



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2022년 8월

석사학위 논문

Sn-Co 및 Sn-Fe계 금속간화합물
형성을 이용한 고온안정성
천이액상소결접합에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 병 우

Sn-Co 및 Sn-Fe계 금속간화합물
형성을 이용한 고온안정성
천이액상소결접합에 관한 연구

Study on high temperature stability transient
liquid phase sintering bonding using Sn-Co
and Sn-Fe intermetallic compound formation

2022년 8월 26일

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 병 우

Sn-Co 및 Sn-Fe계 금속간화합물
형성을 이용한 고온안정성
천이액상소결접합에 관한 연구

지도교수 손 윤 철

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2022년 4월

조선대학교 대학원

용접 · 접합과학공학과

김 병 우

김병우의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 방 희 선 (인)

위 원 조선대학교 조교수 손 윤 철 (인)

위 원 조선대학교 조교수 박 철 호 (인)

2022년 5월

조선대학교 대학원

목 차

그림 목차	III
Abstract	VI
1장. 서론	1
1.1. 연구 배경	1
1.2. 연구 목표	2
2장. 이론적 배경	4
2.1. 전력 반도체	4
2.2. 파워 모듈	5
2.3. TLP(Transient Liquid Phase) Bonding	6
2.3.1. 분말을 이용한 TLP Bonding	6
2.4. TLP bonding 기술 동향	7
2.5. Sn+3.5Ag solder + Co,Fe particle	9
3장. 실험 방법	11
3.1. Sn-3.5Ag + Co particle paste 제조	11
3.2. Sn-3.5Ag + Fe particle paste 제조	11
3.3. 시편 준비	14
3.4. 미세조직 관찰	15
3.5. 전단시험	16

4장. 실험 결과	17
4.1. Sn-3.5Ag + Co particle 1hr Bonding	17
4.2. Sn-3.5Ag + Co particle 2hr Bonding	22
4.3. Sn-3.5Ag + Co particle 3hr Bonding	26
4.4. Sn-3.5Ag + Co particle 상 분석	28
4.5. Sn-3.5Ag + Fe particle 1hr Bonding	30
4.6. Sn-3.5Ag + Fe particle 2hr Bonding	34
4.7. Sn-3.5Ag + Fe particle 3hr Bonding	37
4.8. Sn-3.5Ag + Fe particle 상 분석	39
4.9. Shear Test Analysis	40
5장. 결론	43
6장. 참고문헌	45

그 림 목 차

Fig. 1.1 Binary phase diagram (A) Sn-Co, (B) Sn-Fe	3
Fig. 2.1 Si, SiC 기반 전력반도체 소자 특징	4
Fig. 2.2 파워모듈에서의 신뢰성 문제	5
Fig. 2.3 TLP bonding 공정 모식도	6
Fig. 2.4 Sn/Cu,Ni joint image	8
Fig. 2.5Cu,Ni TLPS bonding 모식도	8
Fig. 3.1 (A) Sn-3.5Ag solder paste, (B) Sn-Co solder paste SEM 이미지	12
Fig. 3.2 Sn-Fe solder paste SEM 이미지	13
Fig. 3.3 페이스트 믹서(Paste Mixer, 대화테크, PDM-300)	13
Fig. 3.4 Sample 모식도	14
Fig. 3.5 접합 공정 Process	14
Fig. 3.6 Normal SEM : JSM7900F/JEOL	15
Fig. 3.7 Die shear tester : Dage, BT 4000	16
Fig. 4.1 (A) Sn-3.5Ag + Co particle 1시간 접합부 SEM 이미 지,(B) Sn-3.5Ag + Co particle 1시간 접합부 SEM 이미지(×3000)	18
Fig. 4.2 Sn-3.5Ag + Co particle 1시간 접합부 SEM 이미지 (×1000)	19
Fig. 4.3 Point analysis of EDX for Sn-3.5Ag+Co paste	20
Fig. 4.4 (A) EPMA line scan of Sn-Co 1hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Co 1hr sample	21
Fig. 4.5 Sn-3.5Ag + Co particle 2시간 접합부 SEM 이미지	23

Fig. 4.6 Sn-3.5Ag + Co particle 2시간 접합부 SEM 이미지 (×1000)	23
Fig. 4.7 Point analysis of EDX for Sn-3.5Ag+Co paste	24
Fig. 4.8 (A) EPMA line scan of Sn-Co 2hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Co 2hr sample	25
Fig. 4.9 Sn-3.5Ag + Co particle 3시간 접합부 SEM 이미지	26
Fig. 4.10 Sn-3.5Ag + Co particle 3시간 접합부 SEM 이미지 (×1000)	27
Fig. 4.11 EPMA line scan of Sn-Co 3hr sample	27
Fig. 4.12 XRD patterns of the Sn-3.5Ag/Co paste	29
Fig. 4.13 Sn-3.5Ag + Fe particle 1시간 접합부 SEM 이미지	31
Fig. 4.14 Sn-3.5Ag + Fe particle 1시간 접합부 SEM 이미지 (×1000)	31
Fig. 4.15 Point analysis of EDX for Sn-3.5Ag+Fe paste	32
Fig. 4.16 (A) EPMA line scan of Sn-Fe 1hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Fe 1hr sample	33
Fig. 4.17 Sn-3.5Ag + Fe particle 2시간 접합부 SEM 이미지	35
Fig. 4.18 Sn-3.5Ag + Fe particle 2시간 접합부 SEM 이미지 (×1000)	35
Fig. 4.19 (A) EPMA line scan of Sn-Fe 2hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Fe 2hr sample	36
Fig. 4.20 Sn-3.5Ag + Fe particle 3시간 접합부 SEM 이미지 ..	38
Fig. 4.21 Sn-3.5Ag + Fe particle 3시간 접합부 SEM 이미지 (×1000)	38
Fig. 4.22 XRD patterns of the Sn-3.5Ag/Fe paste	39
Fig. 4.23 Measured shear stresses of DBC/Chip joints	41

Fig. 4.24 Shear strength of joints (a)Ag sintered,(b)Sn-Ni
 TLPS,(c) Sn-Cu TLPS 41
 Fig. 4.25 Fractured surface of Chip/DBC joints 42
 Fig. 4.26 Fractured surface corss scction of chip/DBC joints ..
 42

ABSTRACT

Study on high temperature stability transient liquid phase sintering bonding using Sn-Co and Sn-Fe intermetallic compound formation

Kim Byung Woo

Advisor : Prof. Sohn Yoonchul, Ph D.

Department of Welding and Joining

Science Engineering

Graduate School of Chosun University

In this study, a study was conducted to evaluate the manufacturing and characteristics of power semiconductor chip bonding paste that can be used at high temperatures. The Sn-Co paste and Sn-Fe paste were prepared by varying the particle content in consideration of printability.

Observation of the microstructure change of the junction showed that Sn remained in the junction for 1 hour, causing a problem, and a sufficient reaction between Sn and the particles occurred in the junction for 2 hours and 3 hours. In addition, a mechanical strength test according to the change in process time was performed. As a result of bonding strength

measurement, it was measured at 25-30 Mpa and high shear strength was observed. After the TLPS bonding process, the bonding part was composed of Sn-Co, Ni intermetallic compounds, Sn-Fe, and Ni intermetallic compounds, respectively, and voids were formed in the bonding part regardless of the process time.

1. 서 론

1.1 연구 배경

탄소 배출 저감 및 연비규제 강화로 인해 친환경 자동차에 대한 관심이 크게 증가하였고 미국, 중국 뿐 아니라 국내 내연기관 자동차 회사들도 친환경 자동차에 대한 관심이 높아졌다. 전기차(electric vehicle, EV)와 하이브리드 차(hybrid electric vehicle, HEV) 생산이 늘어나면서 그에 사용될 고성능 전장부품이 증가하면서 각 전장부품에 적절한 전력으로 바꿔줄 수 있는 파워모듈 수요가 급증하였다. 자동차용 파워모듈은 고온과 같은 환경에서 견딜 수 있는 높은 신뢰성이 요구된다. 지금까지 사용되던 기존 실리콘(Si)기판을 대체해 고전압, 고전류 환경에서 고효율화를 위해 실리콘 카바이드(SiC), 와이드 밴드갭(WBG) 개발이 활발하게 진행 중이다.[1,2] 파워모듈 반도체는 구동시 많은 열이 발생하며 작동온도가 250℃ 이상으로 기존에 사용하던 Sn-Ag-Cu(SAC) solder의 사용이 불가능하기 때문에 고온 작동온도를 장시간 견딜 수 있는 높은 신뢰성을 갖는 접합소재의 적용이 필요하다.[3] 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 솔더링을 대체 할 접합 방법으로 Ag 또는 Cu 분말을 이용한 소결 접합 기술(Sintering) 또는 Sn-Au계 솔더, TLP(Transient Liquid Phase) 접합 기술 등 다양한 접합법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다.[4,5,6] 다양한 기술들 가운데 최근 Sn 및 In과 같은 저융점 분말 소재를 고용점 금속 분말 재료와 반응하여 금속간 화합물(Intermetallic Compound, IMC)을 형성시키는 TLPS(Transient Liquid Phase Sintering) bonding 기술이 관심을 끌었다.[7,8] TLPS bonding 기술은 저융점 금속분말과 고용점 금속 분말을 혼합하여 페이스트로 제작하거나 고용점 금속 분말에 저융점 금속을 코팅하는 Core-Shell 페이스트를 제작하여 기존 솔더와 공정과정이 유사하여 기존 패키징 제조공정과 호환성이 좋다.[10]

1.2 연구 목표

SiC 시스템이 양산 적용되기 위해서는 전체 비용의 대부분을 차지하고 있는 SiC 파워모듈 가격이 절반이하로 낮아져야 하며, 이에 다서 기존 사용되었던 Ag 소결 본딩도 다른 소재로 대체되어야 한다. Ag 소결 본딩은 가격이 비쌌 뿐 아니라 접합 시간 또한 길어 공정상 이점은 떨어진다. 이에 Sn을 기반으로 고용점금속(Cu, Ni 등)과 반응하여 접합부를 형성하는 TLP(Transient Liquid Phase)접합에 대한 많은 연구가 진행중이다.[11, 12, 13, 14]

접합부를 Sn/Ni 금속분말을 사용하여 TLPS 접합방법으로 Ni/Sn IMC로 형성하여 접합부 신뢰성 연구 결과가 보고된 바 있고[15, 16, 17] 또한 Cu/Sn 금속분말을 사용하여 Cu/Sn IMC로 접합부를 형성하는 연구 결과가 보고된 바 있다.[18, 19, 20] 연구 결과 각각 Ni_3Sn_4 (융점 : $798^{\circ}C$), Cu_6Sn_5 (융점 : $408^{\circ}C$)로 파워모듈 작동온도보다 높은 융점으로 접합부에 사용 가능하다.

이에 Sn과 반응하여 형성되는 금속간 화합물(Intermetallic Compound, IMC)을 조사하여 그 중 융점이 $300^{\circ}C$ 이상인 금속 원소를 조사하여 실험 재료로 선정하였다. Sn-Co, Sn-Fe 상태도는 Fig. 1.1에 나타내었다.[21, 22] 결론적으로 본 연구에서는 기존에 사용되던 페이스트인 Sn-3.5Ag paste에 금속 분말인 코발트(Cobalt), 철(iron) Particle을 적절한 비율로 혼합하여 페이스트를 제작하여 칩 접합을 진행하였다. 각각의 접합부는 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)과 에너지 분산 스펙트럼(Energy dispersive X-ray, EDX)을 이용하여 미세구조 및 성분을 분석하였다.

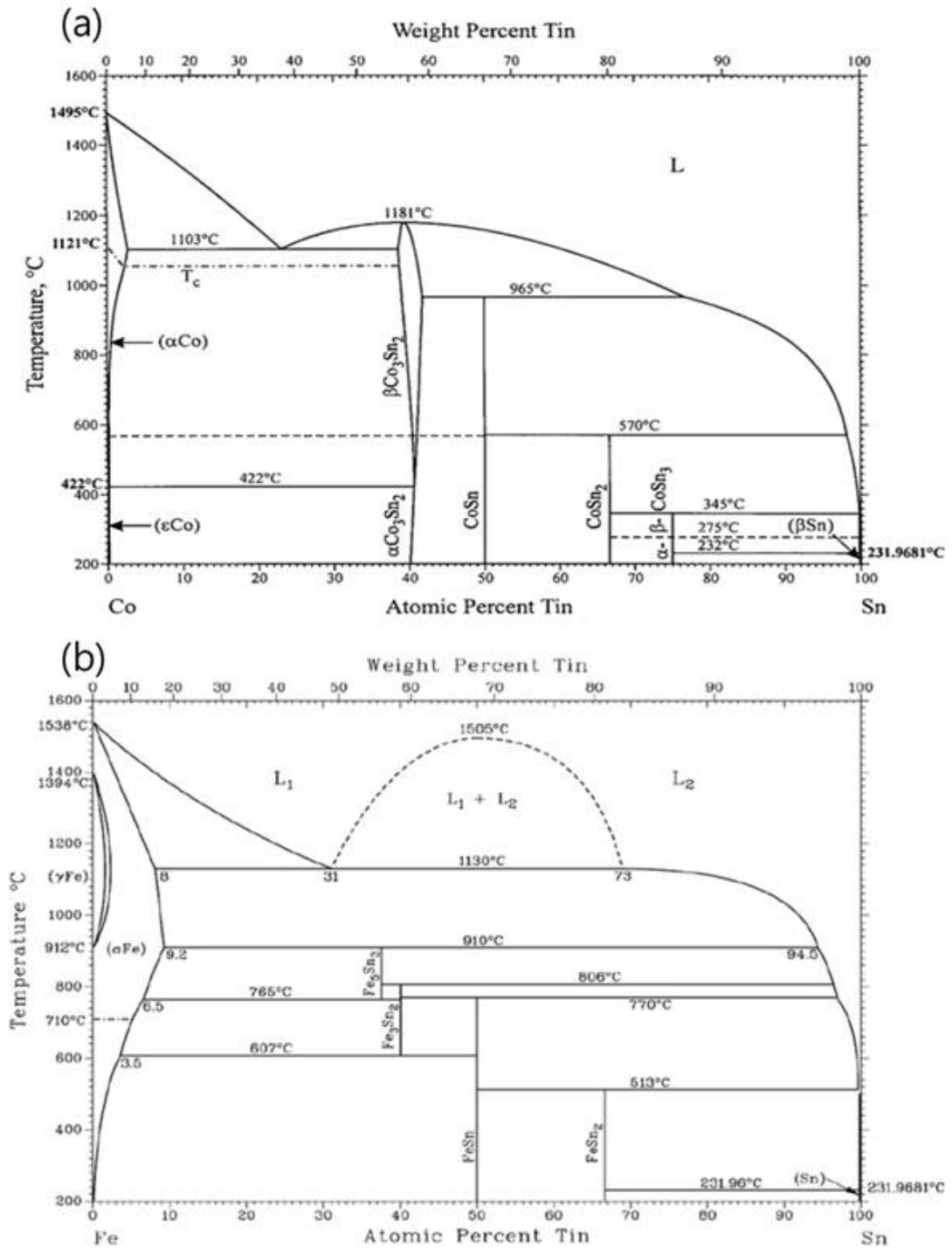


Fig. 1.1 Binary phase diagram (a) Sn-Co,[21] (b) Sn-Fe.[22]

2. 이론적 배경

2.1 전력 반도체

전력 반도체는 에너지를 효과적으로 사용 가능하며, 전력공급 및 전력변환 장치의 크기를 획기적으로 감소시킬 수 있다. 일반 반도체에 비해 고내압, 고신뢰성화가 요구되며 컴퓨터, 통신, 가전, 산전 및 전자 애플리케이션에 적용되며 최근 모바일기와 전기자동차의 개발과 함께 수요가 급증하고 있다. 기존에 Si 기반의 전력반도체가 대부분 사용되어 왔지만 SiC 전력 반도체는 넓은 밴드갭, 높은 절연 내압, 내열성이 우수하다. [23] Si, SiC 기반 전력반도체 소자의 특징을 Fig. 2.1에 나타내었다. 전력반도체는 일반반도체와 달리 고전압 대전류용 고신뢰성 패키징 기술이 필요하다. 전기적, 열적으로 약화된 와이어 본드가 칩과 분리되는 현상으로 칩 오작동이 발생하여 신뢰성 문제의 해결이 필요하다.

