

표면 개질된 구리 나노 와이어/에폭시 복합체의 열 및 전기 특성 분석

안기상 · 김기호 · 김주현[†] · 조원철^{*,†}

중앙대학교 공과대학 화학신소재공학부, *중앙대학교 공과대학 사회기반시스템학부
(2015년 7월 13일 접수, 2015년 8월 2일 수정, 2015년 8월 20일 채택)

Thermal and Electrical Properties of Surface-treated Copper Nanowire/Epoxy Composites

Kisang Ahn, Kiho Kim, Jooheon Kim[†], and WonChul Cho^{*,†}

School of Chemical Engineering & Material Science, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

*School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Studies, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received July 13, 2015; Revised August 2, 2015; Accepted August 20, 2015)

초록: 표면을 개질한 구리 나노 와이어(CuNW)를 이용하여 구리 나노 와이어/에폭시 복합체를 제작하였다. 에폭시 매트릭스에서의 열적 특성과 전기적 특성을 향상시키기 위하여 CuNW의 표면을 SiO₂와 TiO₂로 개질하였다. 순수한 CuNW와 표면 개질된 CuNW의 기능화 여부 확인을 위하여 XPS, EDX, FE-SEM, FE-TEM 분석을 시행하였으며 CuNW 표면에 SiO₂ 층과 TiO₂ 층이 생성된 것을 확인하였다. 순수한 CuNW와 개질된 CuNW를 각각 첨가한 복합체를 제작하여 열전도 특성을 비교하였으며 표면 개질한 CuNW를 첨가한 복합체에서 증가된 열전도도를 갖는 것을 확인하였다. 또한 개질된 CuNW를 사용하였을 때 전기전도도가 감소하는 것을 확인하였다.

Abstract: Copper nanowire (CuNW) composites were prepared to use as thermal interface material by using both raw copper nanowire particles and surface-coated copper nanowire particles. The surfaces of the copper nanowire particles were coated with SiO₂ and TiO₂ to enhance the thermal and electrical properties in the epoxy matrix. The surface coated CuNW and raw CuNW were characterized by XPS, EDX, FE-SEM and FE-TEM. The surface coated CuNW composites possessed enhanced thermal conduction properties as compared to the composites with raw CuNW particles. In addition, the electrical conductivity of the surface treated CuNW composites presented lower electrical conductivity values as compared to the raw CuNW composites. Thus, the surface coated copper nanowire composites prepared in the present work could be desirable as thermal interface materials in the electronics industry.

Keywords: thermal conductivity, electrical conductivity, copper nanowire, surface treatment.

서 론

최근 전자 산업에서 사용되고 있는 전자 부품 소자는 경량화, 소형화, 다기능화 등이 요구되고 있으며 이러한 전자 부품의 요구는 열 밀도의 급격한 증가를 야기시킨다. 전자 부품의 소형화, 고밀도화에 의해 증가된 열 밀도는 소자의 기능을 저하시킬 뿐만 아니라 소자의 오작동, 기관의 열화 등의 원인이 되고 있어 방출 열을 제어하는 기술에 대한 많은 연구가 이루어지고 있는 추세이다.¹⁻³ 전자 부품과 냉각 장치 사이의 공기 틈을 열전도도가 높은 물질로 채워 열을 효과적으로 방출시키는 방법이 있는데 이러한 물질을 thermal

interface material(TIM)이라고 한다.

TIM의 열전도도를 증가시키는 효율적인 방법 중 하나는 TIM의 내부에 열전도도가 높은 충전제를 첨가하는 것이다. 높은 열전도도를 가진 알루미늄 옥사이드(aluminum oxide, Al₂O₃), 알루미늄 나이트라이드(aluminum nitride, AlN), 보론 나이트라이드(boron nitride, BN), 실리콘 카바이드(silicon carbide, SiC)와 같은 물질들이 TIM의 충전제로 많이 사용된다.^{4,7} 하지만, 이러한 물질을 사용하여 적정 열전도도를 얻으려면 높은 충전제 함량을 요구하며 이러한 높은 함량은 복합체의 물리적 특성 감소와 내구성의 문제를 야기한다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 낮은 함량에서 높은 열전도도를 얻을 수 있는 탄소 나노 튜브(carbon nanotube), 구리 나노 와이어(copper nanowire), 그래핀(graphene) 등의 물질들이 충전제로 사용된다.⁸⁻¹⁰ 특히 구리 나노 와이어의 경우

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jooheonkim@cau.ac.kr

©2015 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

뛰어난 열전도도와 기계적 물성을 가지며 구리의 풍부한 매장량으로 인하여 다른 물질과의 가격경쟁에서 우위를 점할 수 있다. 하지만, 이러한 장점에도 불구하고 이러한 물질들은 높은 전기전도도를 가지고 있어 전자소재용 패키징 적용에 제한이 따른다.

