

전도성 아연/에폭시 수지 복합체의 전기적 특성

박재경* · 이정은** · 최태운*** · 홍기현**** · 오승민***** · 오대희†

부경대학교 공업화학과, *경북대학교 응용화학공학과, **에이케이캠텍(주), ***경성대학교 신소재공학과
****김천대학교 소방학과, *****울산여자고등학교

(2015년 4월 1일 접수, 2015년 8월 8일 수정, 2015년 8월 26일 채택)

Electrical Properties of Conductive Zinc/Epoxy Resin Composites

Jae Kyung Park*, Jung Eun Lee**, Tae Un Choi***, Ki Heon Hong****,
Seung Min Oh*****, and Dae Hee Oh†

Department of Industrial Chemistry, Pukyong National University, San 100, Youngdang-dong, Nam-gu, Busan 608-737, Korea

*School of Applied Chemical Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

**AK Chem Tech Co. Ltd., Ho-dong, Nam-gu, Pohang 790-380, Korea

***Department of Advanced Materials Engineering, Kyungsung University, Daeyeon 3-dong, Nam-gu, Busan 608-736, Korea

****Department of Fire Protection Engineering, Gimcheon University,

214, Daehak-ro, Gimcheon-si, Gyeongsangbuk-do, 740-704, Korea

*****Ulsan Girl's High School, Samsanro 9 gil, Nam-gu, Ulsan 680-828, Korea

(Received April 1, 2015; Revised August 8, 2015; Accepted August 26, 2015)

초록: 에폭시 수지에 아연 분말을 분산시켜 전도성 복합재료를 제조하여 충전제의 함량별 체적 전기저항과 미세경도, 미세구조, 열적 성질 등을 조사하였다. 아연/에폭시 수지 복합체의 체적 전기저항은 $8.8 \times 10^6 \sim 4.4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 범위를 나타내었다. 아연함량이 70 wt%인 lower 관투전이 영역에서 upper 관투전이 영역인 78 wt%까지 체적 전기저항 값이 급격하게 감소하였다. 이는 분말 함량 70 wt% 이상에서부터 전자가 잘 이동할 수 있는 통로가 만들어진 것으로 보인다. 분말 함량이 78 wt% 이상에서는 매트릭스 내의 분말 함량만 늘어날 뿐 체적저항의 감소에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 아연/에폭시 수지 복합체의 초미세 경도(DHT) 값은 4.566~6.604로 나타났다. 이것은 매트릭스 내 분말의 함량이 증가할수록 복합체의 DHT 값은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고분자 매트릭스 내에 분말 간의 보강효과에 의해 경도가 증가한 것으로 보인다. 전기전도도는 니켈/에폭시 수지 복합체보다 아연/에폭시 수지 복합체가 높았다. 복합체의 경도는 보고된 니켈/에폭시 수지 복합체와 아연/에폭시 수지 복합체는 비슷한 경도를 가진 것으로 나타났다. 아연/에폭시 수지 복합체의 열적 안정성은 400~470 °C 사이에서 매트릭스로 사용되어진 에폭시 수지의 분해로 무게 손실이 발생된 것으로 니켈과 아연 복합체 모두 비슷한 온도에서 열분해가 시작되는 것으로 보아서 아연금속 분말의 영향보다 에폭시 매트릭스의 영향을 많이 받는 것으로 사료되어진다.

Abstract: The conductive polymer composites have attracted considerable attention in the field of industry due to their electrical properties. To understand electrical properties of the composites, their volume specific resistance was measured. Electrical conductivity results showed percolation phenomena. Percolation theories are frequently applied to describe the insulator-to-conductor transitions in the composites composed of conductive filler and insulating matrix. It was found that percolation threshold strongly depends on the aspect ratio of filler particles. The critical concentration of percolation formed is defined as the percolation threshold. The purpose of this study was to examine electrical properties of the resins filled with zinc. The sample was prepared using vehicle such as epoxy resin replenished with zinc powder, and the evaluation on their practical use was performed in order to apply them to electric and electronic industry as well as general field. The volume specific resistance of epoxy resin composites was $8.8 \times 10^6 \sim 4.4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ when using zinc powder. Weight loss of the conductive composites took place at 400~470 °C.

Keywords: epoxy resin, percolation phenomena, percolation threshold volume specific resistance, insulator-to-conductor.

