

전도성 필러의 구조에 따른 고분자 복합체의 전기적 특성비교

한인수 · 양시열* · 하진욱**†

현대자동차 내장플라스틱재료개발팀, *삼양사 화학연구소, **한국자동차연구원 스마트소재연구센터
(2022년 2월 17일 접수, 2022년 3월 23일 수정, 2022년 3월 25일 채택)

Systematic Study on the Electrical properties of Polymer Composites with Various Types of Conductive Fillers

In Soo Han, Siyeol Yang*, and Jin Uk Ha**†

Interior System Plastic Materials Development Team, 150 Hyundaiyeonguso-ro, Gyeonggi-do 18280, Korea

*Samyang Corp. 730, Daedeok-daero, Daejeon 34055, Korea

**Smart Materials R&D Center, 303 Pungse-ro, Chung Nam 31214, Korea

(Received February 17, 2022; Revised March 23, 2022; Accepted March 25, 2022)

초록: 본 연구에서는 전도성 필러인 카본블랙, multi-walled carbon nanotubes(MWCNTs), branched carbon nanotube(CNT)를 사용하여 자동차 전장 부품에 사용되는 PC/PBT, PA 6 기반의 복합 재료에 대한 전기적, 열적, 기계적 특성 및 모폴로지를 확인하였다. Branched CNT 필러는 두 고분자 소재에서 모두 가장 높은 전기적 특성을 보였다. 특히 MWCNTs보다 두배 이상의 표면 저항 및 전자기 간섭차폐효율(EMI SE) 개선 효과를 확인하였다. 이러한 이유는 branched CNT가 linear MWCNTs에 비해 삼차원 구조를 구현할 수 있고, branched CNT 분기점에 접합점이 존재하여 쉽게 안정적인 전도성 네트워크를 형성할 수 있기 때문으로 보인다.

Abstract: In this paper, the electrical, mechanical, and thermal properties of PA 6 and PC/PBT composites with various conductive fillers such as carbon black, multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), and branched carbon nanotube (CNT) were investigated. The PA 6 and PC/PBT composites with branched CNT fillers exhibited the highest electrical properties. In particular, The composites with branched CNTs showed more than twice the improved surface resistance and EMI SE than those with MWCNTs. This seems to be because branched CNTs can implement 3D structures compared to linear MWCNTs and easily form stable conductive networks due to the presence of junctions at branches.

Keywords: electric properties, carbon nanotube, composite, branched carbon nanotube, polymer.

서 론

최근 테슬라를 선두로 모든 OEM사들은 전기자동차, 수소 자동차와 같은 전력기반의 친환경 자동차 연구에 주력하고 있다. 또한 고객 편의 사양 확대 및 자율 주행 등으로 전장 부품의 사용 비중이 높아지고 있다. 전장 부품 사용이 많아지면 자동차의 중량이 증가되게 되고, 이는 차량의 주행거리 감소와 같이 에너지 효율을 저감하게 되는 반대급부가 있다. 따라서, 전장 부품의 소형화, 경량화 필요성이 높아지고 있는 실정이다. 또한 전장부품 경우에는 빠른 응답 속도를 통해 안전성을 향상해야 하는데, 이 경우 작동 주파수의 증가가 필연적으로 발생하며, 동시에 불필요한 전자기파를 발생시켜 전

장부품 내부 또는 다른 전자 장치의 오작동을 유발할 수 있고, 궁극적으로는 기기의 고장이 되기도 한다. 이를 해결하기 위해서는 Figure 1과 같이 전자기파의 차폐나 흡수 소재를 이용하여 불필요한 전자파를 차단하여 오작동 유발을 방지하여야 한다.

전자파 차폐는 전자파 흡수와 비교하여 소극적인 개념으로 전자파를 반사하여 또다른 전자 장치에 영향을 미치지 못하도록 할 수 있지만, 반사된 전자파가 접지를 통해 없어지도록 디자인해야 한다. 전자파 흡수는 흡수된 전자파가 열로 변환되어 자동 소멸될 수 있으나, 주파수에 따라 흡수재의 두께가 증가되는 단점이 있다. 현재 상용되는 전자파 차폐 재료는 대부분 금속 필러를 첨가한 형태로 높은 전도도로 인한 차폐 효율을 증가시킬 수 있다. 그러나, 금속 필러의 높은 밀도와 가격으로 인하여 많은 함량을 첨가할 경우 충격 강도가 저하되고 최종 제품 중량이 무거워지며, 제품의 단가가 매우 비싸지는 단점이 있다.