종류	기술현황	특징
Si	<ul style="list-style-type: none"> 소자 : MOSEFETs(LDMOS, IGBT), Discrete 공정 : BCD 공정 응용분야 : high Vlotage 전력반도체 분야 	<ul style="list-style-type: none"> 장점 : CMOS 호환성 높음, 공정 용이 단점 : 고전압(~700V 이하), Band Gap(1.12eV)
SiC	<ul style="list-style-type: none"> 소자 : Schottky, SiC MOSFET, Discrete 공정 : CMOS 공정 비호환성 응용분야 : high Vlotage 전력반도체 분야 	<ul style="list-style-type: none"> 장점 : 고전압 소자(~1000V), Band Gap)2.86~3.2eV) 단점 : 고생산단가, Si 회로와 SiC 소자와의 이종 접합기술 어려움

Fig. 2.1 Si, SiC 기반 전력반도체 소자 특징 [23]

2.2 파워 모듈

파워 모듈은 전력 반도체의 한 종류로 전자제품에 필수적으로 사용되며, 전력공급 및 전환 등의 역할을 한다. 소자 종류에 따라 종류가 나누어지게 되며 사용되는 반도체는 MOSFET(Metal oxide semiconductor field effect transistor) 모듈, IGBT(Insulated gate bipolar transistor) 모듈, Diode 모듈 등이 있다. 파워 모듈은 전력반도체 소자 및 패키징 소재의 모듈 직접화, 특성시험, 제조공정기술 및 신뢰성 평가 기술등의 주요 기술을 통해 실현되며 하이브리드 및 전기차에 적용되는 파워모듈은 고온 및 진동 등 열악한 환경에서 작동하기 때문에 높은 신뢰성이 요구된다. Fig. 2.2은 파워 모듈의 주요 신뢰성 위치를 나타내었으며 파워 모듈의 주로 발생하는 신뢰성 위치는 기판과 기판, 칩과 기판을 연결하는 접합부분으로 접합 소재의 선택과 열 문제 해결이 파워 모듈의 신뢰성과 내구성에 큰 영향을 끼치는 것을 보여 준다.[3,24]

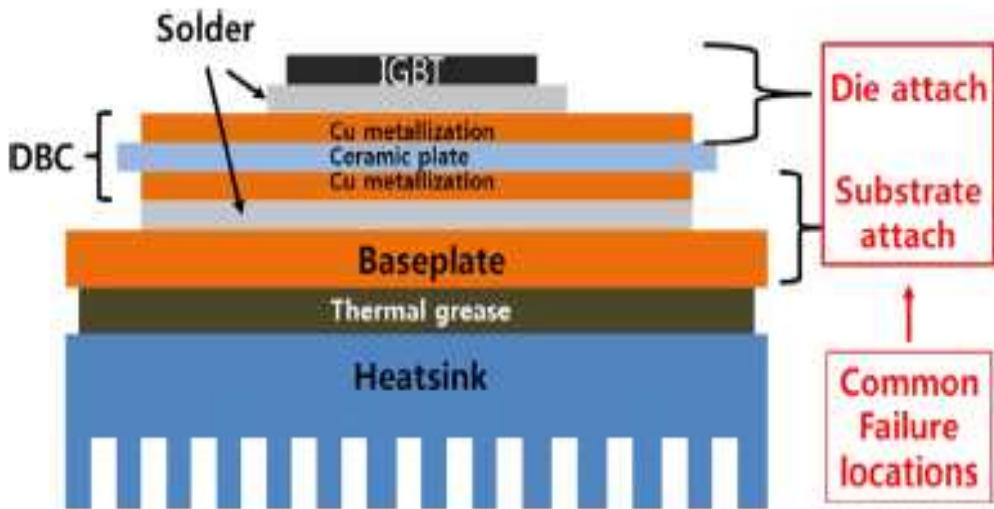


Fig. 2.2 파워모듈에서의 신뢰성 문제

2.3 TLP(Transient Liquid Phase) Bonding

TLP(Transient Liquid Phase) Bonding은 천이액상 접합으로 최근 주목받는 접합 기술로 솔더링 기술과 확산 접합을 조합하여 상대적으로 저온접합을 가능하게 실현한 공정이다. 전통적인 TLP 접합은 Fig. 2.3에 나타낸 것과 같이 접합 전 저융점 재료와 고용점 재료가 샌드위치 구조를 가진다. 그 후 온도가 상승함에 따라 저융점 재료의 용융, 확산, 금속간 화합물 형성등의 단계를 거치면서 두 기판의 접합을 가능하게 한다. 접합부의 균일한 금속간 화합물 형성하기 위해 추가적인 열처리 공정이 필요하다. 모재사이에 용가재를 삽입하고 가열,가압하여 일시적으로 액상을 형성시키는 것은 솔더링의 접합과정과 동일하지만, 접합온도를 유지하여 융점저하원소를 확산시켜 액상을 등은 응고시키는 것은 확산 접합과 유사한 과정이다. [3, 10]

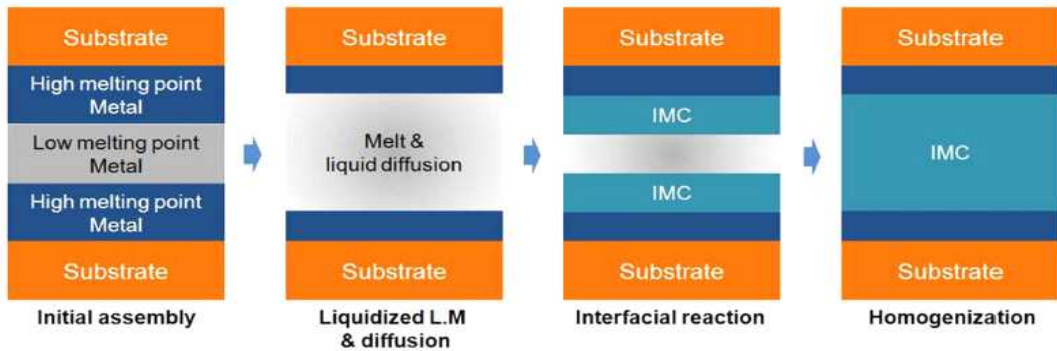


Fig. 2.3 TLP bonding 공정 모식도 [10]

2.3.1 분말을 이용한 TLP(Transient Liquid Phase) Bonding

최근에는 전통적인 TLP bonding의 샌드위치 구조가 아닌 재료의 분말을 이용한 TLP bonding 기술도 연구가 활발히 진행중이다. [15, 18] 페이스트 형태로 제작하여 고용점 분말과 Sn과 같은 저융점 분말을 혼합하여 페이스트 형태로 제작하거나 용

점 금속 분말에 저융점 금속을 코팅하는 Core-Shell 페이스트를 제작하여 기존 솔더와 공정과정이 유사하여 기존 패키징 제조공정과 호환성이 좋다.

2.4 TLP(Transient Liquid Phase) Bonding 연구 동향

TLP bonding 기술은 최근 많은 연구가 진행되고 있으며 특히 분말을 이용한 TLP bonding 기술이 활발히 개발 중이다. 주로 사용된 Metal particle의 종류는 전자 패키징에 주로 사용되는 Cu(구리), Ni(니켈) 이었다

Sn-Cu 연구에 따르면 각각의 분말을 이용하여 페이스트를 제작하고 TLPS 접합 공정동안 형성된 Cu_6Sn_5 상은 Cu_3Sn 상으로 변형되어 접합강도가 약간 증가하고 접합 강도는 reflow 후 약 40Mpa의 강도이며 접합부는 Cu-Sn 금속간 화합물로 형성되었다.[25,26] 이외에 Cu ball에 Sn을 도금하여 Cu-Sn core/shell 구조를 가지는 분말을 사용한 TLPS 연구에서도 Sn은 완전히 소모되어 접합부는 Cu-Sn IMC 및 남은 Cu 입자로 구성되었으며 안정적이 계면 미세구조와 우수한 기계적 강도를 얻었다고 보고되어진다.[9,27,28,29]

Sn-Ni 보고된 연구에 따르면 TLPS 접합 공정 후 접합부는 Ni-Sn 금속간화합물과 반응하고 남은 Ni 입자들로 구성되었고 접합 온도가 올라감에 따라 전단 강도는 증가하는 경향을 나타낸다. 270°C 온도에서 30분동안 TLPS 접합 후 전단강도는 약 30Mpa로 높은 전단 강도 값을 얻을 수 있었다.[15,16,30] 보고된 Cu/Sn, Ni/Sn TLPS 접합부 사진을 Fig. 2.4에 나타내었다.

상용화된 솔더볼과의 TLPS 접합 연구에 따르면 SAC305(Sn-3Ag-0.5Cu) solder에 Cu, Ni metal particle를 첨가하여 TLP bonding한 실험이다. 실험에 대한 간략한 모식도를 Fig. 2.5에 나타내었다. 이 결과 Cu, Ni 모두 Sn과 반응하여 Sn-particle 금속간 화합물을 형성하였으며 Ni은 Cu보다 확산 속도가 느려 잔여 Ni particle도 관찰되었다. 그러나 본딩 시간에 상관없이 공극(Void)이 형성되어 전단강도값이 떨어지는 결과에 이르렀다.[31]

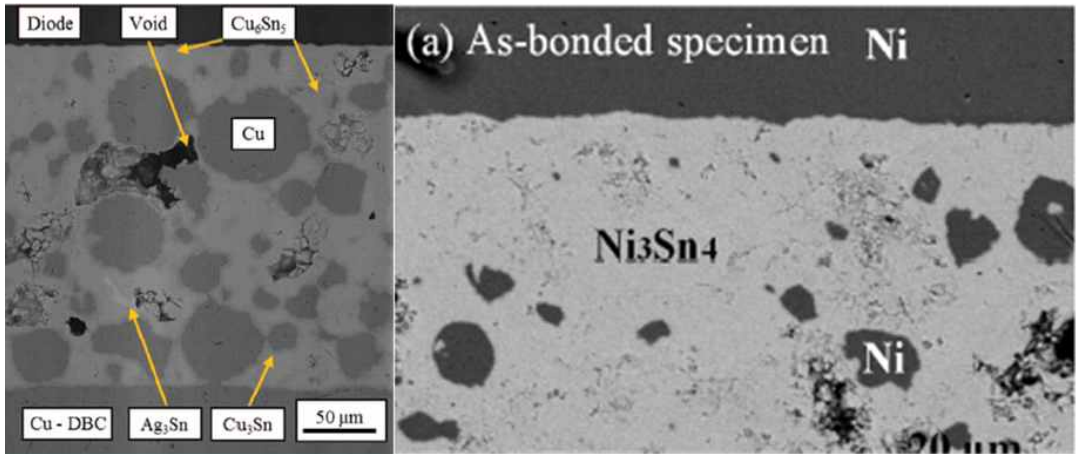


Fig. 2.4 Sn/Cu, Ni joint image. [26,30]

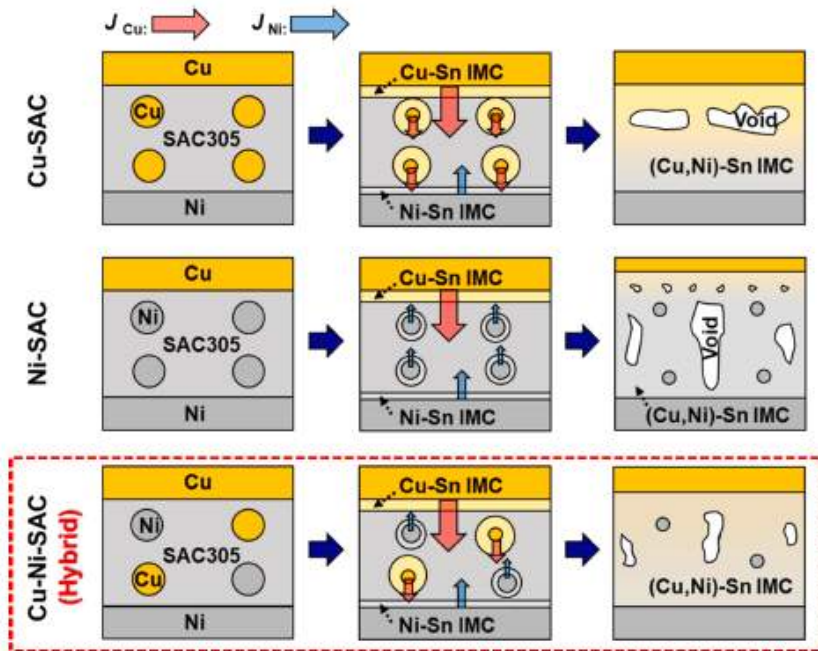


Fig. 2.5 Cu, Ni TLPS bonding 모식도. [31]

2.5 Sn solder + Co,Fe particle 연구 동향

Sn-3.5Ag solder에 Co,Fe particle을 추가하여 솔더의 특성 연구가 진행된 바 있다. 먼저 Kim D.H.등은 Co 첨가서 솔더의 melting temperature를 낮추고 Cu 자리에 치환되어 IMC를 형성하여 기계적 성질을 향상 시키는 점을 토대로 Sn-3.5Ag solder에 Co particle을 0.01~0.7wt.% 소량 첨가하여 용융시켜 솔더볼을 만든 뒤 Ni-P 금속층과의 계면 반응을 연구하였다. Sn-3.5Ag-xCo 솔더를 Ni-P 와 반응 결과 기존 Sn-3.5Ag 솔더의 경우 전형적인 IMC spalling 현상을 관찰 할 수 있었으나 Co가 첨가된 경우 $(Ni,Co)_3Sn_4$ IMC로 확인되며 spalling 현상은 일어나지 않았으며 금속간화합물의 일부가 판상의 형태($Ni_{11}Co_3Sn_{36}$)로 변하는 것을 관찰했다고 보고되어있다. [32]

Z.Lai.등은 Co을 기판으로 Sn-10Bi 솔더와 반응시켜 계면 IMC층의 성장 거동을 연구하였다. 240℃에서 20~60분 반응하였고 그 결과 $CoSn_3$ IMC가 aging 시간과 온도가 증가함에 따라 증가하였으며 접합부의 전단강도는 58Mpa~82Mpa로 우수한 전단강도를 형성하였다. [33] X Bi 등은 SAC305 솔더를 Co 기판에 반응시켜 형성되는 $CoSn_2, CoSn_3$ 역학적 특성에 대해 발표하였다. 이 연구에서는 400℃에서 반응 시 $CoSn_2$ IMC가 형성되었으며 230℃에서 반응 시 $CoSn_3$ IMC가 형성되었고 $CoSn_2$ 의 기계적 특성이 $CoSn_3$ 보다 우수하며 Co-Sn IMC는 Cu-Sn IMC와 비교하여 솔더 조인트가 강하고 솔더와 기판 사이의 연결을 더 강하게 만들 수 있다고 보고하였다. [34]

G. Vakanas 등은 3D 상호연결에서의 Co-Sn 금속간 화합물의 형성 및 특성에 대해 연구하였고 Cu 기판위에 Co를 3 μ m두께로 전기도금 하여 Type 3 Sn-0.7Cu 솔더, Sn 솔더와 260℃에서 5분간 반응 후 200℃에서 4시간 열처리하였다. 관찰되는 금속간 화합물의 종류는 $CoSn_3$ 와 $CoSn_2$ 이며 $CoSn_3$ 와 Co 사이에서 $CoSn_2$ 가 성장하였고 금속간 화합물의 성장은 Co/Sn이 Cu/Sn, Ni/Sn 보다 빠르다고 발표하였다. [35]

또한 C.Wang등은 다양한 온도대에서의 Co/Sn 계면 반응을 연구하였다. 연구 결과에 따르면 327°C미만 온도에서 CoSn₃ 층이 관찰되었고 327°C 초과하였을 때 CoSn₂상이 관찰되었다. CoSn₂ + L(Sn) = CoSn₃로 상변화를 일으켰다고 보고되었다. [36]

Kim S. h.등은 solder에 Fe particle을 0.1~2.0wt.% 소량 첨가하여 금속 분말을 녹여 첨가제 SPS가 첨가된 Cu UBM과의 반응 시 Kirkendall void 형상에 대해 연구하였다. Sn과Cu가 반응 시 금속 원자의 확산 속도 차이에 발생하는 Kirkendall void가 Cu/Cu₃Sn 계면에 형성되는데 이는 기계적 신뢰성 감소에 영향을 끼친다. Fe particle을 첨가할 시 Cu/Cu₃Sn 사이 Kirkendall void가 감소함을 발표하였으며 150°C에서 240시간,960시간 열처리 후 Fe-Sn 금속간 화합물인 FeSn,FeSn₂가 관찰되었다. [37]

X wang 등은 Fe/Sn 금속간 화합물 성장 거동에 대해 연구 발표하였다. 300,350,400,500°C에서 1시간에서 최대 4시간까지 반응시켰다. Fe/Sn 계면에서 불규칙한 미세구조를 가진 FeSn₂ IMC층이 관찰되었으며 IMC층의 성장은 주로 Sn 샘플에서 일어났으며 각 공정 시간별 시간지수는 순서대로 n = 2.46, 2.37, 2.09, 1.99로 분석되었다. [38]

Y Huang등은 솔더와 Fe 계면 반응에 대해 연구하였다. 실질적인 솔더를 담은 솔더팻과 Sn 기반 솔더와 반응성을 연구한 결과 250,500°C에서 FeSn₂ IMC가 형성되었고 500°C에서 100시간 반응 시 FeSn₂ IMC에 다공성 및 스펀링 현상이 관찰되었다. [39]

3. 실험 방법

본 연구에서는 파워 모듈 패키징의 접합 재료로 사용되고 있는 Ag paste의 대체 재료로써 저융점 금속 Sn(주석)을 기반으로 Sn-Co, Sn-Fe 페이스트를 제조하여 분석하였다. 접합 시간에 따른 Sn-Co, Sn-Fe paste의 반응 및 특성을 비교하였다.

3.1 Sn-3.5Ag + Co particle paste 제조

Particle size 20~38 μm 인 Sn-3.5Ag Solder paste(BBien Tech)제품을 사용하였으며, 페이스트의 인쇄성을 고려하여 코발트(Co, Avention, 99.95%) 15 μm 사이즈의 particle을 10wt% 적용하였다. 입자의 분산을 위한 장비로써 페이스트 믹서(Paste Mixer, 대화테크, PDM-300)를 사용하여 균일한 Paste를 제조하였다. Fig. 3.1에 혼합 전 Sn-3.5Ag solder paste와 혼합 후 Sn-Co solder paste SEM 이미지를 나타내었다.