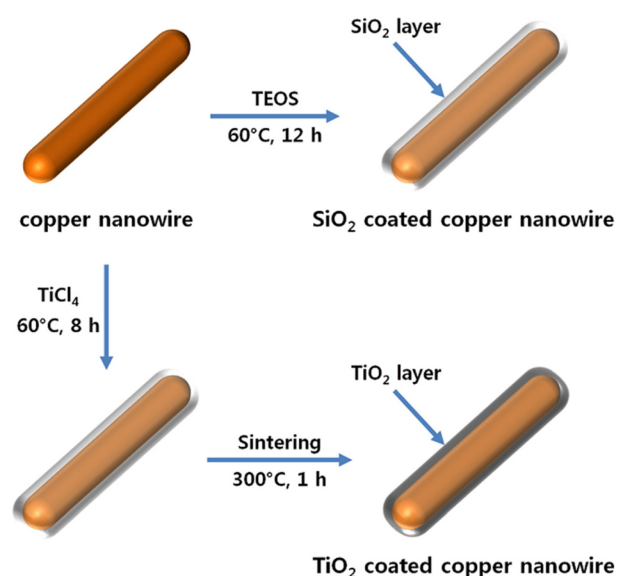
전자소재용 패키징에 사용되는 충전제는 우수한 전기 절연성이 필수적인데 이는 전극 접점(electrode junction)에서 문제가 발생하여 전자 기기의 오작동을 일으킬 수 있기 때문이다. 이러한 이유 때문에 높은 열전도도를 유지하면서 전기전도도를 감소시킬 수 있는 충전제의 표면 처리 방법에 대한 연구들이 이루어지고 있다. Cui 그룹은 SiO_2 로 표면 개질된 MWCNT를 이용하여 전기적 특성과 열적 특성이 우수한 에폭시 복합체를 제조하였으며 Yuen 그룹은 TiO_2 로 표면 개질된 MWCNT를 제작하여 절연 특성과 물리적 특성의 증가를 보여주었다.^{11,12}

따라서 본 연구에서는 전기적 절연 특성이 필수적으로 요구되는 방열 소재 분야에 적용 가능한 절연 특성의 구리 나노 와이어 충전제를 제작하였다. 높은 전기전도도를 가지는 구리 나노 와이어의 전기적 성질을 제어하기 위하여 구리 나노 와이어 표면에 SiO_2 와 TiO_2 층을 각각 생성하였으며 다양한 분석을 통하여 표면 처리 여부를 확인하였다. 표면 처리된 구리 나노 와이어를 bisphenol A계 에폭시 수지 내의 충전제로 사용하여 복합체를 만들었으며 각 충전제의 종류에 따른 열전도도 값의 변화를 관찰하였다. 또한 생성된 복합체의 전기전도도를 측정하여 각 복합체의 전기적 절연 성질을 비교하였다.

실 험

시약 및 재료. 본 연구에서 사용된 에폭시 수지는 diglycidyl ether of bisphenol A(DGEBA)계 에폭시인 YD-128 (Kukdo Chemical, Korea, E.E.W=186 g/eq)이며 에폭시 수지는 진공 오븐에서 4시간 동안 감압하여 수분 제거 후 사용하였다. 경화제로서는 4,4-diamino diphenyl methane (DDM, TCI, Korea)을 사용하였다. 이 외에도 합성과정에서 사용된 질산구리 수용액($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, Daejung Chemical, Korea), 에틸렌다이아민($\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2$, Sigma Aldrich, Korea), 수산화나트륨(NaOH, Sigma Aldrich, Korea), 에탄올($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, Sigma Aldrich, Korea), 테트라에틸 오쏘실리케이트($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$, Samchun Chemical, Korea), 하이드라진($\text{N}_2\text{H}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, Daejung Chemical, Korea), 사염화티탄(TiCl_4 , Daejung Chemical, Korea) 및 기타 유기용매의 경우 별도의 정제처리를 거치지 않고 바로 사용하였다.

구리 나노 와이어 제작. Copper nanowire(CuNW)를 제작하기 위하여 질산구리의 환원반응을 이용하였으며 구체적인 방법은 다음과 같다.



Scheme 1. Schematic diagram of the surface treatment procedure of CuNW.

