

고강도 전자소자 리드프레임용 Cu/STS/Cu 클래드 메탈제조 및 물리적특성에 대한 열안정성 연구

김 일 권** · 손 문 의* · 김 용 성*[†]

*서울과학기술대학교 NID대학원

**서울과학기술대학교 신소재공학과

Fabrication of the Cu-STS-Cu Clad Metal for High Strength Electric Device Lead Frame and Thermal Stability on Their Physical Properties

Il-Gwon Kim**, Moon-Eui Son* and Young-Sung Kim*[†]

*Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

**Advanced Materials Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

[†]Corresponding author : youngsk@seoultech.ac.kr

(Received September 19, 2014 ; Revised October 7, 2014, Accepted October 13, 2014)

Abstract

We have successfully fabricated high strengthening Cu/STS/Cu 3 layered clad metal of 70 kgf/mm² grade for electric device lead frame, and investigated thermal effect of the mechanical and physical properties on the Cu/STS/Cu 3 layered clad metal lead frame material at different temperatures ranging from RT to 200°C. The fabricated clad metal shows a good thermal stability under 6% degrading of mechanical tensile strength and hardness change at 200°C and also physical properties show stable thermal and electrical conductance of over 220 W/m·K and 58.44% IACS upto the 200°C. The results confirm that fabricated high strengthening Cu/STS/Cu 3 layered clad metal can be applied for the high performed electrical lead frame devices.

Key Words : High strength clad metal, Power device, Lead frame, Thermal effect, Physical property

1. 서 론

최근 정보통신 제품의 성능향상 및 소형화 추세로 인하여 사용되는 전기, 전자회로에서 단위 면적당 전류 및 전압이 지속적으로 상승하게 되면서 도전성 소재는 더 가혹한 환경에 노출되고 있다¹⁾. 또한 이와 같은 환경에서 특히 과거에 고려되지 않았던 순수한 전기적특성인 도전특성 외에 이들에서 추가로 발생하는 다양한 종류의 발열특성이 전기, 전자소자의 기계적 특성변화에 따른 수명 및 물리적특성의 성능에 많은 영향을 미치고 있다. 특히 휴대폰, 태블릿 PC, 노트북 등의 급격

한 발전으로 인해 반도체 리드프레임 패키징 소재의 높은 기계적 강도와 열 안정성 등이 크게 요구 되고 있다. Fig. 1에는 기존의 리드프레임 소재로 사용되던 동합금을 그 강도와 전기전도도 특성치에 의거한 기술 로드맵이 제시되었다^{2,3)}. 최근 과도한 소자에서 과도한 발열로 소재에 열영향을 미치는 파워LED용과 고성능 반도체소자 및 전기, 전자소자의 리드프레임 시장의 특성은 고강도와 전기전도도를 동시에 충족시키며, 열안정성 및 방열특성이 우수한 합금의 개발이 요구되고 있다. 이때 강도 향상을 위해 Cu기저금속에 첨가되는 원소들이 기본적으로 전기전도성이 Cu보다 낮기 때문에 기본적으로 전기전도도 향상을 위해 은<구리>금<기타

