

Cu/Ag 복합판재의 전기/기계적 성질 및 프레스 성형성에 관한 연구

신제식

한국생산기술연구원 주조공정연구그룹

A study on electrical and mechanical properties and press formability of a Cu/Ag composite sheet

Je-Sik Shin

Liquid Processing & Casting Technology R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

Abstract : In this study, a novel Cu composite sheet with embedded high electric conduction path was developed as another alternative for the interconnect materials possessing high electrical conductivity as well as high strength. The Cu composite sheet was fabricated by forming Ag conduction paths not within the interior but on the surface of a high strength Cu substrate by damascene electroplating process. As a result, the electrical conductivity increased by 40% thanks to mesh type Ag conduction paths, while the ultimate tensile strength decreased by 20%. The interfacial fracture resistance of Cu composite sheet prepared by damascene electroplating increased by above 50 times compared to Cu composite sheet by conventional electroplating. For feasibility test for practical application, a leadframe for LED module was manufactured by a progressive blanking and piercing processes, and the blanked surface profile was evaluated as a function of the volume fraction of Ag conduction paths. As Ag conduction path became finer, pressing formability improved.

Key Words : electroplated Cu/Ag composite sheet, electrical conductivity, strength, formability

1. 서 론

동(Cu) 및 동합금은 우수한 전기/열 전도성, 가공성 등을 지니고 있어 최근 IT 전기·전자산업 분야에서 전자패키지용 배선소재로서 광범위하게 활용되고 있다. 하지만 최근 IT 전기·전자 제품이 지속적으로 대용량, 고집적, 초소형, 초고속, 초고주파화하는 추세에 있어 배선소재에서의 전력밀도 증가 및 응력 집중 현상은 불가피 하며 이는 곧 제품의 수명과 신뢰성 문제들을 야기하고 있다. 따라서 고강도와 고전도도를 동시에 보유하는 Cu계 신 배선 소재를 개발하는 것이 당 분야의 가장 중요한 이슈 중 하나로서 부각되고 있다¹⁻³⁾.

하지만 일반적으로 금속 소재는 강화 기구와 전기전도 기구가 상호 모순되는 특성을 지니고 있어 야금학적인 방법만으로 기계적 강도와 전기 전도도를 동시에 향상시키는 것은 매우 어렵다. 따라서 이를 해결하기 위하여 냉간가공 공정에 의한 Cu/Ag 필라멘트 복합재, 전기도금 공정에 의한 다층 Cu/Ag 복합재, 탄소 나노 파이버 강화 Cu 기지 복합재 개발한 연구결과들이 보고되고 있다. 하지만 이러한 복합재들은 높은 기계적 강도와 전도도의 우수한 조합특성에도 불구하고 계면 접합성, 성형성, 열적 안정성, 가공성 등에 있어 아직 해결해야 할 기술적 문제들이 산재해 있는 것으로 알려져 있다⁴⁻⁷⁾.

따라서 본 연구에서는 기존의 Cu계 소재가 갖는 특성을 뛰어넘는 새로운 배선소재를 개발하고자, 비교적 양호한 전도도에 뛰어난 기계적 강도를 갖는 Cu 합금 판재들을 기지재료로 사용하고, 고주파의

* To whom correspondence should be addressed.
jsshin@kitech.re.kr
접수 : 2012. 01. 13. 채택 : 2012. 05. 25.

전류가 흐르는 기관의 표피 부분에는 고전도도의 Ag 전도경로를 전해상감법으로 형성시킨 Cu/Ag 복합판재를 제조하였다 (Fig. 1(a) 참조). 표피효과에 의해 전류는 주파수가 증가함에 따라 표면 부위에 전류가 집중하여 흐른다는 것에 착안하여 (Cu 및 Ag의 skin depth는 Fig. 1(a) 참조), 본 연구에서는 소재 원가 절감 및 공정 용이성 등을 감안 Ag 전도경로의 깊이를 50 μm 이하하게 되게 하였다. 전해상감법으로 제조한 Cu/Ag 복합판재 주요 물성은 기관/전도경로 소재의 조합 및 Ag 전도경로의 부피분율의 함수로서 평가하였다. 또한 전해상감법으로 제조한 Cu/Ag 복합판재의 실제 전자패키징용 배선 부품 소재로 제조되어 사용될 수 있는지 여부를 알아보기 위하여 블랭킹, 피어싱, 트리밍 등의 프레스 공정으로 LED용 리드프레임을 제작하고 성형성을 조사해 보았다.

