

자동차 전장용 무연솔더 및 솔더 접합부의 신뢰성 평가

방정환* · 유동열* · 고용호* · 윤정원* · 이창우*·†

*한국생산기술연구원 마이크로조이닝센터

Lead-free Solder for Automotive Electronics and Reliability Evaluation of Solder Joint

Jung-Hwan Bang*, Dong-Yurl Yu*, Young-Ho Ko*, Jeong-Won Yoon* and Chang-Woo Lee*·†

*Microjoining Center, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea

†Corresponding author : cwlee@kitech.re.kr

(Received February 2, 2016 ; Revised February 12, 2016 ; Accepted February 16, 2016)

Abstract

Automotive today has been transforming to an electronic product by adopting a lot of convenience and safety features, suggesting that joining materials and their mechanical reliabilities are getting more important. In this study, a Sn-Cu-Cr-Ca solder composition having a high melting temperature ($>230^{\circ}\text{C}$) was fabricated and its joint properties and reliability was investigated with an aim to evaluate the suitability as a joining material for electronics of engine room. Furthermore, mechanical properties change under complex environment were compared with several existing solder compositions. As a result of contact angle measurement, favorable spreadability of 84% was shown and the average shear strength manufactured with corresponding composition solder paste was $1.9\text{kg}/\text{mm}^2$. Also, thermo-mechanical reliability by thermal shock and vibration test was compared with that of the representative high temperature solder materials such as Sn-3.5Ag, Sn-0.7Cu, and Sn-5.0Sb. In order to fabricate the test module, solder balls were made in joints with ENIG-finished BGA and then the BGA chip was reflowed on the OPS-finished PCB pattern. During the environmental tests, resistance change was continuously monitored and the joint strength was examined after tests. Sn-3.5Ag alloy exhibited the biggest degradation rate in resistance and shear stress and Sn-0.7Cu resulted in a relatively stable reliability against thermo-mechanical stress coming from thermal shock and vibration.

Key Words : Lead-free solder, Vehicle, ELV(End-of-Life Vehicle), Complex stress, Reliability

1. 서 론

오늘날 친환경 소재사용에 대한 환경규제 법안 (RoHS 등)은 산업적용 범위가 보다 넓어지고 있다. 특히 일반 가전을 비롯하여 노트북, 휴대전화 등의 전자제품의 제조에 적용되는 무연솔더(Pb-free solder)는 Sn-Ag계를 중심으로 Sn-Cu계, Sn-Bi계 등에 제3의 원소 혹은 제4의 원소를 미량 첨가하는 연구들이 많이 시도되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 지난 10여년간 많은 전자제품이 무연화되었고 성공적으로 수행되어 왔다¹⁻²⁾. 그러나 환경규제의 움직임이 보다 많은 산업들로 진행됨에 따라 무연 솔더를 적용하는 많은 전자

모듈들이 보다 높은 물성과 신뢰성을 요구받게 되었다³⁾. 지난 10여 년 동안 환경규제 대상에서 제외되어 왔던 자동차 산업에 대한 환경 규제도 유럽연합(EU)에서 발의한 폐차 처리 지침(End-of-Life Vehicle, ELV)을 시작으로 본격화될 전망이다. 더욱이 최근 자동차 산업은 각종 편의/안전 기능과 고효율을 추구하면서 차량용 반도체 및 전장품의 적용이 증가하고 있어 2020년에는 차량 대당가격의 70% 이상이 전장품으로 대체될 전망이다. 그러나 일반 전자제품에 비교하여 보다 가혹한 사용 환경을 요구받는 자동차 전장품의 신뢰성을 보증하기 위해서는 고 신뢰성 접합소재의 개발이 선행되어야 한다. Table 1은 자동차 전장품의 사용 환경을 나타내고 있다. 자동차 전장품은 다른 일반적인 제

Table 1 Environment of automotive electronics

Parameter	Consumer	Industrial	Automotive
Temperature	0℃~+40℃	-10℃~+70℃	-40℃~+155℃
Operation Time	1~3 years	5~10 years	up to 15 years
Humidity	Low	Environment	0~100%
Tolerated failure rates	3%	<<1%	target: zero failure
Supply	up to 2 years	up to 5 years	up to 30 years

품과 달리 고온 고습, 열충격, 진동, 오염 등의 복합적이고 가혹한 사용 환경에 노출된다⁴⁻⁵⁾. 특히 트랜스미션과 엔진 주변의 사용 중 온도는 130℃~150℃에 이른다. 대표적 무연 솔더 조성으로 신뢰성이 검증되어 널리 사용 중인 Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305)의 경우 217℃의 용점을 갖는 중온계 솔더에 가까우며 특정 환경조건에서 신뢰성이 급격히 저하되는 문제를 나타냄으로 엔진룸 내 전장품에 적용하기에는 어려움이 있다⁶⁾. 또한 일반 기계적 특성시험 (전단강도시험, Lead pull test 등) 과 일반 신뢰성 시험 (열 충격시험, 항온항습 시험 등)으로는 자동차의 사용 환경 중에 일어나는 진동, 충격 등의 외부적 인자를 반영할 수 없어서 실제 파괴모드에 이르는 환경을 가속적으로 제공할 수 없다⁷⁻⁸⁾. 일반적으로 자동차 전장모듈에 적용하는 Sn-Pb 공정솔더의 신뢰성은 진동에 대한 평가가 일부 이루어져 있으나 무연솔더의 소재 특성을 반영한 것은 아님으로 복합진동시험 등을 포함하는 정밀평가가 필요하다⁹⁻¹⁰⁾.

이에 따라 본 연구에서는 Sn-Cu-Cr-Ca 무연솔더의 젖음성, 기계적 강도 등의 접합물성을 평가하여 엔진룸용 전장품의 접합소재로서의 적합여부를 평가하였다. 또한 산업적으로 가장 많이 사용되고 있는 Sn-3.5Ag의 솔더와 비교적 중고온계로 분류할 수 있는 Sn-0.7Cu, Sn-5.0Sb 솔더를 사용하여 복합 환경시험에 따른 신뢰성 평가를 연구한 결과를 기술하였다.