수산화나트륨 수용액(2000 mL, 15M)과 질산구리 수용액(100 mL, 0.2 M)을 반응 플라스크에 넣어 혼합 용액을 만든다. 이 용액에 에틸렌다이아민(30 mL)과 하이드라진(2.5 mL, 35 wt%)을 순서대로 넣고 반응기를 80 °C로 유지하여 1시간 동안 교반하여 준다. 얻어진 반응 생성물을 3 wt%의 하이드라진에 분산시킨 후 세척하는 과정을 3회 이상 진행하고 최종적으로 50 °C의 진공오븐에서 24시간 건조시킨다.

구리 나노 와이어의 표면 개질. 표면 처리된 구리 나노 와이어의 합성 과정을 Scheme 1에 도식하였으며 구체적인 방법은 다음과 같다.

SiO_2 -CuNW 제조: 구리 나노 와이어 5 g을 100 mL의 에탄올에 첨가하여 충분히 분산될 수 있도록 교반시킨 후 DI water 1 mL와 TEOS(tetraethyl orthosilicate) 용액 1 mL를 차례대로 첨가하였다. 생성된 혼합물을 60 °C에서 12시간 동안 교반시킨 후 DI water를 이용하여 세척하는 과정을 3회 진행하였다. 최종적으로 생성물을 50 °C의 진공오븐에서 24시간 건조시켜 SiO_2 로 개질된 구리 나노 와이어(SiO_2 -CuNW)를 합성하였다.

TiO_2 -CuNW 제조: 구리 나노 와이어 5 g을 100 mL의 DI water에 첨가하여 충분히 분산될 수 있도록 교반시킨 후 TiCl_4 용액을 1 mL 천천히 첨가하였다. 생성된 혼합물을 60 °C에서 8시간 동안 교반시킨 후 DI water를 이용하여 세척하는 과정을 3회 진행하였다. 최종적으로 생성물을 300 °C, 질소 분위기에서 1시간 경화하여 TiO_2 로 개질된 구리 나노 와이어(TiO_2 -CuNW)를 합성하였다.

구리 나노 와이어/에폭시 복합체 제조. 구리 나노 와이어/에폭시 복합재료는 DGEBA 에폭시 수지에 CuNW와 SiO_2 -

CuNW, TiO₂-CuNW를 각각 첨가하여 제조하였다. 각각의 복합체를 제작하는 방법은 유사하므로 CuNW를 첨가한 DGEBA 복합체를 예로 설명하면 다음과 같다. 먼저 에폭시에 당량비 1/0.45 비율로 경화제인 DDM을 첨가하여 100 °C에서 경화제와 에폭시가 충분히 섞일 수 있도록 15분간 교반하였다. 생성된 에폭시/DDM 혼합물에 CuNW를 첨가한 후 1시간 동안 교반하였다. 얻어진 혼합물을 몰드에 채운 후 100 °C에서 4시간, 120 °C에서 5시간, 160 °C에서 4시간 이상의 경화 과정을 통하여 copper nanowire가 첨가된 에폭시 복합체를 제조하였다.

복합체의 특성 분석. 전계방사형 주사전자현미경 분석: 개질된 구리 나노 와이어의 표면 상태를 관찰하기 위하여 전계방사형 주사전자현미경(FE-SEM, SIGMA, Carl Zeiss)을 사용하였고, 에너지 분산형 X선 분광기(energy-dispersive X-ray spectroscopy)를 통하여 구리 나노 와이어 표면에서의 Si와 Ti 입자 분포를 확인하였다. FE-SEM 측정을 위하여 제조된 구리 나노 와이어 입자를 탄소 테이프 표면에 떨어뜨리고 백금으로 120초 동안 4mA로 코팅한 후 관찰하였다. 또한 제조된 구리 나노 와이어/에폭시 복합체는 액체 질소로 냉각시킨 후 파탄하여 같은 방법으로 백금 코팅을 한 후 복합체의 단면을 분석하였다.

투과전자현미경 분석: 개질된 구리 나노 와이어의 미소영역 상에서의 투과 이미지를 관찰하기 위하여 field emission transmission electron microscopy(FE-TEM, JEM-2100F, JEOL)를 이용하여 분석하였다. FE-TEM 분석을 위하여 구리 나노 와이어를 에탄올에 분산시킨 후 300 mesh의 copper grid에 한 방울 떨어뜨리고 건조시킨 후 미소영역을 관찰하였다.

X선 광전자 분광 분석: 구리 나노 와이어 표면의 성분을 조사하여 표면 처리 여부를 확인하기 위하여 X-ray photoelectron spectroscopy(XPS, ESCA 2000, VG microtech, UK)를 이용하여 분석하였다.