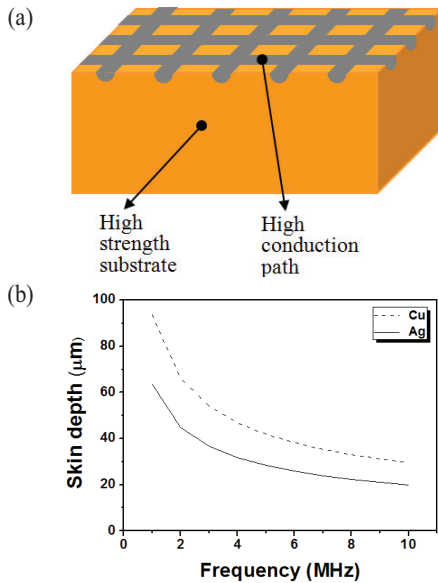


Fig. 1. (a) Schematic diagram of a novel Cu/Ag composite sheet and (b) skin depths of Cu and Ag as a function of electric frequency.

2. 실험

2.1. 복합판재 제조

전해도금 공정에 의하여 상용 Cu 합금 기관 위에 Ag 소재의 전도경로를 형성시킴으로써 3종류의 계면 형상을 갖는 Cu/Ag 복합판재를 제조하였다

(Table 1 참조). 상용 Cu 합금 판재로서는 두께 125 μm 의 C7025 소재와 두께 300 μm 의 C5210R 소재를 사용하였다 (화학조성은 Table 2 참조).

타입 A의 클래드 복합판재는 통상적인 DC 전해도금공정에 의하여 Ag를 Cu 합금 판재에 전착시켜 제조하였다. 타입 B와 C의 복합판재는 전해상감 공정에 의하여 제조하였다. 즉, Cu 판재 위에 스핀코터를 이용하여 액상 포토리지스트 잉크를 도포하고 열경화시켜 판재에 밀착시키고, UV 산란광을 이용하는 노광공정에 의하여 선폭/간격이 각각 100/100, 100/30, 20/20, 20/10 ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)인 격자 구조의 패턴을 현상한 후, FeCl3 용액에 침지 식각처리 하여 메쉬 타입의 전도경로용 트렌치를 형성시켰다. 형성된 트렌치에는 Ag를 전해도금 공정으로 채워 전도경로를 형성시켰다. 이 때 전도경로 내 공공의 생성을 방지하기 위해 펄스-역펄스 전류를 이용하였다. Ag 과도금층을 제거하여 복합판재의 표면을 평탄화하기 위해서는 모델명 KEMET TLP-600의 래핑머신을 이용하여 표면가공 하였다.

Table 1. Interface patterns of Cu/Ag composite sheets and specifications of the used materials

	Type-A	Type-B	Type-C
Interface pattern			
Conduction path width/spacing	-	100/100 100/30 20/20 10/10 ($\mu\text{m}/\mu\text{m}$)	spacing width
Substrate materials	<ul style="list-style-type: none"> ■ C7025 <ul style="list-style-type: none"> - electric conductivity : 49 %IACS - ultimate tensile strength : 672 MPa - sheet thickness : 0.127 mm ■ C5210R <ul style="list-style-type: none"> - electric conductivity : 14.2 %IACS - ultimate tensile strength : 803 MPa - sheet thickness : 0.3 mm 		
Conduction path material	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ag <ul style="list-style-type: none"> - electric conductivity : 109.7 %IACS - ultimate tensile strength : 172 Mpa 		

Table 2. Chemical compositions of the Cu alloys used as substrate (wt.%)

	Ni	Si	Mg	Fe	Pb	Mn	Zn	Sn	P
C7025	2.370	0.550	0.151	0.030	0.002	0.003	-	-	-
C5210R	-	-	-	0.004	0.004	-	0.004	7.253	0.156