2. Sn-Cu-Cr-Ca 솔더

2.1 솔더 모합금 제조 및 시편 제작

Cr, Ca는 산화에 취약함으로 Sn 호일(Foil)과 함께 압연하여 용융시킴으로서 합금화를 용이하게 하였다. 유도가열을 이용해 진공분위기에서 600℃까지 상승시킨 후 Ar 분위기에서 1100℃로 가열하여 Cr을 완전히 용해시켰다. 이후 균질화 처리를 하고 ICP 분광기(Inductively Coupled Plasma Spectrometer)를 통하여 성분분석을 진행하였으며, 이를 통해 미량의 Cr과 Ca의 정량분석을 행하였고, Sn-0.7 wt.% Cu-0.2 wt.%

Cr, Sn-0.7 wt.% Cu-0.2 wt.% Cr-0.15 wt.% Ca의 솔더합금 조성을 확인하였다. 솔더 페이스트는 진공 가스 아토마이저(Atomizer)를 이용하여 20~38 μm 크기의 파우더를 제립한 후 RMA 타입 플러스와 혼합하여 제조하였다. 제작된 솔더 페이스트에 대한 접합강도, 인쇄성을 평가하기 위하여 FR4 재질의 시험평가용 경성 PCB를 제작하였다. PCB는 1005 사이즈 레지스터 칩의 전단강도, 0.08~0.8 mm 패드간 거리를 가지는 연속 인쇄성 시험을 평가하기 위해 설계, 제작되었다. 칩의 접합강도 시험용 모듈은 솔더 페이스트를 사용하여 리플로우 공법으로 제작하였으며 리플로우 공정의 최고 온도(Peak temperature)는 260℃로 설정하였다.

2.2 용점 및 젖음성 측정 결과

DSC(Differential Scanning Calorimetry)를 이용하여 용점을 측정한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. Sn-Cu-Cr은 230.9℃ Sn-Cu-Cr-Ca는 231.3℃의 용점을 각각 나타내었다. 시료는 합금의 중앙 부분에서 10 mg 씩 채취하였으며, 50℃에서 안정화 시킨 후 10℃/min으로 300℃까지 상승시키고 같은 속도로 냉각시켰다. Sn-0.7Cu합금의 공정온도가 227℃인 것을 감안하면 Cr과 Ca의 첨가로 약 4℃이상의 온도상승이 나타난 것으로 사료된다. 현재 상용화 되어 적용되고 있는 고온계 솔더로 Sn-5Sb 합금의 공정온도가 245℃이고 기존의 고온계 솔더에 대해 보고를 감안하면¹¹⁾ 230℃이

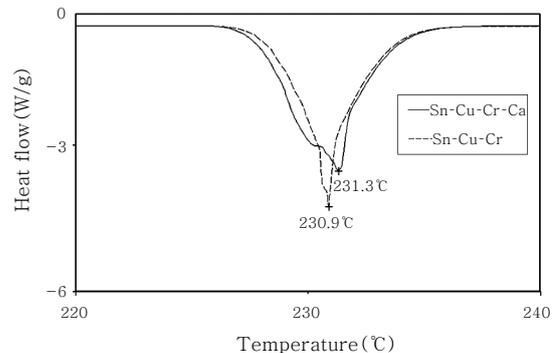


Fig. 1 DSC Results of Sn-Cu-Cr and Sn-Cu-Cr-Ca alloy

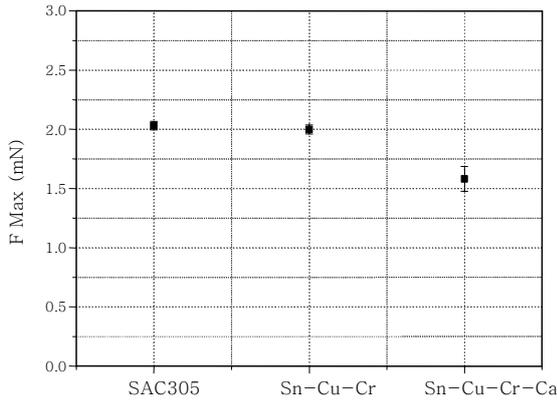


Fig. 2 Wetting force of SAC305 and Sn-Cu-Cr, Sn-Cu-Cr-Ca alloys

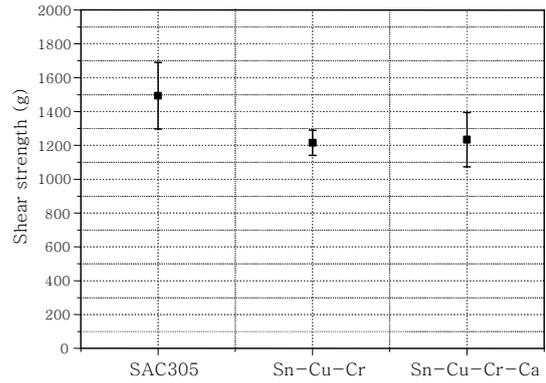


Fig. 3 Joint strength of 1005 type resistance chip as each alloy composition(Ave. of 10 samples)

상의 용점을 지니는 개발합금은 새로운 중고온계 합금이라고 할 수 있겠다. 특히 Sb함유 솔더가 Sb의 유해성 검증으로 지속적 사용이 불투명한 것을 고려하면 중온계 솔더 적용에 대한 대안으로서 적용될 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 2는 Wetting balance 시험기를 이용하여 용융솔더에 대한 Cu 쿠폰의 젖음력을 측정된 결과이다. SAC305와 Sn-Cu-Cr은 약 2 mN으로 동등한 수준의 젖음력을 나타내었지만, Sn-Cu-Cr-Ca는 SAC305 솔더에 비교하여 평균 5% 가량 낮은 젖음력을 나타내었다. 이는 Ca의 산화도가 다른 원소에 비교하여 높기 때문에 Ca의 산화가 Cu pad와의 표면 반응을 방해하여 젖음력을 저하시킨 것으로 추측된다. Ca의 친산화력은 물성제어가 어렵기 때문에 솔더 페이스트 제조시에 산화막 제거의 효과를 증진시키기 위한 플럭스 개발과 함께 reflow 공정에서 예비 가열온도와 공정시간의 최적화를 이루는 공정 조건을 개발하는 것이 양산공정에서 필요하리라 사료된다.

