



Electrical Properties of CNT and Carbon Fiber Filled Hybrid Composites Based on PA66

Minji Lee, Se-Ho Park*, Kwang-Hwan Jhee*, Hyungsan Kye**, and Daesuk Bang†

*School of Science and Engineering of Chemical Materials, Kumoh National Institute of Technology,
Gumi 39177, Republic of Korea*

**Department of Applied Chemistry, Kumoh National Institute of Technology, Gumi 39177, Republic of Korea*

***Department of Advanced Chemical Engineering, Mokwon University, Daejeon 35349, Republic of Korea*

(Received March 23, 2021, Revised March 25, 2021, Accepted March 31, 2021)

Abstract: In recent times, the demand for electronic devices has increased because of advancements in the electronics industry. Consequently, research on shielding against electromagnetic interference (EMI) from electronic devices has also progressed significantly. In particular, research on imparting electrical conductivity to plastic has seen substantial progress. In this study, the effect of hybrid fillers comprising carbon fiber (CF) and carbon nanotubes (CNTs) on the electrical properties of polyamide 66 (PA66) composites was investigated. PA66 composites were prepared using a BUSS Co-Kneader single-screw extruder. EMI shielding effectiveness (SE) increased with the increasing addition of unsized CF (UCF), sized CF (SCF), and CNTs. For the PA66/SCF/CNT hybrid filler composites, EMI SE significantly increased with the increase in SCF content. Finally, the hybrid filler comprising SCF and CNTs may have a synergistic effect on the EMI SE and surface resistivity of PA66/SCF/CNT composites.

Keywords: carbon fiber, carbon nanotube, electromagnetic interference shielding effectiveness, surface resistivity, polyamide 66

Introduction

최근 전자 및 통신 산업의 급속한 발달로 각종 전자 통신 기기들의 수요 증가가 가속화되고 있으며, IT 기기들의 집적화 및 박형화로 인하여 제 4의 공해라고 불리는 전자파압이 급증하고 있는 추세이다. 현대의 인간들은 전자파와 함께 살아가고 있다고 해도 과언이 아닐 만큼 다량의 전자파에 노출되어 있다. 우리가 사용하고 있는 전자기기뿐 아니라 최근에는 편의성 및 고급화 추구 그리고 하이브리드 자동차의 개발로 자동차에 성능이 우수한 전장부품을 다량 도입하면서 자동차가 점차 전자장비화 되어가는 추세이다. 그러나 차량의 편의 증대를 위해 도입한 각종 전자제어장치들로 인하여 다량의 유해한 전자파가 방출되고, 이런 불필요한 전자파 방사로 인해 차량의 오작동 및 급발진 등 안전사고 발생이 심각한 사회문제로 수면 위에 떠오르고 있다. 따라서 차량 내/외장재의 전장부품에서 발생하는 전자파 차폐 필요성이 점차 증대되고 있다. 기존의 전자파 차폐 재료는 일반적인 경량 금속을 적용한 제품으로 전자파 차폐 성능은 우수하지만 제품의 가격 상승 요인, 다이캐스팅 공정 시 적용되는 가공 및 후처

리 공정 등 기존 기술에 문제점이 몇 가지 있다. 기존 기술의 문제점을 보완하기 위해 최근에는 부도체인 플라스틱에 전기 전도성을 갖게 하는 연구가 증가하고 있는데,^{1,2} 생산 공정이 상대적으로 단순하고 가공이 자유로운 압출·사출을 기반으로 한 고분자/탄소 복합소재 제품이 점점 늘어나고 있는 추세이다.³⁻⁵ 또한, 연비 절감을 위하여 자동차용 차세대 기능성 소재의 중요한 요구사항인 경량화 측면에서도 고분자/탄소 복합소재는 기존 경량 금속에 비하여 30% 이상의 경량화가 가능하다. 따라서 고분자/탄소 복합소재는 자동차 부품업체뿐 아니라 일반 재료업체들도 고분자/탄소 복합 연구 개발에 큰 관심을 보이고 있다. 고분자/탄소 복합소재는 이미 디스플레이, IT 전자제품용 부품 재료로 적용되고 있으며,^{6,7} 이러한 고분자/탄소 복합소재 제품은 하이브리드, 전기자동차와 같은 미래형 자동차에도 적용이 가능하고 자동차의 전자제어부품, 각종 센서, 케이블, 하우징에도 적용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 자동차 내/외장재에 많이 쓰이고 고내열성 및 우수한 기계적 강도의 특성을 보유한 엔지니어링 플라스틱 중 하나인 Polyamide 66^{8,9}를 기반으로 하여 다중벽 탄소나노튜브^{10,11}와 탄소섬유^{12,13}를 하이브리드 필러로 사용해 필러 함량에 따른 전자파차폐에 관한 연구를 하고자 한다. 또한 사이징 처리의 유무에 따른 탄소섬유가 전자파 차폐에 미치는 영향

†Corresponding author E-mail: dsbang@kumoh.ac.kr

을 확인하고자 한다. 그리고 전도성 충전제로 사용한 탄소섬유와 다중벽 탄소나노튜브를 하이브리드 필러로 사용, 기존의 단독으로 사용한 고분자/탄소섬유, 고분자/CNT 복합체에서는 얻을 수 없었던 우수한 물성을 구현하여, 전기 특성이 우수한 고분자/탄소 복합소재를 개발하고자 한다.