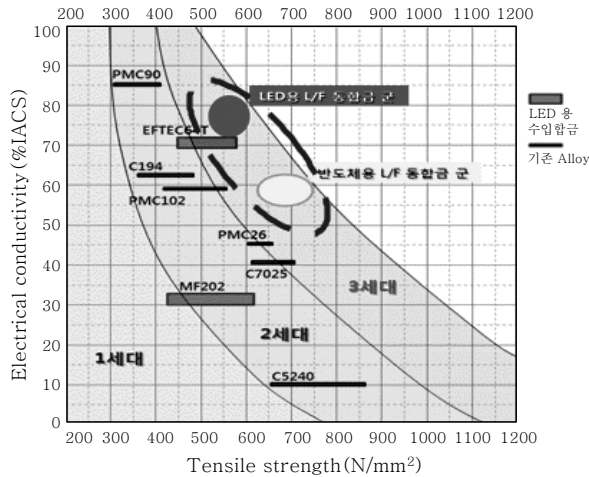


Fig. 1 Technology roadmap of copper alloy for electronic devices

금속원소를 첨가함에 따른 기계적 강도를 감소시키는 원소들로 기계적 부품으로 적용하기에 너무 무르고 가격도 비싸서 적용이 어렵고 상대적으로 고전기전도도와 가격이 싼 금속은 구리 소재외에는 대안이 없다. 또한 강도를 좀더 높이면 전기전도도가 하락하고, 전기전도도를 올리면 강도가 떨어지는 기술적 한계가 있기 때문이다. 물론 지금도 리드프레임 시장에서 요구되는 고강도, 고전기전도도의 동시 구현을 위해 합금 성분계 및 성분비의 변경, 열처리 방법의 개발 등을 통하여 그 기술적 한계를 극복하고자 노력하고 있다. 그러나 이 또한 구리에 첨가되는 원소의 대부분이 희유금속 또는 환경유해물질로 향후 그 원재료 확보 문제, 안전성 역시 무시할 수 없기에 소재 개발에 새로운 패러다임이 필요한 시점에 있다고 할 수 있다. 따라서 기계적 강도와 열 안정성을 확보 할 수 있는 새로운 소재의 개발이 필요하다^{4-6,8)}.

현재 반도체 리드프레임 패키징 소재로는Cu-Ni-Si계 동합금, Cu-Fe-P계 동합금, alloy42(57.7% Fe, 41% Ni, 0.8% Mn, and 0.5% Co)등이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 하지만 이들 합금소재는 국제 연동 표준(%IACS : international annealed copper standard)에서 요구하는 50kgf/mm²이상의 기계적 강도와 70% 이상의 전기 전도도에 대한 요구를 충족시키지 못하고 있다^{5,6)}. 또한 이들 동합금 단일금속소재는 반도체 리드프레임 패키징 소재에 만족하는 높은 기계적 강도나 열 안정성 등을 확보하는데 한계를 극복하기 어렵다. 따라서 최근 단일금속소재로 가장 많이 사용되는 구리 소재에 강도가 높은 금속 소재를 적층 시킨 후 압연하여 높은 기계적 강도를 개선하려는 연구들이 진행 되고 있다⁹⁻¹¹⁾. 또한 실제 전기, 전자소자에서 방출되는 온도

를 고려하면 기존 가공경화된 동합금소재에서 응력완화에 따른 강도완화 상한온도 구간은 120℃ 부근으로 보고되고 있으며¹²⁾, 이들에 대한 기계적특성 변화는 보고되고 있으나, 최근 높은 발열을 유발하는 전기, 전자소자에서 발열온도에 대한 소재의 열안정성 및 열전달특성과 같은 물리적특성에 대한 연구 결과의 발표가 많지 않다.

본 연구에서는 최근 전기, 전자소자용 리드프레임 패키징 소재에서 요구하는 높은 기계적 강도 특성을 확보하기 위해 표면 부에 Cu 소재를 사용하여 전기 및 열전달 특성을 유지시키며, 중간 부에 높은 기계적 강도를 가진 이중 소재인 STS 소재를 클래딩 하여 압연비를 조절하여 기계적 강도를 개선하였다. 또한 본 연구에서는 최근 전기, 전자소자의 고기능화 및 소형화에 따른 발열온도를 고려하여 고강도 전기, 전자소자 리드프레임용 소재로 제조된 Cu/STS/Cu 클래드 메탈을 상온에서 최대 200℃ 온도영역에서 소재의 열안정성 및 물리적특성 변화에 대해 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 Cu-STSCu 클래드메탈 제조

본 연구에서 고강도 전기, 전자소자 리드프레임용 클래드메탈을 제조하기 위해 사용된 재료는 모재로 우수한 기계적 강도를 가진 스테인레스 스틸(STS316L, 제조사 : 대양금속)을 사용하였으며 부재는 구리(Cu, C1030, 제조사 : 이구산업, Cu - 99.96, P - 0.0017, O₂ - 0.0038)를 사용하였다.