2.3 퍼짐성 및 접합강도 결과

용융시킨 솔더와 Cu pad 표면과의 접촉각을 접촉각 시험기를 이용하여 측정한 후 솔더의 퍼짐율을 아래의 정의를 이용하여 산출하였다.

$$\text{퍼짐율(\%)} = \frac{\text{시험에 이용한 솔더의 직경-퍼진솔더의 높이}}{\text{시험에 이용한 솔더의 직경}}$$

Sn-Cu-Cr 솔더의 Cu pad에 대한 퍼짐율은 약 84±2%의 결과를 나타내었다. 상대적 비교를 위하여 SAC305와 Sn-0.7Cu솔더의 퍼짐성을 측정한 결과, SAC305 상용 솔더의 경우 약 85%, Sn-0.7Cu 상용 솔더는 82%의 퍼짐율을 나타내었다. 퍼짐성은 소재의 계면장력과 관련되는 물성임을 고려하면 기존 상용솔더의 계

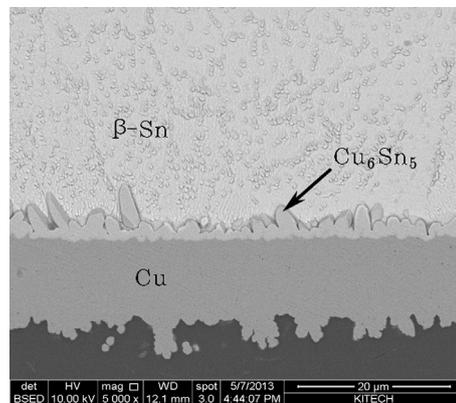


Fig. 4 Cross sectional SEM image of interface between Sn-Cu-Cr and Cu pad after soldering

면장력과 유사한 값을 지닌다고 판단된다. 이는 상온에서 시험하였을 때 플럭스의 영향을 많이 받게 되기 때문에 솔더 자체의 물성으로 평가하기는 어려우나, 플럭스의 영향을 동일하다고 가정하였을 때 상용솔더에 물성을 만족하는 것으로 사료된다.

1005 칩의 전단강도 결과를 Fig. 3에 나타내었다. SAC305 솔더와 비교하여 Cr과 Cr-Ca이 함유된 두 조성이 다소 낮게 나타났지만, 오차범위 이내에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 단위면적당 접합강도는 1.25 kg/mm²으로 양호한 값을 나타내었다. 이는 reflow공정에서 예열시간과 온도분위기를 충분히 상승시켜 플럭스의 활성화를 유도하여 솔더 페이스트 내 산화막을 제거하고 void와 같은 결함이 없이 접합부를 형성한 결과로 판단된다. Fig. 4의 단면 전자현미경 사진에서 솔더의 내부와 계면에서 결함이 없는 양호한 접합부의 형상을 보여주고 있다.

2.4 금속간화합물 분석

Fig. 4은 접합 후의 솔더 내부에 미세조직과 함께

Sn-Cu-Cr 조성의 솔더링 후 접합계면에 형성되는 금속간 화합물을 보여주고 있다. Cu_6Sn_5 금속간화합물층이 2~4 μm 두께의 불균일 형태로 형성되어 있으며, 솔더 내부 상(phase)인 β -Sn 내에도 금속간 화합물 입자(IMC particle)가 일부 분포하고 있었다. 이는 Sn-Cu솔더에서 나타나는 조직과 비교하여 유사한 미세조직을 나타내며, EDS 분석결과 Cr이 계면에서는 발견되지 않은 것으로 나타나서 β -Sn내에 분산되어 있을 것으로 사료된다.

이는 ICP 정량적 분석결과, Cr의 함유량이 확인되었음을 고려하면 Cr의 첨가량이 매우 적어서 EDS의 분해능으로 확인이 어려운 것으로 판단되며 계면에서의 편석현상은 없었음을 확인한 결과이다. Fig. 5는 150°C에서 각 100시간과 300시간 aging 시험 후 금속간 화합물층의 두께변화를 측정된 결과이다. Sn-Cu는 초기 두께 3.3 μm 에서 300시간 후 8.4 μm 로 5.1 μm 증가한데 비해 Sn-Cu-Cr 합금은 약 1.4 μm 증가하였다. 총 금속간 화합물 두께를 비교하면 Sn-Cu-Cr에서 발생한 Cu_6Sn_5 금속간 화합물의 두께는 Sn-0.7Cu 합금에서 발생한 금속간 화합물의 약 50%에 해당하는 두께로 현저히 금속간 화합물의 발생 및 성장이 적은 것을 알 수 있다. 이는 기존의 연구¹²⁻¹⁵⁾인 Sn-Ag-Bi-Cr 합금계의 실험에서 Cr의 첨가가 Cu_6Sn_5 의 형상을 초기 컬럼러 구조에서 Cr의 첨가에 따라 라운드 타입의 형상으로 바뀌게 되어 Sn의 확산이 억제됨으로 인해 IMC의 성장이 적어지게 된다는 보고와 잘 일치하고 있다. Sn-Cu-Cr-Ca 합금의 경우, Sn-Cu-Cr과 매우 유사한 결과를 나타내어 Ca첨가에 대한 영향이 나타나지 않았다고 판단된다. 결과적으로 Cr의 첨가는 금속간 화합물의 성장을 억제하는 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 이전의 연구¹²⁻¹⁵⁾에 따르면, Cr의 첨가에 대해