2.2. 특성 평가

전기전도도는 ASTM F1529-97 방법에 따라 4 point probe법을 사용하여 측정하였으며 IACS

(International Annealed Copper Standard) 규격에 의해 %로 표시하였다. 인장강도는 ASTM E8 subsize 규격 (표점거리는 13 mm, 단면적은 33 mm²)을 기준으로 시편을 가공한 후 만능인장시험기를 사용 인장속도 0.013 mm/s 조건에서 측정하였다. 측정된 전기전도도 및 인장강도 결과 값들을 복합재 이론식에 의한 계산 값과 비교해 보았다. 이 때 이론값 계산에 활용된 소재의 물성은 Table 1에 정리하였다.

Cu 기판과 Ag 도금층간의 계면 접합 특성을 조사하기 위해서는 ASTM D533-85 방법에 따라 만능인장시험기 (INSTRON 5848)를 사용하여 계면접착강도 (peel strength)를 평가하였다. 사용된 시편의 크기는 30 mm × 9 mm 이었으며 박리속도는 0.17 mm/s 이었다.

복합 판재의 부품 성형성을 조사하기 위해서 프로그래시브 프레스를 이용하여 블랭킹, 피어싱 공정으로 LED (Light-Emitting Diode) 리드프레임 시제품을 제작하였다. 프레스 공정 후에는 주사전자현미경 (SEM; Scanning Electron Microscope)을 사용하여 타발면을 정밀 관찰하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 전기/기계적 성질

Fig. 2에는 전해상감법에 의해 제조한 격자 구조의 Ag 전도경로 패턴을 갖는 Cu 복합판재 (Type-C)의 표면과 단면 사진을 각각 도시하였다. 충진율 95% 이상의 건전한 전도경로의 효과적인 형성을 위해서 트렌치 내부에서의 Ag 이온 농도 저하 및 수소 생성 가스의 혼입 등으로 인해 생성되는 공공 결함을 방지하기 위해 전해도금 공정 시 높은 역전류가 인가되었다 (전류밀도 0.9 A/dm² 이상, 정전류 대비 약 50% 수준).

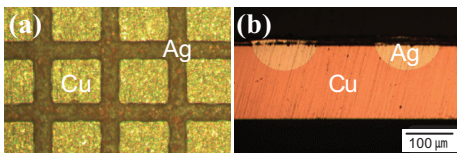


Fig. 2. Optical micrographs showing a mesh type Cu/Ag composite sheet (Type-C): (a) top surface and (b) cross-section

위와 같은 격자 구조의 Ag 전도경로 패턴을 갖는 Type-C의 Cu/Ag 복합판재의 유효 전기전도도를

4-point probe를 활용하여 평가하여 보았다. C7075 Cu 합금 활용 Cu/Ag 복합판재의 전기전도도는 표면에 부피부율 16% 수준으로 Ag 전도경로를 형성시키는 경우 49%IACS에서 69%IACS로 약 40% 이상 증가하였다. Ag 전도경로의 부피부율이 5% 이내에서 변화한 C5210R Cu 합금 활용 Cu/Ag 복합판재의 경우에는 14%IACS에서 15%IACS로 그 증가 폭이 크지 않았다 (약 7% 수준). 이는 C5210R 판재의 두께가 큰데다 4-point probe를 이용한 전기전도도 측정 주파수가 60 Hz로 저주파 범위였기 때문이다. Fig. 1에서와 같이 주파수가 MHz 범위의 고주파대로 증가하고 표피효과에 의해 수십 마이크로미터 범위의 표면 부분에 전류가 집중하여 흐르게 되면 전기전도도 증가 효과는 더욱 두드러질 것이다.

한편 인장강도를 평가하여 본 결과 C7025 복합판재와 C5210R 복합판재의 인장강도는 각각 20%와 6% 감소하여, Cu 판재 표면 부분에 Ag 전도경로를 형성함으로 인한 전기전도도 증가 효과보다 감소폭이 상대적으로 작았다. 더군다나 이러한 경향은 주파수가 증가하며 더욱 두드러질 것으로 사료된다.

