

레이저 비전도성 페이스트(LNCP)소재 최적화를 통한 상온 레이저 압착 접합 (LABC)기반 30 μm 피치 인터커넥션 신뢰성 향상

이가은^{1,2} · 최광성¹ · 엄용성¹ · 최광문¹ · 장기석¹ · 신정호¹ · 이찬미¹ · 오진혁¹
· 김성철^{1,2} · 문석환¹ · 윤호경¹ · 임술이¹ · 이승윤² · 주지호^{1,*}

¹한국전자통신연구원 저탄소집적기술창의연구실
²국립한밭대학교 응용소재공학과

Reliability Enhancement of 30 μm -Pitch Interconnections via Room-Temperature Laser-Assisted Bonding with Compression (LABC) Using Optimized Laser Non-Conductive Paste (LNCP)

Gaeun Lee^{1,2}, Kwang-Seong Choi¹, Yong-Sung Eom¹, Gwang-Mun Choi¹, Ki-Seok Jang¹,
Jungho Shin¹, Chanmi Lee¹, Jin-Hyuk Oh¹, Seong-Cheol Kim^{1,2}, Seok-Hwan Moon¹,
Ho-Gyeong Yoon¹, Solyee Im¹, Seung-Yun Lee², and Jiho Joo^{1,*}

¹Electronics and Telecommunications Research Institute, Low-Carbon Integrated Technology Creative Research Section, Daejeon 34129, Republic of Korea

²Department of Applied Materials Science and Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Republic of Korea

Abstract: As the trend in advanced semiconductor packaging continues toward finer pitch and higher integration, bonding technologies are increasingly expected to meet stricter thermal and mechanical performance requirements. However, conventional methods such as Thermo-Compression Bonding (TCB) often lead to problems including thermal stress, long processing times and limitations of fine-pitch bonding. To overcome these challenges, this study introduces Room-Temperature Laser-Assisted Bonding with Compression (LABC), a next-generation bonding technique that enables localized heating and rapid cooling, minimizing thermal stress while improving alignment accuracy and process efficiency. To further enhance the electrical and mechanical reliability of LABC, we developed two types of Laser Non-Conductive Paste (LNCP), designated LNCP-(A) and LNCP-(B). These eco-friendly materials, flux-free and solvent-free, not only prevent void formation and fume generation but also eliminate the need for post-bond cleaning and underfill processes. The bonding experiments were conducted on 30 μm -pitch daisy-chain bump structures formed on 11 mm \times 7 mm silicon chips, simulating High Bandwidth Memory (HBM). The glass transition temperatures (T_g) of LNCP-(A) and LNCP-(B) were measured to be 36.27 $^\circ\text{C}$ and 51.23 $^\circ\text{C}$, respectively, via Differential Scanning Calorimetry (DSC). Following the bonding process, electrical resistance measurements, cross-sectional microstructural analysis, and temperature cycling (TC) tests were performed. LNCP-(B), with its higher T_g , exhibited improved thermal stability and lower resistance variation compared to LNCP-(A). Furthermore, the LABC process effectively suppressed intermetallic compound (IMC) growth, resulting in consistently thinner IMC thickness compared to those formed by TCB. In addition, shear strength testing confirmed the mechanical robustness of the bonded joints. These results demonstrate the effectiveness of LABC with optimized LNCP materials as a promising solution for high-reliability, fine-pitch interconnections in next-generation semiconductor packaging.

(Received 24 April, 2025; Accepted 23 June, 2025)

Keywords: Laser-Assisted Bonding with Compression (LABC), Laser Non-Conductive Paste (LNCP), 30 μm -pitch interconnection, Reliability, Room Temperature Bonding

- 이가은, 김성철: 석사과정, 주지호, 최광성, 엄용성, 최광문, 신정호, 문석환, 윤호경: 박사, 장기석, 이찬미, 오진혁, 임술이: 연구원, 이승윤: 교수

*Corresponding Author: Jiho Joo

[Tel: +82-42-860-1832, E-mail: jihoo@etri.re.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

1. 서 론

고성능 컴퓨팅 및 첨단 반도체 집적 기술에 대한 수요가 증가함에 따라, 고대역폭 메모리(High Bandwidth Memory, HBM) 및 고성능 AI 가속기를 위한 2.5D 반도체 패키지와 같은 기술이 발전하고 있다. 이에 따라 인터커넥션 밀도가 급격히 증가하는 동시에 피치 간격이 지속적으로 감소하고 있다. 미세 피치 인터커넥션(fine-pitch interconnections)은 성능, 대역폭, 에너지 효율을 향상시키는 필수 요소로 자리잡고 있으며, 산업계에는 점점 더 고밀도 3D 집적 기술(high-density 3D interconnections)로 발전하고 있다. 이를 구현하기 위해 3D 적층(3D stacking) 및 칩 온 웨이퍼(Chip-on-Wafer, CoW)와 같은 첨단 패키징 기술이 개발되어 초미세 피치 인터커넥션을 가능하게 하고 있다. 그러나, 인터커넥트(interconnect)의 크기가 축소됨에 따라, 마이크로 범프(micro bump), 솔더 범프(solder bump) 그리고 실리콘 관통 전극(Through-Silicon Via, TSV)와 같은 연결 구조의 크기가 점점 작아지고, 피치 간격이 감소하고 있다. 이러한 방식은 새로운 도전 과제를 야기하며, 이를 해결하기 위해서는 열 응력을 완화하고 기계적 안정성을 확보하며 대량 생산이 가능한 정밀하고 신뢰성 높은 접합 기술이 필수적이다[1]. 이에 따라, 웨이퍼 변형(warpage)을 최소화하여 미세 피치 인터커넥션의 성능과 수율을 개선하는 동시에, 높은 정렬 정밀도를 유지하면서도 비용 효율성을 확보하는 것이 중요하다. 뿐만 아니라, 메모리 용량 확장을 가능하게 하도록 기능성과 시스템 통합성을 향상시키는 것도 필수적이다.

또한, 저탄소 시대(low-carbon era)를 맞아 에너지 소비 저감의 중요성이 더욱 부각되고 있다[2]. 기존의 접합 방식인 열 압착 접합(Thermo-Compression Bonding, TCB)은 미세 피치 I/O 인터커넥트 문제 해결을 위한 신뢰할 수 있는 방법이다[3,4]. 그러나, TCB는 얇고 열에 민감한 소자를 접합할 때 열 변형과 웨이퍼 변형 등의 문제를 초래할 수 있다. 또한, TCB는 상대적으로 긴 온도 프로파일을 요구하므로, 공정 중 스테이지 온도를 지속적으로 높은 상태로 유지해야 하며, 이는 에너지 소비 절감에 한계를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 그림 1과 같이 레이저 기반 압착 접합(Laser-Assisted Bonding with Compression, LABC) 기술을 도입하였다[5-7].

LABC는 차세대 본딩 기술로서, 레이저를 이용한 빠른 온도 상승 및 하강 공정을 통해 효율적인 인터커넥트 구현이 가능하며, 수직 열 분포를 활용하여 솔더 접합부(solder joint)의 변형과 열 응력을 효과적으로 최소화할 수 있다.