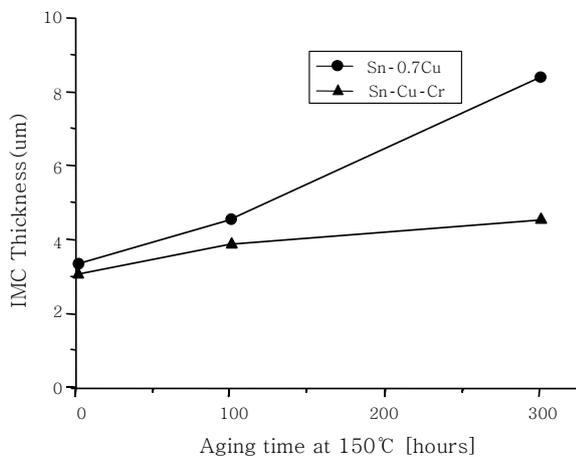


Fig. 5 Changing of IMCs layer thickness with various aging time(150°C)

Sn-Ag-Bi-Cr합금에 대해 Cr과 Ca의 Sn에 대한 고용도가 없음을 고려해 보면 결정립계 혹은 계면 근처에 존재하는 Cr이 금속간 화합물의 형성 및 이동을 방해하여 IMC의 두께증가가 적은 것으로 추측되나, 향후의 연구에서 금속간 화합물의 형성억제 기전과 이것이 접합부 신뢰성에 미치는 영향에 대한 연구가 필요하리라 판단된다.

3. Sn3.5Ag, Sn0.7Cu, Sn5.0Sb 솔더

3.1 시편 제작 및 시험 조건

본 연구에 사용된 솔더의 조성은 Sn-3.5Ag, Sn-0.7Cu, Sn-5.0Sb이었으며 솔더볼의 직경은 450 μm 이었다. 모든 조성은 특별한 언급이 없는 한 wt.%로 표기하였다. BGA의 경우 Cu 패드를 ENIG로 표면처리하였고, PCB Board는 Cu 패드를 OSP 처리를 실시하였다. PCB 위에 솔더볼과 같은 조성을 가지는 솔더페이스트를 도포한 후, BGA 칩을 마운트하고 리플로우를 이용하여 칩과 기판을 접합하였다.

이 때, 접합이 완료된 BGA칩과 기판은 데이지 체인으로 연결되어 전기저항을 측정할 수 있게 하였다¹⁶⁾. Fig. 6은 접합이 완료된 상태의 제작된 시편 이미지이다. 열피로 시험은 열충격시험과 열싸이클시험, 두 종류의 방법으로 진행하였다. 열충격 시험은 VT 7012 S2 (Votsch Co.)장비를 이용하여 진행하였으며, 열싸이클 시험은 VCS 7027-15(Votsch Co.)장비를 이용하였다. 열충격 시험의 경우 고온과 저온 챔버로 구성되어 있으며 엘리베이터 방식으로 급속하게 10초 이내에서 시편이 고온 영역과 저온 영역을 이동하며 시험이 진행되는 방식이다. 열싸이클 시험의 경우에는 하나의 챔버 내에서 설정된 냉각, 가열 속도에 따라 저온과 고온 영역에서의 시험의 진행된다. 열충격, 열싸이클 시험의 온도 범위는 자동차의 사용 환경인 -40~150°C 이었으



Fig. 6 Plane image of fabricated test sample module

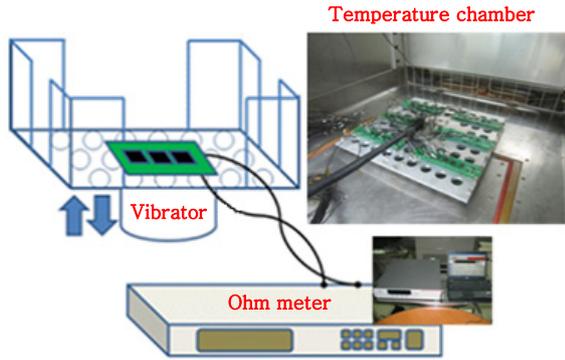
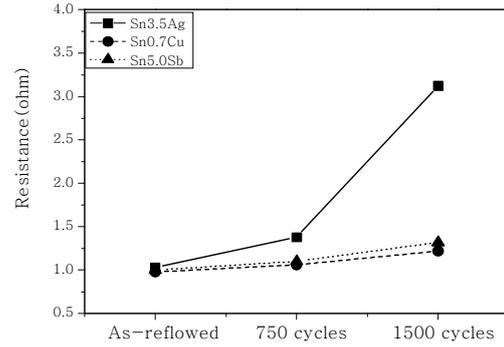


Fig. 7 The Schematic diagram of complex vibration test

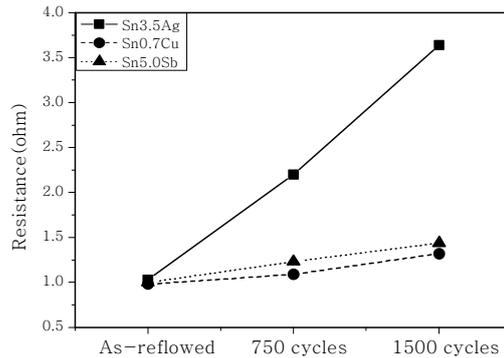
며 고온과 저온에서의 유지 시간은 각 10분이었고 한 사이클의 시간은 25분 이었다. 시험은 각각 1500 사이클 까지 진행하였다. 복합진동시험의 경우 진동을 가하면서 온도 조건을 변화했는데, 이 때 온도 조건은 8시간 동안 -40~150℃의 온도 변화를 준 후, 12시간 동안 상온의 온도 조건을 유지하였다. 복합진동시험의 진동조건은 주파수가 10~1,000 Hz, 진동가속도는 27.8 m/s²였다. 위와 같은 진동복합시험을 x, y, z축 차례대로 1회씩 실시하였고, 다시 1회씩 더 실시하여 총 120시간의 복합진동시험을 실시하였다. Fig. 7은 복합 환경진동시험의 모식도이다.