Experimental

1. 재료

고분자 매트릭스로 사용한 폴리아마이드 66 (Polyamide 66, PA66)는 코오롱 플라스틱에서 구매한 것으로 KN3311을 사용하였고 충전제로 사용한 다중벽 탄소나노튜브(Carbon nanotube, CNT)는 금호석유화학에서 공급받은 것으로 순도 90% 이상, 길이 10~50 μm , 직경이 10~15 nm인 분말 형태의 K-Nanos 100P를 사용하였다. 탄소섬유(Carbon fiber)는 ACE C & TECH CO., LTD에서 구매하여 사용하였다. 사이징 처리를 하지 않은 탄소섬유는 길이가 6 mm인 12K PAN계 탄소섬유 ACECA-6NA1을 사용하였다. 그리고 사이징 처리를 한 탄소섬유는 길이가 6 mm이고 4 wt%의 Polyamide로 표면 처리된 12K PAN계 탄소섬유 ACECA-6HT2를 사용하였다.

2. 압출공정을 이용한 Polyamide 66 복합체 제조

본 연구에서는 single screw extruder (Jiangsu xinda science and technology Co. Ltd, SJW-45, screw diameter: 40 mm, L/D=20)를 이용하여 PA66 복합체를 제조하였다. 복합체의 압출조건은 Table 1에 표기한 것과 같이 hopper에서 die까지 온도를 260~285°C로 설정하였으며, screw speed는 100 rpm으로 설정하였다. 복합체를 압출하기 전 PA66와 충전재를 premixing하였다. Table 2는 PA66 복합체의 조성을 나타낸 것이다. PA66/unsized carbon fiber (PA66/UCF) 복합체는 UCF 함량을 20, 30, 40, 50 wt%, PA66/sized carbon fiber (PA66/SCF) 복합체는 SCF 함량을 20, 30, 40, 50 wt%로 설정하여 압출하였고, PA66/CNT 복합체는 CNT 함량을 2, 3, 4 wt%로 설정하여 압출하였다. PA66/SCF/CNT 복합체는 CNT를 4

Table 1. Conditions of Extrusion Process

Extrusion			
Temperature (°C)			
Cy1	260	Screw speed	100 rpm
Cy2	265		
Cy3	265	Feed rate	10 kg/hr
Cy4	270		
Cy5	270		
Die	285	Vacuum vent	

Table 2. Formulation of PA66 Composites with Different Contents

Sample	PA66 (wt%)	UCF (wt%)	SCF (wt%)	CNT (wt%)
PA66/UCF composites	80	20		
	70	30		
	60	40	-	-
	50	50		
PA66/SCF composites	80		20	
	70		30	
	60	-	40	-
	50		50	
PA66/CNT composites	98			2
	97	-	-	3
	96			4
PA66/SCF/CNT composites	70		26	4
	60	-	36	4
	50		46	4

wt% 고정하고 다양한 함량의 SCF (26, 36, 46 wt%) 조건으로 압출하였다.

3. Polyamide 66 복합체의 압축성형

압출 공정을 이용하여 제조한 PA66 복합체의 pellet을 사용하여 0.5 mm의 두께의 전자파 차폐 시편을 제조하기 위하여 압축성형을 하였다. 지름 133 mm, 두께 0.5 mm로 제작된 SUS 금형에 PA66 복합체의 pellet을 넣어 제조 하였다. 압축 성형 온도는 280°C, 압력 조건은 500, 1000, 1500 psi에서 각각 5분씩 유지하였고 시편에 기포가 생기는 것을 방지하기 위하여 기포 제거 작업을 10회 이상 하였다.

4. 특성 분석

4.1. 전자파 차폐 효과

PA66 복합체의 전자파 차폐율을 측정하기 위하여 Network Analyzer (Agilent, E5071C)와 차폐 효과 시험 지그 장비 (ELECTRO-METRICS, EM-2017)를 사용하였다. 시편은 ASTM D4935 규격에 맞추어 제작하였다. 부하시편을 차폐 효과 시험 지그 장비에 올려놓고 나사로 고정시킨 후 Nicolson-Ross-Weir (NRW)식¹⁴을 사용하여 전자파 차폐 효과 값을 얻었다. 측정된 주파수 영역은 0.03~1.5 GHz 이다.