†To whom correspondence should be addressed.
juha@katech.re.kr, ORCID 0000-0001-5902-8655
©2022 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

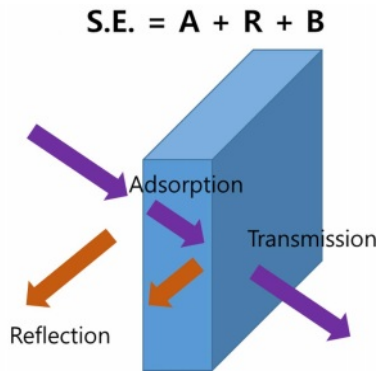


Figure 1. EMI SE Mechanism.

따라서 위에 언급한 단점을 극복하기 위해 많은 연구자들은 전기 전도도 및 전자파 차폐 효과에 좋은 전도성 폴리머 복합체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻¹² 특히, 금속 필러에 비해 매우 가벼운 탄소 나노튜브(CNT)는 전기적, 기계적, 물리적 우수한 특성 때문에 광범위하게 연구되고 있다.⁷⁻¹³ 폴리머 복합체의 전기 전도도 향상을 위해 폴리머 매트릭스내에서 CNTs의 네트워크 형성이 필요하다. 네트워크가 형성되면 인접한 나노튜브 사이의 전자 호핑 및 터널링 공정이 전기 전도에 기여할 수 있다. 열가소성 폴리머 매트릭스 내에 네트워크 형성을 위해 카본블랙, SWCNT & MWCNT(single-walled & multi-walled CNT) 이외에도 branched CNT에 대한 연구가 진행되고 있다. Branched CNT를 제조 방법은 CNT welding,¹⁴⁻¹⁶ 탄소 섬유 탄화법,¹⁷ 화학 증기 증착 기반 방법 등이¹⁸⁻²¹ 있다.

자동차 산업에서 친환경차의 판매량이 증가하고 편의 및 안전장치의 채택이 증가하면서 다양한 전장 부품(자율주행 관련 센서, 전기차의 전동화 관련 부품 등)이 사용될 것이며, 부품의 특성을 향상할 수 있는 기능성 소재의 필요성은 더욱더 향상될 것으로 예상되고 있다. 따라서 본 연구에서는 branched CNT를 현재 널리 사용되고 있는 카본블랙, MWCNTs 필러와 비교하여 branched CNT의 전기적 특성을 비교 및 분석하였다.

실 험

재료. 본 연구에서 사용된 고분자 소재는 자동차 전장 부품에 많이 사용되는 PC/PBT와 PA 6 소재를 선정하였다. PC/PBT는 polycarbonate PC TRIREX 3017PJ(SAMYANG, Melt flow index=33 g/10 min@300 °C, 1.2 kg, Korea)와 PBT(polybutylene terephthalate) 1100-211H(CHANG CHUN, Melt flow index=11-14g/10 min@235 °C, 2.16 kg, Taiwan)를 7:3 비율로 컴파운딩하여 사용하였다. PA 6(polyamide 6)는 EN300 (KP CHEMTECH, 상대 점도: 2.5, Korea) 소재를 사용하였

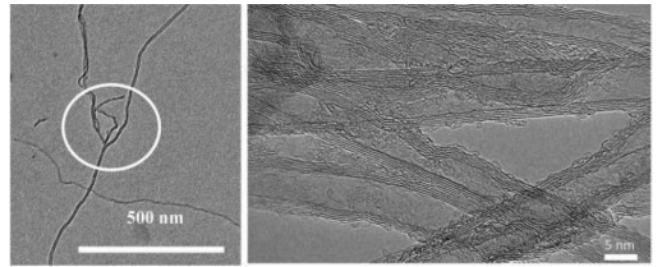


Figure 2. TEM images of branched CNTs.

다. 전도성 필러는 카본 블랙과 MWCNT(CABOT Corporation, USA), Branched CNT(Nanocyl, NC 7000, Belgium)를 사용하였다. 카본 블랙은 CHEZACARB사의 AC-60 그레이드로 SHELL 반응기에서 증석유 잔류물의 가스화에 의해 제조된다. 카본 블랙의 사이즈는 약 20 nm이다. MWCNTs는 촉매 탄소 증기 증착(CCVE) 공정으로 만들어진 파우더 상태로 nanocyl사 NC 7000 그레이드를 사용하였다. 중량비는 150 이상이며, 순도는 90% 이상이다. Branched CNT는 기본적으로 MWCNTs로 구성된다. Branched CNT는 CABOT사의 ATHLOS 그레이드를 사용하였다. Branched CNT는 transmission electron microscope(TEM, Tecnai G2 F30 S-Twin, FEI Co., USA) 장비를 활용하여 측정하였고, Figure 2에서 보이는 것처럼 14±4 nm의 평균 직경을 갖는다. 나노 튜브는 평균 4개의 벽으로 구성되어 있으며, 70 μm의 평균 길이(계산 평균 중량비 5000), 순도 >97%, 0.135 g/cm의 벌크 밀도를 가지고 있다. 3종의 전도성 필러는 실제 산업현장에서 많이 사용되고 있으며, 파우더, 선형, 그리고 결합된 선형의 형상으로 형상에 따른 전도성 필러의 특성을 함께 볼 수 있기 때문에 선택되었다.