3.2 전기적 신뢰성 평가 결과

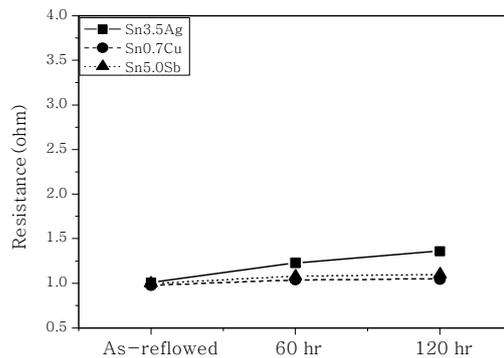
열충격, 열사이클, 복합진동시험에 따른 전기 저항의 변화를 Fig. 8에 도시하였다. 시험 시간이 증가하면서 모든 무연 솔더에서 전기 저항이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 열충격, 열사이클 시험 결과, 사이클 수가 증가 할수록 Sn-0.7Cu, Sn-5.0Sb 솔더에 비하여 Sn-3.5Ag 솔더의 전기 저항 증가율이 급격하게 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 각 시험이 1500 사이클 진행된 후, Sn-3.5Ag 솔더의 경우 초기 저항 대비 열사이클 시험은 253%, 열충격 시험은 203%의 저항 증가를 보였다. 반면에 Sn-0.7Cu와 Sn-5.0Sb 솔더는 열사이클 시험의 경우에는 1500 사이클 이후 35%, 44%가 증가하였으며 열충격시험의 경우에는 25%, 32%의 증가량을 보였다. 복합진동시험의 경우에는 Sn-3.5Ag의 전기저항 증가량은 120 시간 후 35%이었으며 Sn-0.7Cu와 Sn-5.0Sb는 각각 7%, 10%의 증가량을 보여, 열피로 시험에서 비슷하게 Sn-3.5Ag가 급격하게 증가하는 경향을 나타냈었다. Kang¹⁷⁾ 등은 멀티 리플로우 혹은 시효처리시 전기 저항이 증가하



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Electrical resistance changes of the three lead-free solders during (a)thermal shock test, (b) thermal cycle test, and (c)complex vibration test

는 것을 관찰하였으며, 이러한 저항증가의 이유는 계면 IMC 증가와 크랙 등 내부결함 증가에 기인하는 것으로 보았다. 본 연구에서도 신뢰성 시험 시간 증가에 따라 전기 저항이 증가하는 이유 역시 계면 IMC의 성장등에 기인하는 것으로 사료된다. 특히, Sn-3.5Ag에 대해서는 솔더 계면에 형성되는 판상의 Ag₃Sn이 성장하면서 전기저항의 증가에 보다 기여하는 것으로 보인다. Fig. 8의 결과에서 Sn-0.7Cu와 Sn-5.0Sb가 Sn-3.5Ag에 비하여 열충격, 열사이클과 같은 열피로 환경이나 복합진동 환경에서 상대적으로 안정적임을 알 수 있었다.

3.3 기계적 신뢰성 평가 결과

각 신뢰성 시험 후의 전단 강도 시험 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 접합 초기의 강도를 보면, Sn-0.5Sb는 29.2 kgf, Sn-3.5Ag는 28.1 kgf, Sn-0.7Cu는 23.1 kgf로 Sn-0.7Cu가 가장 낮은 값을 나타내었다. 그러나 Sn-3.5Ag와 Sn-5.0Sb의 경우에는 각 시험의 싸이클이 증가 할수록 접합 강도가 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 열싸이클의 경우 750 싸이클 진행 후 감소율은 Sn-3.5Ag와 Sn-5.0Sb가 각각 35%, 28%이었으며 1500 싸이클 진행 후에는 각각 58%, 55%의 감소율을 나타내었다. 열충격 시험의 경우에도 열싸이클과 유사하게 Sn-3.5Ag와 Sn-5.0Sb의 감소율은

750 싸이클 후에는 각각 45%, 21%이었으며 1500 싸이클 진행 후에는 각각 55%, 51%의 감소율을 나타내었다. 반면에 Sn-0.7Cu의 경우에는 초기 강도가 낮음에도 열충격, 열싸이클 시험 결과 다른 두 솔더에 비하여 강도의 감소율이 낮았다. 열싸이클 시험과 열충격 750 싸이클 진행 결과 강도의 감소는 각각 10%, 3%이었으며, 1500 싸이클 진행 후에는 각각 40%, 30%의 감소율을 나타내었다. 특히 750 싸이클까지의 강도 감소는 열피로 시험에서 다른 두 솔더에 비해 훨씬 낮았다. Fig. 8의 전기 저항의 변화와 비교할 때, Sn-3.5Ag의 경우 열피로 시험이 진행됨에 따라 전기 저항이 급격하게 증가하고, 접합 강도는 반대로 두드러지게 감소하는 관계를 나타냈었다. 복합진동시험의 경우에도 열충격, 열싸이클 시험과 같은 열피로 시험 결과와 유사하게 시험 시간이 증가할수록 접합 강도가 초기 값에 비해 감소하는 경향을 나타내었다. Sn-3.5Ag의 경우에는 120시간 시험 진행 후 초기값에 비하여 27%나 감소하였고, Sn-5.0Sb의 경우에는 60시간까지는 14%가량 감소하다가 120시간 후에는 15%로 감소하여 초기의 감소 폭에 비해 감소량이 줄어드는 경향을 나타내었다. 반면에 Sn-0.7Cu의 120시간 후의 감소율은 7% 수준으로 열피로 시험에서와 유사하게 접합강도의 감소가 작아, 상대적으로 좋은 신뢰성을 보였다. Fig. 9의 결과에서 열피로 및 복합진동 환경에서 Sn-3.5Ag와 Sn-5.0Sb에 비하여 Sn-0.7Cu가 보다 안정적이라 할 수 있다.