열전도도 분석: 구리 나노 와이어/에폭시 복합체의 열전도도 측정을 위하여 정사각형 테플론 몰드를 이용하여 800~1200 μm 두께의 시편을 제작해 레이저 섬광법(laser flash apparatus, LFA 457, NETZCH)을 이용하여 상온에서 열확산 계수를 측정하였다. 이렇게 측정된 열확산 계수는 식 (1)에 의해 측정된 밀도, 열용량을 이용하여 열전도도를 구할 수 있다.

$$k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (1)$$

여기에서, k , α , ρ , 그리고 C_p 는 열전도도[W(m·K)⁻¹], 열확산 계수(m² s⁻¹), 밀도(kg m⁻³) 그리고 열용량[J (kg·K)⁻¹]을 나타낸다. 열용량은 시차주사 열량측정법(differential scanning calorimetry, NETZSCH DSC 200F3)을 이용하여 상온에서 측정하였으며, 밀도는 water displacement method를 이용하여 얻었다.

전기전도도 분석: 구리 나노 와이어/에폭시 복합체의 전기전도도는 impedance spectroscopy(IM-6ex, Zahner)를 이용하여 측정하였다.

$$S = \frac{h}{(R \cdot A)} \quad (2)$$

여기에서 S , h , R 그리고 A 는 전기 전도도(S cm⁻¹), 시료의 두께(cm), 전기 저항(Ω), 그리고 시료의 넓이(cm²)를 나타낸다.

결과 및 토론

구리 나노 와이어 특성 분석. 구리 나노 와이어의 표면 처리 여부를 판단하기 위하여 XPS 분석을 통하여 개질된 구리 나노 와이어의 표면을 분석하였다. XPS 분석을 통하여 구리 나노 와이어에 어떠한 영향을 주었는지 관찰한 결과를 Figure 1에 나타내었다. Figure 1은 raw CuNW, SiO₂-CuNW, TiO₂-CuNW의 전 영역 스캔 결과를 0-1300 eV 범위에서 나타내었다. Raw CuNW와 SiO₂-CuNW의 스펙트럼을 비교해보았을 때, SiO₂-CuNW의 106과 156 eV에서 각각 Si 2p와 Si 2s의 피크가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. TiO₂-CuNW의 스펙트럼의 경우, 460 eV에서 Ti 2p의 피크가 생성된 것을 확인할 수 있었다. 또한 SiO₂-CuNW와 TiO₂-CuNW의 531 eV에서 O 1s 피크가 크게 증가한 것을 확인할 수 있다.

보다 자세한 관찰을 위하여 순수한 CuNW와 표면 개질된 CuNW의 표면을 FE-SEM을 통하여 관찰하였으며 이를 Figure 2에 나타내었다. Figure 2(a)는 순수한 CuNW, Figure 2(b)와 (c)는 각각 SiO₂-CuNW와 TiO₂-CuNW의 이미지를 나타내었

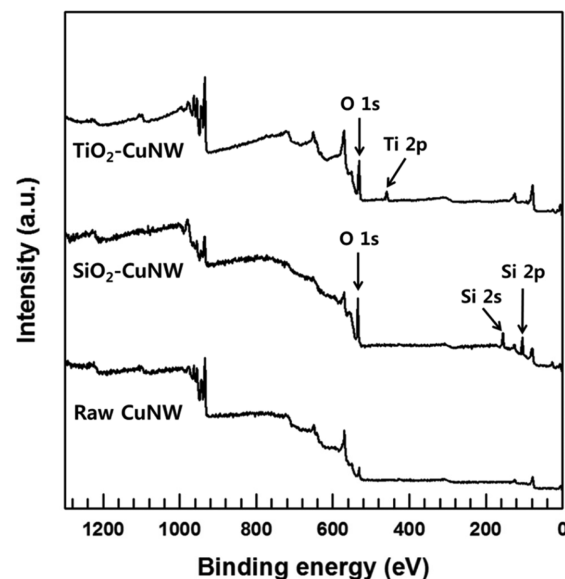


Figure 1. X-ray photoelectron spectra survey scans of raw CuNW, SiO₂-CuNW and TiO₂-CuNW.

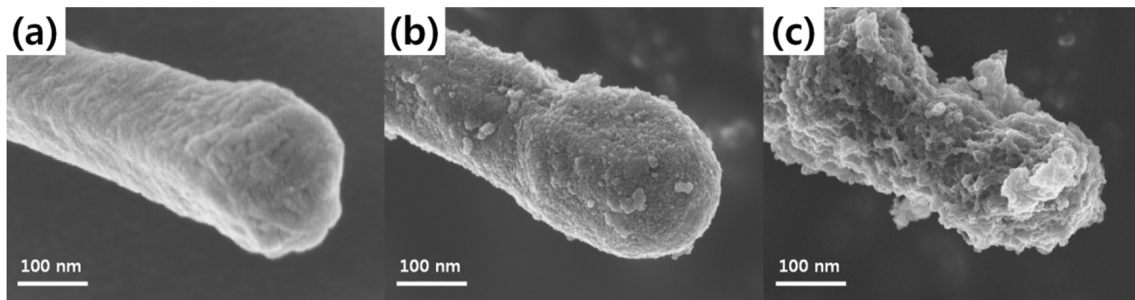


Figure 2. FE-SEM images of (a) raw CuNW; (b) SiO₂-CuNW; (c) TiO₂-CuNW.