4.2. 표면 저항

충전재 함량에 따른 복합체의 표면저항 변화를 측정하기 위하여 2-point probe (ACL Inc. ACL 800 Megohmmeter)와 4-point probe (AIT, CMT-SR 1000N)를 사용하였다. 2-point probe의 측정 범위는 $10^3 \sim 10^{12} \Omega/\text{sq}$ 이고 4-point probe의 측

정 범위는 $10^{-3} \sim 10^6 \Omega/\text{sq}$ 이다.

4.3. 형상학적 관찰

복합체에 분포되어 있는 충전재의 분산성을 확인하기 위하여 주사전자현미경(FE-SEM, Field Emission-Scanning Electron Microscope, JEOL, JSM6380)을 이용하여 각 시편의 파단면을 관찰하였다. 충격강도 시험 후 생긴 파단면을 이용하여 측정하였으며, 파단면에 전도성을 부여하기 위하여 sputtering 방법으로 표면에 백금으로 120초 간 코팅한 후 표면을 분석하였다.

Results and Discussion

1. Polyamide 66 복합체의 전자파 차폐 효과

1.1. 탄소섬유 함량에 따른 PA66 복합체의 전자파 차폐 효과

탄소섬유가 복합체의 전자파 차폐 효과에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 탄소섬유 함량에 따른 전자파 차폐 효과를 측정하였다. Network Analyzer와 시험용 지그로 전자파 차폐율을 측정하였으며 전자파 주파수의 측정 범위는 0.03~1.5 GHz로 구간의 평균값을 도출하여 전자파 차폐율이 측정된다. Figure 1(a)는 UCF의 함량에 따른 PA66 복합체의 전자파 차폐 효과를 나타낸 그림이다. 탄소섬유의 함량이 증가할수록 전자파 차폐 효과가 크다는 것을 알 수 있다. Figure 1(b)는 SCF의 함량에 따른 PA66 복합체의 전자파 차폐 효과를 나타낸 그림이다. 탄소섬유의 함량이 증가할수록 전자파 차폐 효과가 커지는 경향을 나타낸다. 전기적 특성은 전기적 통로를 많이 형성할수록 효율이 높아지게 되므로 탄소섬유의 함량이 증가할수록 각각의 탄소섬유가 3차원 네트워크를 형성하여 탄소섬유 간의 3차원 네트워크가 활발하게 이루어져 복합체 내에서 전기적 통로를 형성하여 나타난 결과로 사료된다. Figure 1(c)는 전자파 주파수 1.5 GHz에서 PA66/UCF (20, 30, 40, 50 wt%) 복합체와 PA66/SCF (20, 30, 40, 50 wt%) 복합체의 전자파 차폐 효과를 나타낸 그림이다. 실험 결과, PA66/UCF의 복합체보다 PA66/SCF 복합체의 전자파 차폐 효과가 더 향상됨을 확인하였다. 이는 SCF가 전자파 차폐 효과에 미치는 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다. SCF와 PA66 간 계면결합력이 UCF와 PA66 간의 계면결합력보다 우수하여 SCF가 PA66 복합체 내에서 UCF보다 pull out되는 현상이 적고 충전재 간의 접촉이 많아져 전기적 통로를 보다 많이 형성하여 나타난 현상으로 사료된다.

1.2. CNT 함량에 따른 PA66 복합체의 전자파 차폐 효과

Figure 2(a)는 CNT가 복합체의 전자파 차폐 효과에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 CNT 함량에 따른 전자파 차폐 효과