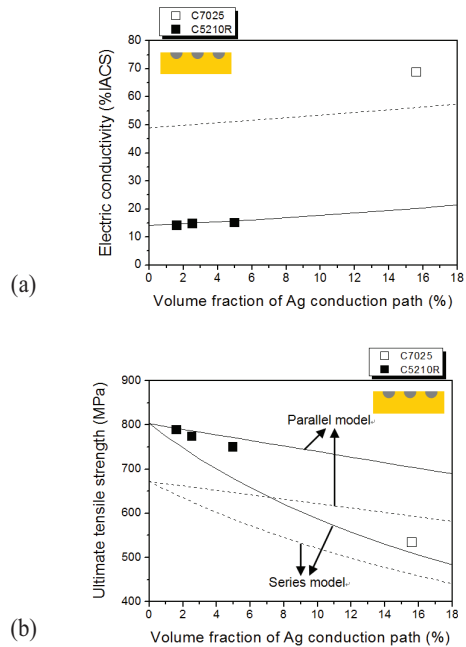


Fig. 3. (a) Electrical conductivity and (b) ultimate tensile strength of electroplated Cu/Ag composite sheets as functions of Cu substrate materials and volume fraction Ag conduction paths

Fig. 3에는 복합재의 전기전도 및 강화 현상에 관한 이론식들을 이용 Ag 부피분율에 따라 계산한 전기전도도와 인장강도를 실험값과 함께 도시하였다. 복합재의 이론적 전기전도도와 인장강도를 계산하기 위해서는 유효매체이론 (effective medium theory) 과 혼합법칙 (rule of mixture)을 각각 활용하였다. 전기전도도의 경우 두 상의 전기전도도 차가 큰 경우에는 유효매체이론을 사용하여야 정밀도가 증가하는 것으로 보고 된다⁸⁾. Fig. 3에서 Cu/Ag 복합판재의 유효 인장강도는 실험값과 이론적 계산값이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 측정 인장강도 값들이 모두 혼합법칙의 병렬모델에 의한 상한과 직렬모델에 의한 하한 범위 내에 위치하고 있다. 한편 전기전도도의 경우에는 Ag의 부피분율이 증가함에 따라 이론적 계산값과 실제 측정값 사이의 차가 더 커지는 경향을 보인다. 이는 유효매체이론이 타원체형의 제2상들이 기지 속에 서로 분리되어 분산되어 있는 것으로 가정하고 있기 때문이다. 즉, 본 연구에서 개발된 Ag 전도경로는 연속된 형태의 격자 구조로서, Ag 부피 분율이 증가하거나 전류 주파수가 증가하는 경우에 유효매체이론에서 계산되는 값보다 더 높은 유효 전기전도도를 보일 것으로 사료된다.

3.2. 접합성 및 프레스 성형성

코팅판재는 단일 소재로서는 획득할 수 없는 여러 가지 성질의 조합을 얻을 수 있는 장점이 있다. 하지만 약한 계면접착강도로 인한 코팅층의 박리 현상은 사용수명 및 신뢰성에 큰 문제를 야기 한다⁹⁾. 전해상감법에 의해 제조한 복합판재(Type-B)의 계면 파단 저항성을 조사하기 위해 평탄한 계면 형상을 갖도록 제조한 Type-A의 판재와 함께 필 테스트 (peel test)를 수행하였다. 이 때 마이크로 범위의 표면 거칠기가 미치는 영향을 동일하게 하고 비교하기 위하여 Type-A 판재도 Type-B 판재에서 트렌치를 생성했던 공정과 동일한 조건으로 표면 식각처리를 행한 후 Ag를 전해도금 하였다. 그 결과 Fig. 4에서와 같이 두 코팅 복합판재 사이에 확연히 다른 양상이 관찰되었다. 평탄한 계면을 갖는 복합판재의 경우(Fig. 4(a))에는 응력-변형 곡선 상에서 수많은 불연속점들이 나타났으며, 4 mm 정도의 필 변형 이후 갑자기 응력이 영으로 감소하였다. 불연속점들은 Ag 코팅층의 디본딩으로 인해 나타난 것이며 변형량이 4

