구리 필러의 표면처리와 PMMA 비드 첨가에 따른 Cu/Epoxy 복합재료의 열전도도 향상

배영한 · 박규대 · 정현옥 · 부민칸 · 김성룡

한국교통대학교 나노화학소재공학과 (2015년 10월 12일 접수, 2015년 10월 29일 수정, 2015년 10월 29일 채택)

Thermal Conductivity Improvement by Cu Surface Treatments and Incorporation of PMMA Beads on Cu/Epoxy Composites

Young-Han Bae, Gyu-Dae Park, Hyun-Ok Jung, Minh Canh Vu, and Sung-Ryong Kim[†]

Department of Polymer Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea (Received October 12, 2015; Revised October 29, 2015; Accepted October 29, 2015)

초록: 질산 처리와 실란 커플링제 처리를 한 덴드라이트 형태의 구리 필러를 에폭시 매트릭스와 혼합하여 복합재료 를 제조하여 열전도도와 표면저항을 고찰하였다. 열전도도는 guarded heat flow meter 법을 이용하여 측정하였다. 질산 처리에 의한 구리 표면의 산화물 제거에 의하여 복합재료의 열전도도는 증가하였으며 표면저항은 감소하였다. 구리 표면에 존재하는 낮은 열전도도와 전기전도도를 가지는 구리 산화물이 복합재료의 열저항과 전기저항을 증가 시키는 것을 확인하였다. 동일한 구리 필러 함량에서 폴리메틸메타아크릴레이트(PMMA) 비드를 첨가하였을 때 복 합재료의 열전도도가 향상되었으며, 이는 PMMA 비드 도입에 의하여 덴드라이트 형태의 구리 필러가 상대적으로 접촉이 용이한 구조가 형성되기 때문으로 추정된다. 50 wt%의 구리 필러를 포함하고 PMMA 비드/(PMMA 비드+ 에폭시)의 비율이 12.5%인 에폭시 복합재료는 0.65 W/mK의 열전도도를 보여 비드를 포함하지 않은 복합재료에 비 해 열전도도가 41% 향상하였다.

Abstract: Thermal conductivity and surface resistance of epoxy-based composites with dendritic Cu fillers with different surface treatments have been investigated. Thermal conductivity of the composites was measured by a guarded heat flow meter method. Thermal conductivity increased when the Cu fillers were treated by HNO₃ and 3-aminopropyltrime-thoxysilane (APTMS). A parallel study on the effect of incorporation of PMMA beads in epoxy matrix was also carried out. PMMA beads led a good contact between Cu fillers and improved the thermal conductivity of the composites for all filler concentrations. The incorporation of 12.5% of PMMA bead/(PMMA bead + epoxy) at Cu filler content of 50 wt% resulted in 0.65 W/mK of thermal conductivity, which is 41% increase compared to the epoxy-based composites without PMMA beads. This paper provides a simple and economical way to produce thermally conductive polymer composites.

Keywords: thermal conductivity, surface treatment, compatibility, epoxy, polymer bead.

서 론

소형화되어 가고 있는 전자기기들은 밀폐된 공간에서 점점 더 많은 전력을 소비하게 되면서 많은 열이 발생되어, 작동 온도의 상승은 전자기기의 성능저하나 고장의 주요 원인이 되기 때문에 이를 해결하기 위한 고열방출성 소재에 대한 많 은 연구가 진행되고 있다. 금속이나 세라믹 등의 소재는 열 전도도가 높지만 가공성이 좋지 않고 밀도가 높아 이들 소재 를 적용하는데 많은 제약이 따르기 때문에 열전도도는 낮지 만 가공성과 경량성이 뛰어난 고분자 매트릭스에 높은 열전 도도를 가지는 금속, 세라믹, 탄소계 필러를 첨가하여 고분자 복합재료의 열전도성을 향상시키려는 연구들이 진행되어 왔 다.¹⁴ 일반적으로 고분자 복합재료에 많이 사용하는 열전도 성 필러로는 AIN, BN, Cu 입자, AI 입자, Ag 입자, 그라파 이트 입자, 탄소나노튜브, 그래핀 등이 있다.