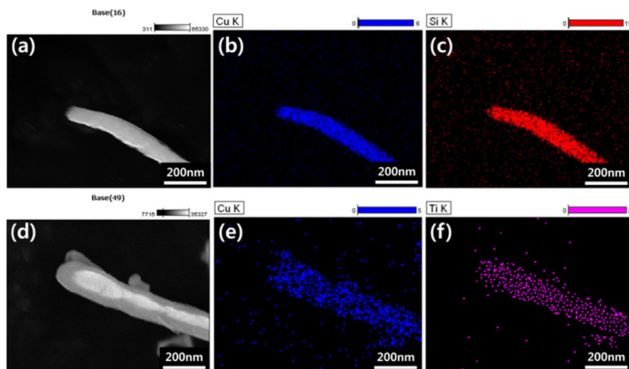


Figure 3. X-ray elemental mapping of SiO₂-CuNW and TiO₂-CuNW.

다. 순수한 CuNW의 경우 Figure 2(a)에 나타난 것처럼 부드러운 표면을 가진 것을 확인할 수 있다. 이와는 대조적으로 SiO₂-CuNW와 TiO₂-CuNW의 경우 Figure 2(b)와 (c)에서 보

는 바와 같이 표면이 거칠어진 것을 확인할 수 있다. 또한 EDX spectroscopy를 이용하여 표면 원소의 구성과 분포를 확인하였으며 이 결과를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3(a), (b), (c)는 SiO₂-CuNW를 Figure 3(d), (e), (f)는 TiO₂-CuNW의 표면 분석 이미지를 나타내었다. Figure 3(b)와 (c)의 EDX spectroscopy 분석을 통해 Si와 O 원소가 구리 나노 와이어 표면에 균일하게 분산되어있는 것을 확인할 수 있었으며 Figure 3(e)와 (f)의 분석 결과를 통하여 구리 나노 와이어 표면에서의 Ti와 O 원소의 존재를 확인할 수 있었다.

순수한 CuNW와 표면이 개질된 CuNW의 미소 영역을 관찰하기 위하여 FE-TEM 분석을 시행하였고 그 결과를 Figure 4에 나타내었다. Figure 4(a), (b)는 순수한 CuNW, (c)와 (d)는 SiO₂-CuNW, (e)와 (f)는 TiO₂-CuNW를 각각 나타내고 있다. 순수한 CuNW의 경우 Figure 4(a)와 (b)에서 나타난 것처럼 균일한 표면을 관찰할 수 있다. 이와는 대조적으로 SiO₂-CuNW[Figure 4(c), (d)]와 TiO₂-CuNW[Figure 4(e), (f)]를 살