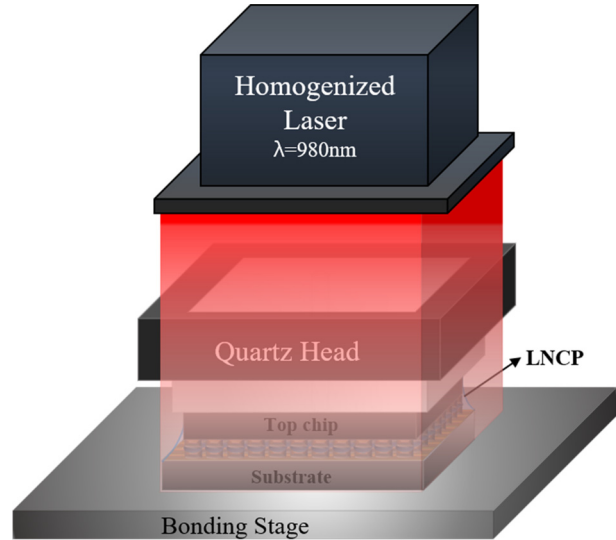


Fig. 1. Illustration of Laser-Assisted Bonding with Compression (LABC) technology.

또한, LABC는 상온에서 공정을 수행할 수 있어 정렬 정밀도를 크게 향상시키며, 에너지 효율이 뛰어나면서도 생산성과 신뢰성을 향상시키는 솔루션으로 주목받고 있다[7-11].

일반적으로 사용되는 솔더 페이스트(solder paste)는 가공 중 점도를 유지하기 위해 용매(solvent)와 플럭스(flux)를 포함하고 있다. 온도가 상승하면 용매가 증발하여 솔더 페이스트의 중량이 감소하게 된다. 그러나, 증발된 용매는 솔더 접합부(solder joint) 내부의 공극(void)을 형성할 수 있으며, 이는 높은 불량률로 이어진다. 뿐만 아니라, 접합 공정 후 플럭스 잔여물을 완전히 제거하여 부식을 방지하기 위한 세정 공정(cleaning process)은 미세 피치 인터커넥트로 인해 더욱 어려워지고 있으며, 용매와 플럭스로 인해 발생하는 유해 가스(harmful fumes)는 친환경 제조 공정에 대한 요구 사항을 충족하지 못하는 문제를 야기한다[12-14]. 따라서, 짧은 레이저 조사 시간 내에서 반응할 수 있으며, 기존 플럭스를 대체할 수 있는 새로운 소재가 필요하다. 이를 해결하기 위해, 본 연구에서는 레이저 솔더 페이스트(Laser Solder Paste, LSP), 레이저 비전도성 필름(Laser Non-Conductive Film, LNCF), 레이저 비전도성 페이스트(Laser Non-Conductive Paste, LNCP)를 포함한 혁신적인 레이저 접합 소재를 개발하였다[2].

본 연구에서는 고대역폭 메모리(HBM)를 모사하기 위해 실리콘 칩과 기판 위에 30 μm 피치의 테이지 체인 범프(daisy chain bumps)를 형성하였다. 또한, 유리전이온도(glass transition temperature, Tg)가 각각 36.27°C와 51.23°C인 두 가지 LNCP-(A) 및 LNCP-(B)를 사용하였

으며, 이는 시차 주사 열량측정법(Differential Scanning Calorimetry, DSC)을 통해 측정되었다[15]. 이후, LABC를 이용하여 샘플을 성공적으로 접합하고, 그 성능을 평가하였다. 또한, 기존에 사용된 LNCP-(A)와 비교하여 유리전이 온도가 더 높은 LNCP-(B)의 신뢰성을 평가하기 위해 정밀 실험을 수행하였다. 이를 위해, 4-포인트 프로브(4-point probe) 및 데이지 체인(daisy chain)을 이용한 범프 저항(bump resistance) 측정, 본딩 접합부의 단면 분석(cross-sectional analyses), 그리고 신뢰성 시험 이후의 저항 변화 및 미세조직 변화 평가를 포함한 다양한 실험을 진행하였다. 본 연구는 LNCP-(A) 및 (B)의 반도체 패키징에서의 고신뢰성 응용 가능성을 평가하고, 그 적합성을 검증하였다.

2. 실험방법

2.1 테스트 구조 설계 및 제작

그림 2는 테스트 구조의 단면을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 테스트 구조는 탑 칩(top chip)과 기판(substrate)으로 구성되었으며, 두 구성 요소 모두 실리콘으로 제작되었다. 표 1에 정리된 바와 같이, 탑 칩의 크기는 7 mm × 11 mm이며, 두께는 400 μm이다. 범프 피치(bump pitch)와 폭(width)은 각각 30 μm 및 18 μm로 설계되었다. 실리콘

Table 1. Comprehensive specifications of test vehicle

	탑칩		기판	
칩 크기	7 × 11 mm ²		8.5 × 13 mm ²	
전체 범프 높이	Cu	8 μm	Ni	2 μm
	Ni	2 μm	Au	0.5 μm
	SnAg	8 μm		
RDL(Cu) 두께	3 μm			
칩 두께	400 μm			
범프 피치	30 μm			
전체 범프 개수	27,190			

칩의 인터커넥션 역할을 하는 3 μm 두께의 Cu 재배선층(Redistribution Layer, RDL)은 전해 도금(electroplating) 공정을 통해 형성되었다. 또한, 8 μm 두께의 Cu 필러(pillar)가 형성된 후, 확산 방지층(diffusion barrier)으로 2 μm 두께의 Ni층이 증착 되었으며, 최종적으로 8 μm 두께의 SnAg 솔더(solder) 층이 형성되었다. 기판의 크기는 8.5 mm × 13 mm이며, 두께는 탑 칩과 동일한 400 μm이다. 범프 피치와 폭 역시 탑 칩과 동일한 사양으로 설계되었다. 기판에는 3 μm 두께의 Cu RDL층, 2 μm 두께의 Ni층, 그리고 0.5 μm 두께의 Au층이 증착 되어 언더 범프 메탈라이제이션(Under Bump Metallization, UBM)을 형성하였