금속 필러는 전기가 잘 통하고 가격이 저렴하여 정전기 방 지, 전자파 차폐 등의 용도에 적용되어 왔다. 하지만, 금속 필 러는 고분자 매트릭스와의 좋지 않은 계면 접합성과 공기와

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: srkim@ut.ac.kr

^{©2016} The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

접촉 시 표면에 생성되는 비전도성의 금속 산화물이 복합재 료의 열전도도와 전기전도도를 감소시키기 때문에 확대 적용 에 많은 제약을 받아왔다.⁵⁶ 구리는 열전도도가 389 W/mK로 높고 금이나 은에 비해 가격이 저렴해서 고분자 복합재료의 유망한 열전도성 필러이나, 표면이 불안정하여 열전도도가 순 수 구리에 비해 열전도도가 1/20 정도인 CuO 등의 산화물을 생성하는 문제점이 있다.⁷⁹

실란 커플링제는 짧은 시간의 처리로 유기물질과 무기물질 의 결합을 증진시키고, 금속 및 비금속 필러에 적용이 가능 하여 광범위하게 사용되어 왔다.¹⁰ Du 등은 구리 입자의 안 정성을 향상시키기 위하여 커플링제로 처리한 후 전기전도도 변화를 관찰하였고,¹¹ Yim 등은 구리 입자를 산 처리한 후 지 방족과 방향족 실란 커플링제로 처리한 구리 입자를 전도성 페이스트에 첨가하여 온도 및 시간 변화에 따른 접촉 전기저 항을 관찰하였다.⁸ Kim과 Li 등은 구리입자 표면에 은을 코 팅하여 내산화성을 향상시켰지만 유기물질과의 낮은 결합력 을 보고하였다.^{12,13} Zeng 등은 구리 입자 표면에 비닐계 실란 커플링제 처리와 은 코팅 처리를 하여 상대적으로 표면저항 이 시간에 따라 서서히 증가함을 보고하였다.⁷ 이와 같이 구 리 표면의 산화물과 실란 커플링제 처리에 의한 고분자 복합 재료의 전기적 특성을 고찰한 연구는 많으나 열전도도에 미 치는 영향에 대한 연구는 거의 진행되지 않았다.

한편, Fu 등은 입자형 알루미늄, 덴드라이트 형태 구리 필 러, 층간 구조 그라파이트 등을 포함한 다양한 필러를 고분 자 수지에 적용한 결과 층간 구조의 그라파이트 필러가 입자 형의 필러에 비하여 접착제의 열전도도 형상에 효과적이며, 덴드라이트 형 구리 필러의 표면에 생성된 낮은 열전도도 산 화물이 접착제의 열전도도를 낮추는 요인으로 추정하였다.¹⁴ 본 연구에서는 덴드라이트 형태를 가지는 구리 필러를 질 산과 실란 커플링제로 표면처리하여 복합재료의 열전도도에 미치는 영향을 알아보았다. 또한 에폭시 매트릭스에 폴리메

틸메타아크릴레이트(PMMA) 비드를 첨가하여 구리 필러의 열전달 경로 형성에 미치는 영향과 이로 인하여 복합재료의 열전도도에 미치는 영향을 병행하여 고찰하였다.

실 험

실험 재료. 본 연구에서는 폭이 15 µm이고 길이가 100 µm 정도인 덴드라이트(dendritic) 형태의 구리 필러(196575000, Acros Organics Co., Belgium)를 사용하였다. 매트릭스 수지 는 Figure 1에 표시된 비스페놀-A 계의 에폭시(EP-3000-32, Pace Technologies, USA)와 에폭시 경화제(EH-3000-08, Pace Technologies, USA)를 5:1의 비율로 혼합하여 경화시켜 사용 하였다. 에폭시는 투명성과 내후성이 우수해서 첨단 고기능 복합재료에 많이 사용되고 있으나 필러가 혼합되지 않은 에 폭시의 열전도도는 0.17 W/mK로 낮아 높은 열방출을 필요 로 하는 방열분야에는 사용하기 어려운 문제가 있다.