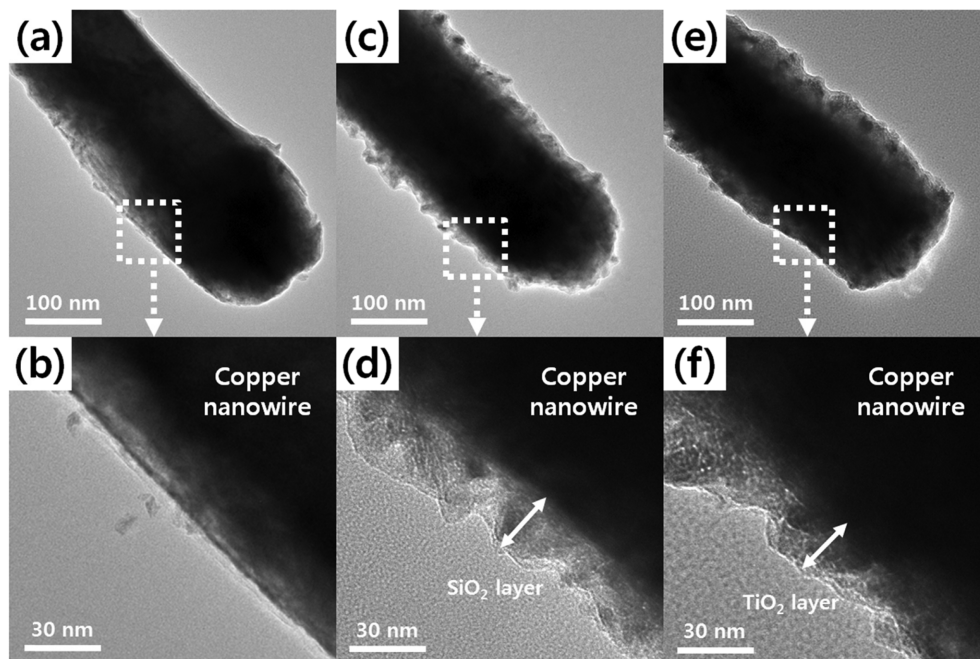


Figure 4. FE-TEM image of (a, b) raw CuNW, (c, d) SiO₂-CuNW; (e, f) TiO₂-CuNW.

떠보면 구리 나노 와이어 표면에 SiO_2 , TiO_2 층이 각각 형성된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 구리 나노 와이어 표면이 효과적으로 개질되었음을 확인할 수 있다.

열전도도 분석. 복합체의 열전도도는 충전제의 매트릭스 내부에서의 분산도, 구조, 첨가량, 충전제와 매트릭스 사이의 열저항 등에 영향을 받음이 알려져 있다. 합성된 구리 나노 와이어 복합체의 열전도 특성을 알아보기 위하여 구리 나노 와이어를 첨가한 에폭시 복합체를 제작하여 열전도도를 측정하였고 결과를 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에 나타내었듯이 CuNW의 함량이 증가할수록 복합체의 열전도도가 증가하는 경향을 나타내었다. 순수한 에폭시의 열전도도 값은 $0.199 \text{ W} \cdot \text{mK}^{-1}$ 로 측정되었고 CuNW의 함량이 3, 6, 9, 12와 15 wt%일 때의 열전도도는 순수한 에폭시의 열전도도의 1.19, 1.43, 2.11, 3.07과 4.71배의 향상된 결과값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 같은 함량의 충전제를 첨가하였을 경우 표면 개질을 한 충전제를 넣은 복합체의 열전도도가 상대적으로 증가된 것을 관찰할 수 있었다. 각 충전제를 15 wt% 첨가하였을 때의 열전도도 결과를 살펴보면 SiO_2 -CuNW를 첨가한 복합체는 $1.122 \text{ W} \cdot \text{mK}^{-1}$, TiO_2 -CuNW를 첨가한 복합체는 $1.324 \text{ W} \cdot \text{mK}^{-1}$ 의 열전도도 값을 가졌다. 이는 순수한 CuNW를 첨가한 복합체의 열전도도보다 각각 19%, 40%의 향상된 결과이다. 이러한 결과는 복합체의 내부 구조의 차이에 기인한다. 구리 나노 와이어의 표면 처리는 구리 나노 와이어와 에폭시 사이에서의 계면 상호작용(interfacial interaction)을 증가시킨다. 구리 나노 와이어 표면의 Si-OH와 Ti-OH 그룹이 구리 나노 와이어의 표면 에너지(surface energy)를 증가시키며 이렇게 증가된 표면에너지는 구리 나노 와이어와

에폭시 사이의 계면 상호작용을 증가시킨다.¹³⁻¹⁵ 증가된 계면 사이의 상호작용은 계면 열저항(interfacial thermal resistance)과 포논의 산란(phonon scattering)을 감소시키고 이로 인하여 열전도도 증가를 초래하게 된다.

Cross-section 분석. 구리 나노 와이어와 에폭시 사이의 계면 상호작용을 확인하기 위하여 복합체의 단면을 FE-SEM 분석을 통해 관찰하였다. Figure 6(a)는 순수한 CuNW/에폭시 복합체를 나타내고, Figure 6(b)와 (c)는 각각 SiO_2 -CuNW/에폭시 복합체, TiO_2 -CuNW/에폭시 복합체를 나타내었다. 순수한 CuNW 복합체[Figure 6(a)]와 비교해보았을 때 표면을 개질한 CuNW를 사용한 복합체[Figure 6(b), (c)]에서 공극이 사라진 것을 확인할 수 있다. 이러한 공극은 CuNW와 에폭시 사이에 계면 상호작용이 없기 때문에 나타나는 결과이며 표면을 개질을 통해 CuNW와 에폭시 사이의 계면 상호작용 증가하였다는 것을 알 수 있다.