3.2 Sn-3.5Ag + Fe particle paste 제조

Particle size 20~38 μm 인 Sn-3.5Ag Solder paste(BBien Tech)제품을 사용하였으며, 페이스트의 인쇄성을 고려하여 아이언(Fe, Avention, 99.95%) 3 μm 사이즈의 particle을 15wt% 적용하였다. 입자의 분산을 위한 장비로써 페이스트 믹서(Paste Mixer, 대화테크, PDM-300)를 사용하여 균일한 Paste를 제조하였다. Fig. 3.2,3.3에 혼합 후 Sn-Fe solder paste SEM 이미지와 페이스트 믹서(Paste Mixer, 대화테크, PDM-300)를 나타내었다.

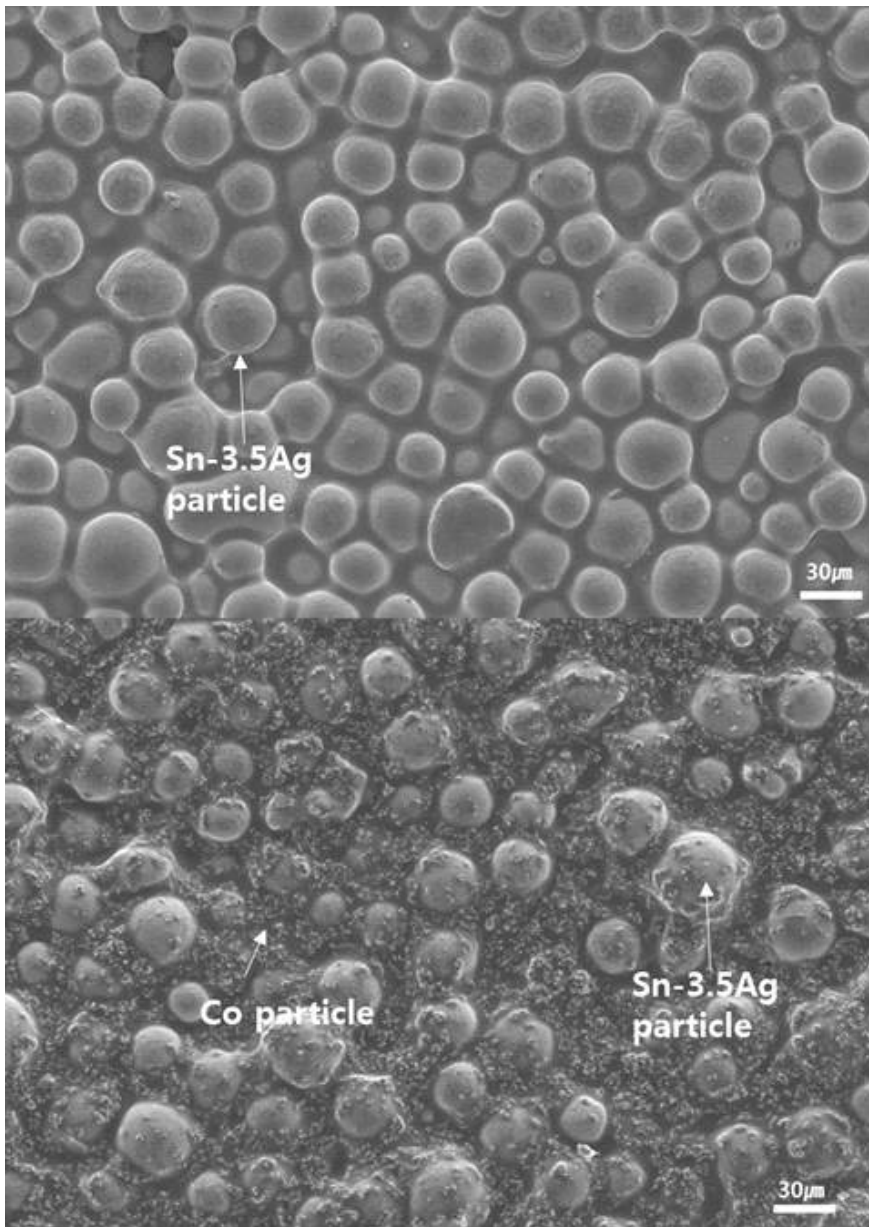


Fig. 3.1 (A) Sn-3.5Ag solder paste, (B) Sn-Co solder paste SEM 이미지

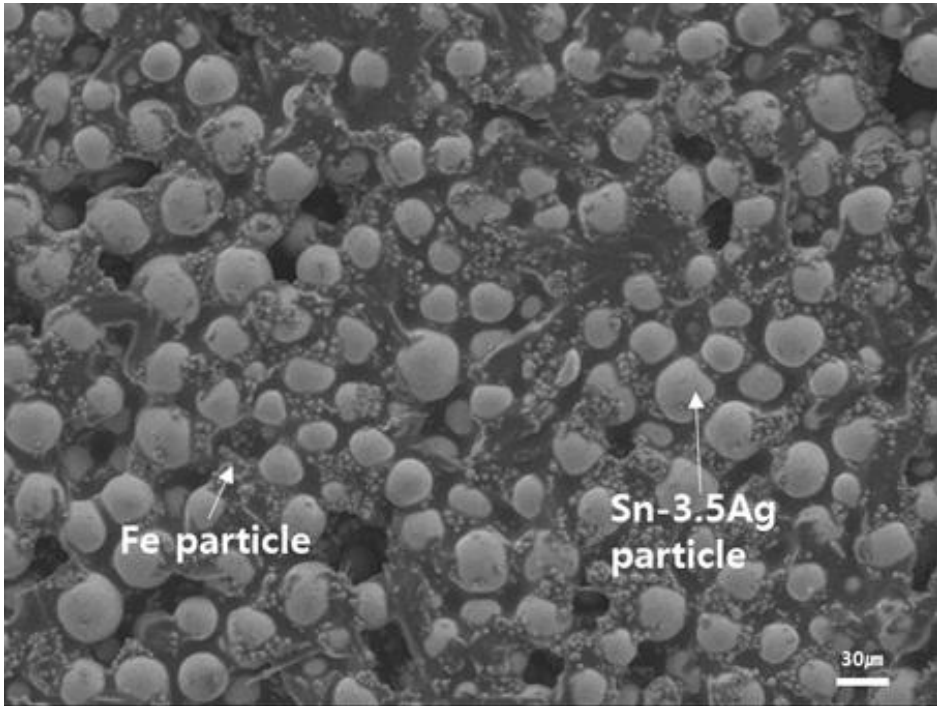


Fig. 3.2 Sn-Fe solder paste SEM 이미지



Fig. 3.3 페이스트 믹서(Paste Mixer, 대화테크, PDM-300)

3.3 시편 준비

시편은 두께 10 × 10 × 1.1mm 크기의 ENIG(Electroless Nickel Immersion Gold) 표면처리 된 DBC(Direct Bonding Copper)기판 위에 스크린 프린팅을 통해 30 μ m 두께로 페이스트를 도포한 후 Au(0.1 μ m)/Ni(P)(5 μ m) 표면처리 된 3 × 3 × 1mm Cu Chip을 올려 제작한 후 정밀다이접합장치(Tresky AG, T-3000-FC3)을 통해 접합 공정을 수행하였다. 접합 공정은 Sn-3.5Ag+Co particle의 경우 300 $^{\circ}$ C에서 10Mpa의 접합압력을 가해 1시간, 2시간, 3시간 진행 하였고 Sn-3.5Ag+Fe particle 은 1차로 진공 분위기로 250 $^{\circ}$ C에서 약 1분간 가열한 후 2차로 3 Mpa의 접합압력을 가해 1시간, 2시간, 3시간 진행하였다. Fig. 3.4,3.5에 샘플 모식도 및 공정을 나타내었다.

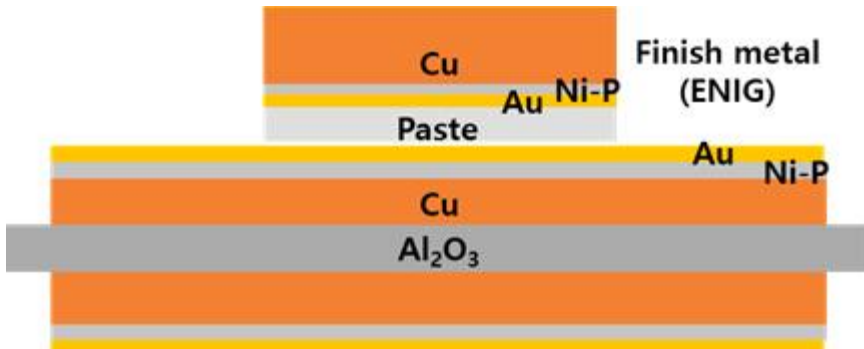


Fig. 3.4 Sample 모식도

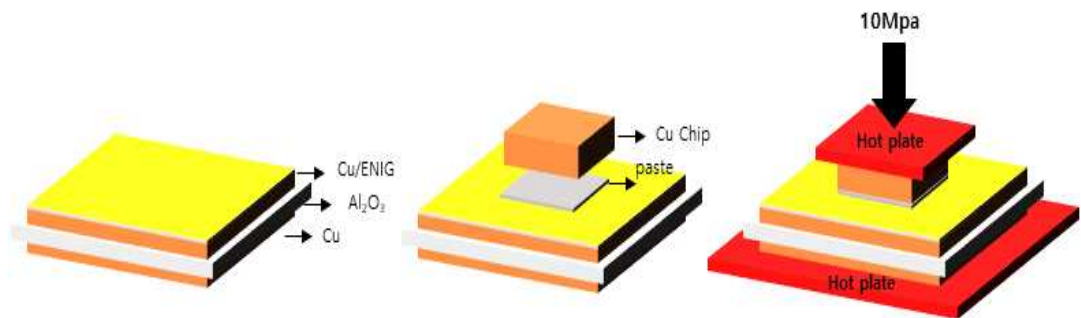


Fig. 3.5 접합 공정 Process

3.4 미세조직 관찰

접합부의 미세조직 관찰을 위해 광학 현미경(Optical Microscopy), 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하였으며 미세조직의 성분 분석을 위해 에너지 분산 스펙트럼(Energy dispersive X-ray, EDX), 전자빔 미세 분석법(Electron microprobe analysis, EPMA)을 사용하였다. 사용한 주사전자현미경(JSM7900F/jeol)을 Fig. 3.6에 나타내었다. 시편은 에폭시 마운팅 방법을 사용하여 마운트 하였다. 이후 단면 관찰을 위해서 #180, #400, #800, #1000, #1500, #2000 Sand Paper을 이용하여 폴리싱을 진행한 후, 3, 1 μ m Diamond Suspension을 사용하여 시편을 연마하였다. 폴리싱을 마친 시편은 주사전자현미경을 보기 위해 표면을 Pt(백금) 코팅을 진행 한 후 미세조직을 관찰 하였다.



Fig. 3.6 Normal SEM : JSM7900F/JEOL

3.5 전단시험

전함강도를 측정하기 위해 Fig. 3.7에 나타난 전단시험기(Dage, BT 4000)를 이용하여 강도시험을 실시하였다. Cu chip과 DBC의 접합부가 완전파괴가 일어날 때까지 전단응력을 가하였다. 시험을 실시 할 때 전단 팁의 높이는 100 μ m로 설정하였고, 전단속도는 200 μ m/sec로 실시하였다. 각 조건별 샘플당 총 4개 샘플의 전단 강도를 측정하여 평균값을 내었다.



Fig. 3.7 Die shear tester : Dage, BT 4000

4. 실험 결과

4.1 Sn-3.5Ag + Co particle 1hr Bonding

Sn-3.5Ag paste에 10wt% Co particle을 추가하여 300℃에서 1시간 접합 한 샘플의 접합부 미세구조 전체 SEM 이미지를 Fig. 4.1(A)에 나타내었다. 전체 접합부는 보이는 바와 같이 기판과 칩 사이 접합부가 잘 형성되었으나 부분적으로 큰 Void가 관찰되었다. 접합부의 미세구조를 촬영한 SEM 이미지를 각각 Fig. 4.2 (A)~(D)에 나타내었으며 Fig. 4.3에 접합부의 조성을 에너지 분산 스펙트럼(Energy dispersive X-ray, EDX)를 이용하여 분석한 결과를 나타내었다. Fig. 4.3을 통해 형성된 금속간 화합물의 종류는 Ni_3Sn_4 , $(Co,Ni)Sn_2$, Ag_3Sn 금속간 화합물이 형성된 것을 확인할 수 있다. Cu chip과 sub(DBC)의 경우 각각 Ni/Au, ENIG 표면처리를 하여 Ni layer와 Sn이 반응하여 Ni_3Sn_4 금속간화합물이 형성되며 Co particle과 잔여 Sn이 반응하여 칩과 기판 사이의 금속간 화합물은 $(Co,Ni)Sn_2$ 가 형성되었다. 시편은 Sn을 에칭 후 SEM 이미지를 촬영하였고 1시간 본딩시편의 경우 에칭 후 Co-Sn 금속간 화합물의 사이사이 경계구간이 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 접합 중 Sn이 반응하지 않고 남아 Co-Sn 금속간 화합물 사이에 존재한다고 추정된다. 특이점으로 Ni_3Sn_4 와 $(Co,Ni)Sn_2$ 사이에서 균열이 관찰되었으며 기존 paste의 Sn-Ag 금속간 화합물인 Ag_3Sn 도 밝은 회색으로 존재하는 것을 Fig. 4.1(B)를 통해 확인할 수 있었다. 접합부의 자세한 분석을 위해 전자빔 미세 분석법(electron microprobe analysis, EPMA)을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.4에 나타내었다. EDX로 분석한 결과와 마찬가지로 접합부는 Ni_3Sn_4 , $(Co,Ni)Sn_2$, Ag_3Sn 으로 형성되었으며 $(Co,Ni)Sn_2$ IMC 사이사이 Ag_3Sn IMC가 분포하는 것을 확인하였다.

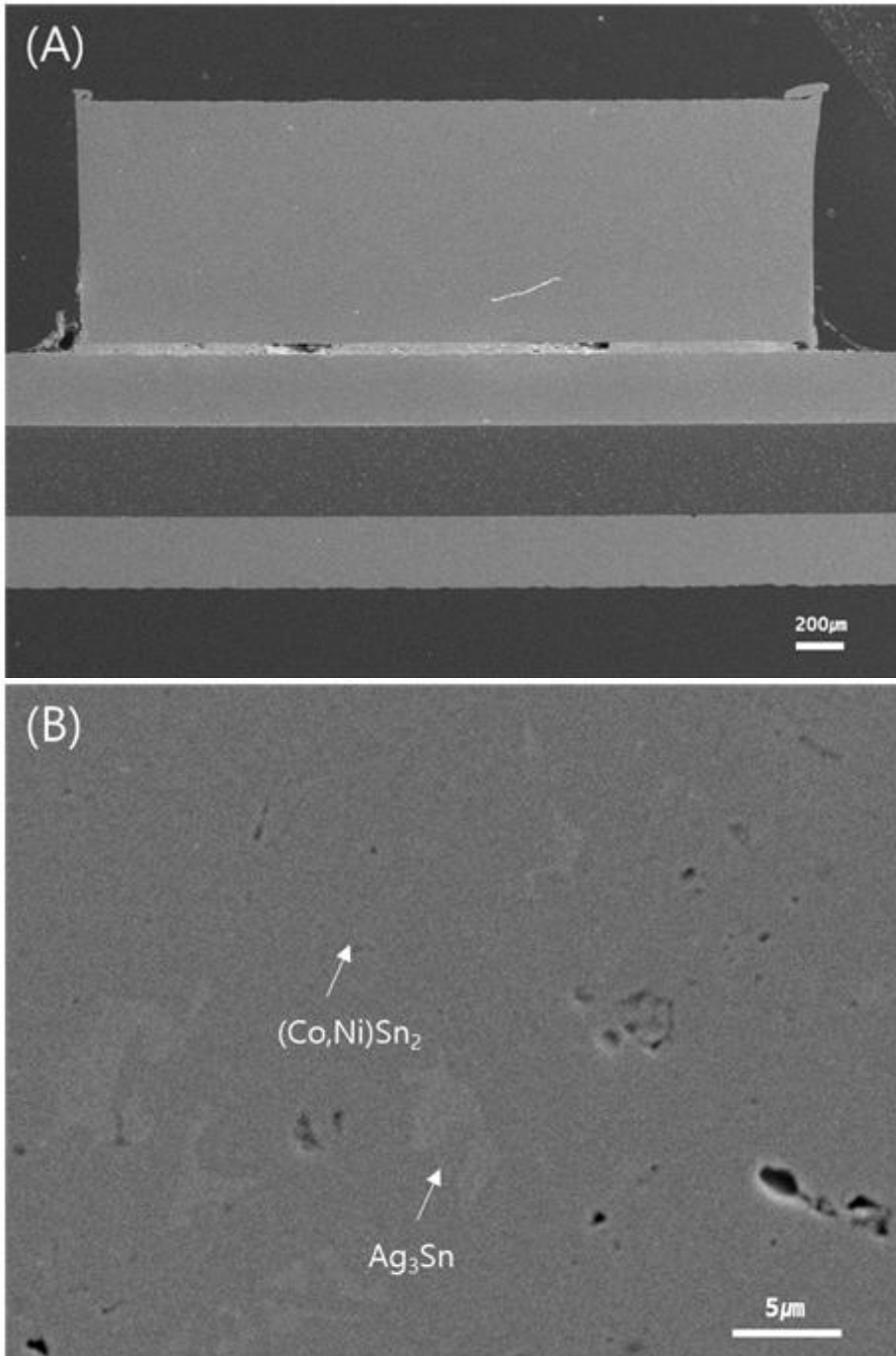


Fig. 4.1 (A) Sn-3.5Ag + Co particle 1시간 접합부 SEM 이미지, (B) Sn-3.5Ag + Co particle 1시간 접합부 SEM 이미지(×3000)