구리 필러의 표면처리 및 시료 준비. 구리 필러 표면의 산 화층을 제거하고 표면의 화학 활성을 높여 복합재료의 열전 도도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 10% 질산 용액에 10 분 동안 담궜다가 거름 종이로 거른 후 이를 증류수와 메탄 올로 2-3회 세척한 후 삼각 플라스크에 넣고 질소 기류하에 서 1시간 건조하여 사용하였다. 에폭시 매트릭스에 구리 필 러의 분산을 용이하게 하고, 구리 필러와 에폭시 수지와의 결 합을 향상시키기 위하여 3-aminopropyltrimethoxysilane (APTMS, Sigma-Aldrich Co., USA)를 3 wt% 첨가하여 표면 처리를 하였으며, 에폭시 매트릭스 내에서 열전도성 구리 필 러의 공간 제한 효과를 주어 열전달을 용이하게 하기 위하여 평균 직경이 5 μm인 폴리메틸메타아크릴레이트(PMMA) 비 드(MH-5FD, Kolon Industries Co., Korea)를 혼합하여 사용 하였다.

질소 기류하에서 건조된 구리 필러와 APTMS를 첨가하여 바이알에서 5분 동안 나무 막대로 저으면서 표면처리를 하였 다. APTMS는 (에폭시+구리 필러)의 질량에 대하여 3 wt% 첨가하였다. 구리 필러를 표면처리한 후에 에폭시, 경화제, PMMA 비드를 한꺼번에 바이알에 추가한 후 15분 동안 혼 련하였다. 구리 필러를 과량 투입할 경우에는 혼합이 불가능 하여 50 wt% 이하를 투입하였다. 혼련이 끝난 혼합물을 주사 기를 이용하여 직경이 50 mm이고 깊이가 30 mm인 이형처 리된 플라스틱 몰드에 옮겨서 상온에서 6시간 동안 경화시킨 후 시료를 추출하였다. 추출된 시료는 열전도도를 측정하기 위한 크기에 맞게 사포로 연마하여 사용하였다.

특성 분석. 필러의 형상 및 크기뿐만 아니라 복합재료의 파 단면 분석을 통한 필러의 분산과 필러와 매트릭스 사이의 계 면결합이 복합재료의 열전도도에 미치는 영향을 알아보기 위 하여 전계형 주사전자현미경(FESEM, JSM 6007-F, JEOL Co., Japan)을 사용하였다. 시료는 액체 질소 분위기에서 파 단시켜 준비하였고 시료 표면의 전하대전으로 인한 손상을 방지하기 위하여 시료를 스퍼터 코터를 이용하여 수십 nm의 Pt 전처리 코팅을 한 후 관찰하였다. 복합재료의 열전도도를 측정하기 위하여 guarded heat 방식을 이용한 열특성 분석기 (Quickline-10[®], Anter Co., USA)를 이용하였으며, 측정 시료 의 직경은 50 mm였으며 두께는 3 mm였다. 구리 필러를 0 에서 50 wt% 포함한 복합재료를 제조하여 사용하였으며 각 함량에서 5개의 시료를 측정하여 평균값을 사용하였다.

시료의 열화 현상과 시료의 온도에 따른 중량 변화를 관찰 하기 위하여 thermal gravimetric analyzer(TGA, TA 1000, TA Instruments Co., USA)를 이용하여 질소 분위기에서 상 온에서 800 ℃까지 10 ℃/min의 승온 속도로 측정하였다.

구리 필러의 APTMS 표면처리 효과를 확인하기 위하여 적 외선 분광분석(FTIR, Nicolet IR 200, Thermo Electron Co., USA)을 사용하였으며, 측정 범위는 400에서 4000 cm⁻¹였으 며, 스펙트럼의 해상도는 32 스캔에 대하여 4 cm⁻¹였다.

필러 조성에 따른 복합재료의 표면저항을 측정하기 위하여 직경 50 mm이고 두께가 3 mm인 디스크 형태의 샘플을 준비 하여 고저항측정기(Agilent 4339B, Agilent Technologies Co., USA)를 사용하였다.