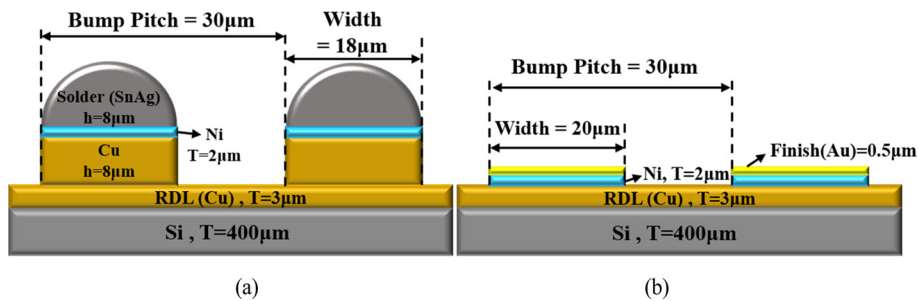


Fig. 2. Schematic diagram of test vehicle. (a) Top chip and (b) Substrate

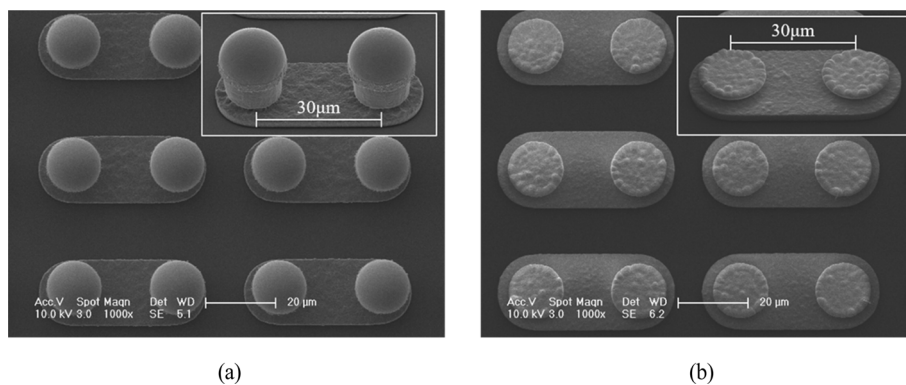


Fig. 3. SEM analysis of the test vehicle. (a) Top chip and (b) Substrate

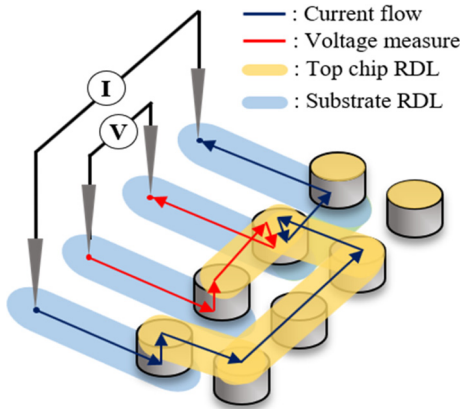


Fig. 4. Schematic of 4-probe structure

다. 본 테스트 구조에서의 총 범프 개수는 27,190개이며, 이는 탑 칩과 기판의 범프 배열 설계(bump array design)에 따라 결정되었다. 그림 3과 같이, 테스트 구조의 실제 형상을 분석하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscopy) 샘플을 제작하였다. 또한, 기판에는 데이지 체인(daisy chain) 측정을 위한 전극 패드(electrode pads)가 포함되어 있어, 모든 범프 간의 전기적 연결성을 검증할 수 있도록 설계되었다. 균일한 솔더 접합부를 보장하기 위해, 4-프로브(4-probe) 패턴이 적용되어 정밀한 단일 범프(single bump) 저항 측정이 가능하도록 설계되었다. 그림 4는 4-프로브 구조의 개략도를 나타낸다.

2.2 레이저 비전도성 페이스트(LNCP)의 특성 분석

본 연구에서 설계한 LNCP(Laser Non-Conductive Paste)는 에폭시(epoxy)기반으로, 환원제(reductant), 촉매(catalyst) 등의 첨가제(additives)를 포함하여 구성되었다. 기존의 플럭스 및 용매를 배제함으로써, 유해한 흡과 잔여물의 생성을 방지하여 소자의 부식을 유발할 가능성을 최소화할 수 있다. 또한, LNCP는 짧은 레이저 조사(laser

irradiation)시간 내에서 빠르게 반응하며, 후경화(post-curing)이후 언더필(underfill)역할을 수행하여 신뢰성 높은 물리적, 전기적, 화학적 보호 기능을 제공한다. 이를 통해 추가적인 세정 공정을 제거할 수 있으며, 친환경 공정(environmentally friendly)구현에도 기여할 수 있다[15].

본 연구에서는 LNCP-(A)와 LNCP-(B) 두 가지 LNCP를 제작하여 비교 분석을 수행하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 이 두 소재는 유리전이온도 (glass transition temperature, Tg)에서 차이를 보이며, 측정된 Tg값은 각각 36.27°C와 51.23°C이다. LNCP의 유리전이온도는 소재의 조성에 따라 바뀔 수 있는데, LNCP-(A)의 조성은 이관능기에폭시, 카복실계 환원제, 촉매로 구성되어 있으며, LNCP-(B)의 조성은 LNCP-(A)의 조성에 산무수물계 경화제를 추가하였다. 따라서 LNCP-(B)의 경화 후 가교밀도가 LNCP-(A)에 비해 더 높으며, 이에 따라 상대적으로 높은 Tg를 보여준다. Tg측정은 시차 주사 열량측정법(Differential Scanning Calorimetry, DSC)을 이용하여 수행되었다. Tg는 에폭시 기반 소재에서 매우 중요한 매개변수로, 점탄성(viscoelastic), 열팽창(dilatometric), 엔탈피(enthalpic)특성이 변하는 온도를 정의한다. 따라서, Tg는 에폭시 기반 소재의 열적(thermal), 유변학적(rheological), 기계적(mechanical) 거동을 평가하는 주요 지표로 활용된다[16,17]. 본 연구에서는 Tg가 본딩 성능과 신뢰성에 미치는 영향을 분석하기 위해 LNCP-(A)와 LNCP-(B)의 비교 실험을 수행하였다. 특히, LNCP-(B)의 높은 Tg가 기존의 LNCP-(A) 대비 신뢰성을 향상시킬 수 있는지를 평가함으로써, 향후 소재 최적화를 위한 기초 데이터를 제공하고자 하였다.

2.3 LNCP를 활용한 LABC 공정

본 연구에서는 LNCP를 적용하여 LABC 공정을 상온에서 수행하였다. SnAg 솔더의 용점을 고려하여, 공정 최대 온도를 265°C로 설정하였다. 따라서, 공정 조건 최적화를

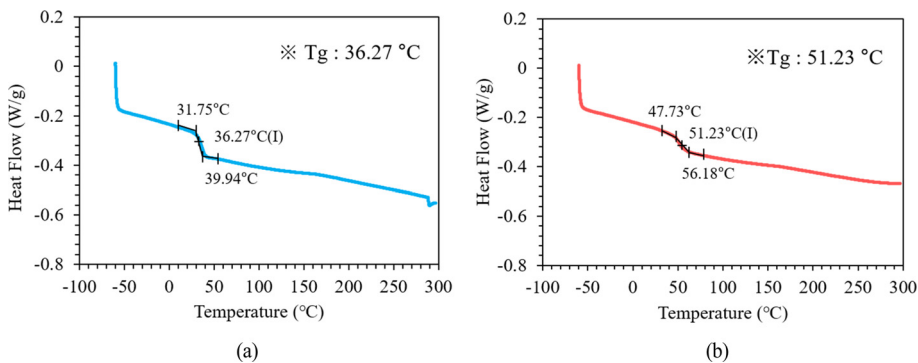


Fig. 5. DSC curves of (a) cured LNCP-(A) and (b) cured LNCP-(B)

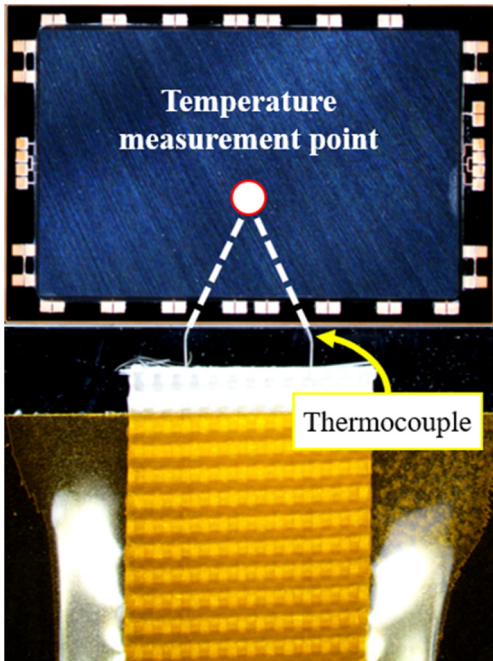


Fig. 6. Microscopic image depicting a test sample with thermocouple installed for temperature profile measurement

위해 열전대(thermocouple)를 삽입한 테스트 샘플을 제작하였으며, 레이저 조사시간은 7초로 고정하고 레이저 출력은 200 W에서 260 W까지 단계적으로 조절하며 실험을 진행하였다. 그림 6과 같이, 탑 칩과 기판 사이에 열전대를 삽입하여 온도 프로파일을 실시간 모니터링 하였으며, 최적의 공정 조건으로 레이저 출력 260 W, 레이저 조사시간 7초가 도출되었다. 열전대 샘플을 활용한 공정 조건 최적화의 세부 공정 조건은 표 2에 정리되어 있으며, 그림 7은 LABC 공정의 개략적인 흐름을 도식화한 것이다. (a) LNCP를 시린지(syringe)를 이용하여 정밀하게 기판 위에 도포(dispensing)한다. (b) LNCP가 도포된 기판을 장비 내 본딩 스테이지(bonding stage)에 배치한 후, 쿼츠 헤드(quartz head)가 탑 칩을 잡고 기판과 정렬한다. (c) 정렬이 완료되면, 쿼츠 헤드가 하강하여 약 0.26 MPa의 압력을 가하는 동시에 260 W 출력의 레이저를 7초간 조사하여 본딩을 수행한다. (d) 본딩이 완료된 샘플에서는 LNCP가 필렛을 형성하며, 언더필 역할을 수행하여 기계적 안정성을 제공한다. 마지막으로, 샘플을 160°C의 오븐에서 2시간 동안 후경화를 진행하여 공정을 완료하였다.