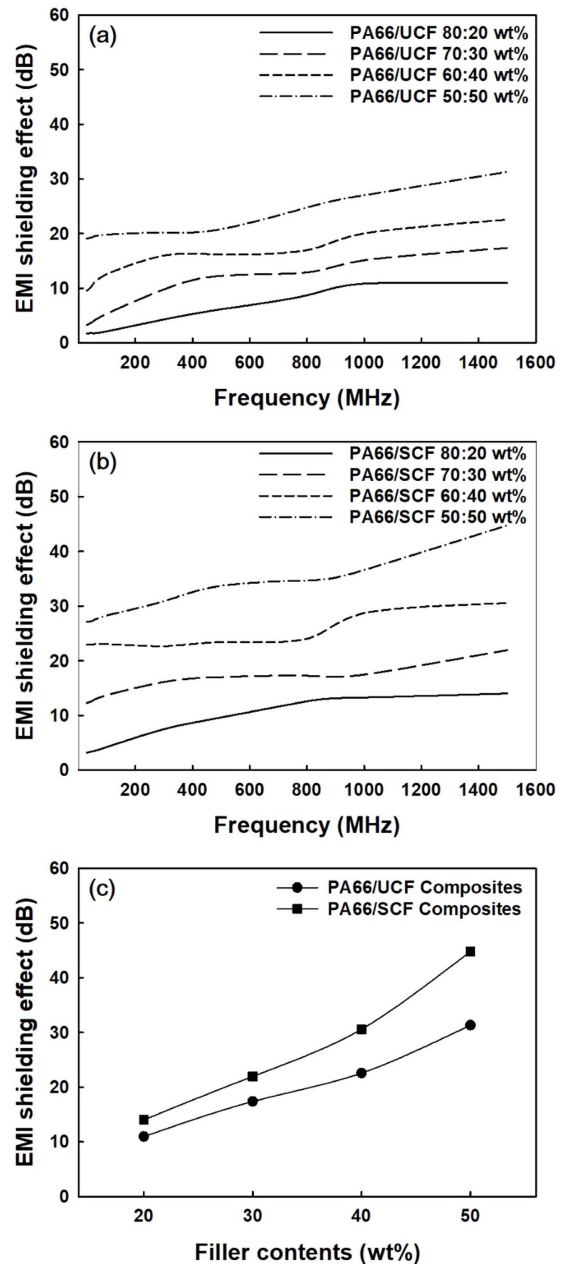


Figure 1. EMI shielding of PA66 composites with different contents of (a) UCF, (b) SCF, and (c) UCF/SCF at 1.5 GHz.

를 나타낸 그림이고 Figure 2(b)는 1.5 GHz에서 PA66/CNT 복합체의 전자파 차폐 효과를 나타낸 그림이다. 1.5 GHz에서 PA66/CNT 복합체는 2 wt%에서 8.3321 dB, 3 wt%에서 10.509 dB, 4 wt%에서 14.7 dB의 전자파 차폐율 값이 나왔다. CNT의 함량이 증가할수록 전자파 차폐 효과가 증가하는 경향이 나타났다. CNT는 전기적 특성이 우수하여 전도성 필러로 많이 쓰이나 분자간 힘인 van der Waals 힘과 같은 표면 인력에 의해 응집이 일어나 3차원 네트워크 구조 형성에 방해가 된다.^{15,16} 따라서 보다 효과적인 전기적 통로를 형성하지 못하게 되고 이로 인해 PA66/CNT 복합체의 전자파 차폐 효과가

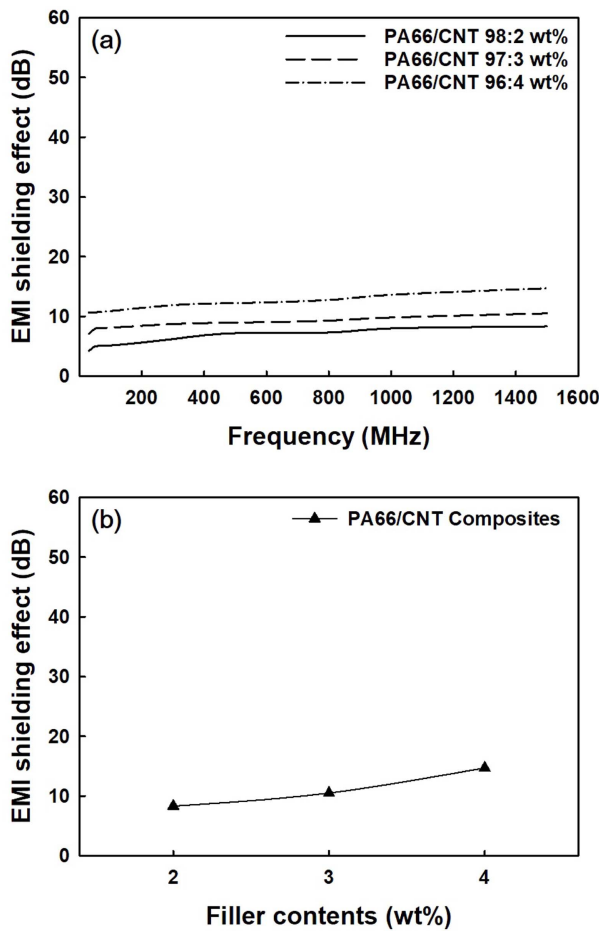


Figure 2. EMI shielding of PA66 composites with different contents of (a) CNT, (b) CNT at 1.5 GHz.