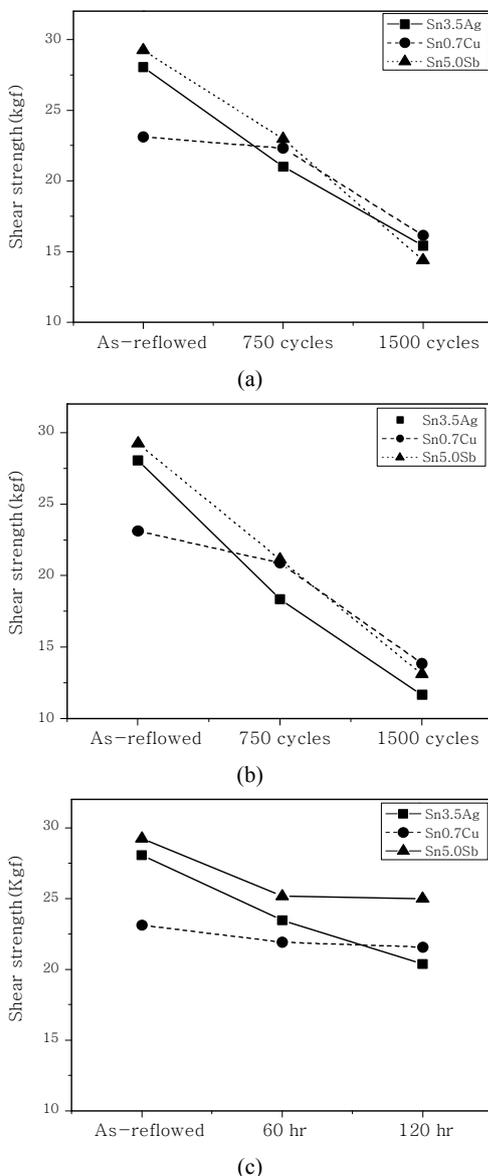


Fig. 9 Shear strength variation of the three lead-free solders during (a)thermal shock test, (b)thermal cycle test, and (c)complex vibration test

3.4 단면 및 파면 분석

PCB의 Cu층과 솔더간의 접합 단면을 관찰하여 접합 초기 상태와 열싸이클 시험 후의 단면을 Fig. 10에 나타내었다. 각 솔더의 계면 반응으로 생긴 IMC의 조성은 Sn-3.5Ag, Sn-0.7Cu, Sn-5.0Sb 모두 동일하게 Cu₆Sn₅이었다. Sn-3.5Ag의 경우에 열싸이클 시험 1500 싸이클 후 IMC는 4.24 μm에서 4.78 μm 정도로 성장하였고 조대화된 IMC들의 스폴링 현상이 나타났는데 접합 강도의 저하에 많은 영향을 미친 것으로 사료된다. Sn-5.0Sb의 경우 IMC는 초기에 4.24 μm에서 시험 후 5.87 μm까지 성장하였다. Sn-0.7Cu의 경우에는 IMC의 두께가 1.96 μm에서 2.64 μm로 성장하였으며, Sn-3.5Ag와 Sn-5.0Sb에 비하여 IMC의 두께가 접합 초기 및 시험 후에도 가장 얇은 것을 확인하였다. 이는 솔더 내에 함유되어 있는 Cu가 이미 공정조성까지 함유되어 있어 PCB의 Cu 확산 구동력을 감소 시켰기 때문으로 추측된다. BGA chip쪽의 Ni(P)층

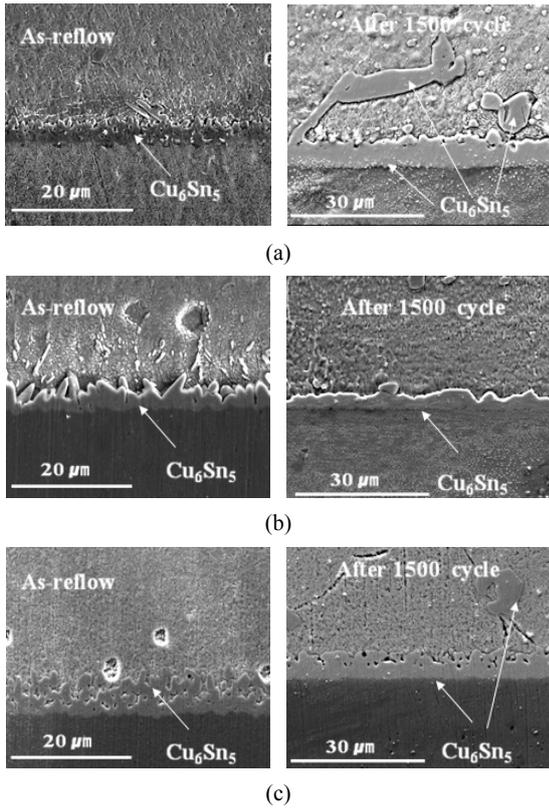


Fig. 10 Cross section SEM images of the three lead-free solders at PCB side after thermal cycle test. (a)Sn-3.5Ag, (b)Sn-0.7 Cu, and (c)Sn-5.0Sb

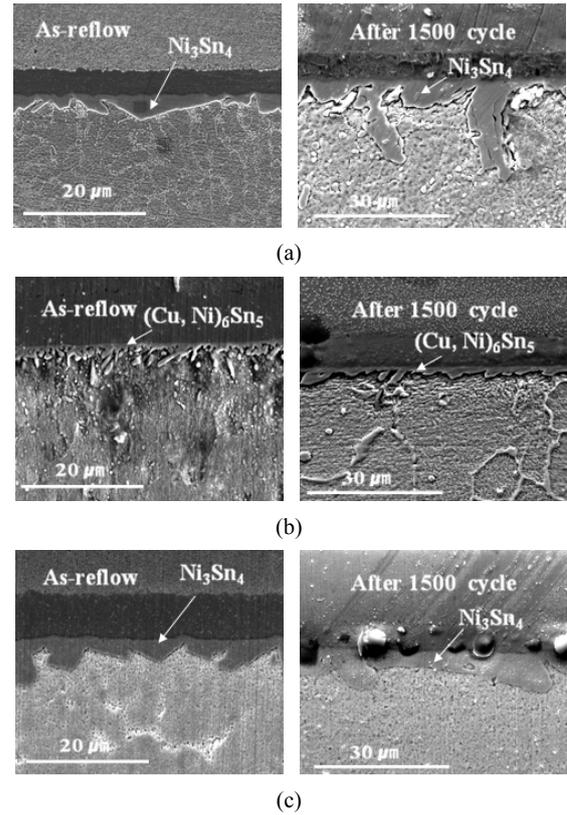


Fig. 11 Cross section SEM images at BGA chip side after thermal cycle test (a)Sn-3.5Ag, (b)Sn-0.7 Cu, and (c)Sn-5.0Sb