mm인 지점에서의 응력 감소는 약한 계면 접촉력으로 인해 코팅층 전체가 한꺼번에 박리되면서 나타난 현상이다. 전해상감공정에 의해 제조되어 반원 형상의 계면 형상을 갖는 Type-B의 복합판재는 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 전혀 다른 응력-변형 양상을 보였다. 필 변형 초기 구간에서는 응력이 완만하게 증가하다 변형량이 9 mm인 지점에 이르러서는 급격하게 증가하다 갑자기 영으로 떨어졌다. 급격한 필 응력의 증가 및 감소는 코팅층의 박리 현상으로 인한 것이 아니라, Cu 기판에 강하게 접촉된 Ag 코팅층이 연신되다 파단에 이르렀기 때문이다. 반원 형상의 계면 패턴을 만들어 줌으로써 코팅 복합 판재의 취약점으로 지적되던 계면접착강도를 50배 이상 크게 향상시킬 수 있었다. SEM을 이용한 필 테스트 후의 계면을 관찰한 결과, 이러한 계면접착강도의 향상은 트렌치를 형성하는 습식 식각 공정의 특성상 트렌치들이 언더컷 (undercut) 구조를 갖도록 형성되어 Cu 기판과 Ag 코팅층이 서로 기계적으로 맞물리는 현상 때문이었던 것으로 조사되었다.

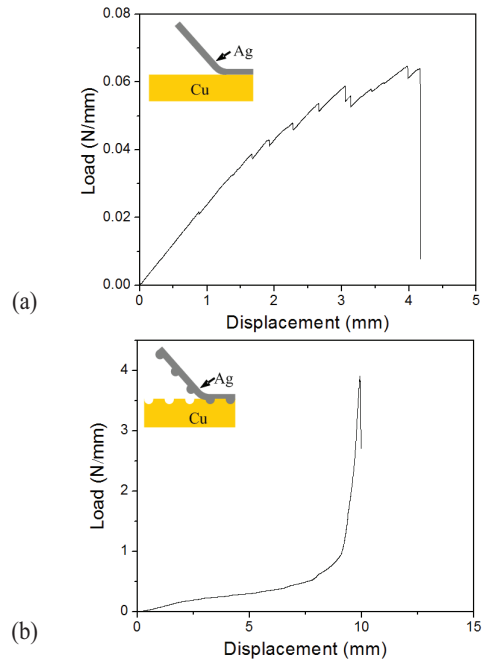


Fig. 4. Load-displacement curves of electroplated Cu/Ag composite sheets with (a) type-A and (b) type-B Cu/Ag interfacial patterns obtained through peel test

실제 배선 부품소재로 채택되어 사용되기 위해서는 고강도-고전도 특성을 동시에 확보하고 우수한 계면접합 특성을 보유하는 것도 중요하지만 통상적인 부품 제조공정에 적용될 수 있도록 우수한 성형성을 지니고 있어야 한다. 전해상감공정에 의해 제조된 Cu/Ag 복합판재의 부품 성형성을 조사하기 위하여 Fig. 5에서 보는 바와 같이 블랭킹, 피어싱, 트리밍 등의 프레스 공정에 의해 LED용 리드프레임을 제작하였다.

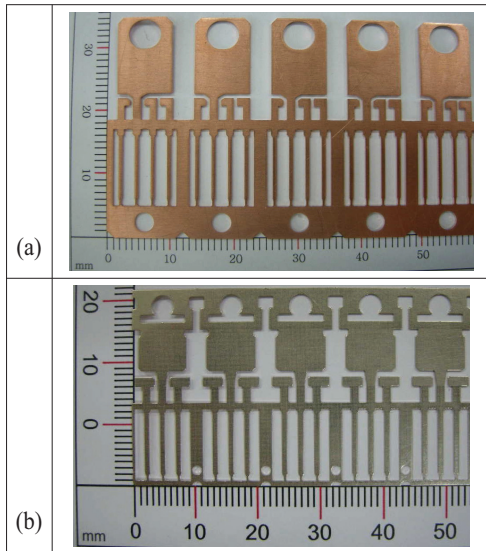


Fig. 5. LED lead frame trial manufactures made of (a) C7025 Cu sheet and (b) the type-C Cu/Ag composite sheet by a progressive pressing process