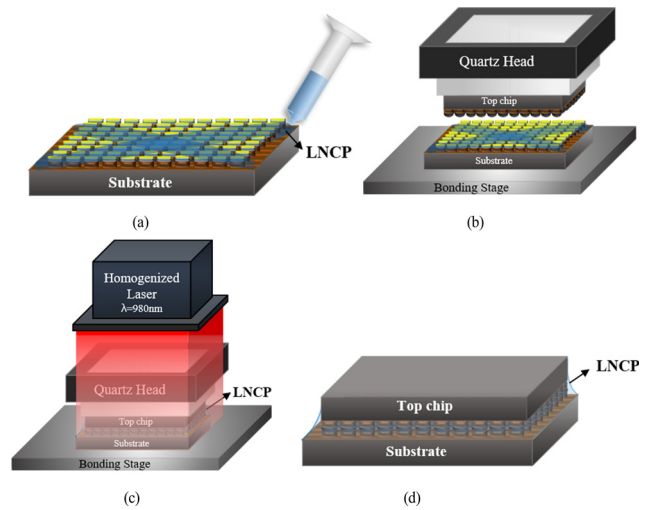


Fig. 7. Schematic diagrams of the LABC process flow using LNCP

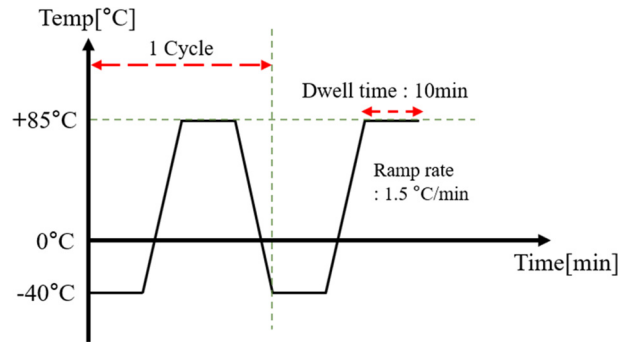


Fig. 8. Detailed temperature profile for TC test

2.4 신뢰성 평가 테스트

제작된 샘플의 신뢰성을 평가하기 위해 온도 사이클 (Temperature Cycling, TC) 시험을 수행하였다. TC 시험은 JEDEC 레벨 N 조건에 따라 진행되었으며, -40°C에서 +85°C까지 온도를 변화시키며 총 100, 500, 1000 사이클 동안 반복적으로 수행되었다. TC 시험의 구체적인 프로파일은 그림 8에 제시되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 프로파일 및 LABC 결과

앞서 언급한 바와 같이, SnAg 솔더의 용점을 고려하여 본 연구에서는 공정의 최대온도를 265°C로 설정하였다. 레

Table 2. Detailed process parameters applied during temperature profiling using a thermocouple sample

레이저 출력	레이저 조사시간	레이저 조사면적	접합 압력	최고 온도	스테이지 온도
200 W~260 W	7 s	15×15 mm ²	0.26 MPa	265°C	25°C

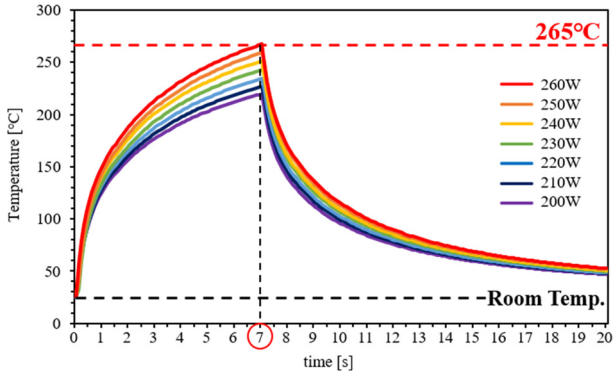


Fig. 9. The temperature profile was measured using the thermocouple test sample

이제 조사 시간은 7초로 고정하였으며, 레이저 출력은 200 W에서 260 W까지 변화시키며 온도 프로파일을 측정하였다. 그림 9는 열전대가 삽입된 테스트 샘플을 이용하여 측정한 온도 프로파일 결과를 나타낸다. 실험 결과를 바탕으로, 최대 온도 265°C를 만족하는 최적의 공정 조건은 레이저 출력 260 W, 조사 시간 7초로 도출되었다.

그림 10에 나타낸 바와 같이, LABC 공정 후 후경화 단계를 수행한 샘플에서는 필렛 형성이 확인되었으며, 특히 그림

10 (a)에서는 필렛 형성이 완전하게 이루어진 모습을 명확히 보여준다. 또한, 그림 11의 주사전자현미경 이미지 분석을 통해 30 μm 피치 인터커넥션이 보이드(void), 오픈(open), 쇼트(short) 등의 결함 없이 신뢰성 있게 형성되었음을 확인하였다.

한편, 그림 12에 제시된 바와 같이, 본딩 전 칩의 단면 분석을 수행하여 초기 IMC(Intermetallic Compound) 두께를 측정된 결과, 약 0.46μm로 확인되었다. 해당 초기 IMC는 솔더 리플로우(bump reflow) 공정 중 형성된 것으로, 본딩 과정에서의 추가적인 IMC 성장 정도를 평가하는 기준(reference)으로 사용되었다.

본딩 품질을 평가하기 위해 데이지 체인 구조를 이용하여 전기적 저항을 측정하였다. 각 조건에서 8개의 시편을 측정하여 평균값을 도출한 결과, LNCP-(A) 및 LNCP-(B) 모두 약 191.9Ω의 저항을 나타내었다. 이는 예상 저항 값인 187.9Ω와 약간의 차이가 있지만, 이러한 편차는 솔더 인터커넥션 형성 시 발생하는 미세한 변동성 또는 측정 지점에서의 접촉 저항(contact resistance) 등의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 단일 범프의 저항은 4-포인트 프로브를 이용하여 측정된 결과, 약 5.49 mΩ로 확인되었다. 예상 저항 값인 3.62 mΩ과 차이를 보였지만, 이 또한 전류 분포의 비균일성(non-uniform current distribution), 범프 형

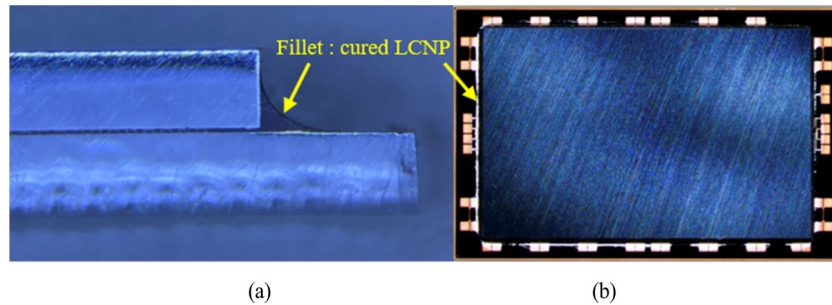


Fig.10. Fillet formation after post-curing: (a) Cross-sectional image of the bonded top chip and substrate. (b) Plane microscope image of the bonded chips