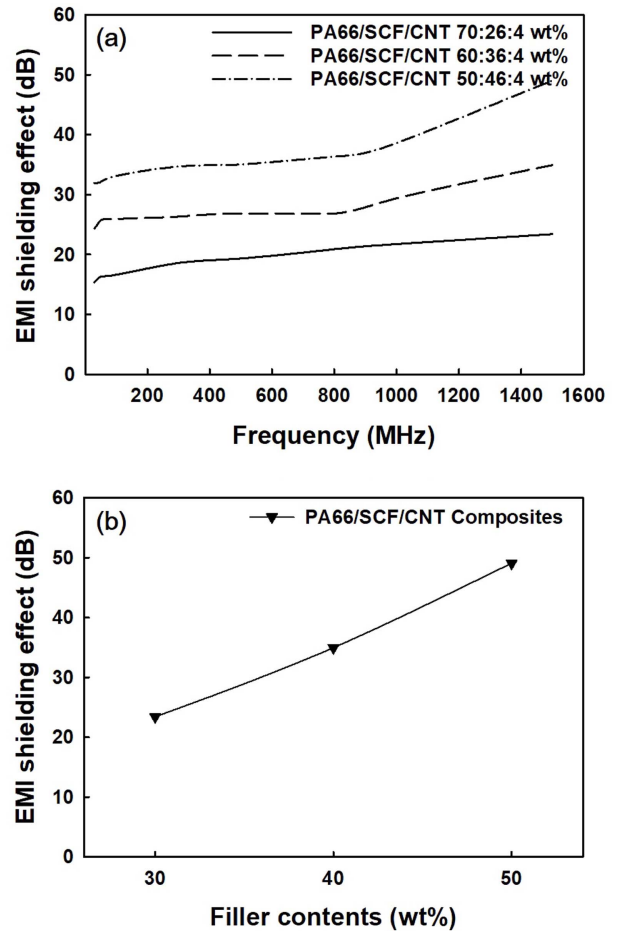


Figure 3. EMI shielding of PA66 composites with different contents of (a) SCF/CNT, (b) SCF/CNT at 1.5 GHz.

PA66/UCF, PA66/SCF 복합체보다 우수하지 않은 것으로 판단된다.

1.3. SCF/CNT 함량에 따른 PA66 복합체의 전자파 차폐 효과

Figure 3(a)는 SCF와 CNT를 hybrid filler로 사용하였을 때 PA66복합체의 전자파 차폐 효과를 고찰하기 위하여 SCF/CNT 충전재 함량에 따른 전자파 차폐 효과를 나타낸 그림이고 Figure 3(b)는 1.5 GHz에서 PA66/SCF/CNT 복합체의 전자파 차폐 효과를 나타낸 그림이다. CNT의 함량은 4 wt%로 고정하고 SCF의 함량(26, 36, 46 wt%)에 변화를 주어 PA66/SCF/CNT (30, 40, 50 wt%) 복합체의 전자파 차폐율을 측정하였다. 1.5 GHz에서 PA66/SCF/CNT 복합체는 30 wt%에서 23.391 dB, 40 wt%에서 34.948 dB, 50 wt%에서 49.05 dB의 전자파 차폐율 값이 측정되었다. 충전재로 탄소섬유 또는 CNT만을 사용한 경우 보다 hybrid filler로 사용하여 복합체를 제조했을 때 전자파 차폐 효과가 우수하게 나타났다. 이는 탄소섬유가 van der Waals 힘에 의해 나타나는 CNT의 응집을 예방해주고 충전재 간의 접촉 및 중첩을 증가시켜 전기적

Table 3. EMI Shielding Effect of PA66 Composites with Different Contents at 1.5 GHz

Composites	wt%	EMI Shielding Effect (dB)
PA66/UCF	20	10.94
	30	17.37
	40	22.54
	50	31.31
PA66/SCF	20	14.01
	30	21.95
	40	30.56
	50	44.77
PA66/CNT	2	8.33
	3	10.51
	4	14.7
PA66/SCF/CNT	30	23.39
	40	34.95
	50	49.05

특성을 향상시킬 수 있는 3차원적 네트워크 구조 형성을 도와주기 때문에 나타나는 현상으로 hybrid filler의 시너지 효과를 확인할 수 있다. Table 3은 PA66 복합체의 전자파 차폐율을 수치화하여 나타내었다.