결과 및 토론

Figure 1은 덴드라이트(dendritic) 구리 필러의 주사전자현 미경 사진이다. 덴드라이트 형태의 필러는 일반적인 구형의 구리 입자와는 다르게 긴축을 따라 가지가 달린 구조로 거친 표면을 가지고 있다. 3~5 µm의 직경을 가지는 중심축을 따 라 작은 가지들이 달려있는 구조이다. 덴드라이트 구리 필러 와 유사한 모양을 가지는 층상 그라파이트가 방열 접착제에 서 입자형의 필러보다 효과적으로 열을 전달하는 것으로 알 려져 있다.^{14,15} Figure 1(b)는 APTMS처리된 Cu (50 wt%)/ epoxy(50 wt%) 복합재료의 파단면을 주사전자현미경으로 찍 은 사진이다. 덴드라이트 형태의 구리 필러가 균일하게 에폭 시 매트릭스 내부에 고르게 분산된 것을 알 수 있으며, 거친 파단면은 복합재료가 에폭시보다 파괴에 큰 에너지가 필요한 구조임을 시사한다. Figure 1(c)는 PMMA 비드/(PMMA 비 드+에폭시) 비율이 12.5 %인 복합재료의 파단면 사진이며, Figure 1(d)는 확대사진으로 PMMA 비드 사이에 덴드라이트 형태의 구리 필러가 놓인 것을 뚜렷이 볼 수 있다.

구리 필러와 PMMA 비드를 동시에 포함하는 경우에도 덴 드라이트 형태의 구리 필러가 에폭시 매트릭스 안에 균일하 게 분산된 것을 볼 수 있고, Figure 1(b)에 비하여 덴드라이 트 구리 필러가 PMMA 비드를 제외한 에폭시 매트릭스 지 역에 집중적으로 위치한 것을 확인할 수 있다(Figure 1(c)). PMMA 비드를 포함하는 Figure 1(c)나 Figure 1(d)와 같은 복 합재료 구조는 Cu 필러들의 열적 접촉을 용이하게 해서 높 은 열전도도를 가지는 것으로 생각할 수 있고, 일부 비드들 이 매트릭스에서 빠져 나온 표면 구조는 비드와 에폭시 수지 와의 높지 않은 계면 접착력을 의미한다. Figure 1(d)를 통해 덴드라이트 형태의 Cu 필러 형태가 복합재료 가공 중에 부 서지지 않고 잘 유지되어 있는 것을 볼 수 있다.

Figure 2는 APTMS 및 APTMS 처리를 한 구리 필러의 FTIR 스펙트럼을 비교하여 보여주고 있다. 구리 필러를



Figure 1. SEM morphologies of (a) dendritic Cu filler ($\times 1000$); (b) Cu (50 wt%)/epoxy (50 wt%) composites ($\times 1000$); (c) Cu(50 wt%)/PMMA bead (6.25 wt%)/epoxy (43.75 wt%) composites ($\times 1000$); (d) Cu (50 wt%)/PMMA bead (6.25 wt%)/epoxy (43.75 wt%) composites ($\times 5000$).

150



Figure 3. (a) Surface resistance; (b) Thermal conductivity of composites as a function of Cu filler loading with- and without HNO₃ treatments.

으로 판단된다. 구리 산화층의 제거로 구리 필러와 매트릭스 사이의 포논과 전자의 전달이 향상되어 열전도도가 증가하고 표면저항이 감소된 것으로 보인다.

Figure 4는 순수한 구리와 20 wt%의 구리를 포함하는 복 합재료에서 단계별 표면처리 방법에 따른 열전도도 변화를 보여주고 있다. 구리 필러를 질산처리, 실란계 커플링제 표면 처리, PMMA 비드를 도입함에 따라 복합재료의 열전도도가 급격히 증가함을 보여주고 있다. 구리 필러를 표면처리하지 않은 경우에 열전도도가 0.23 W/mK인 것에 반하여 질산 처 리와 APTMS 처리에 의하여 열전도도가 0.27 W/mK로 증가 하고, 여기에 구리 필러를 표면처리하고 PMMA 비드를 10 wt% 도입하면 0.31 W/mK로 뚜렷하게 증가함을 알 수 있 다. 20 wt%의 구리 필러를 포함하는 경우에 질산 처리 및 실 란 처리를 하고 비드를 추가하면 순수 에폭시 대비 복합재료 의 열전도도가 약 100% 증가함을 알 수 있다. 실란계 커플 링제 표면처리가 계면의 열저항을 효과적으로 감소시키는 것



Figure 2. FTIR spectra of APTMS and APTMS-treated Cu fillers.