전도성 필러의 분산성 확보와 필러 투입에 따른 실험 오차를 최소화하기 위하여 전처리된 필러를 사용한 마스터 배치를 사용하였으며, 마스터 배치의 수지와 복합체의 수지는 동일한 수지를 사용하였다.

마스터 배치 내 branched CNT 함량은 각각 8 wt%, 10 wt%이다.

고분자 복합체 가공. 복합체의 용융 혼합을 위해 W&P사(Germany)의 ZSK-25 모델로 지름은 25파이, L/D는 39, 10 barrel 사양의 압출기를 사용하였으며, feed rate는 15 kg/hr로 설정하였다. PC/PBT 기반 복합체 경우 압출 온도는 200, 240, 250 °C, PA 6 기반 복합체 경우 압출 온도는 190, 230, 250 °C

Table 1. Materials Used in This Research

Resins	Fillers	Filler contents
• PC/PBT	• Carbon black	• 0.5%
• PA 6	• MWCNT	• 1.5%
	• Branched CNT	• 3.0%

로 설정하였다. 기계적 물성 및 전기 특성을 평가하기 위한 시편 제작은 LS CABLE사(Korea)의 LGH 100N 사출기를 사용하였다. PC/PBT와 PA 6 기반 복합재 모두 사출 온도 250 °C로 설정하였다.

폴리머 매트릭스, 전도성 필러 종류 및 함량에 따른 영향을 보기 위해 아래 Table 1과 같이 매트릭스 수지와 보강재, 및 함량을 설정하였으며, 총 18 종류의 시편을 제작하였으며, 필러의 함량은 소재의 기계적 물성 그 중 충격강도에 영향을 최소화 할 수 있는 범위의 함량을 선정하였다.

분석. 인장 강도는 ASTM D638 방법으로 속도는 50 mm/min, 시편 형상은 Type I로 상온에서 만능재료시험기(UTM, 5967, INSTRON Co., USA)를 사용하였다.

굽곡강도는 ASTM D790 방법으로 속도는 2.8 mm/min, 시편 형상은 12.7×6.4×125 mm, Span 길이는 100 mm로 상온에서 만능재료시험기(UTM, 5967, INSTRON Co., USA)를 사용하였다.

충격강도는 ASTM D256 방법으로 ZWICK ROELL사(Germany)의 HIT 25P 장비를 사용하였다.

표면저항 측정기는 ASTM D257 방법으로 시편 형상은 100×100×2 mm로 ADVANTEST사(Japan)의 R-8340A로 평가하였다.

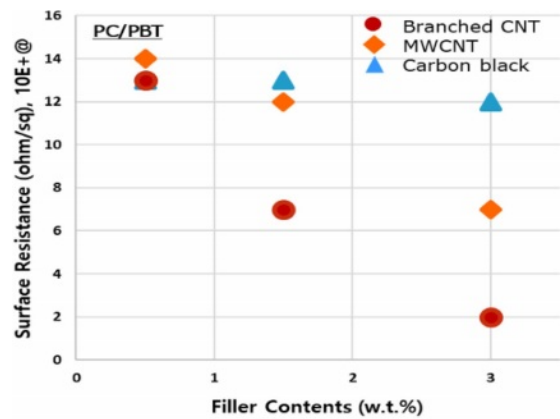
전자기 간섭 차폐 효율(EMI SE) 측정의 경우, 2포트 플랜식 동축 라인 홀더를 갖춘 벡터 네트워크 분석기(KEYSIGHT TECHNOLOGIES, E5063A, Japan)에 연결하여 ASTM D4935-99 방법을 사용하였다. 평가시 주파수 범위가 0.03-1.5 GHz 구간에서 측정하였다.

열전도도는 섬광법으로 측정하였으며, graphite coating으로 표면 처리하였고, 시편 형상은 10 mm square, 두께 2 mm이며 ASTM E1461 방법으로 NETZSCH사(Germany)의 LFA 447 장비를 사용하였다.