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: dhoh@pknu.ac.kr

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

서 론

전도성 고분자는 기존 고분자재료의 장점인 용이한 가공성, 저비용, 경량화, 제품형태의 다양성을 그대로 유지하면서 금속 재료의 특성을 부여할 수 있다. 또한 복합재료를 사용하는 이유는 전도성 무기 소재가 전도성이 우수하나 접착력이 없고, 고분자 소재는 접착력이 우수하나 전도성이 낮기 때문이다.^{1,2} 전도성 고분자는 많은 연구가 이루어지고 있지만 아직 전도성 고분자를 실제 제품에 적용한 예는 그리 많지 않은 실정이다. 가정용품에서부터 기계, 건설, 자동차, 항공 등의 산업용품을 위한 부품을 광범위하게 널리 사용되고 있으며, 계속해서 그 수요 역시 빠르게 증가하고 있다. 플라스틱은 열과 전류에 대한 절연성을 가지고 있는 것에 반하여, 보통 금속에 비해 약한 강도특성으로 인해 용도가 한정되어 있는 것이 현실이다. 그러나 산업기술의 발전과 함께 특수한 성질을 갖는 고기능 플라스틱의 요구가 증가되고 있으며, 고분자 접착 기술의 발전과 함께 특수한 용도에서 요구되는 특성을 만족시키는 플라스틱에 대한 개발이 활발히 수행되고 있다.^{3,4} 상업화된 전도성 고분자 제조는 절연체인 폴리머 매트릭스 내에 전도성 기능을 가진 충전제를 첨가하는 방법이 널리 사용되고 있으며, 전도성 기능을 더 높이기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.^{5,6} 전도성 무기 충전제로서는 아연, 구리, 니켈 등의 금속분말과 카본블랙이나 흑연과 같은 무기물 등이 사용되고 있다.⁷ 최근 전기 전자 등 특수분야에서는 금과 은의 분말이 사용되고 있다.^{8,9} M. Coler와 Malliaris는 폴리에틸렌에 니켈 분말을 충전시켜 입도와 첨가량 변화에 따른 체적고유저항을 측정하고 전자현미경을 이용하여 충전 함량에 따른 도전성 분말의 분산상태를 검토하였다.^{10,11} 또한 철 분말 충전 polyimide-amide 복합체, 니켈 분말 충전 우레탄 탄성체 복합체를, poly(methyl methacrylate)(PMMA)에 구리 분말의 첨가량에 따른 체적고유저항을 측정하였다. 특히 도전성 도료의 경우는 용제 및 충전제의 종류와 충전 함량에 따라 도전성에 큰 영향을 미치게 된다고 보고하였다. 즉, 사용한 수지의 용집으로 연속적인 도전성 막을 형성하지 못하고 단계별로 도전성을 잃게 된다. 도전성 재료는 충전제와 수지의 종류에 따라 이용도가 다르다.^{12,13} 절연 매트릭스에 전도성 충전제를 첨가하여 생성된 복합체는 충전제가 어느 정도 낮은 농도까지는 비전도성을 나타내다가 농도를 증가시켜 어느 농도점에 도달하면 전도성을 나타내며 전도성이 갑자기 증가하는 충전제 농도함수가 절연체로부터 전도성 복합체로의 전이를 관투전이(percolation transition)라 하고 이런 현상을 관투현상(percolation phenomena)이라 한다.¹⁴ 이렇게 총괄저항치가 급격히 떨어지기 시작하는 임계농도를 관투시작점(percolation threshold)이라 부르며 충전제의 농도가 증가하면서 저항치는 크게 하락하다가 어느 농도 이상에서는 저항치의 변화가 일정 값에 수렴한다. 이것은 절연체인 고분자 매트릭스 내에서

