2014, Effect of Dispersion Condition of Multi-walled Carbon Nanotube (MWNT) on Bonding Properties of Solderable Isotropic Conductive Adhesives (ICAs), J. Mater. Sci.: Mater. Electron., 25 5208-5217, <https://doi.org/10.1007/s10854-014-2290-7>.
- [7] Yim, B. S., Jeong, J. S., Lee, J. I., Oh, S. H., Kim, J. M., 2011, Electrical and Mechanical Properties of CNT-filled Solderable Electrically Conductive Adhesive, Journal of the Semiconductor & Display Technology, 10:4 37-42.
- [8] Ko, Y. H., Yu, D. Y., Son, J., Bang, J., Kim, T. S., 2019, Improving Joint Reliability of Lead-free Solder on Flexible Substrate under Cyclic Bending by Adding Graphene Oxide

- Powder, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26:3 43-49, <https://doi.org/10.6117/kmeps.2019.26.3.043>.
- [9] Son, K., Kim, G., Ko, Y. H., Park, Y. B., 2019, Effects of Graphene Oxide Addition on the Electromigration Characteristics of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu Pb-free Solder Joints, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 26:3 81-88, <https://doi.org/10.6117/kmeps.2019.26.3.081>.
- [10] Kim, D. G., Kim, J. W., Jung, S. B., 2006, Evaluation of Solder Joint Reliability in Flip Chip Package under Thermal Shock Test, Thin solid films, 504:1-2 426-430, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.09.097>.
- [11] Li, J., Karppinen, J., Laurila, T., Kivilahti, J. K., 2009, Reliability of Lead-free Solder Interconnections in Thermal and Power Cycling Tests, *IEEE Trans. Compon. Packaging Technol.*, 32:2 302-308, <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2009.2012518>.
- [12] Tian, R., Hang, C., Tian, Y., Feng, J., 2019, Brittle Fracture Induced by Phase Transformation of Ni-Cu-Sn Intermetallic Compounds in Sn-3Ag-0.5 Cu/Ni Solder Joints under Extreme Temperature Environment, *J. Alloy. Compd.*, 777 463-471, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.394>.
- [13] Fu, S. W., Yu, C. Y., Lee, T. K., Liu, K. C., Duh, J. G., 2012, Impact Crack Propagation through the Dual-phased (Cu, Ni) 6Sn5 Layer in Sn-Ag-Cu/Ni Solder Joints, *Mater. Lett.*, 80 103-105, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.04.099>.
- [14] Kang, M. S., Jeon, Y. J., Kim, D. S., Shin, Y. E., 2016, Degradation Characteristics and Ni 3 Sn 4 IMC Growth by a Thermal Shock Test in SAC305 Solder Joints of MLCCs Applied in Automotive Electronics, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 17:4 445-452, <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0055-3>.
- [15] Gu, J., Lin, J., Lei, Y., Fu, H., 2018, Experimental Analysis of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu Solder Joint Board-level Drop/Vibration Impact Failure Models after Thermal/Isothermal Cycling, *Microelectron. Reliab.*, 80 29-36, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.10.014>.
- [16] Kang, M. S., Kim, D. S., Shin, Y. E., 2019, The Effect of Epoxy Polymer Addition in Sn-Ag-Cu and Sn-Bi Solder Joints, *Materials*, 12:6 960, <https://doi.org/10.3390/ma12060960>.
- [17] Sharma, A., Jang, Y. J., Kim, J. B., Jung, J. P., 2017, Thermal Cycling, Shear and Insulating Characteristics of Epoxy Embedded Sn-3.0 Ag-0.5 Cu (SAC305) Solder Paste for Automotive Applications, *J. Alloy. Compd.*, 704 795-803, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.036>.
- [18] Sharma, A., Cheon, J. S., Jung, J. P., 2019, Epoxy Polymer Solder Pastes for Micro-electronic Packaging Applications, *J. Weld. Join.*, 37:2 7-14, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.2>.
- [19] Hu, X., Xu, T., Keer, L. M., Li, Y., Jiang, X., 2016, Microstructure Evolution and Shear Fracture Behavior of Aged Sn3Ag0.5Cu/Cu Solder Joints, *Mater. Sci. Eng. A-Struct. Mater. Prop. Microstruct. Process.*, 673 167-177, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.071>.
- [20] Sujan, G. K., Haseeb, A. S. M. A., Nishikawa, H., Amalina, M. A., 2017, Interfacial Reaction, Ball Shear Strength and Fracture Surface Analysis of Lead-free Solder Joints Prepared using Cobalt Nanoparticle Doped Flux, *J. Alloy. Compd.*, 695 981-990, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.219>.
- [21] Jeon, Y. J., Kim, D. S., Shin, Y. E., 2011, A Study on the Fracture Mode Characteristics of Automotive Application Component Lead-free Solder Joints, *Trans. Korean Soc. Automot. Eng.*, 19:6 90-96.
- [22] Sung, Y. G., Myung, W. R., Jeong, H., Ko, M. K., Moon, J., Jung, S. B., 2018, Mechanical Reliability of the Epoxy Sn-58wt.% Bi Solder Joints with Different Surface Finishes Under Thermal Shock, *J. Electron. Mater.*, 47:7 4165-4169, <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6224-7>.
- [23] Myung, W. R., Kim, Y., Kim, K. Y., Jung, S. B., 2016, Drop Reliability of Epoxy-contained Sn-58 wt.% Bi Solder Joint with ENIG and ENEPIG Surface Finish under Temperature and Humidity Test, *J. Electron. Mater.*, 45:7 3651-3658, <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4517-2>.



**Yu-Jae Jeon**

Professor in the Department of Medical Rehabilitation Science, Yeosu Institute of Technology. His research interests are System control/Design/Manufacturing.  
E-mail: superlittle@yit.ac.kr



**Min-Soo Kang**

Professor in Division of Smart Automotive Engineering, Sunmoon University. His research interests are Design/Manufacturing.  
E-mail: kang10101@sunmoon.ac.kr