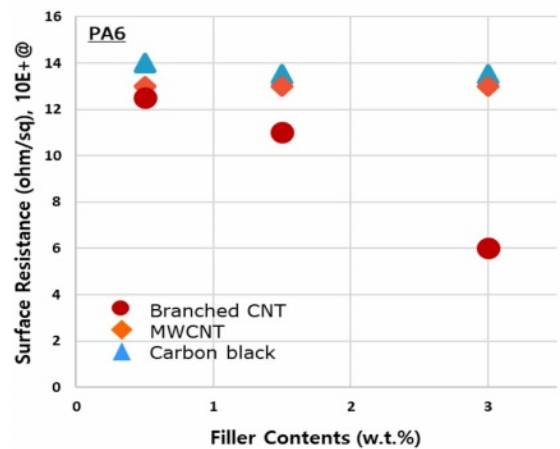
결과 및 토론

Figure 3은 PC/PBT와 PA 6를 매트릭스로 복합재내 다양한 필러에 대한 표면 저항값을 나타내었다. 전도성 필러의 함량이 증가할수록 표면 저항 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 전도성 필러 효과는 PC/PBT가 PA 6 보다 효과적이었다. PC/PBT 소재 경우 전도성 필러 종류에 따라 표면 저항 값의 차이가 분명하게 나타났다. 특히 동일 함량에서 Branched CNT 가장 효과적이며, MWCNTs 보다 2배, 카본블랙 보다 5배 이상 효과적이었다. PA 6의 경우 branched CNT에서만 전기적 효과가 있는 것으로 나타났다.

EMI SE는 일반적으로 반사손실, 흡수손실과 다중반사 보정계수의 총합으로 표현된다. 관계식 (1)과 같이 표면저항 값은 전기전도도와 반비례한다. 전기 전도도와 EMI SE 사이의 관계는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1), (2)으로부터



(a)



(b)

Figure 3. Surface Resistance of the composites with different filler types and matrix materials (a) PC/PBT composites; (b) PA 6 composites.

EMI SE는 표면저항 값이 감소함에 따라 증가함을 알 수 있다.

$$L=1/R \quad (1)$$

L =electrical conductivity, R =Resistivity

$$\text{EMI SE}=20\log(1+0.5\sigma dZ_0) \quad (2)$$

σ =the electrical conductivity, d =thickness

Z_0 =free space impedance (constant: 377/S)

Figure 4는 전도성 필러에 따른 EMI SE 효과를 비교하기 위해 1.02 GHz 주파수에서의 값을 나타냈다. EMI SE 효과는 표면 저항 결과와 유사하게 PC/PBT 소재가 PA 6 보다 우수하였다.

PC/PBT 소재 경우 전도성 필러 함량이 증가함에 따라 EMI SE 값이 증가하였다. 특히 동일 함량에서는 전도성 필러인 branched CNT 가장 효과적이었다. 카본 블랙은 3% 이내에

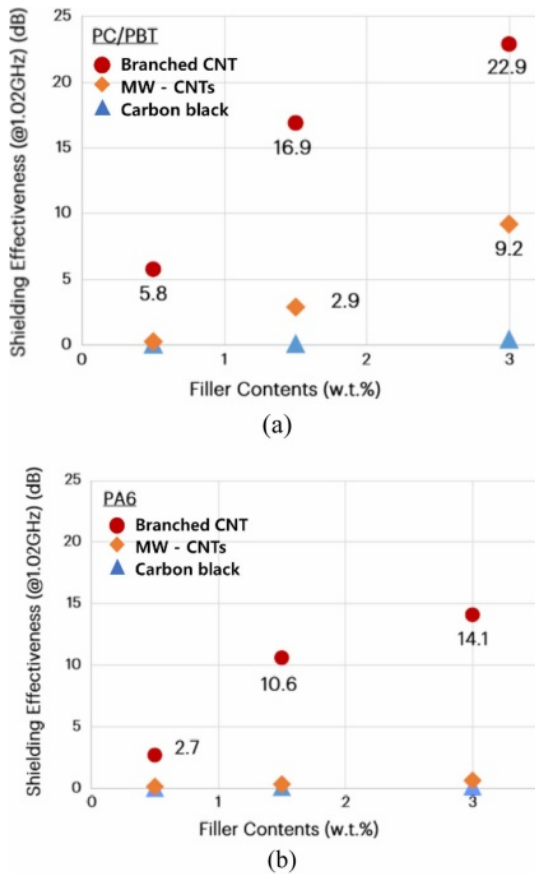


Figure 4. EMI SE of the composites with different filler types and matrix materials (a) PC/PBT composites; (b) PA 6 composites.