APTMS로 표면처리한 후에 APTMS의 특징적인 피크 크기 가 작아지기는 했지만 여전히 존재하기 때문에 표면처리가 성공적으로 이루어진 것을 알 수 있다. 실란계 커플링제의 사 용은 필러와 매트릭스 사이의 강한 결합을 이끄는 것으로 알 려져 있고, 실란계 커플링제(일반식 X-Si(OR)_n)가 가수분해 되어 실라놀을 형성하고 금속표면과 실라놀이 결합하는 것은 이전의 연구에서 제안되었다.^{16,17} Figure 2의 APTMS 처리 Cu 필러의 스펙트럼에서 2900-3000 cm⁻¹은 C-H 피크이고, 1000-1100 cm⁻¹는 Si-O-C의 피크이고, 3400 cm⁻¹의 피크는 APTMS 커플링제가 가수분해되어 형성된 Si-OH 피크로 구리 표면층 과 결합하여 보호막을 형성하는 것으로 보인다. 구리 필러의 표면에 형성된 보호막은 산화방지에 도움을 줄뿐만 아니라 유기 매트릭스와 양호한 결합을 형성하는데 도움이 되며, 강 한 계면 결합은 에폭시와 구리 필러 사이의 계면의 공극을 감소시키며 이는 복합재료의 열전도도 상승의 주요 요인이다.⁵

Figure 3(a), (b)는 구리 필러 함량을 변화시키면서 질산 처 리 유무에 따른 복합재료의 표면저항과 열전도도의 변화를 각각 보여주고 있다. 질산 처리를 하여 구리 표면에 존재하 는 산화물을 제거하였을 때 표면저항이 감소하는 것을 보여 주고 있고, 구리 필러 함량이 높아짐에 따라 표면저항 감소 폭이 커지는 것을 알 수 있다. 순수 에폭시의 열전도도는 0.17 W/mK에서 30%의 구리 필러를 포함하였을 때 질산 미 처리와 질산 처리 구리 필러 함유 복합재료의 열전도도는 각 각 0.28, 0.34 W/mK였다. Figure 3(b)는 질산 처리에 의해 구 리 산화물을 제거하여 열전도도가 향상된 것을 보여주고 있 으며 표면저항과 비슷하게 높은 함량의 구리 함량에서 열전 도도가 크게 증가하였다. 이는 단사정계 구조를 가지는 CuO. Cu₀O와 같은 구리 산화물이 면심입방구조를 가지는 구리와 비교하여 높은 전기 저항과 20 W/mK 정도의⁹ 낮은 열전도 도를 가지기 때문에 질산 처리에 의한 단사정계 산화층 제거 가 복합재료의 표면저항과 열전도도에 크게 영향을 미친 것



Figure 4. Thermal conductivities of (a) bare epoxy; (b) Cu (20 wt%)/epoxy(80 wt%); (c) Cu(20 wt%)/APTMS(3 wt%)/epoxy (80 wt%); (d) HNO₃-treated Cu(20 wt%)/APTMS(3 wt%)/epoxy (80 wt%); (e) HNO₃-treated Cu(20 wt%)/APTMS(3 wt%)/(bead+epoxy) (80 wt%) with a condition of bead/(bead+epoxy)=0.125.

으로 보인다. 표면처리와 비드 도입으로 열전도도 증가 효과 를 보여주지만, 구리 필러의 높은 열전도도를 감안하면 복합 재료의 열전도도는 여전히 매우 낮은 값을 가지는 데 이는 필러와 매트릭스 사이의 계면 열저항이 열전도도를 급격히 감소시키기 때문으로 보인다.