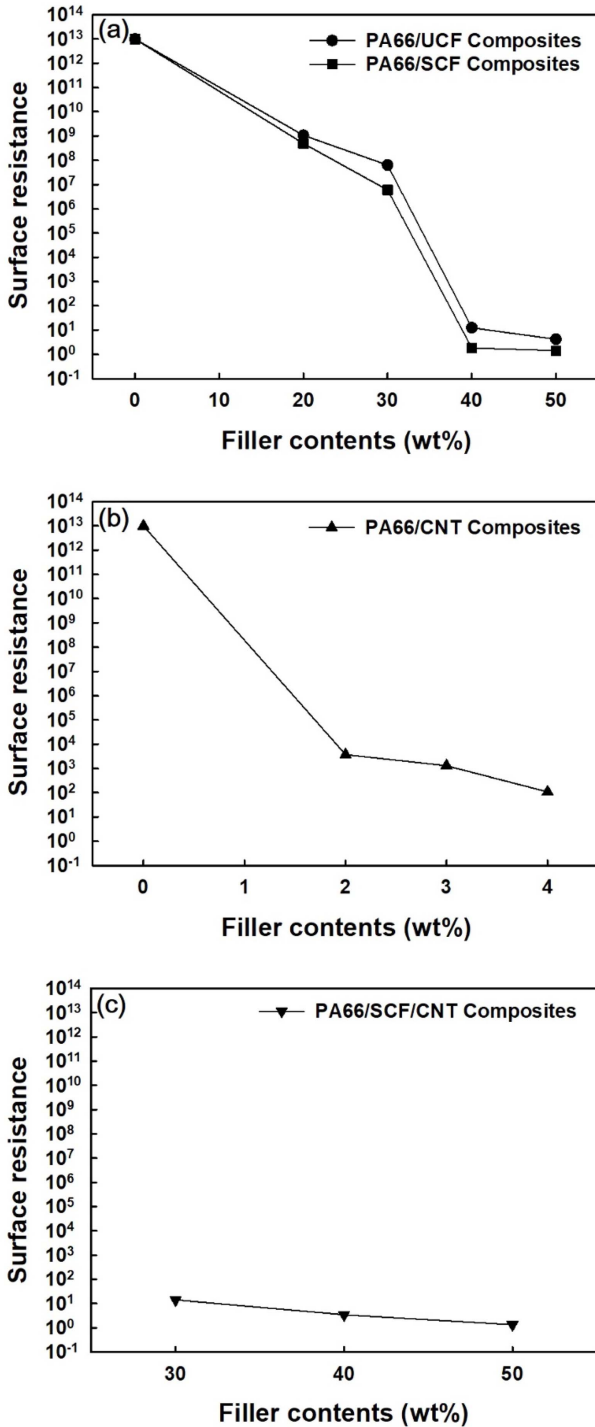


Figure 4. Surface resistance of (a) PA66/UCF and PA66/SCF composites with different contents of UCF/SCF, (b) PA66/CNT composites with different contents of CNT, and (c) PA66/SCF/CNT composites with different contents of SCF.

2. Polyamide 66 복합체의 표면 저항

탄소섬유가 복합체의 표면저항에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 탄소섬유 함량에 따른 표면저항의 변화를 측정하였다. 측정범위가 10⁻³~10⁶ Ω/sq인 4-point probe를 주로 사용하였고, 저항 값이 높은 복합체를 측정하기 위해서 측정범위가 10³~10¹² Ω/sq인 2-point probe를 사용하여 표면저항을 측정하였다. Figure 4(a)는 PA66/UCF (20, 30, 40, 50 wt%), PA66/SCF (20, 30, 40, 50 wt%)의 표면 저항을 나타낸 그림이다. PA66는 전기절연성의 특징을 가지는 부도체이므로 표면저항 값이 측정되지 않아 그래프에서 PA66의 표면 저항 값을 10¹³ Ω/sq로 표기하였다. 전자파 차폐 효과와 전기 전도도는 전기적 통로를 많이 형성할수록 전기적 특성이 우수하게 나타나는 면에서 연관성이 깊다. 따라서 표면저항 그래프는 전자파 차폐 효과 그래프와 비슷한 양상을 보이고 있다. UCF와 SCF 모두 함량이 증가할수록 표면저항 값이 감소하는 경향이 나타났으며 PA66/UCF 복합체보다 PA66/SCF 복합체의 표면저항 값이 더 낮게 나타났다.

Figure 4(b)는 CNT가 복합체의 표면 저항에 미치는 영향을 알아보기 위하여 CNT 함량에 따른 PA66/CNT (2, 3, 4 wt%)의 표면저항을 나타낸 그림이다. CNT의 함량이 증가할수록 표면저항 값이 감소하는 경향을 나타내었다. 0 wt%와 2 wt% 사이에서 전기적 통로가 급격히 증가하는 시점인 electrical percolation이 일어난 것으로 판단된다. CNT의 함량이 증가할수록 표면저항 값이 감소하는 것으로 보아 전기 전도성이 향상되는 경향이 있다고 할 수 있다. 하지만 그 표면저항 값의 변화 폭이 좁은 것으로 보아 전기전도성의 큰 효과를 기대하기는 어렵다고 판단된다. 이는 충전재로 사용한 CNT가 충전

Table 4. Surface Resistance of PA66 Composites with Different Contents

Composites	wt%	Surface resistance (Ω/sq)
Polyamide 66	-	1.00 × 10 ¹³
PA66/UCF	20	1.08 × 10 ⁹
	30	6.38 × 10 ⁷
	40	11.25
	50	4.21
PA66/SCF	20	4.95 × 10 ⁸
	30	6.01 × 10 ⁷
	40	1.84
	50	1.42
PA66/CNT	2	3.72 × 10 ³
	3	1.29 × 10 ³
	4	1.07 × 10 ²
PA66/SCF/CNT	30	14.28
	40	3.45
	50	1.34