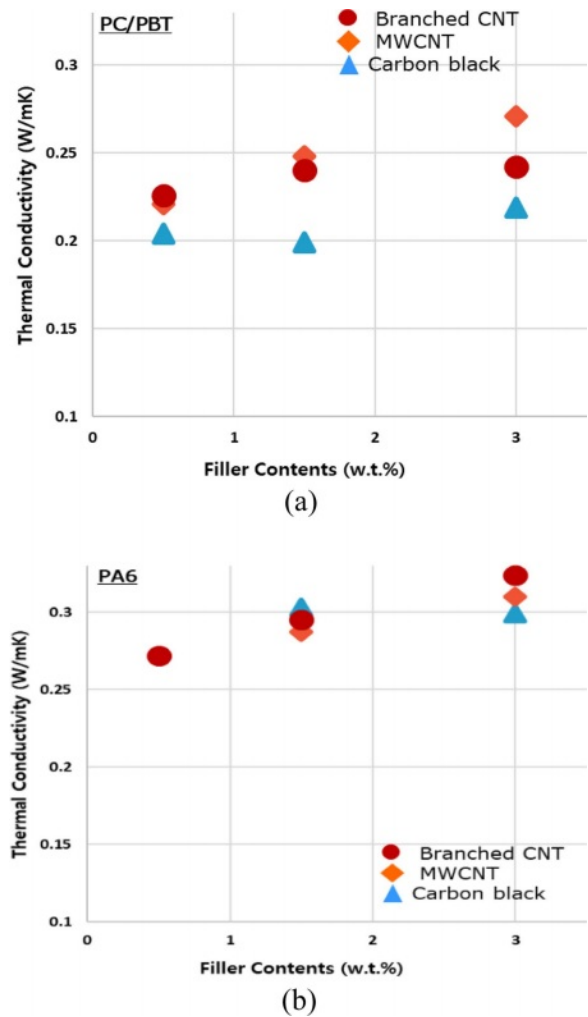


Figure 6. Thermal conductivity of the composites with different filler types and matrix materials (a) PC/PBT composites; (b) PA 6 composites.

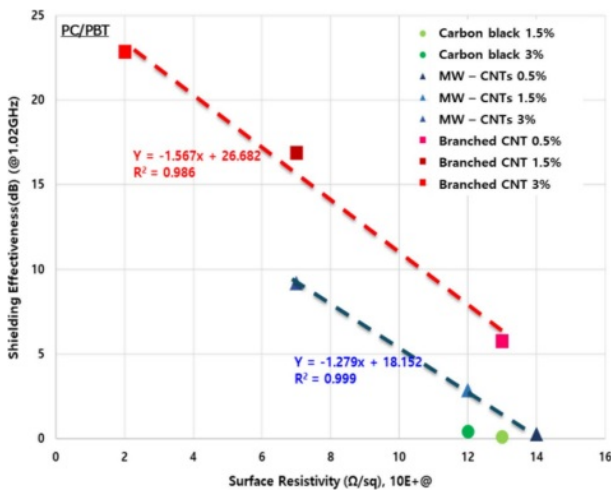


Figure 5. Correlation between EMI SE and surface resistance in PC/PBT the composites.

서 EMI SE 효과가 없었다. 즉, 동일한 전기적 특성을 구현하기 위해서는 많은 양의 카본 블랙이 필요하다는 것을 알 수 있다. PA 6 소재의 경우 branched CNT 전도성 필러만 수

지의 전기적 특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 5에서는 표면저항과 EMI SE에 대한 상관성 분석을 진행하였다. 분산분석을 통하여 필러 종류에 대한 상관 관계식을 도출하였다. MWCNT의 상관 방정식은 $-1.279x+18.132$ 이고, branched CNT의 상관 방정식은 $-1.567x+26.682$ 이다. Branched CNT의 기울기 절대값과 Y 절편값이 큰 것을 알 수 있다. 이는 통하여 branched CNT 필러가 전기적 특성이 MWCNT 우수하다는 것을 알 수 있다.

이러한 현상은 전도성 필러의 형상이 전기적 특성에 영향을 주는 것으로 추정된다.

열전도도에 대한 필러 종류 및 함량에 따른 결과는 Figure 6을 통해 볼 수 있다. PC/PBT와 PA 6 복합체 모두 필러 함량이 증가하면 열전도도율이 증가하다. 또한 branched CNT 필러 사용시 향상됨을 알 수 있었다. 그러나, 전기특성과 비교해서는 유사한 결과를 얻었다.