과 솔더 간의 접합 초기 및 열사이클 시험 후의 단면을 Fig. 11에 나타내었다. 접합부의 IMC는 Sn-3.5Ag와 Sn-5.0Sb의 경우에는 Ni_3Sn_4 이었다. 반면에, Sn-0.7Cu의 경우에는 $(Cu, Ni)_6Sn_5$ 가 형성됨을 확인하였다. IMC의 두께는 Sn-3.5Ag가 $5.33 \mu m$ 에서 $6.41 \mu m$ 로 성장하였고 Sn-5.0Sb의 경우 $2.87 \mu m$ 에서 $3.86 \mu m$ 까지 성장하였다. Sn-0.7Cu의 경우에는 $1.55 \mu m$ 에서 $1.98 \mu m$ 성장을 보였는데 PCB쪽에서와 같이 가장 얇은 IMC 두께를 나타내었다. 복합진동시험 후 전단 강도 시험에 따른 파면을 관찰한 사진이 Fig. 12에 나타나 있다. Sn-3.5Ag의 경우에는 취성파괴의 경향을 나타냈으며, Sn-5.0Sb의 경우에는 취성파괴와 연성파괴가 동시에 나타나는 경향을 보였다. 반면 Sn-0.7Cu의 경우에는 연성파괴가 우세한 파단면을 보였다. 파괴 모드의 양상이 차이가 나는 것은 IMC 두께에 대한 영향과 솔더 내부에 형성되는 IMCs의 종류 및 형상에 기인하는 것으로 생각된다. Sn-0.7Cu의 경우 열피로 시험 및 복합진동시험에서 시험 전후 IMC의 두께 증가가 두드러지게 나타나지 않았으며 세 가지의 무연 솔더 중에서 가장 얇은 두께를 나타내었다. 또한 Sn-3.5Ag의

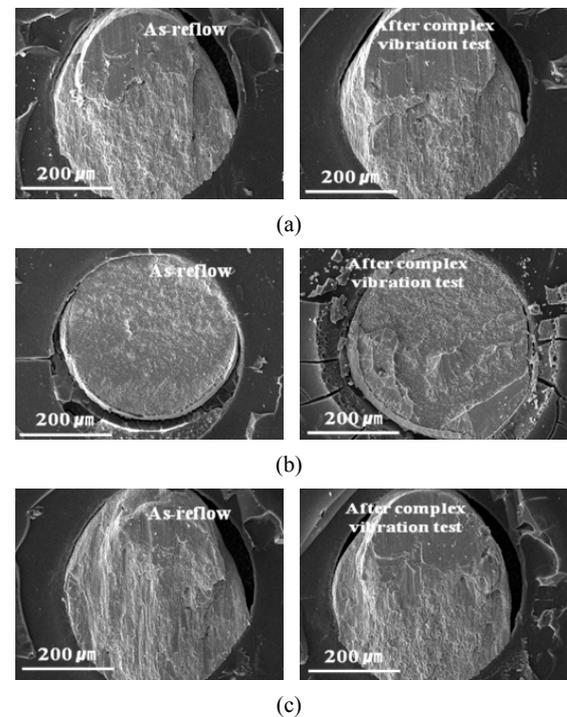


Fig. 12 SEM images of fracture surface from shear test (a)Sn-3.5Ag, (b)Sn-0.7Cu, and (c)Sn-5.0Sb. The shear test was performed after 120 hr complex vibration test

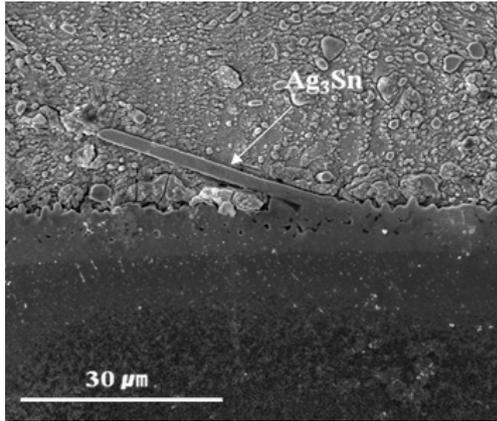


Fig. 13 Ag₃Sn IMC of Sn-3.5Ag after complex vibration test

경우에 Fig. 13에서 보는 바와 같이 각 시험 후 Ag₃Sn이 조대화되는 것을 확인 할 수 있었다. Sn-3.5Ag 솔더에서 각 신뢰성 시험 후 접합 강도가 크게 감소하는 이유는 조대화 된 Ag₃Sn의 영향으로 생각된다. 그리고 Sn-5.0Sb의 경우 Sn-3.5Ag에 비해 작지만, 초기 접합 강도 대비 큰 강도 저하를 나타내는 이유도 상대적으로 두꺼운 IMC에 기인한 것으로 생각된다. Date¹⁸⁾ 등은 충격 시험에서 시효처리 된 경우 접합 강도의 저하가 일어나는 원인으로 IMC의 증가와 결합 생성에 의한 파단 모드의 변화가 원인이라고 하였는데, 본 연구에서도 접합 강도의 저하는 시험 진행 동안의 IMC 증가나 결합의 생성으로 인하여 일어나는 것으로 생각되며, 파단면의 관찰에서 나타나는 것과 같이 일부 벽계 파괴 양상¹⁹⁾을 나타내는 것으로 보아 크랙 형성에 따른 취성 파괴의 양상도 함께 나타내고 있다.