전도성인 금속충전제가 네트워크를 생성하여 총괄저항치가 낮아져 전도성이 크게 증가한다.^{15,16} Moon 등은¹⁷ PVC와 PE에 Ni와 Cu를 첨가했을 때 고분자입자/금속입자의 비(R_p/R_m)에 따라서 비저항이 다름을 나타냈고, Jung 등은 PP/MWNT에 소량의 스테인레스 단섬유(SSF)를 소량 첨가했을 때 더 낮은 MWNT 함량에서 관투전이점이 나타난다고 보고하였다.¹⁸ 지금까지는 고분자 복합재료의 정확한 전도기구는 알려져 있지 않고 있지만, 모든 도전성 충전제의 충전 함량에 따라 관투전이 부피분율이라고 불리는 임계 부피분율에서 전기저항 값이 부도체 영역($>10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$)으로부터 반도체 영역이나 도체 영역($<10^5 \Omega \cdot \text{cm}$)으로 급격히 감소하게 되는 관투현상이 나타난다. 그러나 사용된 도전성 충전제와 수지의 종류에 따라 복합재료의 체적저항이 다르게 되므로 산업체 응용분야별로 달라진다. 에폭시 수지는 한 분자에 2개 이상의 에폭시기를 가진 화합물로서, 우수한 기계적 물성, 전기적 특성, 접착성, 치수안정성, 형상안정성, 가소성, 내마모성, 저장안정성, 기계가공성, 내수성, 내약품성 등을 갖고 있을 뿐만 아니라, 에폭시기와 여러 종류의 경화제와 다양한 조합을 통하여 넓은 범위의 물성 및 공정조건 조절을 가능하게 함으로써 다양한 물성실현이 가능하기 때문에 전기전자산업 분야뿐만 아니라 도료, 접착제, 자동차, 선박, 기계, 건축토목 등 다양한 분야에 응용되고 있다.

본 연구에서는 절연체인 에폭시 수지를 매트릭스로 사용하여 전도성 충전제인 아연의 금속분말을 충전시켜 전도성 도막을 제조하여 아연 함량에 따른 전기적 특성과 도막의 초미세경도, 미세구조, 열적 성질을 구리와 니켈을 사용한 전보와^{19,20} 비교하기 위해 조사하였다. 또한 관투현상과 관투전이도 관찰하였다.

실 험

시약 및 기기. 실험에 사용된 고분자 수지는 국도화학의 에폭시 수지(YD-011X70, 에폭시 당량: 450-500, 수지함량: 70%)를 사용하였으며, 경화제로는 Goodmide계[DOMIDE G-5022X70, 수지함량 70%, (주)국도화학]를 사용하였다. 도전성 충전제로는 판상구조의 아연분말[(주)고순도화학]을 사용하였다. 첨가제로는 BYK-Chemi사의 소포제(byk-320)를 사용하였으며 그대로 사용하였다. 실험에 사용되어진 매트릭스 재료들을 Table 1에 나타냈으며, 충전제의 형상을 Figure 1에 나타내었다. 아연분말을 고분자 매트릭스 내에 분산시키기 위해 사용된 분산기는 독일 VMA-GETZMANN사의 GHBH-D-51580을 사용하였으며, scanning electron microscopy (SEM, JSM840A)을 사용하여 매트릭스 내에 충전제의 분산상태를 확인하였다. 또한 Lorsta-GP(MCP-T600, Mizubish)의 four point probe를 사용하여 복합재료의 전기 저항 값을 측정하였다. 아울러 dynamic ultra micro hardness tester(일본

Table 1. Materials of Conductive Composites Matrix

	Epoxy resin	Curing agent	Viscosity improver	Deforming agent	Solvent
Equivalent	450~500	-	-	-	-
Solvent content	30%	30%	-	-	-
Product	YD-011X70	G-5022X70	sp-1000	byk-320	Xylene
Manufacture company	Kukdo Chem.	Kukdo Chem.	Koehisa	BYK-Chemie	Dongyang Chem.

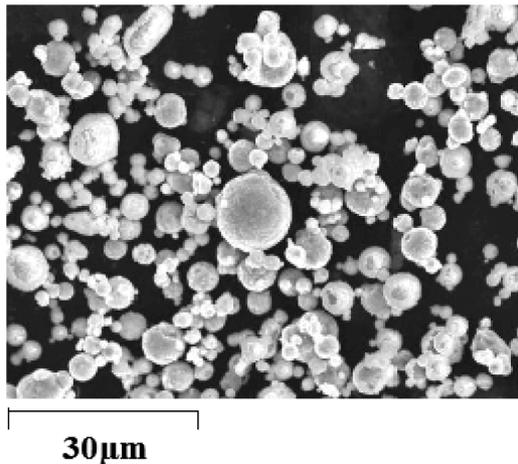


Figure 1. Microstructure of conductive zinc powder.

SHIMADZU, DUH-W201S)를 사용하여 복합재료의 초미세 경도를 측정하였으며, Perkin Elmer사의 themogravimetric analyzer TGA7 기기를 사용하여 복합체의 열적 성질도 조사하였다.