Fig. 2는 고강도 전기, 전자소자 리드프레임 클래드 메탈 제작을 위한 압연 공정의 모식도로 압연 전후의 두께 변화를 그림으로 나타내었다. 클래드 메탈의 두께

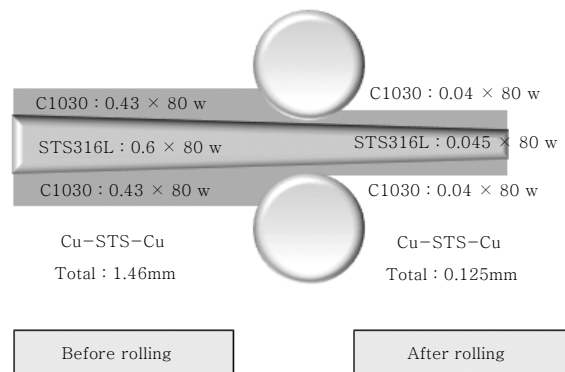


Fig. 2 Schematic illustration of cladding process by rolling for the fabrication of the high strength Cu/STS/Cu clad metal lead frame materials

는 STS 0.60 mm, Cu 상하층 각각 0.43 mm를 사용하여 총 1.46 mm를 사용하였다. 또한 전체 소재의 클래딩 시 접착력을 강화를 위해 소재 표면을 브러싱 작업 후 냉간압연 하였다. 압연시 1회당 평균압하비는 10% 수준으로 70 kg/mm² 급 수준의 고강도 전자소자의 리드프레임 클래드 소재를 확보하기 위하여 사전 예비실험들을 통하여 최종압하율은 92% 수준으로 제어하였다.

2.2 조직 및 파면관찰

제작된 클래드메탈의 두께는 광학 현미경(LG-PS2, 제조사 : 올림푸스)을 사용하여 모재와 부재간의 전체 두께를 관찰하여 압연비 제어하였으며, 모재와 부재간의 접합계면에 대해시편의 단면을 연마 한 후 이종재료의 계면에서의 접합결합을 미시적으로 관찰하였다.

파면의 분석을 통해 기계적 시험 후 소재의 강도와 인성에 대한 평가 및 소재의 미세부의 접합상태를 확인하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscope : SEM) 및 에너지 분산 스펙트로미터(energy dispersive spectroscopy : EDS)를 사용하였다.

2.3 기계적 특성

소재의 경도 시험은 상온에서 200℃까지 열 처리된 시편의 단면을 마이크로 비커스경 도기 (JP/FM7, 제조사 : FUTURE-TECH)를 사용하여 시험하중 25 gf (245.2 mN), 하중유 지시간 10초로 측정하였다. 경도시험은 연마 처리 후 표면에 흠이 없는 곳을 선택하여 압입자 크기의 5배 간격으로 각 5회씩 측정하였다.

고강도 전기, 전자소자 리드프레임 클래드 메탈의 기계적 강도는 응용분야를 고려하여 마이크로 인장시험편을 Fig. 3과 같이 제작하여 실험을 진행하였다. 제작된 인장 시험편의 평형부의 넓이는 1 mm로 압연방향과 일치하도록 방전가공기로 잘라 판상 인장시험편을 제작하였다.

인장강도는 마이크로인장시험기(SMT-H50, Space solution)를 사용하여 로드셀 50kg-f, 하중부속도

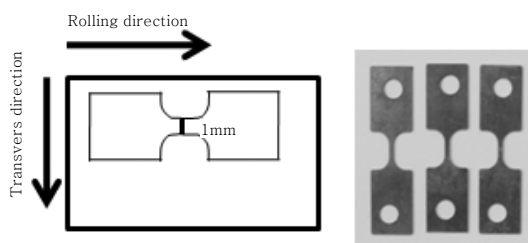


Fig. 3 Illustration for micro tensile test

50 μ m/s로 측정하였다¹³⁻¹⁵. 또한 소재의 열안정성을 확인하기 위해 상온에서 200℃까지 온도의 변화를 주어 온도 변화에 따른 기계적 인장강도를 실험하였다.