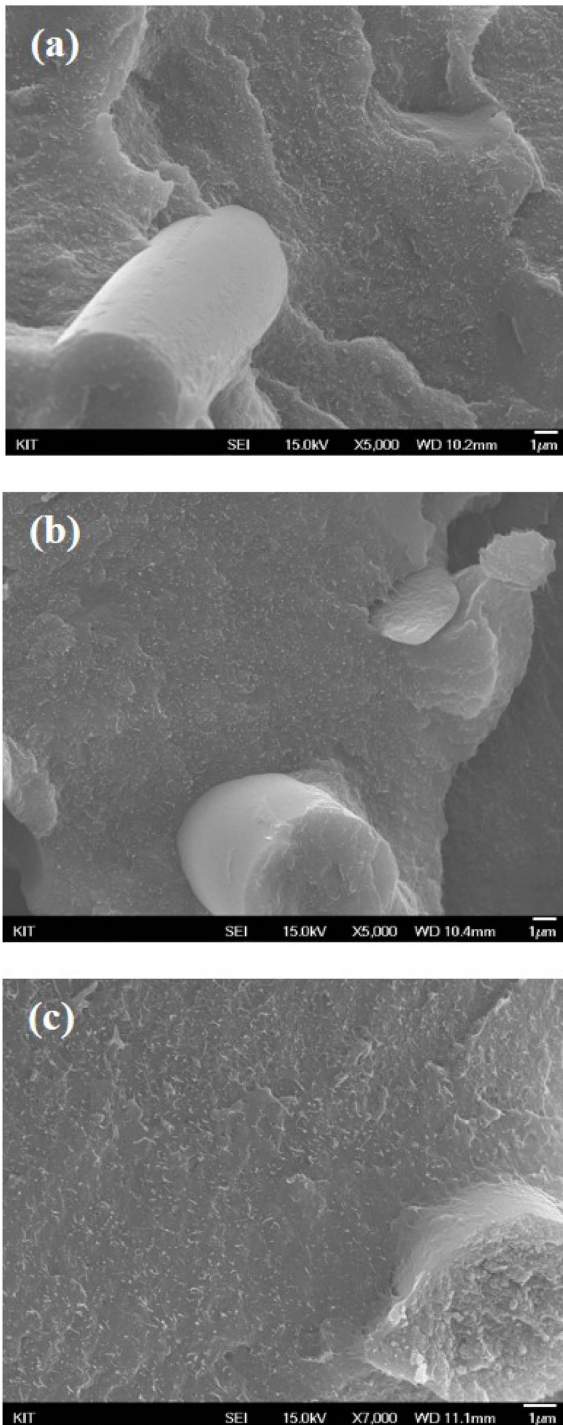


Figure 5. SEM image of PA66/SCF/CNT composites with different contents of (a) SCF/CNT (26:4 wt%), (b) SCF/CNT (36:4 wt%), and (c) SCF/CNT (46:4 wt%).

재 사이에서 접촉 및 중첩이 없어 전기적 통로인 네트워크 형성이 불가능하여 전하가 충전재 입자에서 구성되는 사슬에 따라 이동을 하지 못하게 되고, 그로 인해 전기 전도도의 효과가 우수하지 않은 것으로 판단된다.

Figure 4(c)는 SCF와 CNT를 hybrid filler로 사용하였을 때

PA66 복합체의 표면 저항 값의 변화를 고찰하기 위하여 SCF/CNT 충전재 함량에 따른 표면 저항을 그래프로 도식하였다. SCF의 함량이 증가할수록 표면 저항 값이 감소하는 경향이 나타났다. 충전재로 탄소섬유 또는 CNT만을 사용했을 때보다 hybrid filler로 사용하여 복합체를 제조했을 때 표면 저항 값이 낮게 나타났다. 이를 통해 표면저항 특성에서도 탄소섬유와 CNT를 hybrid filler로 사용했을 때 시너지효과가 나타나는 것을 알 수 있다. Table 4는 PA66 복합체의 표면저항값을 수치화하여 나타내었다.

3. Polyamide 66 복합체의 형상학적 특성

Figure 5는 PA66/SCF/CNT 복합체의 충격파단면을 관찰하기 위하여 FE-SEM 으로 측정한 사진이다, 탄소섬유의 함량이 증가할수록 CNT의 응집을 예방해주는 탄소섬유가 증가하기 때문에 CNT의 분산이 균일하게 된 것을 관찰할 수 있었다. 이로 인하여 CNT-CNT 및 탄소섬유-CNT 간의 접촉 및 중첩이 증가하게 되어 전기적 통로를 많이 형성하게 되고 따라서 전자파효과가 우수하게 나타난 것으로 사료된다.