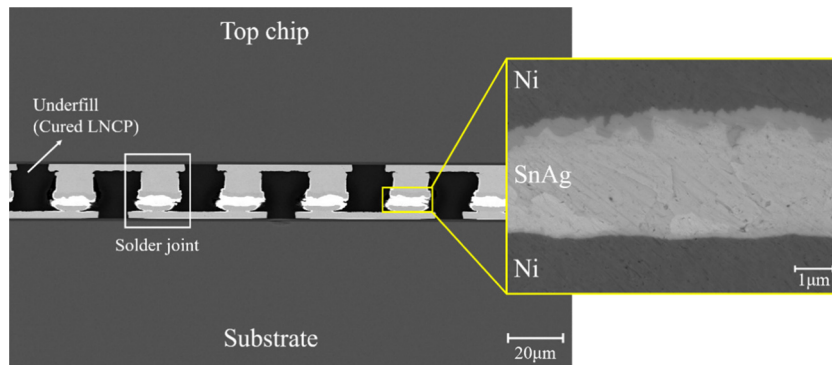


Fig. 11. Cross-sectional SEM image of the 30 μm-pitch interconnections

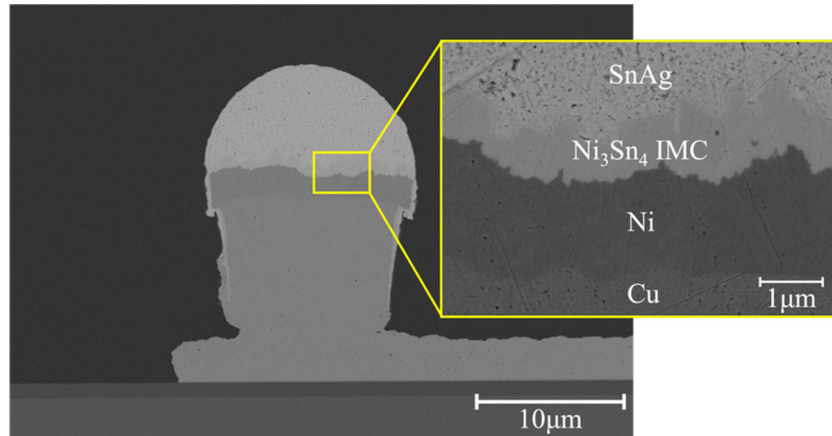


Fig. 12. Cross-sectional SEM image of the initial IMC, which formed during the solder reflow process

성 과정에서의 미세한 결함 또는 추가적인 저항 요소로 인해 발생한 것으로 추정된다. 그러나, 이러한 차이에도 불구하고 LNCP-(A) 및 LNCP-(B) 모두에서 일관된 저항 변화 경향을 나타내었으며, 본 연구에서 적용한 LABC 공정과 LNCP의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

3.2 솔더 접합부의 미세조직 분석

금속간 화합물(IMC)은 본딩 인터페이스에서 전기적 특성과 기계적 강도를 결정하는 데 중요한 역할을 한다. IMC의 성장 정도는 본딩 강도와 밀접한 관련이 있으며, 과도한 IMC형성은 취성을 증가시키고, 반대로 IMC 형성이 부족하면 계면 접착력이 약화될 수 있다. 본딩 인터페이스에서 형성된 IMC의 조성을 분석하기 위해 에너지 분산형 X선 분광 분석(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)을 수행하였다. EDS 선 스캔(line scan) 분석 결과, Ni, Cu, Sn, Au가 검출되었으며, 원자 조성은 각각 33.2 at% Ni, 8.01 at% Cu, 49.48 at% Sn, 9.31 at% Au로 나타났다.

이러한 원소 분포를 기준으로, 주된 IMC는 $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ 로 예상되며, 일부 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_3$ 가 존재할 가능성이 있다. 높은 Ni 함량은 Ni-Sn 기반 IMC가 우세하게 형성되었음을 시사하며, Cu의 포함은 $(\text{Ni,Cu})\text{-Sn}$ 복합 IMC 구조 형성에 기여할 수 있다. 또한, 검출된 Au는 기판(substrate)의 언더 범프 메탈리제이션(UBM) 층에서 유래한 것으로 판단되며, 본딩 과정에서 솔더 영역으로 확산된 것으로 추정된다. Au는 확산 계수(diffusion coefficient)가 높고 원자 질량이 상대적으로 낮기 때문에, 본딩 공정 중 고온 환경에서 Sn 매트릭스 내로 확산되었을 가능성이 크다. 일부 Au는 Sn과 반응하여 Au-Sn 기반 IMC(예: AuSn_4)를 형성할 가능성이 있지만, 비교적 낮은 Au 농도를 고려할 때, 독립

적인 IMC로 존재하기 보다는 Sn 매트릭스 내에서 고용체(solid solution) 형태로 존재할 가능성이 높다.

이러한 결과를 종합하면, 본딩 인터페이스에서 형성된 IMC는 주로 $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ 로 구성되며, Au는 IMC 형성에 크게 기여하지 않고 Sn 매트릭스 내에서 확산 원소로 존재하는 것으로 판단된다. 이는 Ni 기반 솔더 접합부에서 일반적으로 관찰되는 IMC 형성과 일치하는 결과이다. 자세한 EDS 분석 결과는 그림 13에 제시되어 있다.

본딩 인터페이스에서의 IMC 형성을 정량적으로 평가하기 위해, 단면 분석을 통해 IMC 두께를 측정하였다. 솔더 리플로우 공정 중에 형성된 초기 IMC는 평균 $0.46 \mu\text{m}$ 의 두께를 보였으며, 본딩 이후 총 IMC 두께는 $0.54 \mu\text{m}$ 로 증가하였다. 특히, LABC 공정에 의해 유도된 IMC 성장 정도를 평가하기 위해, 초기 IMC 두께를 제외한 순수한 IMC 성장량을 계산한 결과, 평균 $0.09 \mu\text{m}$ 증가한 것으로 확인되었다. 이는 열 압착 본딩(TCB)에서 관찰되는 IMC 두께($0.72 \mu\text{m}$)와 비교하여 현저히 낮은 수준이며[18], 본 연구에서 적용한 LABC 공정이 IMC 성장 거동을 효과적으로 제어함으로써, 과도한 IMC 형성으로 인한 취성 파괴(brittle fracture) 및 기계적 신뢰성 저하 문제를 완화할 수 있음을 시사한다. 측정된 IMC 두께는 인터페이스 안정성과 전기적 연결성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 균형을 유지하고 있음을 나타낸다.