전도성 복합체의 제조. 용제함량이 30%인 YD-011X70 에폭시 수지와 용제함량 30% 경화제인 G5022X70을 약 7:3의 비율이 되도록 혼합한 후에 첨가제로 밀도가 큰 아연 분말이 복합체에 침전하지 않도록 증점제(sp-1000)를 소량 첨가하였으며 제조 후 발생하는 기포를 억제하기 위하여 소포제(byk-320)을 소량 혼합하였다. 주제와 경화제 및 첨가제를 충분히

교반시켜준 후에 아연 분말을 복합재료 전체 함량에서 50~80 wt%까지 주입하여 분산시켰다. 전도성 충전제의 충전 함량비는 용제 함량과 증점제, 소포제 함량을 제외한 순수한 매트릭스(에폭시 수지+경화제)와의 함량비를 나타내었다. 고속 분산기를 사용하여 4000 rpm으로 20분간 분산시켜 미세한 입자로 금속 분말을 분산시켰다. 사용되어진 아연분말의 비중은 7.113이다. 매트릭스 내에 충전제를 분산시켜 경화시키는 과정에서 고분자 수지보다 밀도가 높은 금속 분말이 침전하는 것을 방지하기 위하여 소량의 증점제를 첨가하였다. Table 2는 전도성 복합체의 충전제 조성별로 나타내었다.

전도성 복합체의 도막 제조. 각종 충전제 및 함량별 도전성 복합재료의 도막은 Teflon으로 코팅된 금속판 위에 0.7 T 두께의 강판을 양옆으로 고정시킨 후 그 사이에 혼합된 복합 재료를 도포한 후 유리봉으로 밀어 약 30분간 상온에서 방치하여 예비 건조시킨 후, 50 °C에서 12시간 경화시켜 두께가 0.40~0.45 mm인 도막을 제조하였다. Figure 2는 실험 과정을 그림으로 도식화하였다.

전도성 복합체의 체적 고유 저항 측정. 체적 고유 저항 측정은 일본 Mizubish사의 Loresta-GP(MCP-T600)를 사용하여 각종 시료 도막을 1000×1000 mm 크기로 절단하여 four point probe 단자 위에 올려놓고 5회 반복하여 평균치를 얻었다.

전도성 복합체의 미세구조. 고분자 매트릭스 내에 전도성 분말의 분산상태를 확인하기 위하여 제조된 복합체 필름을 액체질소에 냉각시킨 후 절단하여 파단면을 SEM으로 관찰하였다.

Table 2. Formulation of Zinc/Epoxy Composites

Sample	Epoxy resin	Hardener	Viscosity improver	Deformer	Diluent	Zinc
50 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	35.0
55 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	42.8
60 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	52.5
65 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	65.0
70 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	81.7
75 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	105.0
76 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	110.8
78 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	124.1
80 wt% composite	24.99	10.01	1.5	0.1	15	140.0

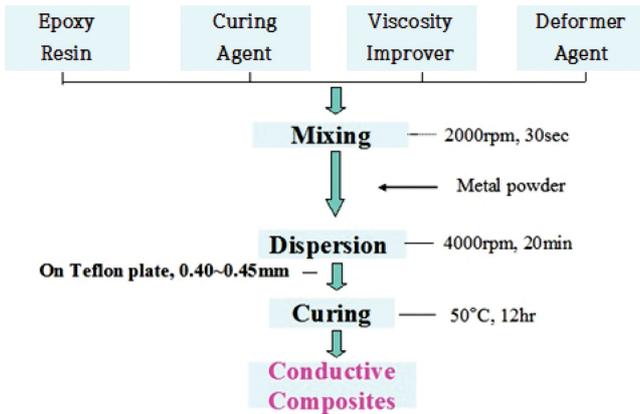


Figure 2. Flow diagram for experimental procedure.

전도성 복합체의 초미세경도. 전도성 복합체의 경도를 알아보기 위하여 시료를 150×150 mm로 절단하여 dynamic ultra hardness tester(일본 SHIMADZU, DUH-W201S)를 사용하여 경도를 측정하였다. Loading time은 1(0.145000[gf/sec])로 하였고, DHT 각도는 115°, test force는 1.000[gf]로 하여 1개의 시료에 5회 반복 측정하여 평균값을 구하였다.

전도성 복합체의 열적 성질 측정. 복합체 도막의 열적 안정성은 Perkin Elmer사의 thermogravimetric analyzer TGA7을 사용하여 질소분위기에서 50~700 °C에서 측정하였다.