또한 Figure 1(c)에서 볼 수 있는 복합재료 내부에 존재하 는 기공들도 열전도도를 낮추는 주요 요인으로 알려져 있다. Zeng 등은 구리 필러를 triethoxyvinylsilane으로 표면처리하 여 페놀 수지에 첨가하였을 때 전기전도도가 증가함을 보고 하였는데 이러한 결과는 Figure 3과 Figure 4에서 유추할 수 있다. 7 고정된 구리 필러 함량에 대하여 매트릭스를 전부 에 폭시로 사용한 경우와 (에폭시+PMMA 비드) 함량에 대한 PMMA 비드의 비율을 0, 5, 12.5, 25%로 변화시킨 경우의 복합재료의 열전도도를 Figure 5에 나타내었다. PMMA 비드 를 투입하기 전보다 투입한 후의 복합재료의 열전도도가 전 체적으로 높고, 그 중에서도 비드 포함 비율이 12.5%일 때 가장 높은 열전도도를 보였다. 비드 포함 비율이 25%인 조 성에서는 에폭시와 비드의 완전한 분산이 이루어지지 않아 불완전한 계면 현상으로 열전도도가 오히려 낮아지는 것으로 추정된다. 구리 필러를 50 wt% 포함하고 PMMA 비드를 포 함하지 않는 에폭시 복합재료와 비드/(비드+에폭시) 비율이 12.5%인 에폭시 복합재료의 열전도도는 각각 0.46, 0.65 W/ mK가 되어 비드를 포함한 경우에 복합재료의 열전도도가 41% 이상 증가하였다.

이와 같은 결과는 Figure 1(c)와 Figure 1(d)에서 보듯이 비 드를 포함하는 경우에 구리 필러는 비드 외의 에폭시 매트릭 스 영역에만 집중적으로 위치하게 됨으로써 구리 필러간의 접촉이 용이해지고 상대적으로 적은 수의 접촉점이 존재하기



Figure 5. Thermal conductivity of epoxy composites as a function of Cu filler loading with different bead contents.



Figure 6. Thermal gravimetric analysis curves of pure epoxy and composites with different bead loadings.

때문에 복합재료의 열전도도가 상승한 것으로 보인다.¹⁸ 특히 이러한 구리 필러의 열전도도 상승 효과는 입자형의 구리 필 러보다 Figure 1(a)와 같은 덴드라이트 구조나 종횡비가 큰 필러에서 뚜렷할 것으로 예상된다. Figure 5에서 볼 수 있듯 이 비드 투입에 의한 열전도도 상승 효과는 40 wt% 이상의 구리 필러를 포함하였을 경우에 현저하였다.

Figure 6은 비드의 함량에 대한 복합재료의 열적 안정성과 분해온도를 조사하기 위한 열중량 분석 결과이다. 필러가 포 함되지 않은 순수 에폭시와 구리를 50 wt%를 포함하면서 비 드 함량을 변화시킨 복합재료의 열중량 그래프를 비교하였 다. 순수 에폭시나 비드를 포함하지 않는 복합재료의 경우에 는 비드를 포함하는 복합재료보다 300 ℃ 이하에서 더 큰 중 량감소를 보였다. 이는 미반응 에폭시 단량체들이 낮은 온도 에서 부터 분해되는데 반해 PMMA 비드는 상대적으로 열적 으로 안정하기 때문으로 생각된다. 구리 필러를 50 wt%를 포 함하고 PMMA 비드 함량 비율이 25%인 시료는 순수 에폭 시나 낮은 함량 비율의 PMMA 비드를 포함한 복합재료에 비 하여 완만한 중량 감소와 500 ℃ 이상의 고온에서 높은 잔류 함량을 보였다. 한편, Figure 6은 매트릭스 내에서 비드의 함 량이 증가함에 따라 중량의 감소 속도가 늦어짐을 보여주고 있다.