3.3 신뢰성 평가 결과: LNCP에 따른 저항 변화 및 IMC 두께 변화

솔더 접합부의 장기 신뢰성을 평가하고, 반복적인 온도 스트레스 환경에서 LNCP-(A)와 LNCP-(B)의 성능 차이를 분석하기 위해 온도 사이클(Temperature cycle, TC)

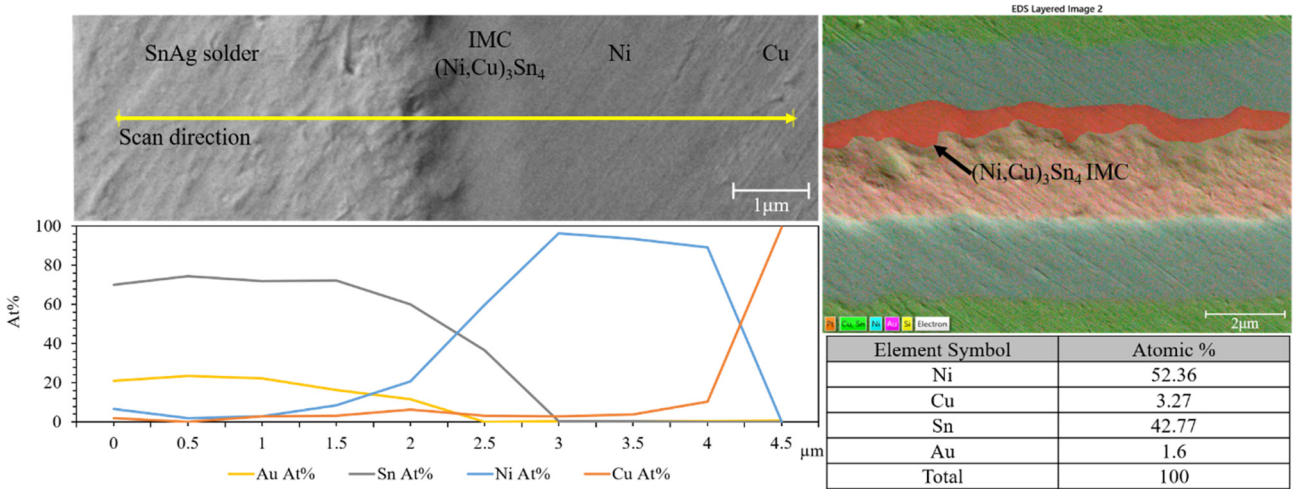


Fig. 13. EDS analysis of the bonding joint. The SEM image illustrates the detailed elemental composition, including the $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ IMC, formed at the bonding interface. The graph depicts the elemental distribution, highlighting the presence of $(\text{Ni,Cu})_3\text{Sn}_4$ IMC along with other key elements.

시험을 수행하였다. 이를 위해 데이지 체인 구조 및 단일 범프 저항의 변화를 측정하여 각 소재의 전기적 연속성 및 안정성을 비교하였다. LNCP-(A)의 경우, 온도 사이클링이 진행됨에 따라 저항이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 초기 저항은 $192.2\ \Omega$ 이었으나, 100 사이클 후 $358.9\ \Omega$ 로 증가하였으며, 500 사이클 및 1000 사이클 이후에는 전기적 연속성(electrical continuity)이 완전히 손실되어 개방회로(open-circuit) 불량 발생하였다. 반면, 유리전이온도(T_g)가 더 높은 LNCP-(B)는 초기 저항 $191.9\ \Omega$ 에서 100 사이클 후 $209.8\ \Omega$, 500 사이클 후 $220.8\ \Omega$, 1000 사이클 후 $246.6\ \Omega$ 로 증가하였으며, LNCP-(A)와 비교하여 상대적으로 안정적인 거동을 유지하였다. 이러한 저항 변화 차이는 LNCP-(B)가 온도 사이클 시험 조건에서 보다 높은 신뢰성을 제공함을 보여준다.

이와 유사한 경향은 단일 범프 저항에서도 관찰되었다. LNCP-(A)와 LNCP-(B)는 모두 초기 저항이 약 $5.5\ \text{m}\Omega$ 로 유사한 값을 나타내었다. 그러나, LNCP-(A)는 100 사이클 후 $90.1\ \text{m}\Omega$ 까지 급격히 증가하였으며, 500 사이클 이후에는 전기적 연속성이 완전히 손실되었다. 반면, LNCP-(B)는 보다 완만하고 제어된 저항 증가를 나타내었으며, 100 사이클 후 $10.1\ \text{m}\Omega$, 500 사이클 후 $17.6\ \text{m}\Omega$, 1000 사이클 후 $42.7\ \text{m}\Omega$ 를 기록하였다. 이는 반복적인 온도 스트레스 환경에서 T_g 가 솔더 접합부의 구조적 안정성을 유지하는 데 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다. 데이지 체인 및 단일 범프 구조의 저항 변화에 대한 세부 결과는 그림 14에 요약되어 있다.

온도 사이클 시험이 솔더 접합부에 미치는 영향을 분석

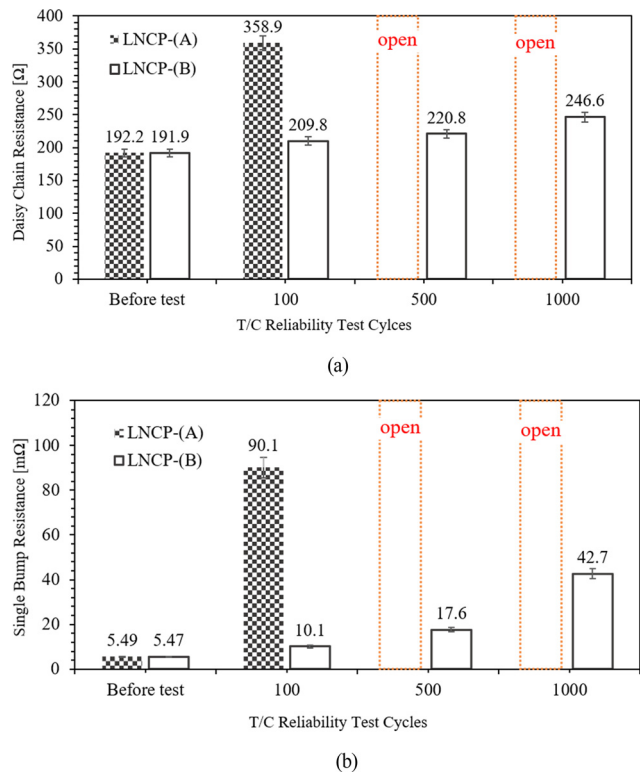


Fig. 14. Resistance changes during TC test: (a) Daisy chain resistance and (b) Single bump resistance

하기 위해 단면분석을 실시하였으며, 이를 주사전자현미경을 이용하여 수행하였다. 그림 15는 LNCP-(A)의 100, 500, 1000 사이클의 시험 후에 얻어진 단면 이미지를 보여준다. 500 사이클 이후부터 균열(crack)이 관찰되었으며, 이는 앞서 논의한 저항 측정 결과에서 확인된 개방회로

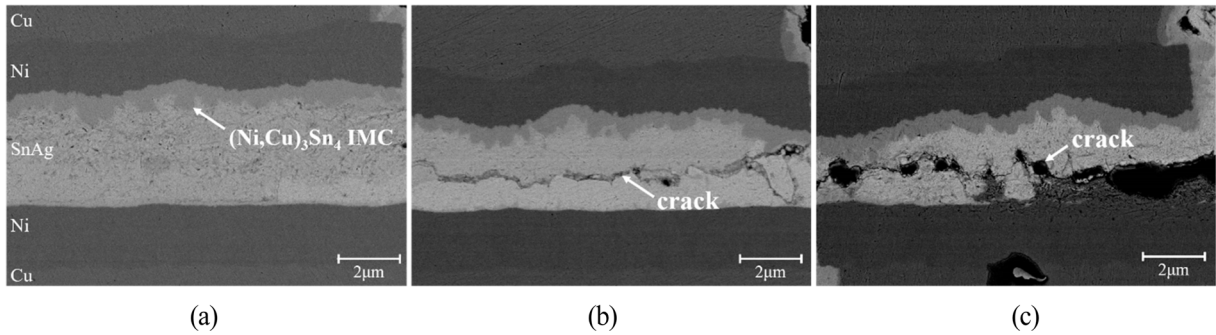


Fig. 15. Cross-sectional SEM images of bonded chips using LNCP-(A) after TC tests: (a) After 100cycles, (b) After 500cycles, (c) After 1000cycles