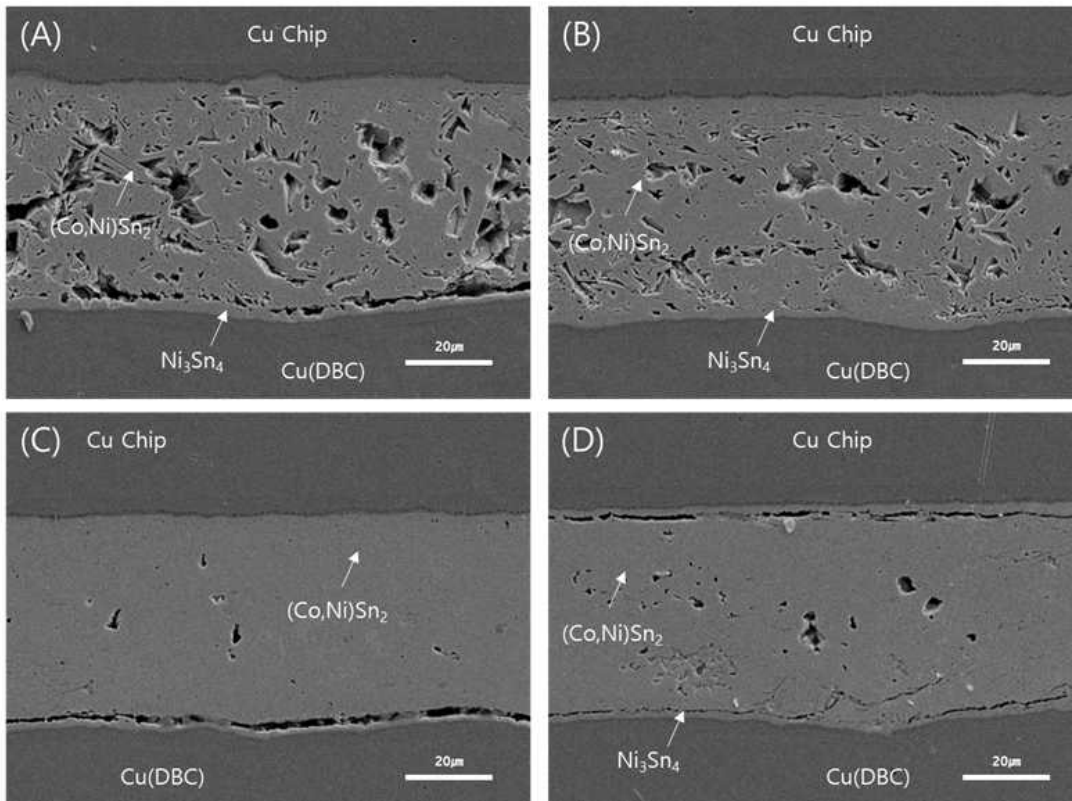


Fig. 4.2 Sn-3.5Ag + Co particle 1시간 접합부 SEM 이미지(×1000)

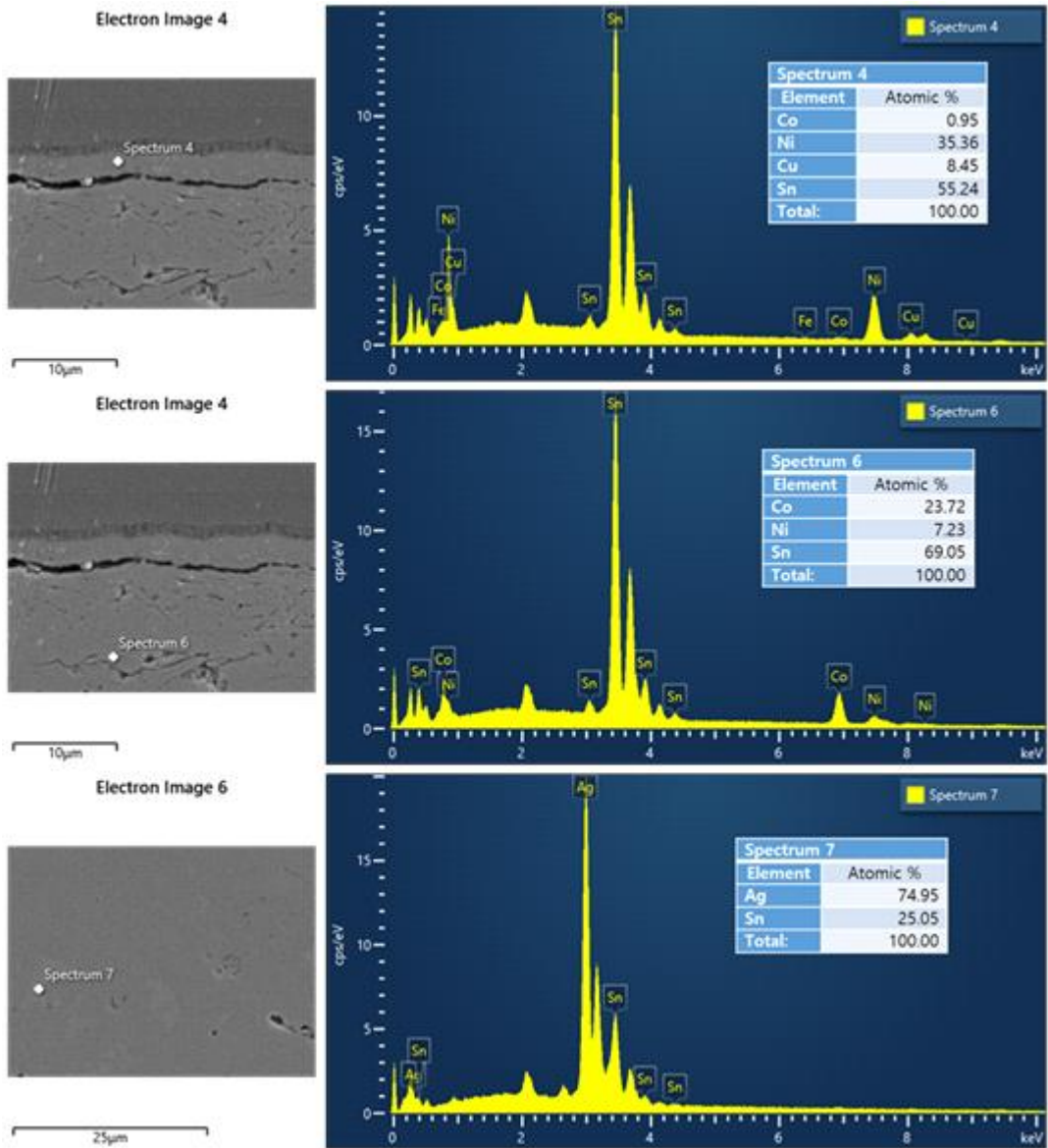


Fig. 4.3 Point analysis of EDX for Sn-3.5Ag+Co paste

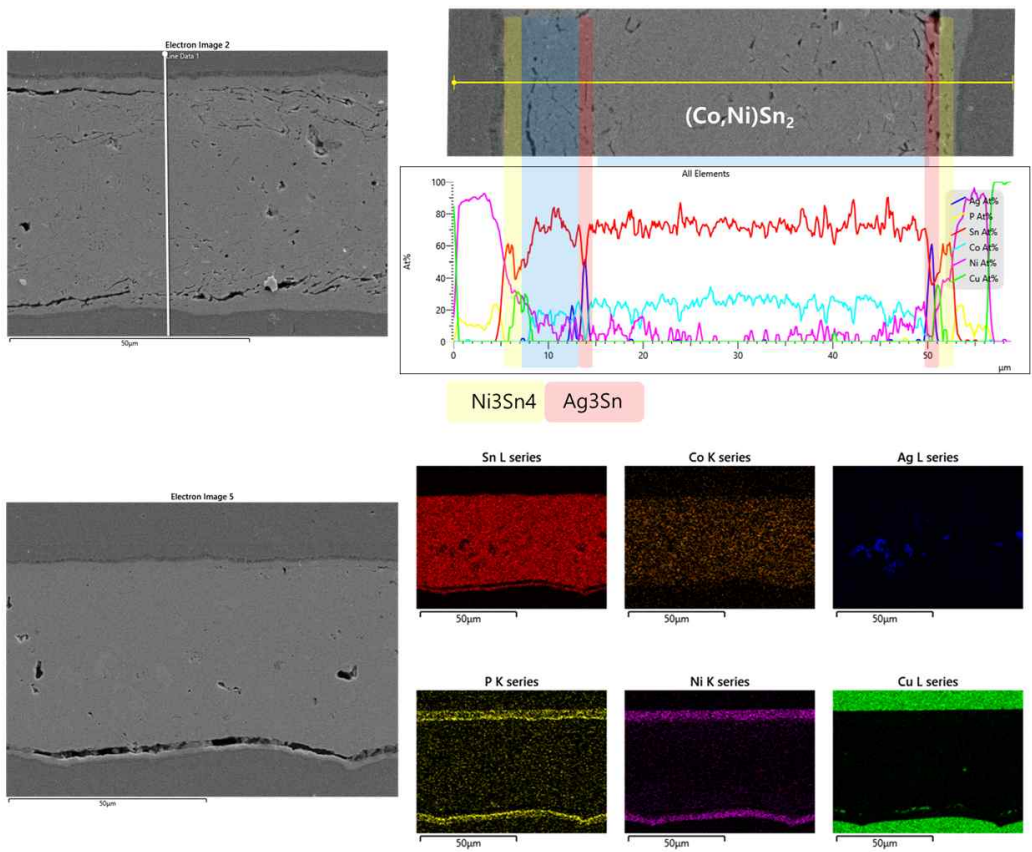


Fig. 4.4 (A) EPMA line scan of Sn-Co 1hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Co 1hr sample

4.2 Sn-3.5Ag + Co particle 2hr Bonding

Sn-3.5Ag paste에 10wt% Co particle을 추가하여 300℃에서 2시간 접합 한 샘플의 접합부 미세구조 전체 SEM 이미지를 Fig. 4.5에 나타내었다. 전체 접합부는 보이는 바와 같이 기판과 칩 사이 접합부가 잘 형성되었으며 1시간 접합부와 비교하여 큰 Void는 관찰되지 않았으나 접합부에 작은 Void가 분포되어 있었다. 접합부의 미세구조를 촬영한 SEM 이미지를 각각 Fig. 4.6(A)~(D)에 나타내었으며 Fig. 4.7에 접합부의 조성을 에너지 분산 스펙트럼(Energy dispersive X-ray, EDX)를 이용하여 분석한 결과를 나타내었다. Fig. 4.7을 통해 형성된 금속간 화합물의 종류는 Ni_3Sn_4 , $(Co,Ni)Sn_2$, Ag_3Sn 금속간 화합물이 형성된 것을 확인할 수 있다. Cu chip과 sub(DBC)의 경우 각각 Ni/Au, ENIG 표면처리를 하여 Ni layer와 Sn이 반응하여 Ni_3Sn_4 금속간화합물이 형성되며 Co particle과 잔여 Sn이 반응하여 칩과 기판 사이의 금속간 화합물은 $(Co,Ni)Sn_2$ 가 형성되었다. 2시간 시편의 경우 Sn을 에칭 후에도 단면의 변화가 거의 없으며 금속간 화합물의 경계구간도 관찰되지 않아 잔여 Sn이 없이 반응한 것으로 생각된다. 2시간 시편도 마찬가지로 기존 paste의 Sn-Ag 금속간 화합물인 Ag_3Sn 도 밝은 회색으로 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 접합부의 자세한 분석을 위해 전자빔 미세 분석법(electron microprobe analysis, EPMA)을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.8에 나타내었다. EDX로 분석한 결과와 마찬가지로 접합부는 Ni_3Sn_4 , $(Co,Ni)Sn_2$, Ag_3Sn 으로 형성되었으며 Co-Sn IMC 사이사이 Ag_3Sn IMC가 분포하는 것을 확인하였다. 결과적으로 1시간 시편과 비교하면 작은 Void가 생겨나는 문제점은 있지만 잔여 Sn이 없이 반응한 2시간 접합 시간이 적절하다고 생각된다.

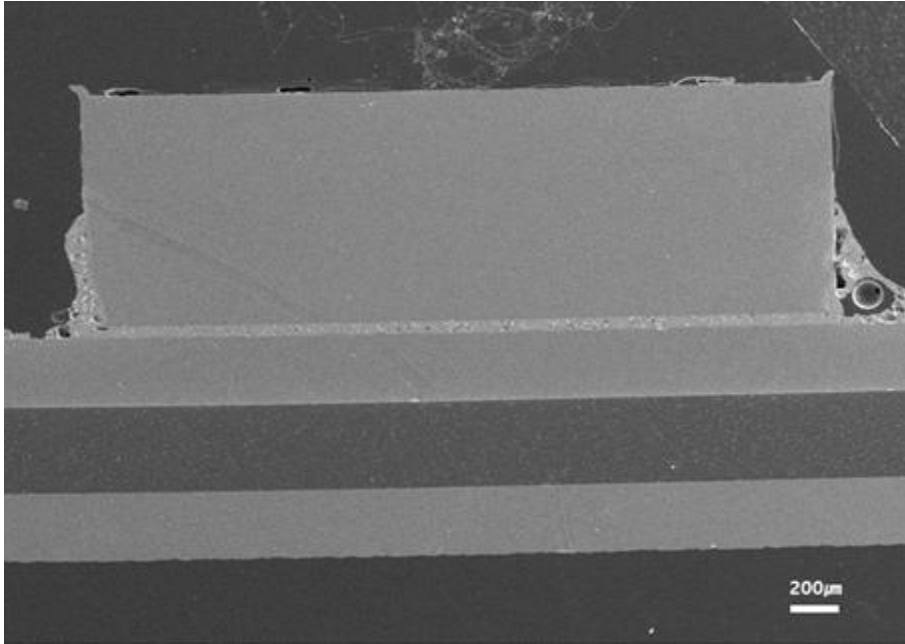


Fig. 4.5 Sn-3.5Ag + Co particle 2시간 접합부 SEM 이미지

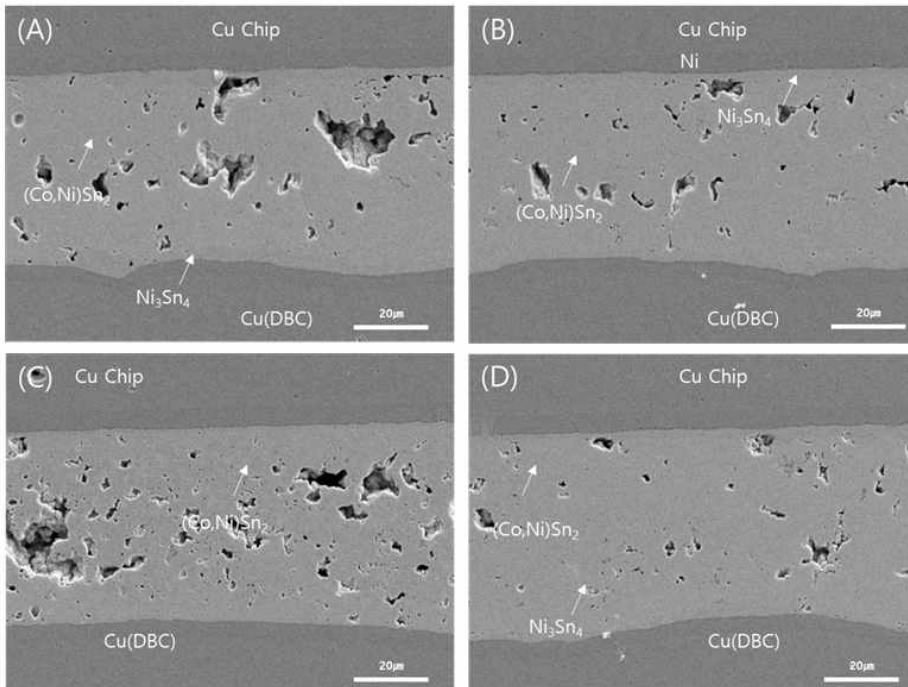


Fig. 4.6 Sn-3.5Ag + Co particle 2시간 접합부 SEM 이미지 ($\times 1000$)