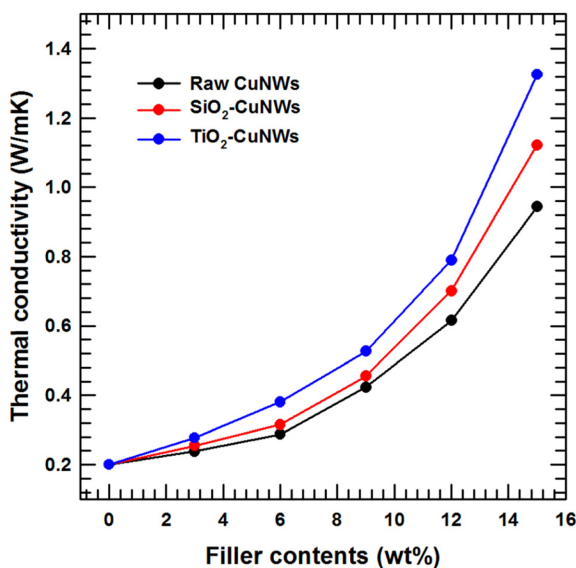


Figure 5. Thermal conductivity of raw and surface-treated CuNW/epoxy composites as a function of filler content.

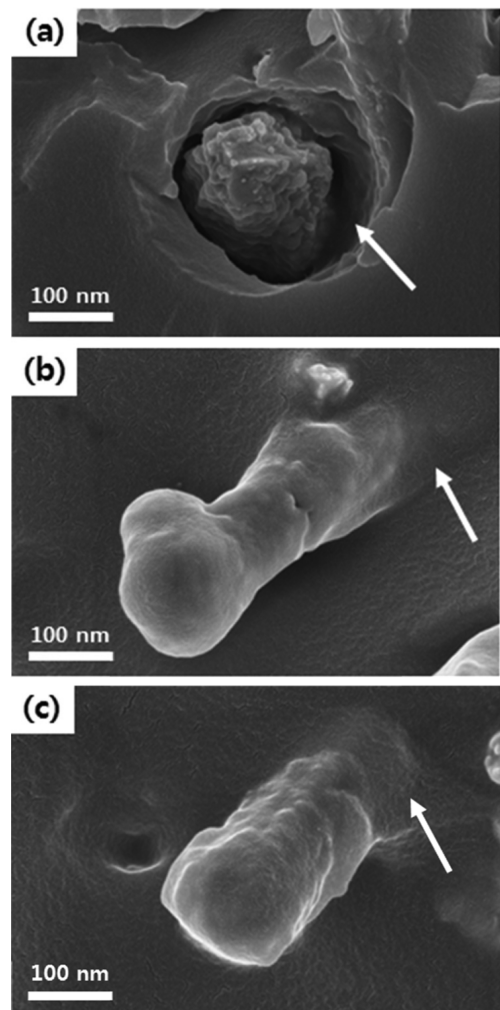


Figure 6. Cross-sectional images of (a) raw CuNW/epoxy; (b) SiO_2 -CuNW/epoxy; (c) TiO_2 -CuNW/epoxy composites.

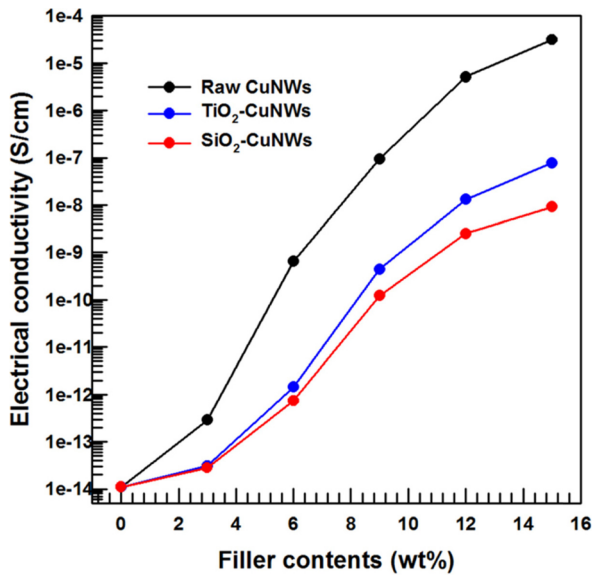


Figure 7. Electrical conductivity of raw and surface-treated CuNW/epoxy composites as a function of filler content.