2.4 물리적 특성

소재의 열안정성을 평가하기 위해서 열전도도 특성을 측정하였다. 열전도 특성 분석은 시편의 온도 조건별 클래드 메탈의 비열을 시차 주사 열량계(DSC: differential scanning calorimetry, DSC 204 F1, 제조사: Netzsh)로 소재의 열용량값(C_p)을 측정하였다. 시편의 밀도는 아르키메데스의 수중 부유법을 사용하여 측정하였다. 열확산 특성을 측정하기 위해 25 mm 원형의 시편을 제작하여 표면 레이저 펄스의 균일 흡수와 반사를 방지하기 위해 콜로이드 흑연입자를 분사 처리하였다. 클래드 메탈의 열확산계수(α)는 laser flash(Nano Flash LFA 447, 제조사: Netsch)로 상온에서 200℃까지 50℃ 간격으로 측정하였다. 열 확산계수를 측정하기 위해 박판 아랫면에 Xenon nano-flash laser를 조사하였다. 그리고 박판 샘플의 윗면에서 적외선 온도 센서를 사용하여 온도변화를 전압의 변화를 통해 환산하여 열 확산계수 α 값을 이론적 계산을 통해 구하였다¹⁶⁻¹⁷. 또한 측정된 각 시편의 비열과 밀도 및 열 확산계수를 식 (1)의 관계식을 사용하여 온도변화에 따른 열전도도를 구하였다⁵⁻⁷.

$$K = \alpha d C_p \quad (1)$$

식(1)에서 k (W/m·K)는 열전도도, α (m²/s)는 열 확산계수(thermal diffusivity), d (kg/m³)는 밀도(density), C_p (J/kg·K)는 비열(specific heat)를 나타낸다.

전기 전도도 실험은 더블 브릿지 장비를 이용하여 KS D 0240 규격에 의거 측정하였다. 구리선에 대한 표준저항은 “20℃ 의 온도조건에서 길이 1m, 일정한 단면적(1mm²)을 가지는 표준 열처리된 구리선의 저항은 1/58 Ω , 즉 0.017241 Ω ”이며, 이 값을 100 % IACS (international annealed copper standard)로 정의한다^{18,19}.

$$\%IACS = ((1/\rho) \times 1.724 \mu\Omega \cdot cm \times 100) \quad (2)$$

식(2)에서는 전기비저항 값으로 정의 되며, 전기전도도는 상기 식(2)으로부터 소재의 값을 구하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4은 압연방향으로 제작된 Cu/STS/Cu 클래드

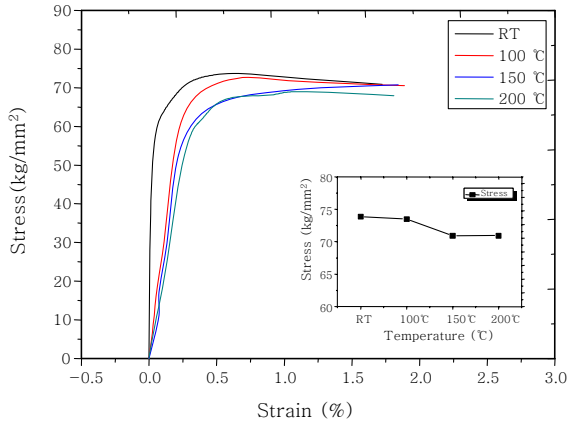


Fig. 4 Stress & strain curves of the Cu/STS/Cu clad metal at different temperatures ranging from RT to 200°C

메탈의 온도 변화에 따른 응력 변형률 곡선을 나타내었다. Cu/STS/Cu 클래드 메탈의 인장강도는 상온에서 실험한 시편이 73.84 kgf/mm²로 가장 높은 인장강도를 나타내었다. 또한 온도가 증가함에 따라 인장강도가 점차 저하하는 경향을 나타내었으나 변형률의 변화는 크게 나타나지 않았다. 특히 200°C에서 인장강도가 70.3 kgf/mm²로 약 5% 감소하였다. 이는 실제 고방열의 전기, 전자소자의 리드프레임에서 발생하는 발열 온도 약 80°C보다 높은 100°C ~ 200°C에서도 70 kgf/mm² 이상의 높은 인장강도를 유지하는 것으로 나타났다. 따라서 Cu/STS/Cu 클래드메탈은 고강도 전기, 전자소자 리드프레임용으로 사용시 상온에서 200°C까지 온도 안정성을 가지는 것으로 판단된다.