전해상감공정에 의해 제조된 Cu/Ag 복합판재의 프레스 성형성을 좀 더 정밀하게 조사하기 위해 Fig. 6에서와 같이 블랭킹 공정으로 제조한 리드프레임의 가공 측면을 SEM으로 관찰하며 처짐 (roll-over), 전단면 (shear zone), 파단면 (fracture zone)으로 구분하여 보았다. 리드프레임의 최적 프레스 가공 조건은 블랭킹 면의 형상 및 정밀도가 최적이 되는 조건으로서, 처짐과 파단면이 차지하는 비율이 최소가 되며 전단면이 차지하는 비율이 최대가 되는 조건이다. 계면의 언더컷 구조로 인해 블랭킹 공정 도중에도 Ag 전도경로의 분리 및 이탈 현상은 전혀 관찰되지 않았다. Fig. 7은 Type-C의 Cu/Ag 복합판재에 있어서 상기 각 영역들의 면적비율

을 Ag 전도경로의 부피분율의 함수로서 정리하여 도시한 것이다. 연성이 큰 Ag의 부피분율이 증가함에 따라 전단면은 감소하고 처짐과 파단면의 비율이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 취약한 전해도금 계면이 증가함과 동시에 Cu 판재의 단면적 감소로 인해 전단응력이 집중되는 효과에 기인하는 결과로 사료된다. 즉, 이로부터 Ag 전도경로가 미세화되고 부피분율이 작아질수록 전단면의 영역이 넓어지며 프레스 성형성이 향상될 것으로 생각된다. Ag 전도경로를 미세 피치화 함으로써 실제 고주파의 사용 환경 하에서는 전도도, 강도와 같은 기초 물성의 손실 없이 프레스 공정에 의한 부품 성형성 향상 효과를 기대할 수 있을 것이다.

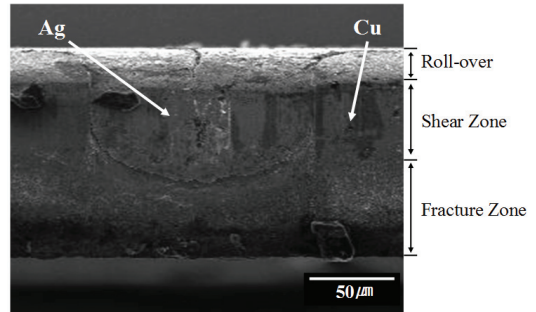


Fig. 6. SEM photograph showing the blanked surface of the LED lead frame trial manufacture made of the type-C Cu/Ag composite sheet

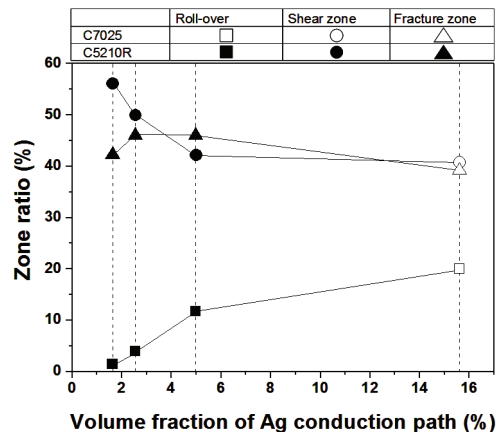


Fig. 7. Zone ratio variation of blanking profile of the LED lead frame trial manufacture made of the type-C Cu/Ag composite sheet as a function of the volume fraction Ag conduction paths