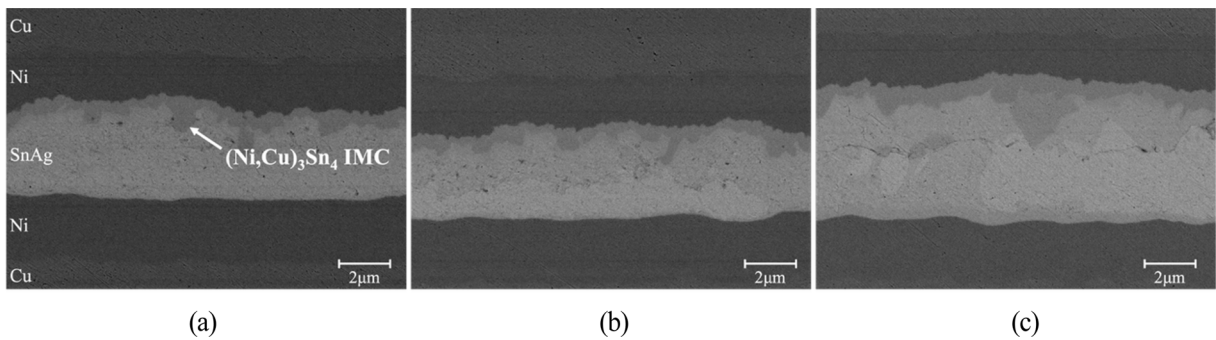


Fig. 16. Cross-sectional SEM images of bonded chips using LNCP-(B) after TC tests: (a) After 100cycles, (b) After 500cycles, (c) After 1000cycles

(open-circuit) 불량과 상관성이 있음을 보여준다.

LNCP-(B)를 이용하여 접합된 샘플의 단면분석 결과는 그림 16에 제시되어 있다. 500 사이클 이후에도 균열(crack)이 관찰되지 않아 우수한 구조적 안정성(structural integrity)을 나타내었다. 그러나, 1000 사이클 이후에는 미세한 균열(fissure)이 확인되었으며, 이는 동일한 조건에서의 저항 증가와의 연관성을 추가로 뒷받침한다.

그림 15 및 그림 16에서 IMC 두께를 측정하고, 본딩 전 초기 IMC 두께(그림 12)를 제외하여 본딩 및 신뢰성 시험에 의해 성장한 IMC 두께를 산출하였다. 측정 결과는 그림 17에 제시되어 있다. 측정 결과에 따르면, 본딩 직후 IMC 두께는 0.09 µm로 확인되었으며, 이는 열 압착 본딩(TCB)에서 형성되는 IMC 두께(약 0.72 µm)보다 현저히 얇은 수준이다[18]. 1000 사이클의 온도 사이클 시험 이후 IMC 두께는 약 0.55 µm까지 증가하였으나, LNCP-(A)와 LNCP-(B) 간의 IMC 두께 차이는 유의미하게 나타나지 않았다. 이러한 결과는 본 연구에서 적용한 본딩 공정이 과도한 IMC 형성을 효과적으로 제어하여 기계적 신뢰성을 저하시킬 수 있는 취성 금속간 화합물(brittle intermetallic layers)의 형성을 완화할 수 있음을 시사한다.

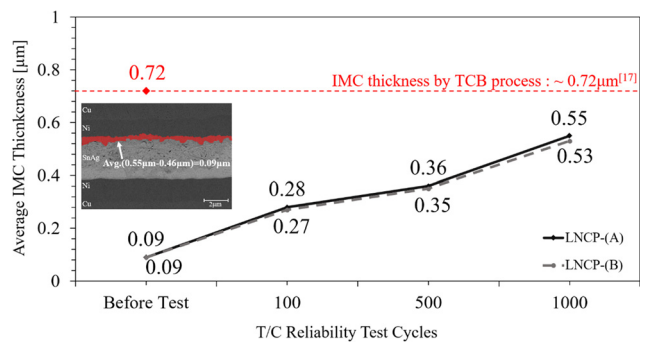


Fig. 17. Evolution of IMC thickness over TC test for LNCP-(A) and LNCP-(B). The IMC thickness gradually increased with the number of TC cycles, reaching approximately 0.55 µm and 0.53 µm, respectively, after 1000 cycles. The IMC thickness observed in the TCB process (~0.72 µm^[17]) is indicated for comparison

3.4 전단 시험 결과: LNCP에 따른 접합 강도 및 파단 특성 분석

SnAg 솔더 및 LNCP-(A), LNCP-(B)를 적용한 시편에 대해 전단시험을 수행하였다. 시험은 전단 속도 200 µm/s, 전단 높이 50 µm/s 조건에서 진행되었으며, 각각 6개의 시편에 대해 측정된 평균값을 기준으로 접합부의 기계적 강

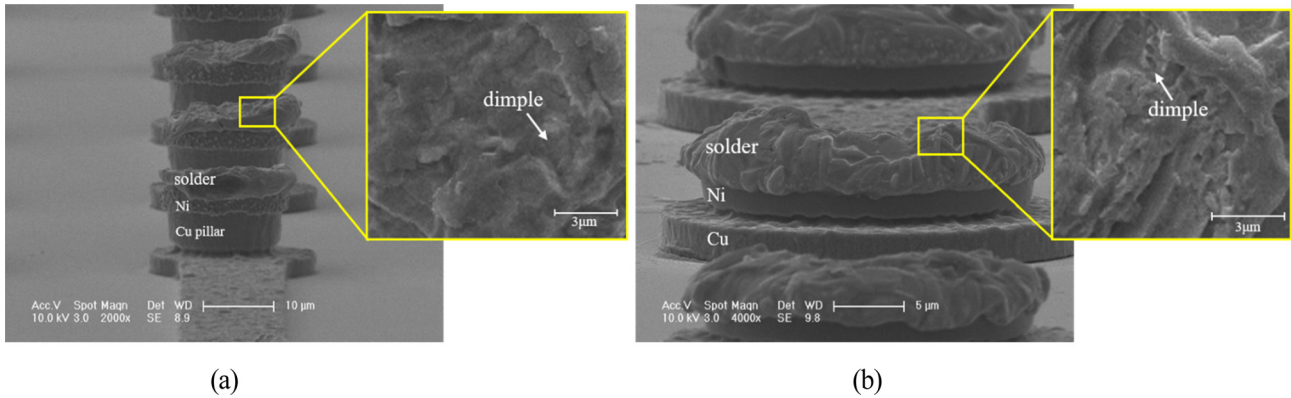


Fig. 18. SEM images of fracture surfaces after shear testing: (a) Top chip and (b) Substrate. Each set consists of a tilt view and a magnified plane view of the fracture region. Typical features of ductile fracture, such as dimple structures, are observed on both sides, indicating that the failure occurred through localized plastic deformation at the bonding interface.

도를 정량적으로 평가하였다. 시험 결과, 각 재료의 고유 전단강도는 SnAg 솔더 42.95 MPa, LNCP-(A) 38.77 MPa, LNCP-(B) 44.81 MPa로 확인됐다. SnAg 솔더 시편의 전단강도는 문헌에서 보고된 참조값인 43.88 MPa와 유사한 수준을 나타냈다[19,20]. 따라서 LNCP-(A)를 적용하여 본딩 한 시편의 전단 강도는 39.11 MPa, LNCP-(B)를 적용한 경우에는 44.66 MPa로 계산되었다. 전단시험 결과는 접합 구조물의 강도가 단순한 재료의 기계적 특성뿐만 아니라, 계면 결합 상태와 전체 접합 품질의 영향을 복합적으로 받는다는 점을 보여준다. LNCP-(B)를 적용한 시편에서는 가장 높은 전단강도가 확인되었으며, 이는 우수한 계면 결합 강도 및 접합 구조의 기계적 안정성을 반영하는 결과로 해석된다.