Table 2. Mechanical Properties of Polymer Composites with Various Fillers

Properties	Filler contents (%)	PC/PBT			PA 6		
		CB	MWCNTs	Branched CNT	CB	MWCNTs	Branched CNT
Tensile strength (kgf/cm ²)	0.5	668	687	710	718	762	818
	1	683	675	751	756	775	873
	3	687	704	624	686	824	949
Flextural modulus (kgf/cm ²)	0.5	18870	19762	19368	22688	23311	22897
	1	19171	18714	22007	22724	22815	24322
	3	19759	20110	24206	23470	23897	29031
Impact strength (kgfcm/cm)	0.5	6.11	6.56	5.37	3.54	3.18	4.63
	1.5	6.04	6.17	5.43	3.05	3.76	3.89
	3	4.76	5.37	4.08	2.47	2.67	4.05

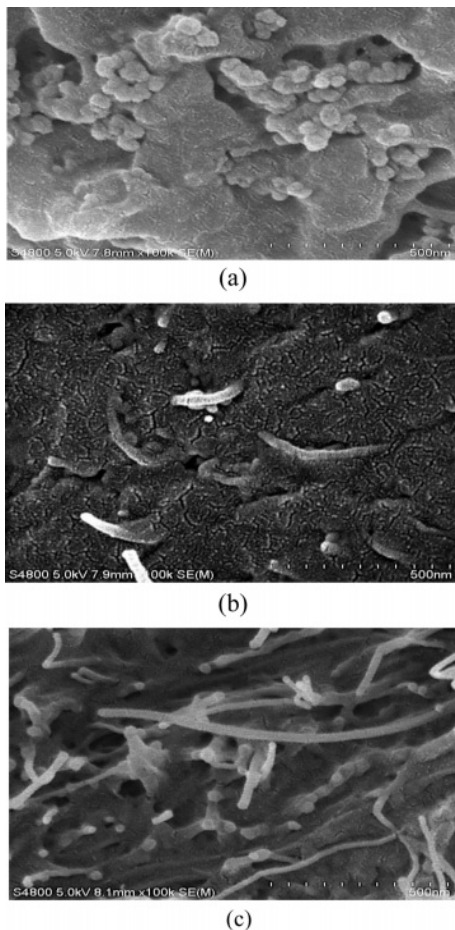


Figure 7. FE-SEM images of the composites: (a) carbon black in PC/PBT composites; (b) MWCNT in PC/PBT composites; (c) branched CNT in PC/PBT composites.

자동차 부품에 적용되는 전장 부품은 전기적 특성뿐만 아니라, 내구 및 충돌 성능 때문에 기계적 물성을 요구한다. 본

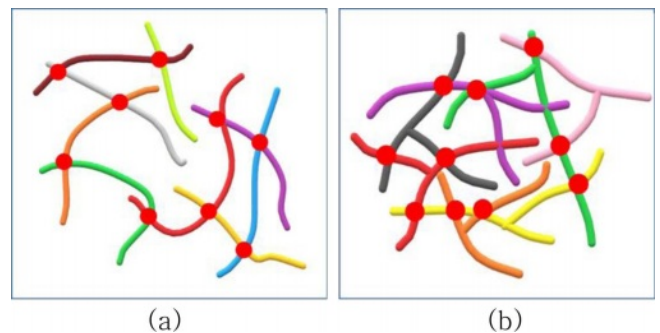


Figure 8. Schematics of network structure in the composites for (a) linear; (b) branched CNT.

연구에서는 전도성 필러 종류 및 함량에 따른 기계적 물성을 평가하였다. Table 2에 보는 것 같이 필러 종류 및 함량에 따라 물성 차이가 있음을 확인할 수 있다.

PC/PBT 경우 인장강도는 branched CNT 필러 1.5% 조건에서 가장 높았으며, 굴곡강도는 필러 함량 증가 및 branched CNT 필러가 좋았다. 충격강도는 MWCNTs 필러가 좋았다. PA 6 경우 branched CNT 필러 사용시 인장강도, 굴곡탄성율, 충격강도가 전반적으로 좋았다. 이러한 현상은 전도성 필러의 분산성과 형상이 영향을 주는 것으로 추정된다.

Figure 7는 전도성 필러에 따른 분산성을 FE-SEM 사진을 비교하여 나타내었다.

카본 블랙의 경우, 입자들이 응집되어 있고, 입자 거리간 편차가 크다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 카본 블랙은 전기적 특성 향상을 위해서는 많은 함량이 필요하다.

MWCNTs의 경우 PC/PBT 매트릭스와 상용성이 좋아 잘 내장되어 있다. 그러나 MWCNTs 거리간 편차가 크므로, 전자 이동이 어려울 것으로 추정된다.