4. 결 론

자동차 산업에 적용하는 전자모듈의 신뢰성에 대한 평가 및 공정에 대한 개선은 비단 복합 진동시험만에 국한되어 있지는 않다. 내 충격성, 미세구조변화에 따른 기계적 강도변화 등 많은 신뢰성 인자를 검증해야 무연솔더의 안정적 적용을 기대할 수 있으리라 생각한다. 그러나 기존의 일반 전자제품에 비교하여 온도, 습도, 외부적 진동, 충격 등 보다 많고 복잡한 외부 사용 환경이 고려되어야 하기 때문에 전류인가를 포함한 복합 환경의 조건에서 기계적, 전기적 물성변화를 관찰하여 사용자 조건에 만족하는 공정과 소재가 개발되어야 할 것이다. 특히 고온에서 보다 안정적인 무연솔더의 개발을 통하여 미세구조의 변화에도 만족할 만한 신뢰성을 확보하기 위한 많은 연구가 필요한 상태라 생각된다.

References

1. Y. K. Jee, Y. H. Ko, and J. Yu, *J. Mater. Res.*, Effects of Zn addition on the drop reliability of Sn-3.5Ag-xZn/Ni(P) solder joints, *J. Mater. Res.*, 22 (10) (2007), 1879
2. B. I. Noh, S. H. Won, and S. B. Jung, Study on Characteristics of Sn-0.7wt%Cu-Xwt%Re Solder, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 14 (4) (2007), 21
3. Yu-Jae Jeon, Do-Seok Kim, Young-Eui Shin, A Study on the Fracture Mode Characteristics of Automotive Application Component Lead-free Solder Joints, *Journal of KSAE*, 19 (6) (2011), 90-96
4. Yong-Ho Ko, Sehoon Yoo and Chang-Woo Lee, Evaluation on Reliability of High Temperature Lead-free Solder for Automotive Electronics, *Journal of Microelectronics & Packaging Society*, 17 (4) (2010), 35-40
5. S. I. Son, Y. E. Shin, Y. J. Jeon, A Study on Tensile Characteristic of QFP Lead-free Joint for Automotive Electrical Parts, *Korean Society of Precision Engineering*, (2010), 1103-1104
6. Sanghun Jin, Namhyun Kang, Kyung-mox Cho, Changwoo Lee, Wonsik Hong, Behavior of Vibration Fracture for Sn-Ag-Cu-X Solders by Soldering, *Journal of KWJS*, 30 (2) (2012), 65-69 (in Korean)
7. R. W. Johnson, J. L. Evans, P. Jacobsen, J. R. Thompson, and M. Christopher, The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics, *IEEE Trans. Electron. Package. Manufac.* 27 (3) (2004), 164
8. J. H. Choi, S. W. Jun, H. J. Won, B. Y. Jung, and T. S. Oh, Electromigration Behavior of the Flip-Chip Bonded Sn-3.5Ag-0.5Cu Solder Bumps, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 11 (4) (2004), 43
9. Y. S. Chen, C. S. Wang, and Y. J. Yang, Combining vibration test with finite element analysis for the fatigue life estimation of PBGA components, *Microelectron. Reliab.*, 48 (2008), 638
10. F. X. Che and John H. L. Pang, Vibration reliability test and finite element analysis for flip chip solder joints, *Microelectron. Reliab.*, 49 (2009), 754
11. Namhyun Kang, Hye Sung Na, Seong Jun Kim, Chung Yun Kang, Alloy design of Zn-Al-Cu solder for ultra high temperatures, *Journal of Alloys and compounds*, 467, Issues 1 (2) (2009), 246-250
12. Guobiao Su, Yongjiu Han, Chunyan Wang, Hongbin Wang and Xicheng Wei, Effect of 0.05% Cr on Intermetallic Compound Layer Growth for Sn-Ag-Cu Lead-free Solder Joint during Isothermal Aging, *16th IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers) International Symposium*, (2009), 393-396
13. Xi Chen, Anmin Hu, Ming Li, Dali Mao, Effect of Aging on the Interfacial Reaction between Sn-9Zn-xCr Solder and Cu Substrate, *IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, 1 (4) (2007)

14. H. Wang, A. Hu, C.C.M. Li, D.Mao, Oxidation Behavior and Intermetallic Compounds Growth of Sn-Ag-Bi-Cr Lead-free Solder, *IEEE(The Institute of Electrical and Electronics Engineers)*, 1 (4) (2007)
15. Junghwan Bang, Dong-Yurl Yu, Yong-Ho Ko, Jeonghan Kim and Chang-Woo Lee, Joint Property of Sn-Cu-Cr (Ca) Middle Temperature Solder for Automotive Electronic Module, *Journal of KWJS*, 31 (5), (2013), 54-58 (in Korean)
16. G. Subbarayan, A procedure for automated shape and life prediction in flip-chip and BGA solder joints, *Journal Electron Packaging*, 118 (1996), 127-133
17. S. K. KANG, W. K. CHOI, M. J. YIM, and D. Y. SHIH, Studies of the Mechanical and Electrical Properties of Lead-Free Solder Joints, *J. Electron. Mater.*, 31 (11) (2002), 1292
18. M. Date, T. Shoji, M. Fujiyoshi, K. Sato, K.N. Tu, Ductile-to-brittle transition in Sn-Zn solder joints measured by impact test, *Scripta Materialia*, 51 (2004), 641
19. J Koo, J Chang, YW Lee, SJ Hong, KS Kim, HM Lee, New Sn-0.7Cu-based solder alloys with minor alloying additions of Pd, Cr and Ca, *Journal of alloys and compounds*, 608 (2014), 126-132