4. 결 론

본 연구에서는 고강도와 고전도도를 동시에 보유하는 Cu계 신 배선소재를 개발하고자 고주파의 전류가 흐르는 Cu 기관의 표피 부분에는 고전도도의 Ag 전도경로를 전해상감법으로 형성시킨 Cu/Ag 복합판재를 제조하고, 전기적/기계적 물성, 계면 접합성 및 프레스 성형성을 접합계면의 형상과 Ag 전도경로의 부피 비율로 평가하여 보았으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전해상감공정에 의해 제조한 Cu/Ag 복합판재는 Cu 합금 기관 재료와 비교하여 Ag 전도경로를 복합화 함에 따라 전기전도도의 증가효과는 컷던 반면에 인장강도의 감소효과는 상대적으로 작았다.
- 2) 전해상감법으로 제조한 Cu/Ag 복합판재와 일반적인 도금법으로 제조한 복합판재의 계면접착강도를 평가한 결과, 전해상감법으로 제조한 경우 계면접착강도가 약 50배 정도 높았다. 이는 표면의 미세 거칠기 보다는 Cu/Ag 계면의 언더컷 구조로 인한 기계적 맞물림 효과에 기인하였기 때문이다.
- 3) 블랭킹, 피어싱, 트리밍 공정을 적용하여 Cu/Ag 복합판재의 성형성을 평가해 본 결과, Ag 전도경로의 부피비율이 증가할수록 프레스 가공면 중 전단면의 비율은 감소하고 처짐과 파단면의 비율은 증가하였다. 이는 Ag 전도경로 형성 시 취약한 전해도금 계면이 증가함과 동시에 Cu 판재의 단면적 감소로 인해 전단응력이 집중되는 효과 때문이었다.

이상 전해상감법에 의해 Cu 기관 재료 위에 Ag 전도 경로를 형성시킨 Cu/Ag 복합판재는 비교적 작은 인장강도의 손실이 발생하는 반면 높은 전기전도도 향상을 기대할 수 있어 고강도-고전도도 동시에 만족시킬 수 있는 새로운 배선 소재의 개발 가능성을 확인할 수 있었다. 또한 계면 언더컷 구조로 인한 뛰어난 계면접착력과 우수한 프레스 성형성을 갖추고 있어 배선부품으로의 적용 가능성도 충분하다고 판단된다.

참고문헌

- 1) S. Strehle, S. Menzel, A. Jahn, U. Merkel, J.W. Bartha, K. Wetzig, Electromigration in electroplated Cu(Ag) alloy thin films investigated by means of single damascene Blech structures, *Microelectronic Engineering*, Vol. 86, pp. 2396-2403, 2009.
- 2) S.K. Lahiri, N.K. Waalib Singh, K.W. Heng, L. Ang, L.C. Goh, Kinetics of oxidation of copper alloy leadframes, *Microelectronics Journal*, Vol. 29, pp. 335-341, 1998.
- 3) S.J. Cho, K.W. Paik, Oxidation Studies on a Cu-base Leadframe Alloy between 150°C and 300°C, *Scripta Materialia*, Vol. 38, pp. 1149-1154, 1998.
- 4) R. Zhou, J.D. Embury, J.T. Wood, J.L. Smith, High-Strength, High-Conductivity Copper-Steel Composite, *Materials Characterization*, Vol. 37, pp. 239-243, 1996.
- 5) S.I. Hong, P.H. Kim, Y.C. Choi, High strain rate superplasticity of deformation processed Cu-Ag filamentary composites, *Scripta Materialia*, Vol. 51, pp. 95-99, 2004.
- 6) F. Ebrahimi, Q. Zhai, D. Kong, Mechanical properties of Cu/Ag multilayered composites, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 255, pp. 20-32, 1998.
- 7) S.B. Lee, K. Matsunaga, Y. Ikuhara, S.K. Lee, Effect of alloying elements on the interfacial bonding strength and electric conductivity of carbon nano-fiber Cu matrix composites, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 449-451, pp. 778-781, 2007.
- 8) J. Kováčik, Electrical conductivity of two-phase composite material, *Scripta Materialia*, Vol. 39, pp. 153-157, 1998.
- 9) F.Z. Ren, P. Liu, S.G. Jia, B.H. Tian, J.H. Su, Adhesion strength of Ni film on Ti substrate characterized by three-point bend test, peel test and theoretic calculation, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 419, pp. 233-237, 2006.