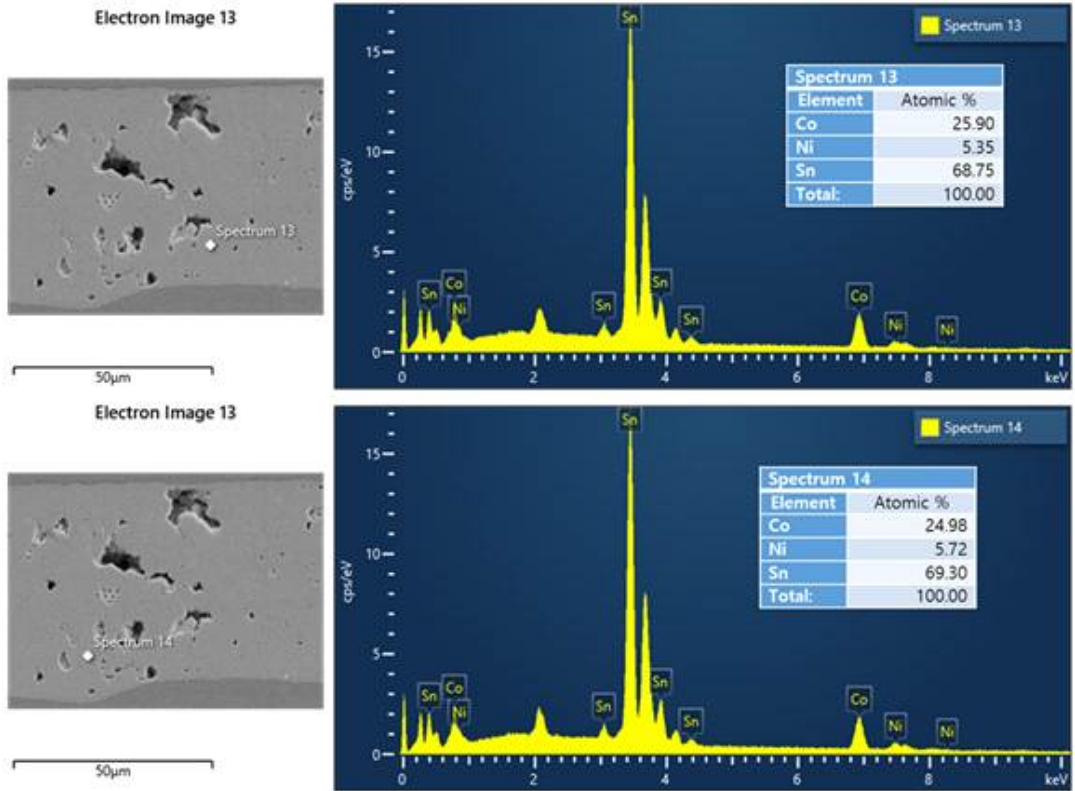


Fig. 4.7 Point analysis of EDX for Sn-3.5Ag+Co paste

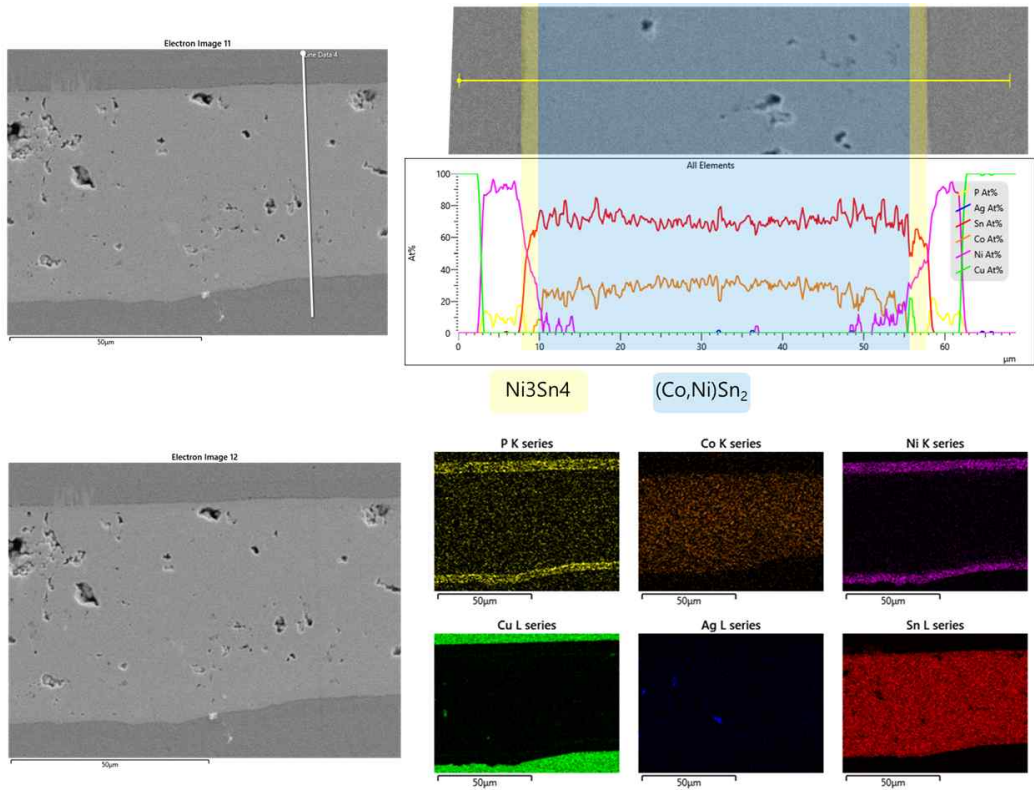


Fig. 4.8 (A) EPMA line scan of Sn-Co 2hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Co 2hr sample

4.3 Sn-3.5Ag + Co particle 3hr Bonding

Sn-3.5Ag paste에 10wt% Co particle을 추가하여 300℃에서 3시간 접합 한 샘플의 접합부 미세구조 전체 SEM 이미지를 Fig. 4.9에 나타내었다. 전체 접합부는 보이는 바와 같이 기판과 칩 사이 접합부가 잘 형성되었으며 반응 시간이 지남에 따라 작은 Void의 사이즈가 증가하는 경향을 보였다. 접합부의 미세구조를 촬영한 SEM 이미지를 각각 Fig. 4.10(A)~(D)에 나타내었다. 3시간 시편 또한 특이점은 관찰되지 않았으며 형성되는 IMC 또한 똑같았다. 접합부의 자세한 분석을 위해 전자빔 미세 분석법(electron microprobe analysis, EPMA)을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.11에 나타내었다

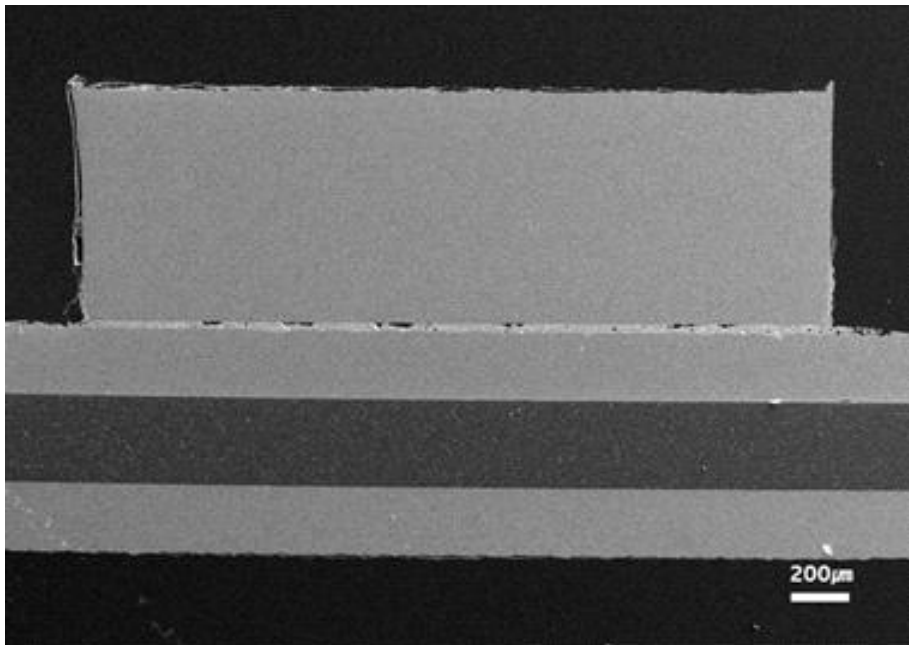


Fig. 4.9 Sn-3.5Ag + Co particle 3시간 접합부 SEM 이미지

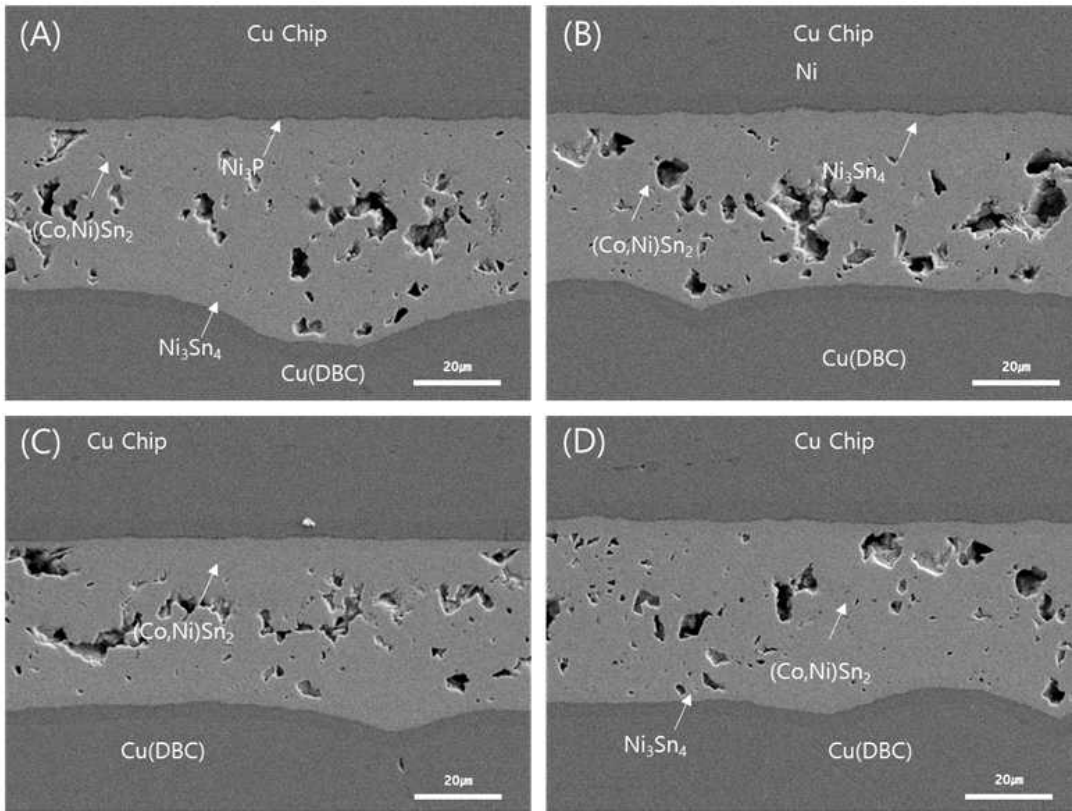


Fig. 4.10 Sn-3.5Ag + Co particle 3시간 접합부 SEM 이미지(×1000)

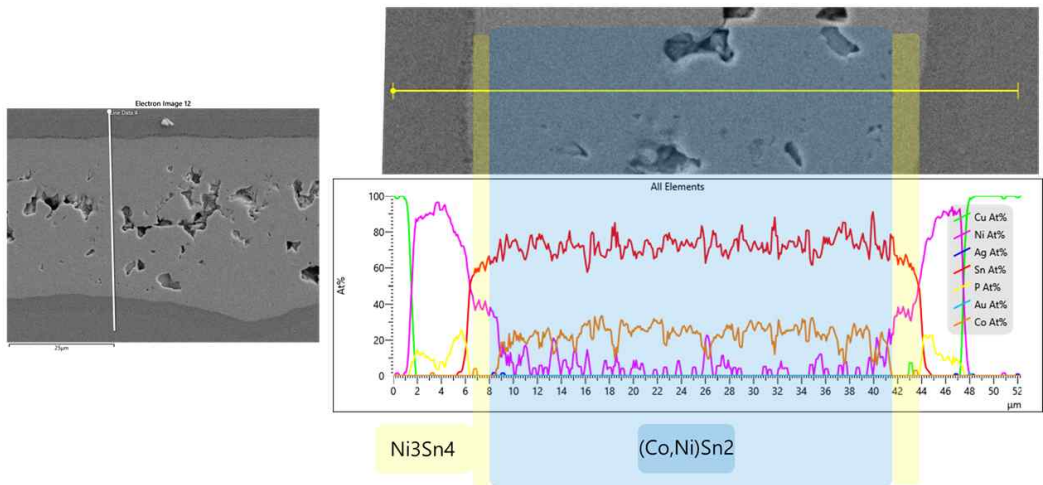


Fig. 4.11 EPMA line scan of Sn-Co 3hr sample

4.4 Sn-3.5Ag + Co particle 상 분석

Sn-3.5Ag paste에 10wt% Co particle의 정확한 상을 관찰하기 위해 전단 시험 파단면 X-ray diffraction 분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 4.12에 나타내었다. 분석 결과 주 피크는 (Co,Ni)Sn₂로 분석이 되었으며 Ni₃Sn₄와 Cu₆Sn₅도 존재하는 것으로 보인다. 공정 시간 별 다른 상의 IMC는 확인 할 수 없었으며 (Co,Ni)Sn₂, Ni₃Sn₄ 피크가 시간에 따라 강한 강도를 나타냄을 확인할 수 있었다. 샘플 모식도에서 보이는 것과 같이 표면처리가 한쪽면만 되어 있어 Cu₆Sn₅ 피크는 chip의 옆면 Cu가 확산되어 Sn과 반응하여 형성되는 것으로 사료된다. 앞선 연구에 따르면 Sn-Co 공정 반응 시 320°C 이상의 온도에서 반응 시 CoSn₂가 형성되었고 300°C 이하의 온도에서는 주로 CoSn₃ IMC가 주로 형성되었다.[33,34,35,36] 하지만 본 실험에서는 공정 온도가 300°C임에도 불구하고 CoSn₃ IMC는 관찰할 수 없었다. 그 이유로 가압 공정으로 인한 온도 상승 및 공급이 제한된 Sn,Co 영향으로 인하여 (Co,Ni)Sn₂ IMC가 형성된 것으로 추정된다.

1시간부터 3시간까지 반응 결과 Cu,Ni을 첨가하여 TLPS 접합 연구[15,25]와 비교하여 상대적으로 미세 공극이 많이 관찰되었다. Co-Sn 특성 연구[35]에 따르면 Sn 과의 반응은 Co가 Cu,Ni보다 빠르다고 보고되어진다. 그 결과 IMC 형성은 Cu,Ni TLPS 접합보다 접합부 IMC 형성 시간이 감소하였고 잔여 Sn 위상도 관찰되지 않았다.

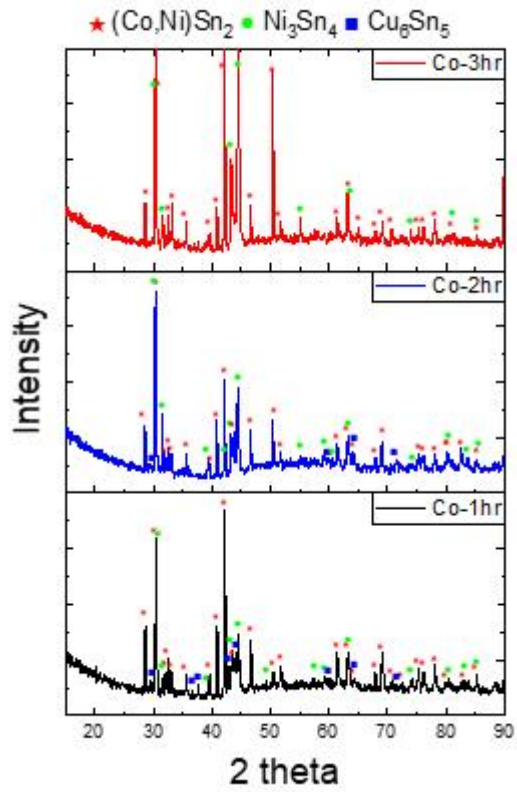


Fig. 4.12 XRD patterns of the Sn-3.5Ag/Co paste

4.5 Sn-3.5Ag + Fe particle 1hr Bonding

Sn-3.5Ag paste에 15wt% Fe particle을 추가하여 300℃에서 1시간 접합 한 샘플의 접합부 미세구조 전체 SEM 이미지를 Fig. 4.13에 나타내었다. 기판과 칩 접합부에 Sn-Fe IMC가 형성되어 접합되었고 부분적으로 큰 Void가 관찰되었다. 큰 Void의 경우 솔더 페이스트에 첨가된 Flux의 휘발과정에서 생기는 Gas Void로 추정되며 작은 Void의 경우 Sn과의 반응에 의한 Void로 추정된다. 접합부의 미세구조를 촬영한 SEM 이미지를 각각 Fig. 4.14(A)~(D)에 나타내었으며 Fig. 4.15에 접합부의 조성을 에너지 분산 스펙트럼(Energy dispersive X-ray, EDX)를 이용하여 분석한 결과를 나타내었다. Fig. 4.15을 통해 형성된 금속간 화합물의 종류는 Ni_3Sn_4 , $FeSn_2$ 금속간 화합물이 형성된 것을 확인할 수 있다. Cu chip과 sub(DBC)의 경우 각각 Ni/Au, ENIG 표면처리를 하여 Ni layer와 Sn이 반응하여 Ni_3Sn_4 금속간 화합물이 형성되며 Fe particle과 Sn이 반응하여 칩과 기판 사이의 금속간 화합물은 $FeSn_2$ 가 형성되었다. 형성된 $FeSn_2$ 금속간 화합물은 전체적으로 사이즈가 크지 않고 사이사이 Void가 관찰되었으며 Sn-rich 구간은 관찰되지 않았지만 IMC 사이사이 존재할 것으로 추정된다. 또한 잔여 Fe particle도 관찰되었으며 이는 Sn이 기판과 반응하며 Sn 공급 부족에 따른 잔여 particle로 추정된다. 접합부의 자세한 분석을 위해 전자빔 미세 분석법(electron microprobe analysis, EPMA)을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.16에 나타내었다. 사이사이 Ag_3Sn 과 Ni 계면에서의 Ni-Sn IMC를 제외한 접합부는 EDX로 분석한 결과와 마찬가지로 접합부는 Ni_3Sn_4 , $FeSn_2$, Ag_3Sn 으로 형성되었다.