Conclusions

사이징 처리를 하지 않은 탄소섬유 UCF와 폴리아마이드로 사이징 처리 된 탄소섬유 SCF를 PA66에 20, 30, 40, 50 wt% 첨가하였을 때, 탄소섬유의 함량 증가에 따라 탄소섬유 간 접촉 및 중첩이 증가하여 전기적 통로 형성에 도움이 되었다. 이로 인하여 PA66 복합체의 전자파 차폐율의 증가 및 표면저항의 값 감소에 따라 전기적 특성이 우수해지는 것을 확인하였다.

CNT의 함량이 증가할수록 전자파 차폐율 증가 및 표면저항 값의 감소로 인하여 PA66 복합체의 전기적 특성이 좋아지는 경향이 나타났으나 그 효과는 미미하였다.

CNT를 4 wt%로 고정하고, SCF의 함량(26, 36, 46 wt%)을 변화시킨 복합체를 제조하였다. SCF의 함량이 증가할수록 전기적 특성이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 탄소섬유 및 CNT를 단독으로 사용하였을 때 보다 SCF와 CNT를 하이브리드 필러로 사용하여 복합체를 제조한 경우 전기적 특성이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

FE-SEM을 사용하여 PA66/SCF/CNT 복합체의 인장파단면을 관찰한 결과, 탄소섬유로 인하여 CNT의 응집을 예방하여 분산이 보다 균일하게 되었다.

Acknowledgements

본 연구는 금오공과대학교 연구비에 의하여 연구된 논문이므로 이에 감사 드립니다.

References

1. T. Fukushima, A. Kosaka, Y. Yamamoto, T. Aimiya, S. Notazawa, T. Takigawa, T. Inabe, and T. Aida, "Dramatic effect of dispersed carbon nanotubes on the mechanical and electroconductive properties of polymers derived from ionic liquids", *Small*, **4**, 554 (2006).
2. B. Kandasubramanian and M. Gilbert, "An electroconductive filler for shielding plastics", *Macromol. Symp.*, **221**, 185 (2005).
3. Y. Liu and S. Kumar, "Polymer/carbon nanotube nano composite fibers-a review", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 6069 (2014).
4. S. G. Kim, H. B. Jeong, H. S. Lee, Y. R. Park, R. M. Lee, H. Y. Kye, K. W. Jhee, and D. S. Bang, "A Study on the mechanical and thermal properties of polyketone/chopped fiber composites", *Elast. Compos.*, **543** 1 (2019).
5. Y. Han and J. Elliott, "Molecular dynamics simulations of the elastic properties of polymer/carbon nanotube composites", *Comput. Mater. Sci.*, **39**, 315 (2007).
6. A. Kausar, I. Rafique, and B. Muhammad, "Review of applications of polymer/carbon nanotubes and epoxy/CNT composites", *Polymer Plast. Tech. Eng.*, **55**, 1167 (2016).
7. C. Gao and G. Chen, "Conducting polymer/carbon particle thermoelectric composites: Emerging green energy materials", *Compos. Sci. Technol.*, **124**, 52 (2016).
8. A. Maurel-Pantel, E. Baquet, J. Bikard, J. L. Bouvard, and N. Billon, "A thermo-mechanical large deformation constitutive model for polymers based on material network description: Application to a semi-crystalline polyamide 66", *Int. J. Plast.*, **67**, 102 (2015).
9. H. Qin, Q. Su, S. Zhang, B. Zhao, and M. Yang, "Thermal stability and flammability of polyamide 66/montmorillonite nanocomposites", *Polymers*, **44**, 7533 (2003).
10. Z. Spitalsky, D. Tasis, K. Papagelis, and C. Galiotis, "Carbon nanotube-polymer composites: chemistry, processing, mechanical and electrical properties", *Prog. Polym. Sci.*, **35**, 357 (2010).
11. S. Xie, W. Li, Z. Pan, B. Chang, and L. Sun, "Mechanical and physical properties on carbon nanotube", *J. Phys. Chem. Solids*, **61**, 1153 (2000).
12. M. Suzuki, "Activated carbon fiber: fundamentals and applications", *Carbon*, **32**, 577 (1994).
13. C. Soutis, "Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction", *Mater. Sci. Eng. A*, **412**, 171 (2005).
14. A. Nicolson and G. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of time-domain techniques", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, **19**, 377 (1970).
15. A. S. Hoang, "Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding characteristics of multiwalled carbon nanotube filled polyurethane composite films", *Nanosci. Nanotechnol.*, **2**, 025007 (2011).
16. S. H. Park and J. H. Ha, "Improved electromagnetic interference shielding properties through the use of segregate carbon nanotube networks", *Materials*, **12**, 1395 (2019).