Fig. 5는 Cu/STS/Cu 클래드메탈의 인장시험후 파단면 사진을 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다. Cu/STS/Cu 클래드메탈에서 STS 316L 소재는 상온에서 200°C까지 내부에 미세 dimple들이 균일하게 분포하는 전형적인 연성파면의 특징을 나타내었다. 또한 온도증가에 따른 파면의 변화는 발견되지 않았으며, STS 316L 소재를 클래딩 하고 있는 C1030 소재도 온도변화에 따른 파면의 변화는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 고강도 전기, 전자 리드프레

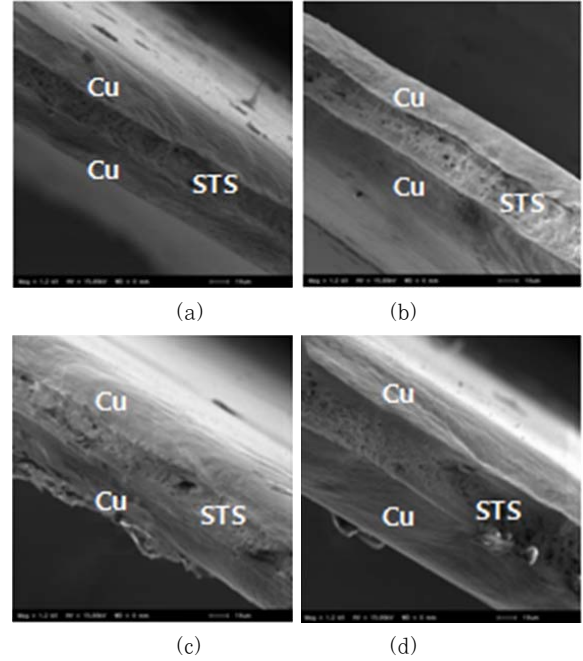


Fig. 5 Fracture morphology of the Cu/STS/Cu clad metal at different temperatures ranging from RT to 200°C, (a) RT, (b) 100°C, (c) 150°C, (d) 200°C

임용 소재로 사용하는 경우 외부 충격에 대한 소재의 파괴인성도 양호할 것으로 판단된다.

Table 1는 상온에서 200°C까지 1시간 동안 열처리된 클래드메탈 시편의 단면에 대한 미소경도시험 후 경도 값을 나타내었다. Cu/STS/Cu 시편의 경도는 C1030 소재는 상하층 모두 120 Hv로 수준으로 나타났으며, STS 316L 소재는 400 Hv로 수준으로 나타났다. 또한 클래드메탈 소재의 모재인 STS의 경우 150°C까지 전혀 경도의 변화가 발생하지 않았으며, 200°C 열처리된 시편의 경우 경도의 감소는 2% 수준으로 온도의 영향은 거의 발생하지 않았다. 반면 부재인 C1030소재의 경우 150°C에서부터 3% 미만 수준의 미미한 경도의 감소가 발생하였으나 200°C에서 경도의 감소가 약 6%로 나타났다. 이 클래드메탈 소재의 Cu 소재는 약 150°C에서부터 다소간의 열영향에 의한 클래딩공정시 유입된 응력완화 차원의 미미한 경도가 감소한 것으

Table 1 micro vickers hardness of the Cu/STS/Cu clad metal lead frame material at different temperatures ranging from RT to 200°C

Sample	RT	100°C	150°C	200°C
Cu(C1030) top	128.32 Hv	128.22 Hv	121.88 Hv	117.37 Hv
STS(STS 316L)	405.82 Hv	407.92 Hv	408.72 Hv	397.66 Hv
Cu(C1030) bottom	124.38 Hv	124.72 Hv	120.86 Hv	116.32 Hv