결과 및 토론

아연/에폭시 복합체의 체적 전기 저항. Figure 3에서 보는 바와 같이 아연/에폭시 복합체의 경우 에폭시 매트릭스 내에 아연 분말의 함량비에 따른 체적전기저항을 측정하였다. 함량이 50~80 wt%일 때 체적전기저항은 $8.8 \times 10^6 \sim 4.4 \times 10^3$

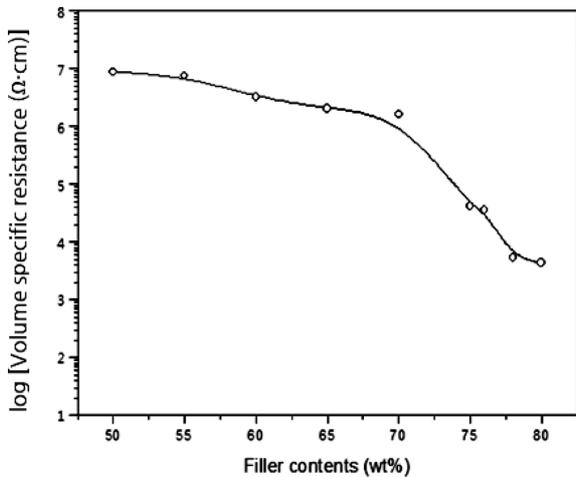


Figure 3. Volume specific resistance with zinc powder contents for zinc/epoxy composite.

$\Omega \cdot \text{cm}$ 의 범위를 나타내었다. 에폭시 매트릭스 내의 아연 분말의 함량비가 증가할수록 복합재료의 체적 전기저항 값은 감소함을 알 수 있다. 함량비가 70 wt%까지는 전기저항 값이 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 비교적 높은 저항 값을 나타내었다. 함량비가 70 wt% 이상의 조성부터는 중합체 내에 분말의 연속적인 통로가 형성되어 저항값이 급격히 감소하는 lower 관투전이 영역이 나타나기 시작했다. 함량비가 70~78 wt% 영역의 조성에서는 전기저항 값이 급격히 감소하다가 함량비가 78 wt% 지점부터는 입자와 네트워크내에 전도입자의 수가 두 번째 임계점인 upper 관투전이 영역에 도달하게 되었다. 78 wt% 이상의 조성에서는 filler 네트워크의 수만 증가하므로 전기저항의 변화는 완만한 곡선을 이루게 되었다. 아연/에폭시 복합체의 전기전도도는 많은 함량의 분말을 첨가하여도 전보에^{19,20} 보고한 구리나 니켈 복합체에 비해 떨어지는 것으로 나타났다.