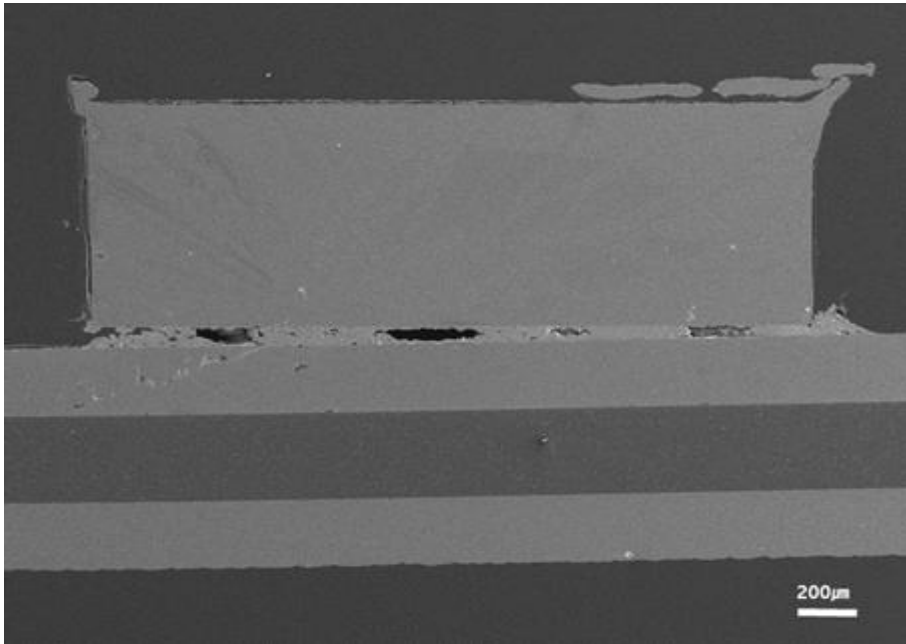


Fig. 4.13 Sn-3.5Ag + Fe particle 1시간 접합부 SEM 이미지

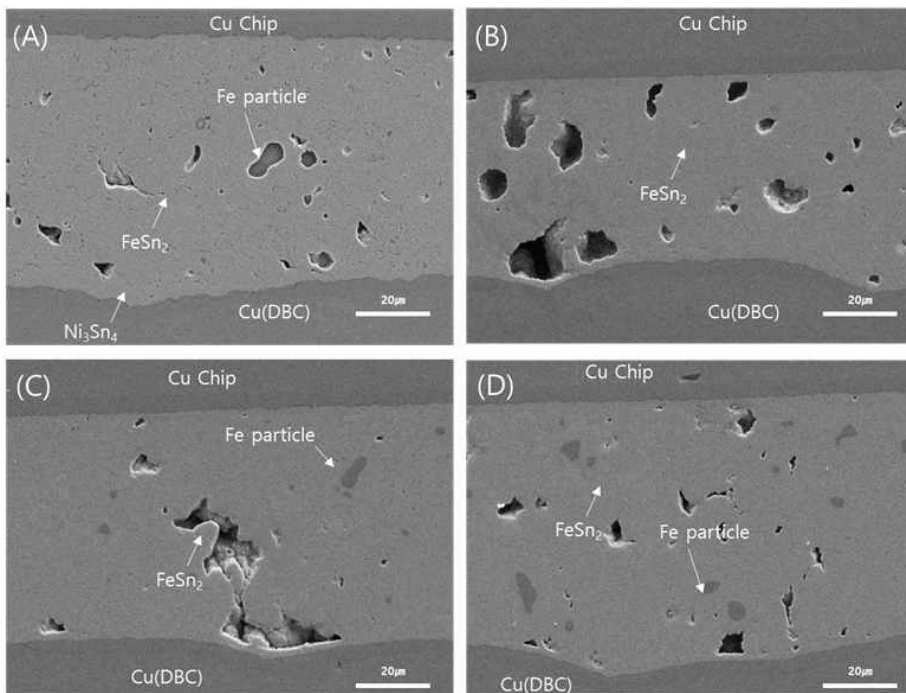


Fig. 4.14 Sn-3.5Ag + Fe particle 1시간 접합부 SEM 이미지(×1000)

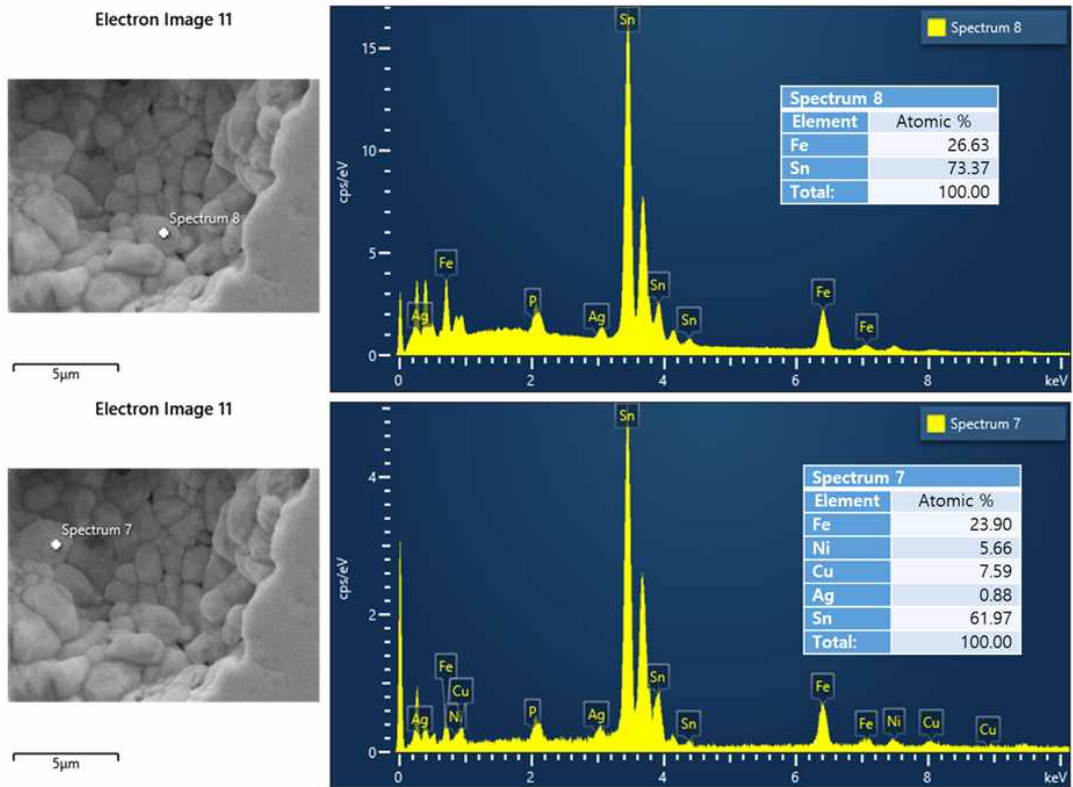


Fig. 4.15 Point analysis of EDX for Sn-3.5Ag+Fe paste

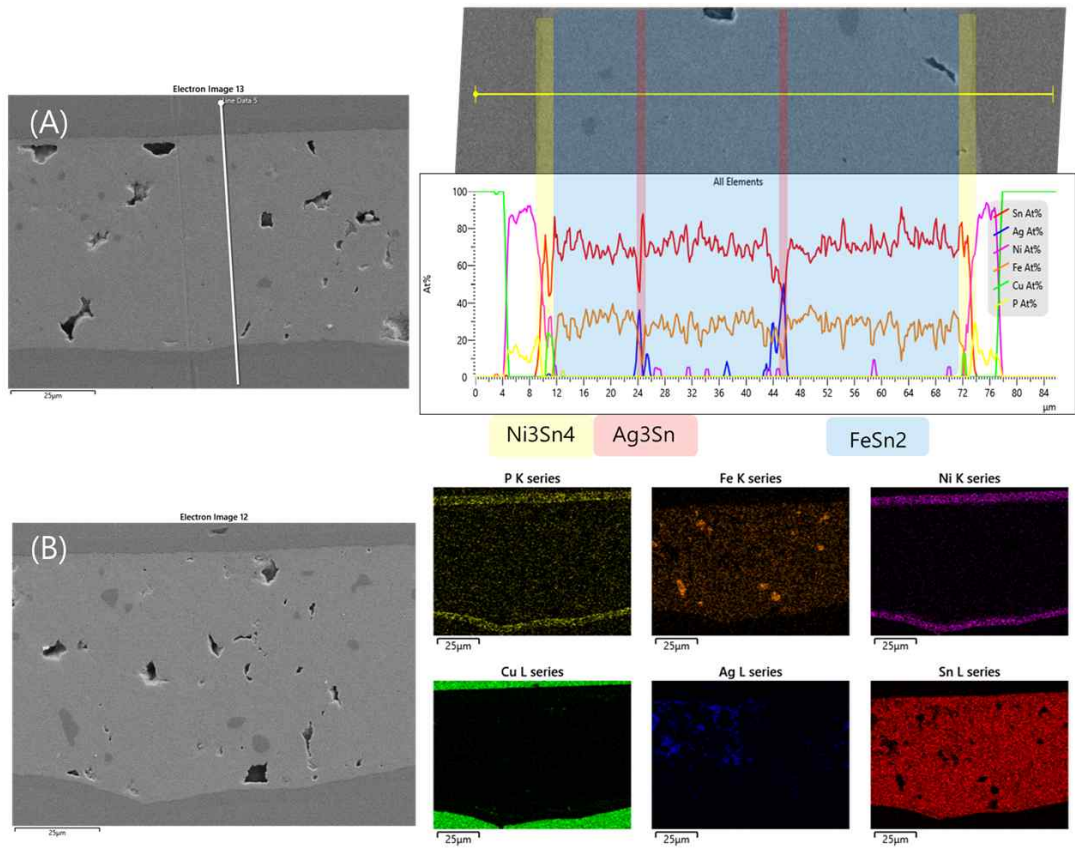


Fig. 4.16 (A) EPMA line scan of Sn-Fe 1hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Fe 1hr sample

4.6 Sn-3.5Ag + Fe particle 2hr Bonding

Sn-3.5Ag paste에 15wt% Fe particle을 추가하여 300℃에서 2시간 접합 한 샘플의 접합부 미세구조 전체 SEM 이미지를 Fig. 4.17에 나타내었다. 기판과 칩 접합부에 Fe-Sn IMC는 형성되어 접합되었으나 중간중간 큰 Void가 관찰되었다. 이는 솔더 페이스트 반응 중에 생기는 Gas에 의한 Void 및 Sn의 소비로 인한 Void로 추정된다. 접합부의 미세구조를 촬영한 SEM 이미지를 각각 Fig. 4.18(A)~(D)에 나타내었다. 접합부에 형성된 금속간 화합물의 종류는 Ni_3Sn_4 , $FeSn_2$ 금속간 화합물이 형성된 것을 확인할 수 있으며 접합부에 형성된 IMC층은 1시간 비교하면 미세한 Void는 존재하지만 상대적으로 더 적고 잔여 Fe particle도 관찰되지 않아 시간이 지남에 따라 Fe particle이 Sn과 반응하여 IMC를 형성한 것으로 생각된다. 접합부의 자세한 분석을 위해 전자빔 미세 분석법(electron microprobe analysis, EPMA)을 사용하여 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.19에 나타내었다. EDX로 분석한 결과와 마찬가지로 접합부는 Ni_3Sn_4 , $FeSn_2$, Ag_3Sn 으로 형성되었다. 2시간 샘플의 경우 칩과 기판의 접합부가 1시간 샘플에 비해 다소 형성되지 못하였으나 형성된 접합부의 Void 상태 및 잔여 Fe particle의 존재 여부 등을 감안하면 2시간 접합 공정이 적절하다고 생각한다.

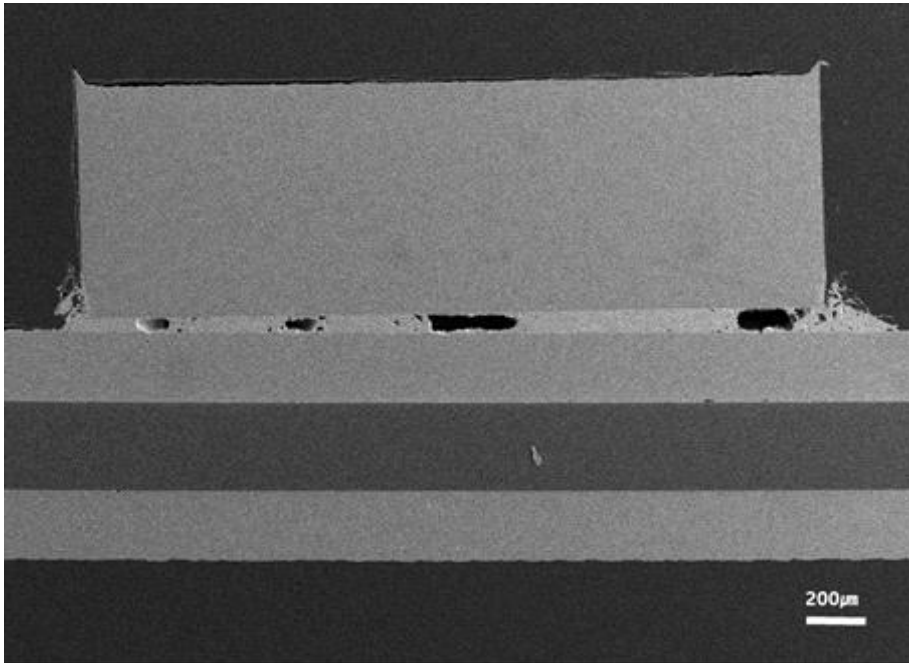


Fig. 4.17 Sn-3.5Ag + Fe particle 2시간 접합부 SEM 이미지

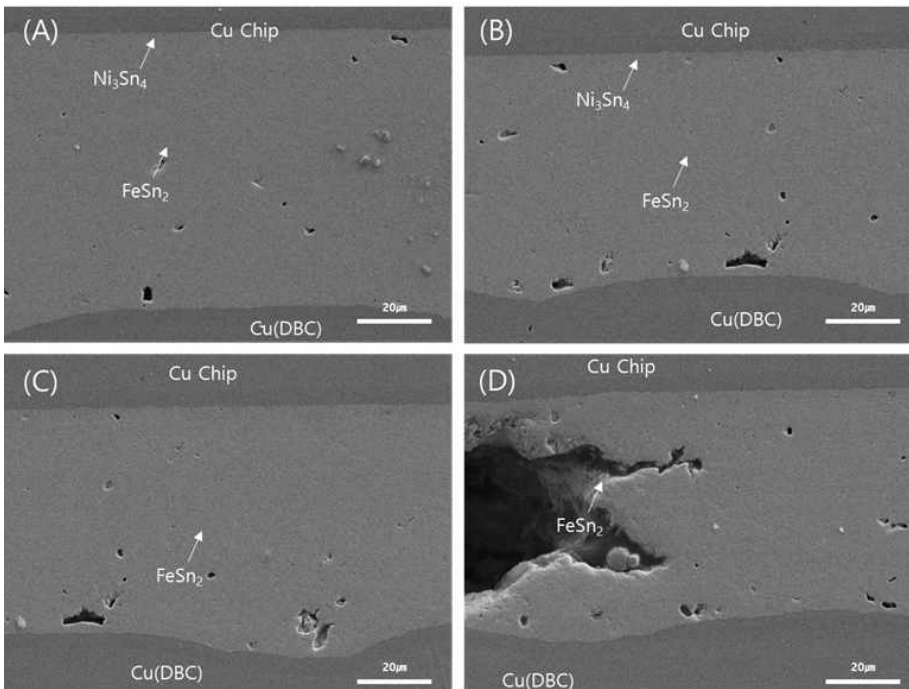


Fig. 4.18 Sn-3.5Ag + Fe particle 2시간 접합부 SEM 이미지(×1000)