전단시험 이후의 파단 양상을 정밀 분석하기 위해 탐 칩과 기관 축 파단면을 각각 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 그림 18의 (a)와 (b)는 각각 탐 칩 및 기관 축의 파단면을 경사 관찰 이미지 (tilt view) 와 전단면 확대 이미지를 촬영한 SEM 이미지다. 먼저, 탐 칩 축 파단면(그림 18 (a))의 SEM 이미지에서는 전단 하중에 따른 연성 파단(ductile fracture)의 전형적인 특성이 확인되었다. 경사 관찰 이미지에서는 불규칙하고 복잡한 파단 형상이 나타났으며, 전단면 확대 관찰 이미지에서는 딩플(dimple) 구조가 넓게 분포된 양상이 관찰되었다. 이는 국부적인 소성 변형(plastic deformation)이 선행된 후 파괴가 발생하였음을 시사한다. 이와 유사하게, 기관 축 파단면(그림 18 (b))에서도 연성 파괴 특성이 뚜렷하게 나타났다. 경사 관찰 이미지와 전단면 확대 이미지에서 모두에서 다수의 미세한 dimple 패턴이 파단면에 걸쳐 분포하고 있었으며, cleavage facet, river pattern 등 취성 파괴의 전형적인 지

표는 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 SnAg 솔더 및 LNCP 기반 접합 구조가 전단 하중에 대해 충분한 소성 변형을 수반한 연성 파괴 거동을 보였음을 의미한다. 특히, 탐 칩과 기관 양측에서 모두 일관된 연성 파단 특성이 관찰되었다는 점은, 본딩 공정의 기계적 신뢰성과 접합 균일성을 함께 입증하는 중요한 근거로 해석될 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상온 LABC 공정의 최적화를 통해, LNCP의 Tg 특성이 미세 피치 인터커넥션의 신뢰성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 유리전이 온도가 각각 36.27°C, 51.23°C인 두 종류의 레이저 비전도성 페이스트(LNCP)-(A), (B)를 적용하여 30 μm 피치 솔더 범프 인터커넥션의 신뢰성과 성능을 평가하였다. LABC 공정은 저온 본딩을 성공적으로 구현하여, 열 변형(thermal stress) 및 웨이퍼 변형(warping)을 최소화하는 동시에 미세 피치 마이크로 범프의 정렬 정밀도를 향상시킬 수 있었다. 그리고 온도 사이클(Temperature Cycle, TC) 신뢰성 시험을 수행한 결과, Tg가 높은 LNCP-(B)는 LNCP-(A)보다 우수한 온도 사이클 시험 내구성을 나타내었으며, 장기 사이클에서도 저항 변화가 적어 뛰어난 전기적 안정성을 유지하였다. 또한, IMC(Intermetallic Compound) 성장 역시 효과적으로 제어되었으며, 본 연구에서 형성된 IMC 두께는 기존의 열 압착 접합(Thermocompression Bonding, TCB) 공정에서 관찰된 두께보다 일관되게 얇게 유지되었다. 또한, 전단시험을 통한 접합 구조의 기계적 신뢰성 평가 시험 결과, 모든 시편에서 연성 파단(ductile fracture)의 전형적인 특성이 관찰되었으며, 이는 접합부가 전단 하

중 하에서 충분한 소성 변형을 수반한 후 파괴되었음을 시사한다. 이러한 결과는 향후 고신뢰성 반도체 패키징 공정의 재료 설계 및 선택에 있어 방향성을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구를 통해 LNCP를 적용한 상온 LABC 공정은 기계적·전기적 신뢰성을 동시에 확보함으로써, 차세대 고집적 반도체 패키징에 적합한 확장 및 고성능의 본딩 솔루션으로서의 적용 가능성을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) (과제번호 RS-2024-00408495, RS-2025-02308294), 한국전자통신연구원 (과제번호 25YB1100) 연구비 지원에 의한 연구임.

REFERENCES

1. J. H. Lau, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* **12**, 228 (2022).
2. K.-S. Choi, Y.-S. Eom, K.-S. Jang, and H.-C. Bae, *Proc. 72nd Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.198, IEEE, San Diego, USA (2022).
3. T. Nonaka, Y. Kobayashi, N. Asahi, S. Niizeki, and K. Fujimaru, *Proc. Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.913, IEEE, Orlando, USA (2014).
4. K. Seyama, S. Wada, Y. Eguchi, T. Nakamura, D. Day, and S. Sugawa, *Proc. Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.392, IEEE, San Diego, USA (2018).
5. Y. Jung, D. Ryu, M. Gim, C. Kim, Y. Song, J. Kim, J. Yoon, and C. Lee, *Proc. Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.392, IEEE, Las Vegas, USA (2016).
6. K.-S. Choi, W. A. Braganca Junior, K.-S. Jang, H.-C. Bae, and Y.-S. Eom, *Proc. Int. Symp. Microelectron. (IMAPS)*, p.67, IMAPS, Raleigh, USA (2017).
7. L. A. Wentlent, M. Genanu, and T. Alghoul, *Proc. Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.425, IEEE, San Diego, USA (2018).
8. W. A. Braganca, Y.-S. Eom, K.-S. Jang, S. H. Moon, H.-C. Bae, and K.-S. Choi, *ETRI J.* **41**, 396 (2019).
9. K.-S. Choi, Y.-S. Eom, K.-S. Jang, and H.-C. Bae, *Proc. 69th Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.197, IEEE, Las Vegas, USA (2019).
10. J. Joo, G. Choi, C. Lee, I. Kye, Y. Eom, K. Jang, S. Hwang, J. D. Kim, and K. Choi, *SID Symp. Dig. Tech. Pap.* **53**, 1005 (2022).
11. Y. H. Moon, G.-M. Choi, J. Joo, K.-S. Choi, and K.-S. Jang, *Proc. 73rd Electron. Compon. Technol. Conf. (ECTC)*, p.1, IEEE, Orlando, USA (2023).
12. Z. Jun, Y. X. Fei, and S. Hailin, *Proc. 19th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. (ICEPT)*, p.834, IEEE, Shanghai, China (2018).
13. L. Shen, *Proc. Int. Conf. Mech. Autom. Control Eng.*, p.3634, IEEE, Wuhan, China (2010).
14. B. J. Han, Y. Kim, and J.-H. Lee, *Korean J. Met. Mater.* **61**, 679 (2023).
15. G.-M. Choi, K.-S. Jang, K.-S. Choi, J. Joo, H.-G. Yun, C. Lee, and Y.-S. Eom, *Polymers* **13**, 957 (2021).
16. K.-S. Jang, Y.-S. Eom, K.-S. Choi, and H.-C. Bae, *Polym. Int.* **67**, 1241 (2018).
17. Y.-S. Eom, G.-M. Choi, K.-S. Jang, J. Joo, C. Lee, J.-H. Oh, S.-H. Moon, and K.-S. Choi, *ETRI J.* **46**, 347 (2024).
18. C. Tang, Z. Chen, M. Fang, X. Xiao, G. Chen, and W. Zhu, *J. Mater. Res. Technol.* **18**, 1865 (2022).
19. X. Zhou, Y. Li, X. Yang, A. Xie, H. Wang, and C. Cao, *Proc. 23rd Int. Conf. Electron. Packag. Technol. (ICEPT)*, p.1, IEEE, Dalian, China (2022).
20. D. I. Jang, G. Kim, D. Kim, M. Oh, G. H. Kim, and Y. B. Park, *Korean J. Met. Mater.* **62**, 312 (2024).