Branched CNT의 경우 MWCNTs 필러와 같이 상용성이 좋아 잘 내장되어 있고, 분기된 모양을 볼 수 있다. 또한,

branched CNT 사이 간격이 가장 작은 것을 알 수 있다.

본 연구는 PC/PBT와 PA 6 소재에 대한 전도성 필러 종류와 함량에 대한 전기적 특성을 분석하였다. 특히, branched CNT 효과가 우수하였다. 이는 branched CNT 경우 용융 혼합 중에 형성된 전도성 네트워크 구조가 선형 구조인 MWCNTs와 다르다고 가정할 수 있다.²² Figure 8에 이를 도식화 하였다. 전도성 네트워크는 반드시 인접한 나노 튜브 간의 직접적인 접촉을 필요로 하지 않으며 전자의 호핑 또는 터널링으로도 절연 매트릭스를 통해 전기 경로를 허용한다는 것이 일반적으로 알려져 있다. 그러나, 각 접촉 또는 “준접촉”(Figure 8, 빨간점)은 접촉 저항이 발생되어 전도도를 감소시킨다.²³ Branched CNT 네트워크의 일부 접촉점은 이미 branched CNT 구조상에 존재하므로 저항 손실 없이 존재한다. 또한, 전자 전달은 접합부(Figure 8(b))와 CNT 가지를 따라 발생할 수 있다. Linear CNT와 달리 branched CNT는 2차원 또는 3차원으로 확장을 할 수 있으며, 이는 용융 혼합 중에 3D 네트워크를 쉽게 형성될 수 있다. 따라서 branched CNT 필러는 전기적 특성이 향상될 수 있다.

결 론

본 연구에서는 전도성 필러인 카본블랙, MWCNTs, branched CNT를 사용하여 자동차 전장 부품에 사용되는 PC/PBT, PA 6와 복합 재료에 대한 전기적, 열적, 기계적 특성 및 모폴로지를 확인하였다.

Branched CNT 필러는 두 소재 모두 가장 높은 전기적 특성을 보였다. 특히 동일 함량에서 MWCNTs보다 두배 이상의 표면 저항 및 EMI SE 개선 효과를 확인하였다. 이러한 이유는 branched CNT가 선형 구조인 MWCNTs에 비해 3D 구조를 구현할 수 있고, branched CNT 분기점에 접합점이 존재하므로 쉽게 안정적인 전도성 네트워크를 형성할 수 있기 때문이다.