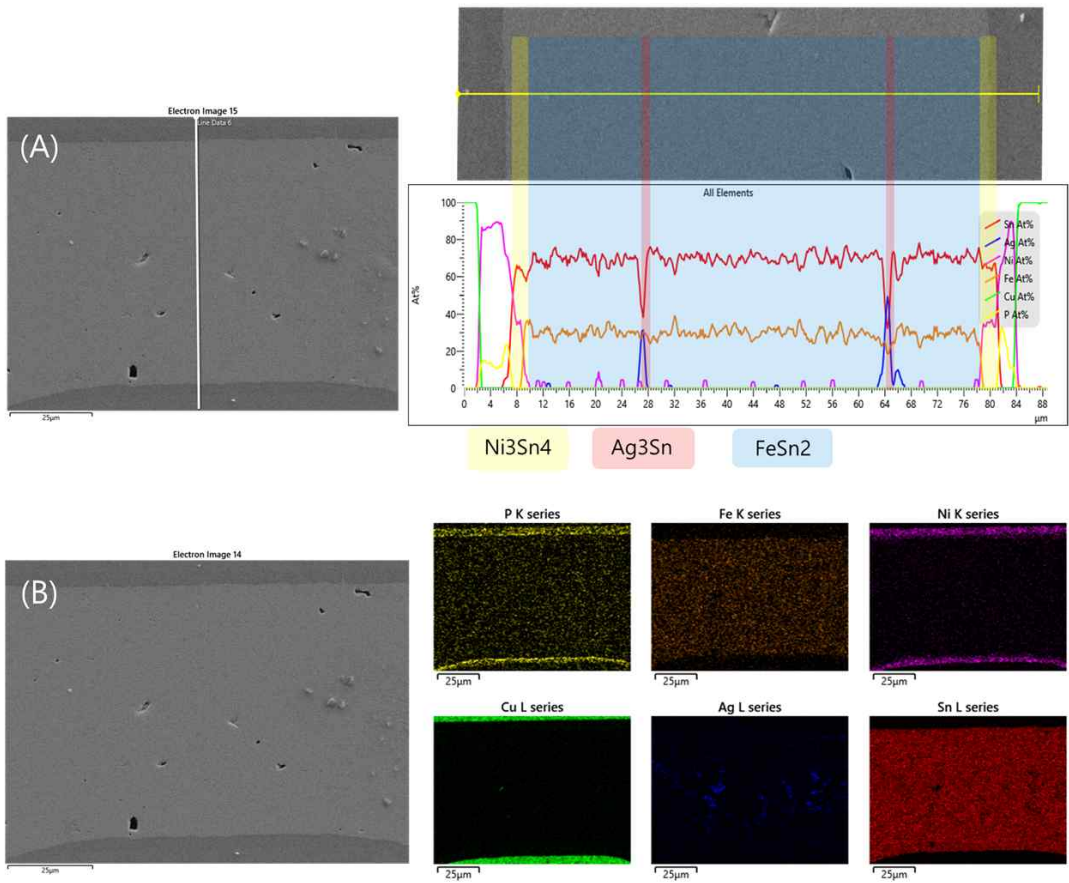


Fig. 4.19 (A) EPMA line scan of Sn-Fe 2hr sample, (B) EPMA Mapping of Sn-Fe 2hr sample

4.7 Sn-3.5Ag + Fe particle 3hr Bonding

Sn-3.5Ag paste에 15wt% Fe particle을 추가하여 300℃에서 3시간 접합 한 샘플의 접합부 미세구조 전체 SEM 이미지를 Fig. 4.20에 나타내었다. 기판과 칩 접합부에 Fe-Sn IMC는 형성되어 접합되었으나 큰 Void가 관찰되었다. 이는 솔더 페이스트 반응 중에 생기는 Gas에 의한 Void와 더불어 Sn과Fe가 반응하면서 IMC를 형성하며 Sn의 공급 부족에 따른 Void로 추정된다. 이전 반응 시간 샘플과 비교하면 칩의 양 끝의 접합부는 밀도 있게 접합부가 형성되었으나 중앙부에 큰 layered Void가 관찰되었다. 접합부의 미세구조를 촬영한 SEM 이미지를 각각 Fig. 4.21(A)~(D)에 나타내었다.

1시간부터 3시간까지 반응 결과 Cu,Ni을 첨가하여 TLPS 접합 연구[15,25]와 비교하여 상대적으로 큰 공극이 형성되었고 미세 공극 또한 많이 관찰되었다. 첨가한 Fe particle의 size가 작아 잔여 metal particle은 1시간 샘플을 제외하곤 관찰되지 않았다. 본 실험과 유사한 상용화된 솔더볼과 Cu,Ni particle을 첨가한 연구 논문[31]에서 잔여 Sn 위상이 반응 시간 2시간까지도 남아있었지만 제작된 Fe 페이스트의 경우 1시간 반응 시간에서도 잔여 Sn 위상을 관찰하기 힘들어 Fe-Sn간 반응이 잘 이뤄진 것으로 분석된다.

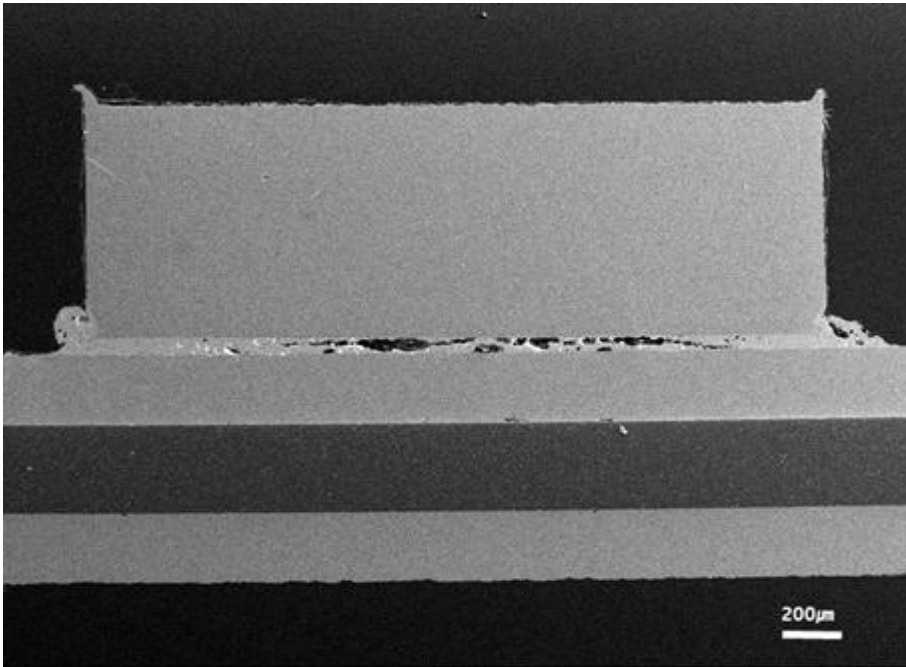


Fig. 4.20 Sn-3.5Ag + Fe particle 3시간 접합부 SEM 이미지

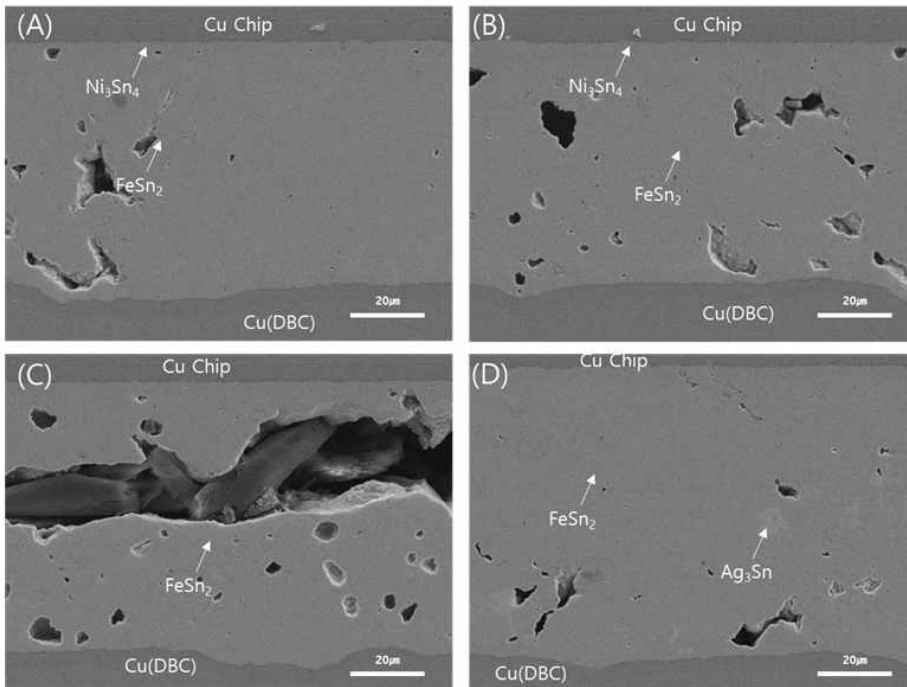


Fig. 4.21 Sn-3.5Ag + Fe particle 3시간 접합부 SEM 이미지(× 1000)

4.8 Sn-3.5Ag + Fe particle 상 분석

Sn-3.5Ag paste에 15wt% Fe particle의 정확한 상을 관찰하기 위해 전단 시험 파단면 X-ray diffraction 분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 4.22에 나타내었다. 분석 결과 주 피크는 FeSn_2 로 분석이 되었으며 Ni_3Sn_4 와 Cu_6Sn_5 도 존재하는 것으로 보인다. $\text{FeSn}_2, \text{Ni}_3\text{Sn}_4$ 피크가 시간에 따라 강한 강도를 나타냄을 확인할 수 있었다. 샘플 모식도에서 보이는 것과 같이 표면처리가 한쪽면만 되어 있어 Cu_6Sn_5 피크는 chip의 옆면에서 Cu층과 Sn이 반응하여 형성되는 것으로 사료된다. 기존 연구되어진 Sn-Fe 반응시 형성되는 금속간 화합물 FeSn_2 와 동일한 금속간 화합물이 형성되었다. [37,38,39]

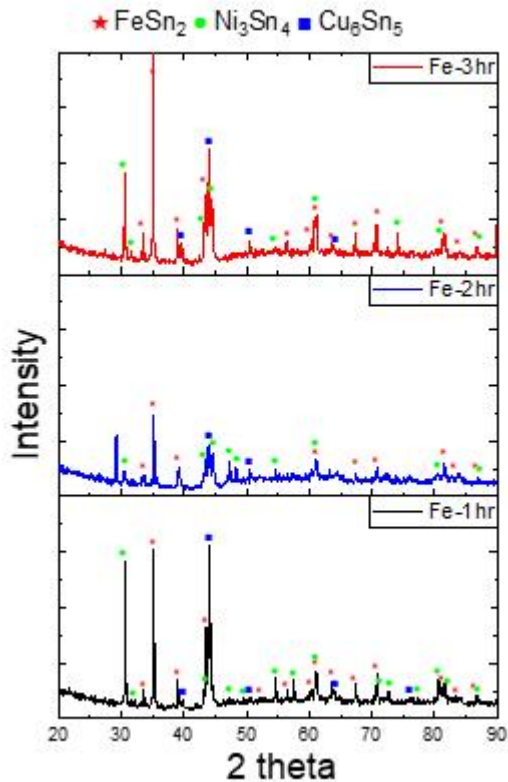


Fig. 4.22 XRD patterns of the Sn-3.5Ag/Fe paste

4.9 Shear Test Analysis

제작한 Co 첨가 paste 및 Fe 첨가 paste와 칩/기판과 반응한 조인트의 기계적 신뢰성을 평가하기 위해 다이 전단시험을 진행하였고 각 페이스트의 공정 시간별 접합강도를 Fig. 4.23에 나타내었다. 결과적으로 Co particle을 첨가한 페이스트는 반응 시간이 증가할수록 접합강도가 감소하였으며, Fe particle을 첨가한 페이스트는 반응 시간이 증가할수록 접합강도가 증가하였다. Sn-Co 페이스트의 접합강도는 순서대로 33, 29, 25Mpa이고 Sn-Fe 페이스트는 24, 29, 30Mpa이다. 동일한 공정으로 수행한 기존 Sn-3.5Ag 페이스트의 접합강도보다 떨어진 접합강도가 측정되었다.

Sn-Co 페이스트의 접합 시간에 따른 접합강도 차이는 약 4Mpa로 미비하였으면 이유는 공극의 증가로 추정된다. 시간이 지남에 따라 공극의 형상이 커지는 경향을 보이며 균열이 공극을 따라서 진행하였다. Sn-Fe 페이스트의 경우 각 반응 시간별 접합강도가 큰 차이가 없으며 이는 접합부에 생기는 큰 공극의 차이에 의한 것으로 생각된다. 기존 사용되는 Ag 소결 접합 강도[40]에 유사한 접합 강도를 가진다. 비교군으로 Ag 소결 접합의 전단강도 및 Cu/Ni TLPS 접합 강도를 Fig. 4.24에 나타내었다. Cu-Sn TLPS 접합강도 약 40Mpa, Ni-Sn TLPS 접합강도 약 40Mpa보다 낮은 접합강도로 분석되었으며 그 원인은 본 실험 접합부에 생기는 공극의 크기와 양에 영향을 받는 것으로 추정된다.

칩 전단강도의 변화 원인을 조사하기 위해 전단 시험 후의 파단면을 관찰하였다. 파단면 관찰 결과 첨가물에 상관없이 파단은 Ni layer와 반응하여 형성되는 Ni₃Sn₄ 금속간 화합물과 Co-Sn, Fe-Sn 금속간 화합물 경계면에서 일어나는 것이 관찰되었고 상부 Chip 계면과 하부 DBC 계면에서 균열이 진전하면서 사이사이 공극을 통해 접합부 내부에서도 파단이 일어났다. 각 반응 시간별 파단면은 Fig. 4.25,26에 나타내었다.

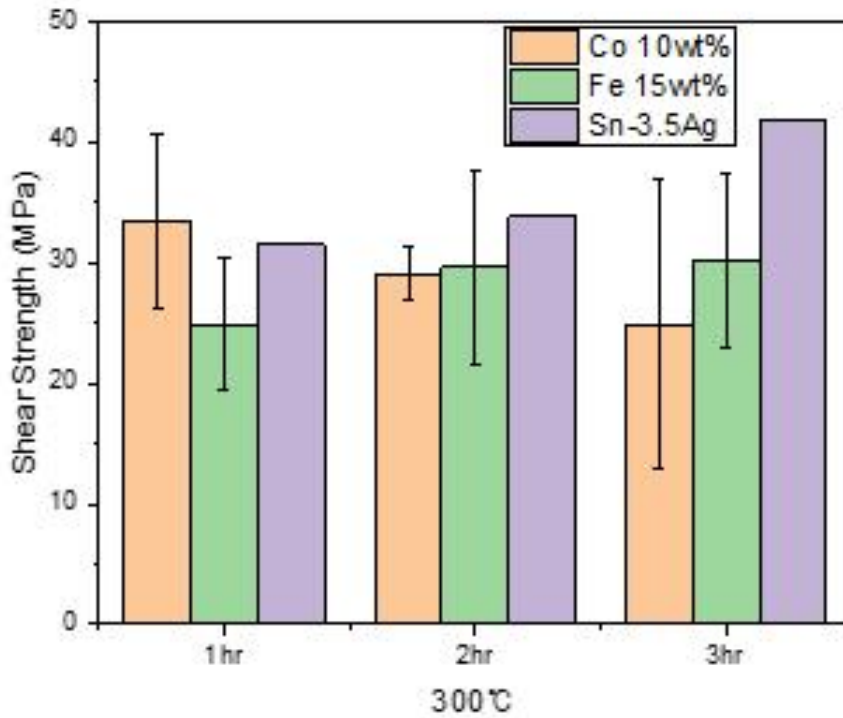


Fig. 4.23 Measured shear stresses of DBC/Chip joints

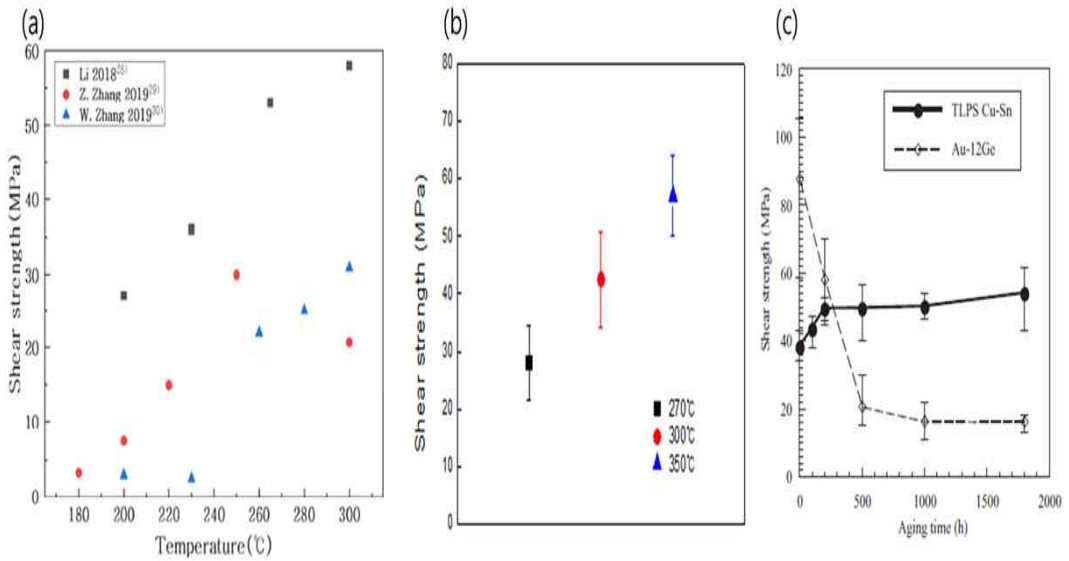


Fig. 4.24 Shear strength of joints (a)Ag sintered[40], (b)Sn-Ni TLPS[16], (c) Sn-Cu TLPS[25]