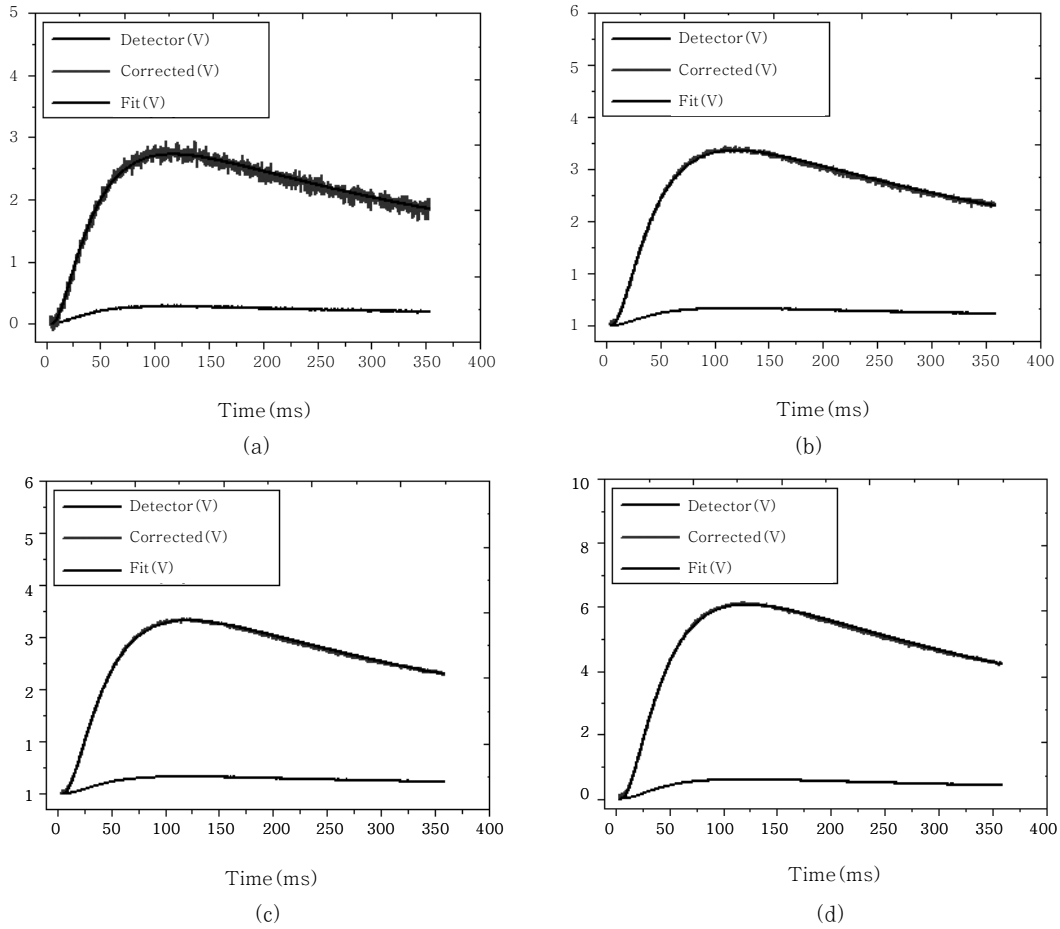


Fig. 6 Laser flash measurement result for the constant of thermal diffusivity at different temperatures ranging from RT to 200°C

로 판단되나, 실제 전기, 전자소자의 리드프레임으로 사용시 소자자체의 발열에 대한 온도 수준이 100°C 미만임을 고려할 때 소재의 열안정성은 우수한 것으로 판단된다.

Fig. 6는 Cu/STS/Cu 클래드메탈을 상온에서 200°C 까지 laser flash 법으로 측정된 결과를 나타내었다. 또한 laser flash 법으로 측정된 열 확산 계수값과, 비열 및 밀도 값을 적용하여 계산된 열전도도 등을 정리하여, 온도변화에 따르는 각 특성값의 변화를 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 시차주사 열량계로 상온에서 200°C 까지 온도 변화에 따른 Cu/STS/Cu 클래드메탈의 비열을 측정된 결과 온도가 증가함에 따라 비열이 증가하는 경향을 나타내었으나 열 확산계수는 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 열 확산계수와 비열, 밀도 값을 식(1)에 대입하여 계산된 평균 열전도도는 약 220(W/m·K)로 나타났다. 또한 열전도도는 온도가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내었으나 온도 변화에 따른 열전도도의 증가비는 큰 차이는 보이지 않았다. 이는 온도