Branched CNT 필러는 전기적 특성이 우수하고, 기계적 물성이 동등 수준으로 자동차 전장 부품에 사용하기 매우 적합한 것을 확인하였다. 향후 이러한 복합 소재를 활용하여 자동차 전장 부품화 연구를 진행할 예정이다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Han, M. S.; Lee, Y. K.; Lee, H. S.; Yun, Y. H.; Kim, W. N. Electrical, Morphological and Rheological Properties of Carbon Nanotube Composites with Polyethylene and Poly(phenylene sulfide) by Melt Mixing. *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64*, 4649.
- You, K. M.; Park, S. S.; Lee, C. S.; Kim, J. M.; Park, G. P.; Kim, W. N. Preparation and Characterization of Conductive Carbon Nanotube-polyurethane Foam Composites. *J. Mater. Sci.* **2011**, *46*, 6850-6855.
- Rahaman, M.; Chaki, T. K.; Khastgir, D. Development of High Performance EMI Shielding Material from EVA, NBR, and Their Blends: Effect of Carbon Black Structure. *J. Mater. Sci.* **2011**, *46*, 3989-3999.
- Sachdev, V. K.; Patel, K.; Bhattacharya, S.; Tandon, R. P. Electromagnetic Interference Shielding of Graphite/Acrylonitrile Butadiene Styrene Composites. *J. Appl. Polym. Sci.* **2011**, *120*, 1100-1105.
- Zhang, L.; Wang, L. B.; See, K. Y.; Ma, J. Effect of Carbonfiber Reinforcement on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Syntactic Foam. *J. Mater. Sci.* **2013**, *48*, 7757-7763.
- Huang, C. Y.; Wu, C. C. The EMI Shielding Effectiveness of PC/ABS/Nickel-coated-carbon-fibre Composites. *Eur. Polym. J.* **2000**, *36*, 2729-2737.
- Im, J. S.; Kim, J. G.; Lee, Y. S. Fluorination Effects of Carbon Black Additives for Electrical Properties and EMI Shielding Efficiency by Improved Dispersion and Adhesion. *Carbon* **2009**, *47*, 2640-2647.
- Sung, Y. T.; Han, M. S.; Song, K. H.; Jung, J. W.; Lee, H. S.; Kum, C. K.; Joo, J.; Kim, W. N. Rheological and Electrical Properties of Polycarbonate/Multi-walled Carbon Nanotube Composites. *Polymer* **2006**, *47*, 4434-4439.
- Papanicolaou, G. C.; Papaefthymiou, K. P.; Koutsomitopoulou, A. F.; Portan, D. V.; Zoutsos, S. P. Effect of Dispersion of MWCNTs on the Static and Dynamic Mechanical Behavior of Epoxy Matrix Nanocomposites. *J. Mater. Sci.* **2012**, *47*, 350-359.
- Imran, S. M.; Kim, Y.; Shao, G. N.; Hussai, M.; Choa, Y. H.; Kim, H. T. Enhancement of Electroconductivity of Polyaniline/Graphene Oxide Nanocomposites Through in situ Emulsion Polymerization. *J. Mater. Sci.* **2014**, *49*, 1328-1335.
- Zetina-Hernandez, O.; Duarte-Aranda, S.; May-Pat, A.; Canche-Escamilla, G.; Uribe-Calderon, J.; Gonzalez-Chi, P.; Aviles, F. Coupled Electro-mechanical Properties of Multiwall Carbon Nanotube/Polypropylene Composites for Strain Sensing Applications. *J. Mater. Sci.* **2013**, *48*, 7587-7593.
- Yoo, T. W.; Lee, Y. K.; Lim, S. J.; Yoon, H. G.; Kim, W. N. Effects of Hybrid Fillers on the Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Polyamide 6/Conductive Filler Composites. *J. Mater. Sci.* **2014**, *49*, 1701-1708.
- Yoo, T. W.; Lee, Y. K.; Lim, S. J.; Yoon, H. G.; Kim, W. N. Effects of Hybrid Fillers on the Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Polyamide 6/Conductive Filler Composites. *J. Mater. Sci.* **2014**, *49*, 1701-1708.
- Jin, C.; Suenaga, K.; Iijima, S. Plumbing Carbon Nanotubes. *Nat. Nano* **2008**, *3*, 17-21.
- Terrones, M.; Terrones, H.; Banhart, F.; Charlier, J. C.; Ajayan, P. M. Coalescence of Single Walled Carbon Nanotube. *Science* **2000**, *288*, 1226-1229.
- Raghuveer, M. S.; Ganesan, P. G.; D'Arcy-Gall, J.; Ramanath, G.; Marshall, M.; Petrov, I. Nanomachining Carbon Nanotubes with Ion Beams. *Appl. Phys. Lett.* **2004**, *84*, 4484-4488.

17. Joh, H.-I.; Ha, H. Y.; Prabhuram, J.; Jo, S. M.; Moon, S. H. Synthesis of Branched Carbon Nanotubes by Carbonization of Solid Polyvinylidene Fluoride Fiber. *Carbon* **2011**, 49, 4601-4603.
18. AuBuchon, J. F.; Chen, L.-H.; Daraio, C.; Jin, S. Multibranching Carbon Nanotubes via Self-seeded Catalysts. *Nano Lett.* **2006**, 6, 324-328.
19. Du, G. H.; Li, W. Z.; Liu, Y. Q.; Ding, Y.; Wang, Z. L. Growth of Carbon Nanotubes by Pyrolysis of Thiophene. *J. Phys. Chem. C* **2007**, 111, 14293-14298.
20. Gothard, N.; Daraio, C.; Gaillard, J.; Zidan, R.; Jin, S.; Rao, A. M. Controlled Growth of Y-junction Nanotubes using Ti-doped Vapor Catalyst. *Nano Lett.* **2004**, 4, 213-217.
21. Wei, D.; Liu, Y.; Cao, L.; Fu, L.; Li, X.; Wang, Y.; Yu, G.; Zhu, D. A New Method to Synthesize Complicated Multi-branched Carbon Nanotubes with Controlled Architecture and Composition. *Nano Lett.* **2006**, 6, 186-192.
22. Krause, B.; Barbier, C.; Kunz, K.; Pötschke, P. Comparative Study of Singlewalled Multiwalled and Branched Carbon Nanotubes Melt Mixed in Different Thermoplastic Matrices. *Polymer* **2018**, 159, 75-85.
23. Nirmalraj, P. N.; Lyons, P. E.; De, S.; Coleman, J. N.; Boland, J. J. Electrical Connectivity in Single Walled Carbon Nanotube Networks. *Nano Lett.* **2009**, 9, 3890-3895.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의
관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.