전기전도도 분석. 구리 나노 와이어를 방열 복합체의 충전제로 적용하기 위해서는 구리 나노 와이어의 전기전도성을 막아주는 과정이 필요하다. 구리 나노 와이어의 우수한 전기전도도는 에폭시 복합체의 전기전도도를 향상시키며 이러한 성질은 전기 절연성을 필요로 하는 전자패키징 분야에서 구리 나노 와이어의 사용을 제한한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 구리 나노 와이어 표면의 개질을 통해 절연성을 갖는 구리 나노 와이어 충전제를 제작하였으며 측정된 전기전도도를 통하여 절연 특성을 분석하였다. 구리 나노 와이어 에폭시 복합체의 전기전도도를 측정된 결과를 Figure 7에 나타내었다. Figure 7에 나타내었듯이 순수한 CuNW의 함량이 증가할수록 전기전도도가 증가하는 현상을 관찰할 수 있으며 15 wt%의 함량을 넣었을 때 $3.1 \times 10^{-5} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 로 가장 높은 전기전도도를 갖는 것을 관찰할 수 있다. 또한 표면 개질을 한 충전제를 15 wt% 첨가하였을 때의 전기전도도 결과를 비교해보면 SiO₂-CuNW를 첨가한 복합체는 $9.1 \times 10^{-9} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$, TiO₂-CuNW를 첨가한 복합체는 $8.1 \times 10^{-8} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 로 전기전도도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 구리 나노 와이어 표면의 절연체인 SiO₂, TiO₂ 층이 전자 이동(electron tunneling)효과를 막아주고 이로 인하여 전기전도도가 감소하게 되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 표면 개질을 통하여 절연 특성이 강화된 구리 나노 복합체의 제조가 가능함을 나타낸다.

결론

본 연구에서는 열전도도 향상과 절연 특성을 강화하기 위하여 표면이 개질된 구리 나노 와이어를 제작하였다. 표면이

개질된 구리 나노 와이어를 에폭시 매트릭스에 첨가하여 복합체를 제조하였으며 특성 분석을 하였다. 제작된 구리 나노 와이어의 기능화 여부를 확인하기 위하여 XPS, EDX 분석을 시행하였으며 FE-SEM 이미지와 FE-TEM 분석을 통하여 구리 나노 와이어의 표면에 SiO₂층과 TiO₂층이 균일하게 분포하고 있음을 확인하였다. 순수한 CuNW와 개질된 CuNW를 각각 첨가한 복합체를 제작하여 열전도도와 전기전도도를 측정하여 비교하였다. 표면을 개질한 CuNW를 첨가한 복합체에서 증가된 열전도도를 갖는 것을 확인하였으며 전기전도도 또한 표면을 개질한 CuNW에서 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통하여 SiO₂층과 TiO₂층이 복합체의 열전도도를 증가시키고 구리나노 와이어의 전기전도도를 막아 주어 절연특성을 강화시켜 주는 것을 확인하였다.

감사의 글: This Research was supported by the Chung-Ang University Research Scholarship Grants in 2015.

참고문헌

1. W. Lin, K. S. Moon, and C. P. Wong, *Adv. Mater.*, **21**, 2421 (2009).
2. Y. Mamunya, A. Boudenne, N. Lebovka, L. Ibos, Y. Candau, and M. Lisunova, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 1981 (2008).
3. A. Yu, P. Ramesh, M. E. Itkis, E. Bekyarova, and R. C. Haddon, *J. Phys. Chem. C*, **111**, 7565 (2007).
4. Z. Shi, M. Radwan, S. Kirihara, Y. Miyamoto, and Z. Jin, *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 224104 (2009).
5. T. L. Li and S. L. C. Hsu, *J. Phys. Chem. B*, **114**, 6825 (2010).
6. C. Zhi, Y. Bando, T. Terao, C. Tang, H. Kuwahara, and D. Golberg, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 1857 (2009).
7. F. Yang, X. Zhao, and P. Xiao, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30**, 3111 (2010).
8. G. Y. Heo, K. Y. Rhee, and S. J. Park, *Polym. Korea*, **35**, 548 (2011).
9. S. Wang, Y. Cheng, R. Wang, J. Sun, and L. Gao, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 6481 (2014).
10. J. Kim, H. Im, J. Han, and J. Kim, *Polym. Korea*, **36**, 22 (2011).
11. W. Cui, F. Du, J. Zhao, W. Zhang, Y. Yang, X. Xie, and Y. W. Mai, *Carbon*, **49**, 459 (2011).
12. S. M. Yuen, C. C. M. Ma, C. Y. Chuang, Y. H. Hsiao, C. L. Chiang, and A. D. Yu, *Compos. Part A - Appl. Sci. Manuf.*, **39**, 119 (2008).
13. K. Ahn, K. Kim, and J. Kim, *Ceram. Int.*, **41**, 9488 (2015).
14. C. Wang, H. Mao, C. Wang, and S. Fu, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **50**, 11930 (2011).
15. S. J. Park, *Interfacial Forces and Fields Theory and Applications*, J. P. Hsu, Editor, Marcel Dekker, New York, 1999.