가 증가함에 따라 소재의 비열 특성의 증가율이 열확산 계수의 감소율에 비해 열전달특성에 다소 영향을 더 주고 있음을 나타내고 있다. 그럼에도 불구하고 클래드 소재의 온도변화에 따르는 전체적인 열전도도의 변화는 3%이내의 범위내에서 안정성을 유지하고 있음을 보였다. 따라서 본 연구에서 제조된 고강도를 유지하면서

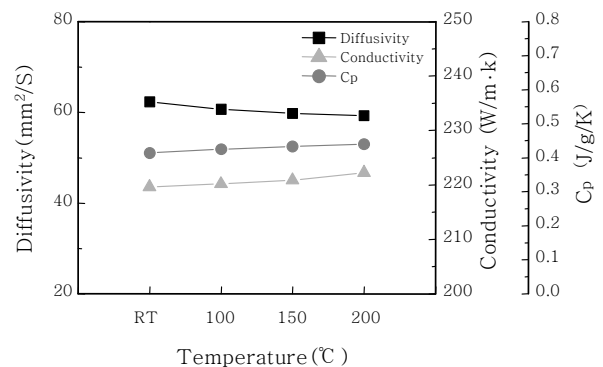


Fig. 7 Diffusivity, Cp, conductivity of Cu/STS/Cu clad metal lead frame material at different temperatures ranging from RT to 200°C

높은 열방출특성을 요구하는 전기, 전자 소자의 리드프레임 소재는 200℃까지 높은 열안정성을 유지함을 알 수 있었다.

4. 결 론

70 kg/mm²급의 고강도 전기, 전자소자용 리드프레임의 소재의 제조 및 물리적 특성에 대한 열안정성 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고강도의 기계적 특성을 갖는 소재를 확보하기 위해 Cu/STS/Cu 클래드방법의 이중소재 접합공정을 하였고, 이때 최대의 인장강도는 압연비 90%이상의 높은 가공비에서 70 kg/mm² 이상의 높은 값을 확보할 수 있었다. 또한 소재의 경도값의 변화는 모재 및 부재의 값들이 마이크로 Hv 값으로 405 및 120 수준으로 안정한 값을 유지하였다.

2) 고강도 리드프레임 소재의 기계적 열안정성을 평가하기 위해 소재의 실제 고방열의 전기, 전자소자의 리드프레임에서 발생하는 발열 온도 약 80℃보다 높은 100℃ ~ 200℃에서도 70 kgf/mm² 이상의 높은 인장강도를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 소재의 경도값의 변화는 검토한 온도 범위 150℃까지 모재 및 부재에서 3% 미만, 최대 200℃의 고온에서도 6%미만으로 우수한 열안정성을 보였다.

3) 상온에서 열전도도는 약 220(W/m·K)로 높은 열전달 특성을 나타냈으며, 온도변화에 따른 열전도도는 온도가 증가함에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 온도증가에 따라 소재의 비열 특성의 증가율이 열확산계수의 감소율에 비해 열전달특성에 영향을 주고 있음을 보여주었다.

4) 클래드 소재의 전기적 특성은 58.44 %IACS의 전기 전도도 값을 나타내었다. 이 값은 고강도 전기, 전자 소자용 리드프레임 소재 산업분야에서 요구되는 순동소재의 전기전도도 기준 50 %IACS 값에 대해 15% 이상 높은 매우 안정된 전기특성을 나타내었다.

이상의 결론으로부터 고압연비로 제조된 Cu/STS/Cu 3층 구조의 클래드메탈 리드프레임 소재는 70 kgf/mm²의 고강도를 유지하면서 높은 열방출특성을 요구하는 고기능성 전기, 전자 소자의 리드프레임 소재로 200℃까지 안정적인 물리적특성을 유지함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Reference