결 론

덴드라이트 형태를 가지는 구리 필러에 질산 처리와 실란 계 커플링제 처리를 하여 복합재료의 열전도도와 표면저항을 향상시켰다. 구리 필러를 질산 처리하여 낮은 열전도도와 전 기전도도를 가지는 구리 표면의 산화막을 제거하여 구리 필 러를 30 wt% 포함하는 복합재료의 열전도도가 20% 이상 증 가하였으며, 표면저항은 4×10¹⁶에서 2×10¹⁶ ohm/sg.로 감소하 였다. 구리 표면에 형성된 산화막이 복합재료의 열전도도와 표면저항에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였다. 동일한 구리 함량에서 PMMA 비드를 포함하는 경우에 복합재료의 열전도도가 증가하는 것을 확인하였으며, 이는 비드의 도입 에 의하여 구리 필러가 제한된 공간에 위치하게 되어 덴드라 이트 구리 필러간의 열접촉이 용이해져 열전도도를 향상시킨 것으로 보인다. 대부분의 구리 필러 함량에서 비드/(비드+에 폭시)의 비율이 12.5%인 복합재료의 열전도도가 가장 높았 으며, 50 wt%의 구리 필러를 포함하는 복합재료의 경우 열전 도도가 0.65 W/mK를 가져 비드를 포함하지 않은 복합재료 에 비해 열전도도가 41% 이상 증가하였다. PMMA 비드를 함유한 에폭시 복합재료는 비드를 포함하지 않은 복합재료에 비하여 완만한 열분해 거동과 높은 잔류 질량을 보였다. 본 연구는 저렴한 PMMA 비드를 복합재료 매트릭스안에 투입 하여 같은 함량의 열전도 필러에서 열전도도를 효과적으로 증가시키는 방법을 제시하고 있다.

감사의 글: 본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신 창의인력양성사업의 연구지원(2013H1B8A2032161)에 의해 이루어졌습니다. 또한 본 연구는 한국연구재단의 연구지원 (2013R1A1A4A01006213)에 의해 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 1. K. M. F. Shahil and A. A. Balandin, Nano Lett., 12, 861 (2012).
- 2. Y. Hwang, J. Kim, and W. C. Cho, Polym. Korea, 38, 782 (2014).
- X. Y. Huang, T. Iizuka, P. K. Jiang, Y. Ohki, and T. Tanaka, J. Phys. Chem. C, 116, 13629 (2012).
- Y. S. Eom, K. S. Choi, S. H. Moon, J. H. Park, J. H. Lee, and J. T. Moon, *Etri J.*, 33, 864 (2011).
- A. Boudenne, L. Ibos, M Fois, J. C. Majeste, and E. Gehin, *Composites: Part A*, 36, 1545 (2005).
- W. Trabelsi and M. F. Montemor, *Surf. Coat. Technol.*, **192**, 284 (2005).
- 7. Y. Zeng and G. Zhang, J. Alloys Compd., 585, 277 (2014).
- 8. M. J. Yim and C. P. Wong, J. Electron. Mater., 36, 10 (2007).
- 9. K. Kwak and C. Kim, Korea-Aust. Rheol. J., 17, 35 (2005).
- 10. M. Fedel and M. E. Druart, Prog. Org. Coat., 66, 118 (2009).
- S. G. Du, T. L. Zhang, J. Yan, and H. P. Cui, *Progress in Safety Science and Technology*, 4, 1548 (2004).
- 12. J. H. Kim and S. S. Kim, J. Alloys Compd., 509, 4399 (2011).
- 13. X. Z. Li and Y. Q. Wang, J. Alloys Compd., 509, 5765 (2011).
- 14. Y. X. Fu and S. S. Lu, Appl. Therm. Eng., 66, 493 (2014).
- G. D. Park, H. O. Jung, S. G. Lee, J. H. Lee, K. M. Kim, J. H. Yim, and S. R. Kim, *Macromol. Res.*, 14, 254 (2015).
- F. Beari, M. Brand, and P. Jenkner, J. Organomet. Chem., 625, 208 (2001).
- A. Franquet, C. L. Pen, H. Terryn, and J. Vereecken, *Electrochim. Acta*, 48, 1245 (2003).
- 18. I. Novak and I. Krupa, Eur. Polym. J., 40, 1417 (2004).