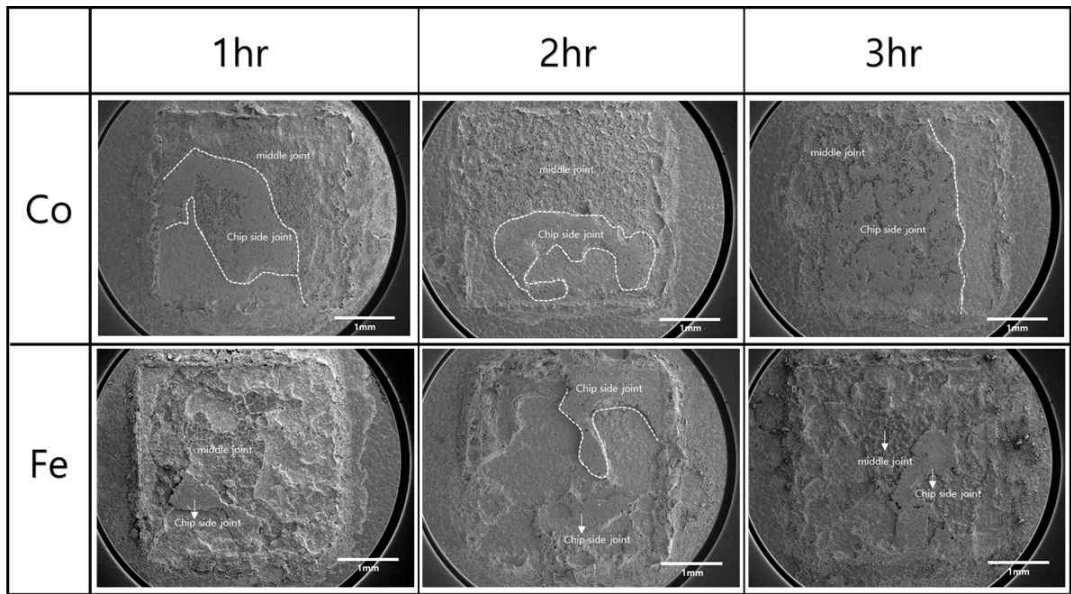


Fig. 4.25 Fractured surface of Chip/DBC joints

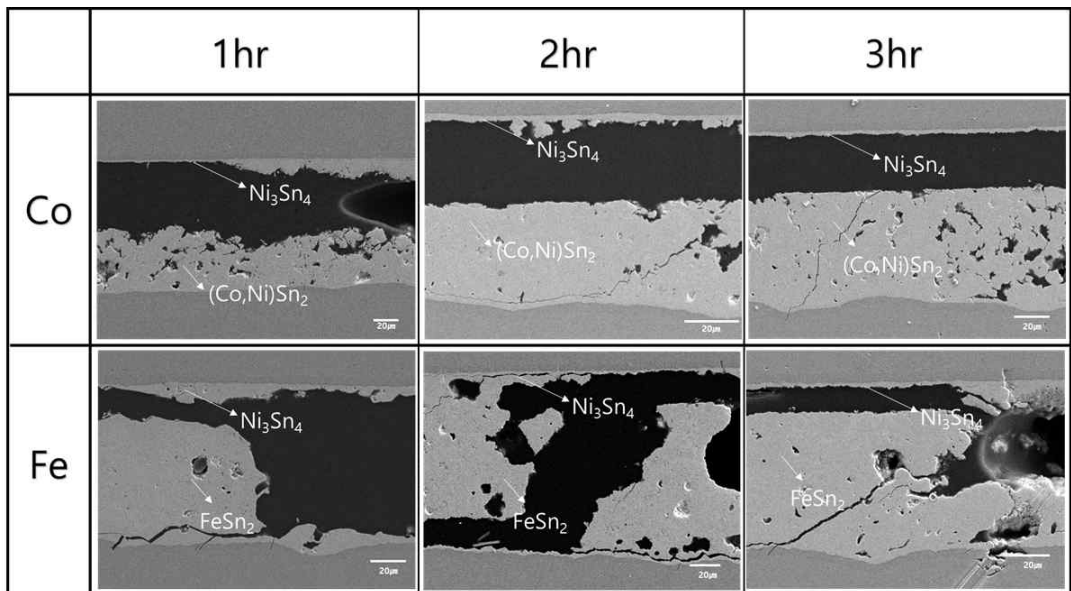


Fig. 4.26 Fractured surface cross section of Chip/DBC joints

5. 결 론

본 연구는 고온에서 사용 가능한 친환경자동차용 파워모듈 접합을 위한 Sn-Co, Sn-Fe TLP bonding 접합소재를 개발하였으며, 이에 대한 평가를 수행하였다. 접합소재 개발 시 첨가할 Metal particle의 종류, IMC 형성여부, IMC 용융온도, 첨가할 particle의 양 등을 고려하여 접합소재를 제작하였다. 제작한 접합소재를 가압, 가열하여 접합부 미세구조 관찰 및 기계적 테스트를 진행하였다. 자세한 실험 결과는 다음과 같다.

1) 본 연구에서 파워모듈용 접합소재 2종을 제조하였다. 다양한 Metal particle을 첨가하여 실험 진행 결과 IMC가 잘 형성되는 particle은 Co(코발트), Fe(아이언)이었으며, paste의 인쇄성을 고려하여 각각 10wt%, 15wt% 첨가하여 제작하였다. 단면 관찰 결과 시간에 상관없이 공극(Void)이 관찰되었으며 Co-Sn의 경우 비교적 작은 공극이 관찰되었고, Sn-Fe의 경우 접합부가 비어있는 큰 공극과 작은 공극이 같이 관찰되었다.

2) 제작된 접합재의 접합 후의 단면을 XRD로 분석한 결과 Co particle을 첨가한 샘플에서는 $(Co, Ni)Sn_2$, Cu_6Sn_5 , Ni_3Sn_4 가 존재하였고 Fe particle을 첨가한 샘플에서는 $FeSn_2$, Cu_6Sn_5 , Ni_3Sn_4 상으로 분석되었으며 SEM, EDX 분석 결과와 일치하였다. 주로 계면 부는 표면처리 금속인 Ni과 반응하여 Ni_3Sn_4 가 형성되었고 계면을 제외한 접합부는 Sn-Co, Sn-Fe IMC로 형성되었다.

3) 제작된 접합재의 기계적 신뢰성을 전단시험을 통해 분석한 결과 균열은 솔더 내부, 솔더와 Sn-Ni IMC 계면 두 가지로 나타났으며 주로 Sn-Ni 금속간 화합물과 Sn-Co,Fe 금속간 화합물 사이에서 파괴가 일어나며 접합부 사이사이 공극의 영향으로 내부 파괴가 관찰되었다. Sn-Co paste(25~30Mpa) Sn-Fe paste(25~30Mpa) 접합강도를 나타냈으며 기존 사용되던 Ag 소결 접합 강도(20~40Mpa)에 상응하는 접합강도를 얻었다. 이는 접합부 공극에 의한 결과로 파악되며 추가적인 연구를 통해 공극 문제를 해결할 경우 더욱 개선될 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

- [1] 김경호, & 좌성훈. (2019). 차세대 전력반도체 소자 및 패키지 접합 기술. 마이크로전자 및 패키징학회지, 26(3), 15-22.
- [2] 김동환, 오애선, 안현식, 박은영, 김경현, 전성재, & 배현철. (2020). 고방열 기판 및 접합 소재를 이용한 파워 모듈의 열 해석. 대한전자공학회 학술대회, 151-154.
- [3] 윤정원, 방정환, 고용호, 유세훈, 김준기, & 이창우. (2014). 전기자동차용 고신뢰성 파워모듈 패키징 기술. 마이크로전자 및 패키징학회지, 21(4), 1-13.
- [4] Yoon, J. W., & Back, J. H. (2018). Effect of sintering conditions on the mechanical strength of Cu-sintered joints for high-power applications. *Materials*, 11(11), 2105.
- [5] Nishikawa, H., Liu, X., Wang, X., Fujita, A., Kamada, N., & Saito, M. (2015). Microscale Ag particle paste for sintered joints in high-power devices. *Materials Letters*, 161, 231-233.
- [6] Zeng, G., McDonald, S., & Nogita, K. (2012). Development of high-temperature solders. *Microelectronics Reliability*, 52(7), 1306-1322.
- [7] Fujino, M., Narusawa, H., Kuramochi, Y., Higurashi, E., Suga, T., Shiratori, T., & Mizukoshi, M. (2016). Transient liquid-phase sintering using silver and tin powder mixture for die bonding. *Japanese Journal of Applied Physics*, 55(4S), 04EC14.
- [8] Wang, T., Chen, X., Lu, G. Q., & Lei, G. Y. (2007). Low-temperature sintering with nano-silver paste in die-attached interconnection. *Journal of Electronic Materials*, 36(10), 1333-1340.
- [9] Yoon, J. W., Bae, S., Lee, B. S., Jung, S. B. (2020). Bonding of power

device to ceramic substrate using Sn-coated Cu micro paste for high-temperature applications. *Applied Surface Science*, 515, 146060.

[10] 노명훈, 정재필, & 김원중. (2017). 전력반도체 패키징을 위한 Transient liquid phase 접합 기술. *마이크로전자 및 패키징학회지*, 24(1), 27-34.

[11] Lee, B. S., Ko, Y. H., Bang, J. H., Lee, C. W., Yoo, S., Kim, J. K., & Yoon, J. W. (2017). Interfacial reactions and mechanical strength of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu/Ni/Cu and Au-20Sn/Ni/Cu solder joints for power electronics applications. *Microelectronics Reliability*, 71, 119-125.

[12] ahinkar, D. G., Puckett, W., Graham, S., Boteler, L., Ibitayo, D., Narumanchi, S., ... & Major, J. (2018). Transient liquid phase bonding of AlN to AlSiC for durable power electronic packages. *Advanced Engineering Materials*, 20(10), 1800039.

[13] Peng, J., Liu, H. S., Ma, H. B., Shi, X. M., & Wang, R. C. (2018). Microstructure evolution and mechanical reliability of Cu/Au-Sn/Cu joints during transient liquid phase bonding. *Journal of materials science*, 53(12), 9287-9296.

[14] Chu, K., Sohn, Y., & Moon, C. (2015). A comparative study of Cu/Sn/Cu and Ni/Sn/Ni solder joints for low temperature stable transient liquid phase bonding. *Scripta Materialia*, 109, 113-117.

[15] Yoon, J. W., Kim, Y. S., & Jeong, S. E. (2019). Nickel-tin transient liquid phase sintering with high bonding strength for high-temperature power applications. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(22), 20205-20212.

[16] Yoon, J. W., & Jeong, S. E. (2021). Transient liquid phase sinter bonding with Tin-Nickel micro-sized powders for EV power module

applications. *Journal of the Microelectronics and Packaging Society*, 28(2), 71-79.

[17] Feng, H. L., Huang, J. H., Yang, J., Zhou, S. K., Zhang, R., Wang, Y., & Chen, S. H. (2017). Investigation of microstructural evolution and electrical properties for Ni-Sn transient liquid-phase sintering bonding. *Electronic Materials Letters*, 13(6), 489-496.

[18] Tatsumi, H., Lis, A., Monodane, T., Yamaguchi, H., Kashiba, Y., & Hirose, A. (2018, May). Transient liquid phase sintering using Copper-Solder-Resin composite for high-temperature power modules. In 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC) (pp. 564-567). IEEE.

[19] Hwang, B. U., Min, K. D., Lee, C. J., Kim, J. H., & Jung, S. B. (2020). Pressureless transient liquid phase bonding using SAC305 with hybrid Ag particles and its reliability under high-temperature storage test. *Materialia*, 12, 100808.

[20] Min, K. D., Jung, K. H., Lee, C. J., Hwang, B. U., & Jung, S. B. (2021). Enhancement of electrochemical and thermal bonding reliability by forming a Cu₃Sn intermetallic compound using Cu and Sn-58Bi. *Journal of Alloys and Compounds*, 857, 157595.

[21] Gupta, K. P. (2009). The Co-Ni-Sn (Cobalt-Nickel-Tin) System. *Journal of phase equilibria and diffusion*, 30(6), 646-650.

[22] Wang, X., Li, D., Li, N., & Wang, R. (2019). Growth behavior of intermetallic compounds in Fe/Sn diffusion couples. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(13), 12639-12646.

[23] 양일석, 장문규, & 김종대. (2009). 친환경 절전형 전력반도체 기술. [ETRI]

전자통신동향분석, 24(6), 0-0.

[24] 노명훈, & 정재필. (2015). 자동차용 파워 모듈 패키징의 은 소재를 이용한 접합 기술. 마이크로전자 및 패키징학회지, 22(4), 15-23.

[25] Lang, F., Yamaguchi, H., Nakagawa, H., Sato, H. (2013). Thermally stable bonding of SiC devices with ceramic substrates: transient liquid phase sintering using Cu/Sn powders. Journal of The Electrochemical Society, 160(8), D315.

[26] Greve, H., McCluskey, F. P. (2017, April). Thermal conductivity of Cu-Sn transient liquid phase sintered interconnects for high power density modules. In 2017 IEEE International Workshop On Integrated Power Packaging (IWIPP) (pp. 1-7). IEEE.

[27] Hu, T., Chen, H., Li, M. (2016). Die attach materials with high remelting temperatures created by bonding Cu@ Sn microparticles at lower temperatures. Materials & Design, 108, 383-390.

[28] Wang, J., Wang, X., Zhang, L., Zhang, L., Duan, F., Wang, F., Chen, H. (2022). A Multilayer Paste Based on Ag Nanoparticles with Cu@ Sn for Die Attachment in Power Device Packaging. Materials, 15(3), 914.

[29] Peng, X., Wang, Y., Ye, Z., Huang, J., Yang, J., Chen, S., Zhao, X. (2022). Microstructural evolution and performance of high-tin-content Cu40Sn60 (wt.%) core/shell powder TLPS bonding joints. Journal of Manufacturing Processes, 75, 853-862.

[30] Feng, H., Huang, J., Peng, X., Lv, Z., Wang, Y., Yang, J., Zhao, X. (2018). Microstructural evolution of Ni-Sn transient liquid phase sintering bond during high-temperature aging. Journal of Electronic Materials, 47(8), 4642-4652.

- [31] Min, K. D., Lee, C. J., Hwang, B. U., Kim, J. H., Jang, J. H., & Jung, S. B. (2021). Hybrid transient liquid phase sintering bonding of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder with added Cu and Ni for CuNi bonding. *Applied Surface Science*, 551, 149396.
- [32] Kim, D. H., Cho, M. G., Seo, S. K., Lee, H. M. (2009). Effects of Co addition on bulk properties of Sn-3.5 Ag solder and interfacial reactions with Ni-P UBM. *Journal of electronic materials*, 38(1), 39-45.
- [33] Lai, Z., Kong, X., You, Q., Cao, X. (2017). Microstructure and mechanical properties of Co/Sn-10Bi couple and Co/Sn-10Bi/Co joint. *Microelectronics Reliability*, 68, 69-76.
- [34] Bi, X., Hu, X., Jiang, X., Li, Y. (2019). Mechanical properties of CoSn₂ and α -CoSn₃ intermetallic compounds: first-principles calculations and nano-indentation measurements. *Applied Physics A*, 125(3), 1-10.
- [35] Vakanas, G., Minho, O., Dimcic, B., Vanstreels, K., Vandecasteele, B., De Preter, I.,...Beyne, E. (2015). Formation, processing and characterization of Co-Sn intermetallic compounds for potential integration in 3D interconnects. *Microelectronic Engineering*, 140, 72-80.
- [36] Wang, C. H., Kuo, C. Y., Huang, S. E., Li, P. Y. (2013). Temperature effects on liquid-state Sn/Co interfacial reactions. *Intermetallics*, 32, 57-63.
- [37] Kim, S. H., Yu, J. (2013). Fe addition to Sn-3.5 Ag solder for the suppression of Kirkendall void formation. *Scripta Materialia*, 69(3), 254-257.
- [38] Wang, X., Li, D., Li, N., Wang, R. (2019). Growth behavior of intermetallic compounds in Fe/Sn diffusion couples. *Journal of Materials*

Science: Materials in Electronics, 30(13), 12639-12646.

[39] Huang, Y. C., Chen, S. W., Gierlotka, W., Chang, C. H., Wu, J. C. (2007). Dissolution and interfacial reactions of Fe in molten Sn-Cu and Sn-Pb solders. Journal of Materials Research, 22(10), 2924-2929.

[40] Lee, G. A., Cho, D. H., Sri Harini, R., Jung, J. P. (2022). Trends of Packaging and Micro-joining Technologies for Car Electronics. Journal of the Microelectronics and Packaging Society, 29(1), 7-16.