1. Seung Zeon Han, and Su-Hyeon Kim : Technological Trend in Thermo-mechanical Treatment of High Conductivity Copper Alloys, Trends in Metals & Materials Engineering, **21-2**(2009), 27-33 (in Korea)
2. Koya Nomura : R & D Kobe Steel Engineering Reports, **54-1** (2004) 115
3. Hoon Cho, Byoung-Soo Lee, and Hyung-Ho Jo : Development of High Strength and High Conductivity Cu Alloys, Trends in Metals & Materials Engineering, **21-2** (2008), 21-26 (in Korea)
4. Young-Bae Kim, Jongsup Lee, Guen-Ahn Lee and Sangmok Lee : An Overview and Prospects for Hybrid Materials, Trends in Metals & Materials Engineering, **24-4** (2011), 24-30 (in Korean)
5. Young-Sung Kim and Il-Gwon Kim : Thermal Stability of the Mechanical and Thermal Conductive Properties on Cu-STS-Cu Clad Metal for LED Package Lead Frame, Journal of KWJS, **31-5** (2013), 77-81 (in Korean)
6. Chang-Hun Lee, Ki-Chul Kim and Young-Sung Kim : Study on the Mechanical Properties and Thermal Conductive Properties of Cu/STS/Cu Clad Metal for LED/semiconductor Package Device Lead Frame, Journal of KWJS, **30-3** (2012), 230-235 (in Korean).
7. Byung-Koog Jang, Yoshio Sakka, Norio Yamaguchi, Hideaki Matsubara and Hyung-Tae Kim : Thermal conductivity of EB-PVD ZrO₂-4 mol% Y₂O₃ films using the laser flash method, Journal of Alloys and Compounds, **509** (2001), 1045-1049
8. E. Fred Schubert : Light Emitting Diodes, 2nd Ed. Cambridge University Press, 2003, 13
9. D. J. Lee, D. H. Ahn, E. Y. Yoon, S. I. Hong, S. H. Lee and H. S. Kim : Estimating interface bonding strength in clad metals using digital image correlation, Scripta Materialia, **68** (2013), 893-896
10. J.E.Lee, D.H.Bae, W.S. Chung, K.H.Kim, J.H.Lee, Y.R. Cho : Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum /copper clad-metal sheets, J. of Mater. Processing Technology, **187-188** (2007) 546-549
11. Jong Su, Sun Ig Hong : Design of high strength Cu alloy interlayer for mechanical bonding Ti to steel and characterization of their tri-layered clad, Materials and Design, **51** (2013), 293-299
12. Seung Zeon Han, Kwangjun Euh and Hyuk Chon Kwon : Technologies in Thermo-mechanical Treatment of High Strength and High Conductivity Copper alloys, Trends in Metals & Materials Engineering, **22-6** (2009), 12-18 (in Korean)
13. S. J. Yoo, D. H. Kim : Super thin 0.25 mm thickness white LED lamp with PCB type lead frame, Journal of the korean institute of electrical and electronic material engineers, **23-1**(2010), 34-37 (in Korean)
14. B. J. Kim, M. H. Jeong, S. H. Hwang, H. Y. Lee, S. W. Lee, K. D. Chun, Y. B. Park, Y. C. Joo :

- Relationship between tensile characteristics and Fatigue failure by folding or bending in Cu foil on flexible substrate, J. Microelectron. Packag. Soc., **18-1** (2011), 55
15. J. S. Jeong, K. H. Shin, J. H. Kim : Estimation of mechanical properties of Sn-xAg-0.5Cu lead-free solder by tensile test, Journal of KWJS, **29-1** (2011), 41-45 (in Korean)
 16. Soon-Jae Yu, Do-Hyung Kim, Yong-Seok Choi and Heetae Kim : Development of a very small LED lamp with a low-thermal-resistance lead frame for an LCD backlight unit, J. Information Display, **10-2** (2009), 49-52
 17. R. Kisiel, M. Jarosz : Thermal properties of SiC-ceramics substrate interface made by silver glass composition, Electronics Technology(ISSE), 34th International spring seminar on, 2011, 98-102
 18. J. H. Kang, S. O. Han : DC and AC characterization of metal conductivity using the van der pauw measurement method, The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2007, 157-160 (in Korean)
 19. K. J. Hong, L. S. Hun : A study on the precision measurement of metal electrical resistivity, The transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 2007, 37-39 (in Korean)