아연/에폭시 복합체의 미세구조. 아연/에폭시 복합체를 형태학적으로 분석하여 보면 고분자 매트릭스 내에 관상 모양

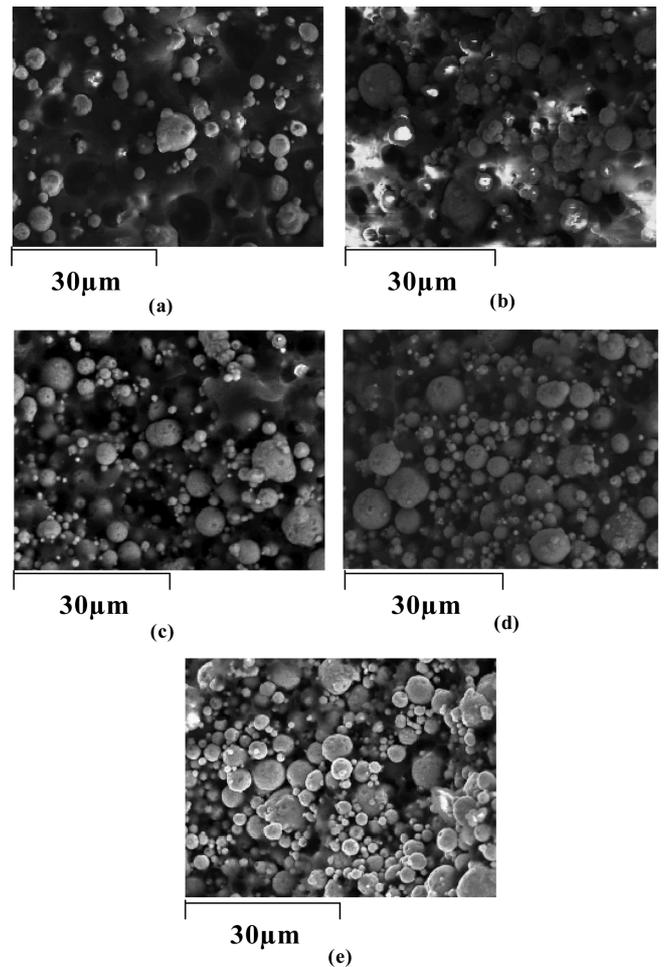


Figure 4. SEM images of fractured surface of the zinc/epoxy composites, content of nickel powder: (a) 65 wt%; (b) 70 wt%; (c) 74 wt%; (d) 78 wt%; (e) 80 wt%.

의 니켈 분말이 분산과정 중에 서로 엉켜져 있는 모습을 lower 관투전이 영역과 upper 관투전이 영역에서 관찰할 수 있다. Figure 4에는 아연이 복합체 전체 함량의 (a) 65 wt%, (b) 70 wt%, (c) 74 wt%, (d) 78wt%, (e) 80 wt%인 복합체의 파단면을 나타낸 것이다. 충전제의 함량이 증가할수록 매트릭스 내에 아연분말이 차지하는 표면적이 증가함으로써 전자가 이동할 수 있는 연속적인 통로가 만들어지게 됨을 알 수 있다.

Figure 5는 back scattered image(BSI)를 나타내는 것으로 검은 부분은 매트릭스이고 흰 부분은 충전제로서 매트릭스와 분말의 명암이 확연히 대비됨으로써 매트릭스 내 분말의 분산된 모양을 정확히 식별할 수 있다.

Lower 관투전이 영역이 발견되는 분말함량이 70 wt%에서 부터 아연분말이 밀집되기 시작하여 관투전이 현상이 일어남

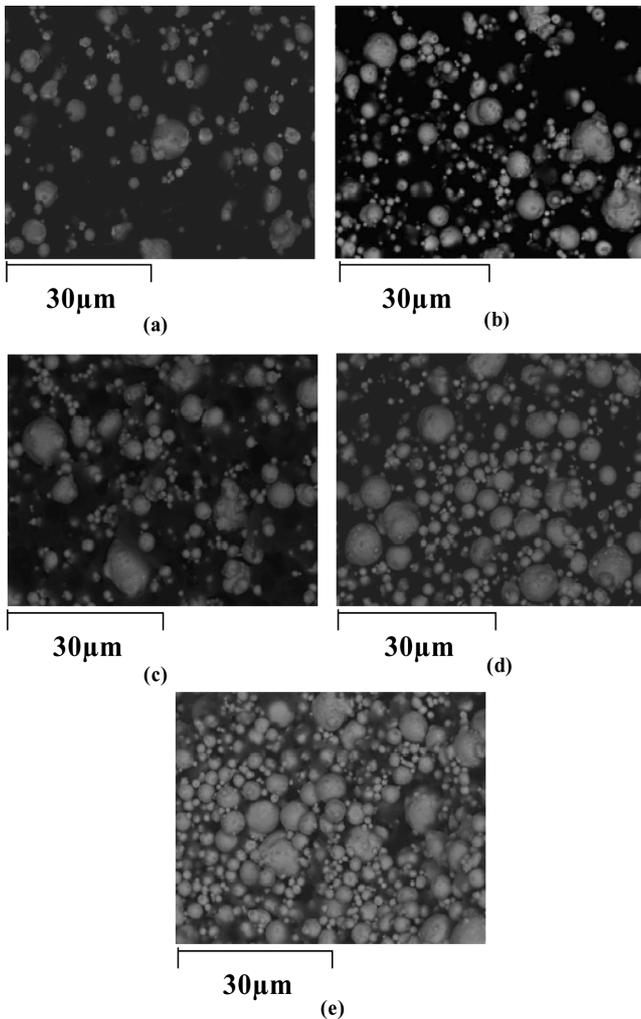


Figure 5. Back scattered images with zinc contents of zinc/epoxy composites, zinc powder wt%: (a) 65 wt%; (b) 70 wt%; (c) 74 wt%; (d) 78 wt%; (e) 80 wt%.

을 알 수 있다. upper 관투전이 지점인 분말함량 78 wt% 지점부터는 매트릭스 내 분말이 차지하는 표면적은 증가하지만 더 이상 체적전기지항에는 영향을 주지 않은 것으로 생각되어진다.

아연/에폭시 복합체의 초미세 경도. Figure 6은 아연/에폭시 복합체의 초미세 경도를 나타내었다. 고분자 매트릭스 내에 아연분말의 함량이 증가할수록 복합체의 미세 경도도 서서히 증가함을 알 수 있다. 아연/에폭시 복합체의 미세경도는 50~80 wt% 함량에서 경도 값은 5.021~8.230의 값을 나타내었다. 이는 고분자 매트릭스 내에 분산되어 있는 아연분말간의 보강효과에 의해 경도가 증가한 것으로 생각되어진다.

아연/에폭시 복합체의 열적 성질. Figure 7은 복합체의 열적 성질을 나타낸 그림이다. 400에서 470 °C 사이에 급격히

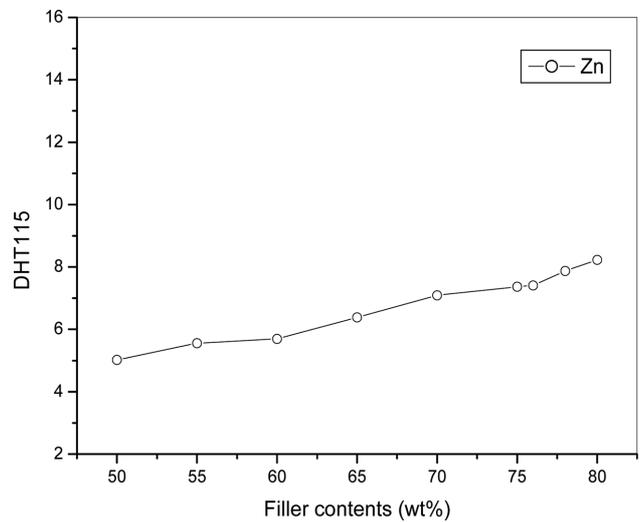


Figure 6. Microhardness of the zinc/epoxy composites as a function of filler content.

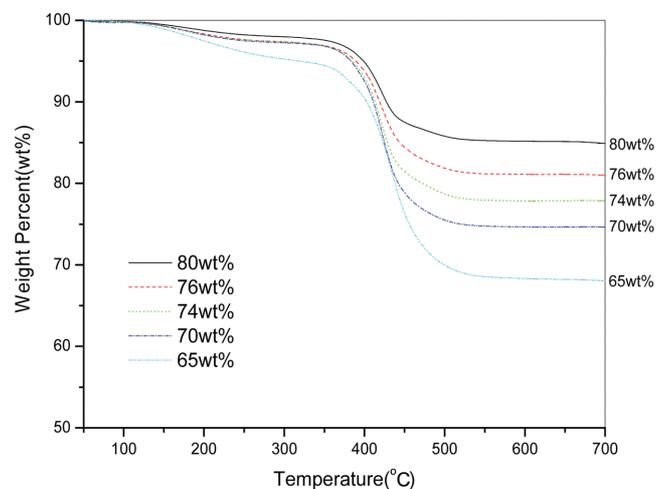


Figure 7. TGA thermograms of zinc/epoxy composites.

질량이 감소함을 알 수 있다. 매트릭스 내 분말 함량이 80 wt% 인 아연/에폭시 복합체의 경우 약 15 wt%의 무게 감량이 나타났으며 분말 함량 78 wt% 복합체의 경우는 약 18 wt%, 분말 함량 74 wt%는 약 23 wt%, 분말 함량 70 wt% 복합체의 경우는 약 25 wt%, 분말 함량 65 wt% 복합체의 경우는 약 34 wt%의 무게 감량이 있었다. 그러나 다시 470 °C 이상에서는 무게 질량의 변화가 거의 일어나지 않았다. 이는 400 °C 에서 470 °C 사이에서는 무게감량은 금속인 아연 분말에 비해 상대적으로 열적으로 약한 에폭시 수지의 분해가 일어난 것으로 생각되어진다.

결 론

절연체인 에폭시 수지에 전도성 충전제인 아연 분말을 수지 내에 분산시켜 전도성 복합재료를 제조하였다. 충전제의 함량별 체적 전기저항과 미세경도, 미세구조, 열적 성질 등을 조사하였다. 아연/에폭시 수지 복합체의 체적 전기저항은 $8.8 \times 10^6 \sim 4.4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 의 범위를 나타내었다. 분말 함량 70 wt% 이하인 복합재료의 경우 체적전기 저항은 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 이상의 비교적 높은 저항값을 나타냈으나 lower 관투전이 영역이 나타나는 70 wt%에서 upper 관투전이 영역인 78 wt% 까지 체적 전기저항 값이 급격하게 감소하였다. 이는 분말 함량 70 wt% 이상에서부터 전자가 잘 이동할 수 있는 통로가 만들어진 것으로 보인다. 분말 함량이 78 wt% 이상에서는 매트릭스 내의 분말 함량만 늘어날 뿐 체적저항의 감소에는 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 아연/에폭시 수지 복합체의 초미세 경도(DHT) 값은 4.566~6.604로 나타났다. 이것은 매트릭스 내 분말의 함량이 증가할수록 복합체의 DHT 값은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 고분자 매트릭스 내에 분말간의 보강효과에 의해 경도가 증가한 것으로 보인다. 전기전도도는 전보에서^{19,20} 보고된 니켈/에폭시 수지 복합체보다 아연/에폭시 수지 복합체가 높았다. 복합체의 경도는 보고된 니켈/에폭시 수지 복합체와 아연/에폭시 수지 복합체는 비슷한 경도를 가진 것으로 나타났다. 아연/에폭시 수지 복합체의 열적 안정성은 400~470 °C 사이에서 매트릭스로 사용되었던 에폭시 수지의 분해로 무게 손실이 발생된 것으로 전보의^{19,20} 구리 및 니켈과 아연 복합체 모두 비슷한 온도에서 열분해가

시작되는 것으로 보아서 아연/에폭시 수지 복합체의 열적 안정성보다 에폭시 매트릭스의 영향을 많이 받는 것으로 생각되어진다.

참 고 문 헌

1. S. L. Shinde and J. Goela, *High Thermal Conductivity Materials*, Springer, New York, 2006.
2. Y. Xu, D. D. L. Chung, and C. Mroz, *Composites: Part A*, **32**, 1749 (2001).
3. X. G. Lu, P. G. Hofstra, and R. C. Bajcar, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **36**, 2259 (1998).
4. L. A. Utacki, *Commercial Polymer Blends*, Chapman & Hall, London, 1998.
5. K. J. Yoon, Y. C. Jung, and T. W. Cho, *Key Eng. Mater.*, **297**, 1539 (2005).
6. J. J. Grodzinski, *Polym. Adv. Technol.*, **13**, 615 (2002).
7. Y. P. Mamunya, V. V. Davydenko, P. Pissis, and E. V. Ledev, *Eur. Polym. J.*, **38**, 1887 (2002).
8. K. Y. Law, *Chem. Rev.*, **93**, 449 (1993).
9. W. A. Gazotti, "Optical Devices Based on Conductive Polymers", in *Handbook of Advanced Electronic and Photonic Materials and Devices*, Wiley, New York, Vol **10**, p 53 (2001).
10. M. Coler, Japanese Patent 2,761,849 (1961).
11. M. Coler, Japanese Patent 62,110,974 (1961).
12. K. Jeszka, J. Ulanski, and M. Kryszewski, *Nature*, **289**, 390 (1981).
13. J. Ulanski, J. K. Jeszka, A. Tracz, and M. Kryszewski, *Matter. Sci.*, **10**, 299 (1984).
14. T. A. Ezquerro, J. Martinez, and F. J. Belta Calleja, *J. Mater. Sci. Lett.*, **5**, 1065 (1986).
15. J. Yu, L. Q. Zhang, M. Rogunova, J. Summers, A. Hiltner, and E. Baer, *J. Appl. Polym. Sci.*, **98**, 1799 (2005).
16. A. Celzard, E. McRae, C. Deleuze, M. Dufort, and M. Furdin, *Phys. Rev. B.*, **53**, 6209 (1996).
17. T. J. Moon, C. H. Choi, and J. H. Kim, *Polym. Korea*, **7**, 307 (1983).
18. J. K. Jung, K. H. Park, D. S. Bang, M. H. Oh, B. S. Kim, and J. K. Lee, *Polym. Korea*, **38**, 250 (2014).
19. J. E. Lee, Y. H. Park, S. M. Oh, D. J. Lim, and D. H. Oh, *J. Korean Oil Chemists' Soc.*, **30**, 472 (2013).
20. D. H. Oh, D. J. Lim, Y. H. Park, and S. M. Oh, *J. Korean Oil Chemists' Soc.*, **31**, 329 (2014).