

다중벽 탄소나노튜브강화 폴리프로필렌 나노복합재료의 전자파 차폐효과 및 기계적 특성

임윤지 · 서민강* · 김학용 · 박수진**†

전북대학교 유기소재파이버공학과, *전주기계탄소기술원, **인하대학교 화학과
(2012년 1월 10일 접수, 2012년 2월 13일 수정, 2012년 2월 14일 채택)

Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Mechanical Properties of MWCNT-reinforced Polypropylene Nanocomposites

Yoon-Ji Yim, Min-Kang Seo*, Hak-Yong Kim, and Soo-Jin Park**†

Department of Organic Materials and Fiber Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 561-765, Korea

*Jeonju Institute of Machinery and Carbon Composites, Jeonju, Jeonbuk 561-844, Korea

**Department of Chemistry, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received January 10, 2012; Revised February 13, 2012; Accepted February 14, 2012)

초록: 본 연구에서는 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)의 함량을 1에서 10 wt%까지 달리하여 MWCNT 강화 폴리프로필렌(PP) 나노복합재료의 전자파 차폐효과 및 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서 살펴보았다. 전기전도도는 4단자법으로 측정하였고, 전자파 차폐효과는 흡수와 반사방법으로 분석하였다. 기계적 특성은 임계응력세기인자(K_{IC}) 측정을 통하여 고찰하였으며, 모폴로지는 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 실험결과, MWCNT의 함량이 증가함에 따라 차폐효과가 향상됨을 확인할 수 있었으며, MWCNT의 함량이 전자파 차폐효과를 결정하는 중요한 요소임을 알 수 있었다. K_{IC} 값도 MWCNT의 함량이 증가할수록 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있었으나 5 wt% 이상에서는 오히려 감소하였다. 이는 과량의 MWCNT가 PP 내에서 서로 뭉침으로 인하여 K_{IC} 값을 감소시킨 것으로 판단된다.

Abstract: In this work, the effect of multi-walled carbon nanotube (MWCNT) on electromagnetic interference shielding effectiveness (EMI SE) and mechanical properties of MWCNT-reinforced polypropylene (PP) nanocomposites were investigated with varying MWCNT content from 1 to 10 wt%. Electric resistance was tested using a 4-point-probe electric resistivity tester. The EMI SE of the nanocomposites was evaluated by means of the reflection and adsorption methods. The mechanical properties of the nanocomposites were studied through the critical stress intensity factor (K_{IC}) measurement. The morphologies were observed by scanning electron microscopy (SEM). From the results, it was found that the EMI SE was enhanced with increasing MWCNT content, which played a key factor to determine the EMI SE. The K_{IC} value was increased with increasing MWCNT content, whereas the value decreased above 5 wt% MWCNT content. This was probably considered that the MWCNT entangled with each other in PP due to an excess of MWCNT.

Keywords: electromagnetic interference (EMI), shielding effectiveness (SE), carbon nanotube (CNT), nanocomposites, thermoplastic.

서 론

최근 첨단 전자기술의 발달로 인하여 정보전달과 에너지원에 대한 관심이 급속도로 증가하고 있는 추세이며, 일상생활에 사용되고 있는 전기·전자 제품과 항공·선박 등 각종 통신기기의 사용이 급증함에 있어 전자파의 이용과 발전속도는

현재 매우 빠르게 진행되고 있다. 이 밖에 의료용 기구, 입자 가속기, 식품가공 등의 에너지원으로도 전자파는 광범위하게 이용됨으로써 현대 인간의 생활활동은 전자파에 둘러싸여 있다고 해도 과언이 아닐 만큼 무수한 전자파에 노출되어 있다.¹

산업현장이나 일상생활에서의 각종 기기들로부터 발생하는 전자파는 상호간섭으로 인해 다른 기기의 오작동을 일으키거나, 인체에 직접적인 영향을 미쳐 생체리듬의 변화, 가임 여성의 유산 및 기형아 출산과 시력장애 등의 여러 질병들을 유발시킬 수 있다고 보고되고 있다.^{2,3} 이러한 피해현상을 전

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: sjpark@inha.ac.kr

자파장해(electromagnetic interference, EMI)라 하며, EMI의 영향은 밀집도가 크고 정밀한 부품을 많이 사용하는 장비일 수록 민감하기 때문에 소형화, 고집적화, 고속화 및 다기능화를 지향하는 현대 전기·전자 및 통신산업 등에 있어서 치명적인 장애요소로 대두되고 있다.⁴ 따라서 전자파장해에 대한 대책 방안으로 엄격한 규제가 마련되어 있으며, 전자파 차폐 재료에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다.⁵⁻⁷ 전자파차폐(electromagnetic interference shielding, EMI shielding)란 전도체 혹은 자성체를 이용하여 불필요한 전자파를 차단하거나 새로운 회로를 형성하여 보호할 대상의 주변에 존재하는 유해 전자파를 감소시켜 전자파로부터 장비 또는 인체를 보호하는 것을 말한다.⁸

전자파차폐는 외부의 전자파를 실내나 시스템 내로 투과되지 않도록 임의의 재료에 의해 그 파를 흡수 혹은 반사시키는 개념이다. 즉, 차폐효과는 물체 위에 입사된 전자파를 얼마나 많이 감소시키는 것인가로 정의된다.⁹ 이론적인 전자파 차폐효과는¹⁰ 차폐 면에 의한 신호의 송·수신부의 구분과 차폐 면에 수직으로 입사하는 전자파가 반사 또는 흡수되고, 투과하는 기구에 의해 결정된다. 입사전력 P_i 에 대하여 재료를 통과해 수신되는 전력을 P_t 라 하면 재료의 SE는 식 (1)과 같다.¹¹

$$SE(dB) = 10\log\frac{P_i}{P_t} \quad (1)$$

재료의 두께와 전기적 특성을 고려하여 계산하면 다음 식과 같이 유도된다.¹²

$$SE(dB) = 20\log\left[e^{at\frac{(1+K)^2}{4K}} \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1}\right)^2 e^{-2\alpha t} \right\} \right] \quad (2)$$

$$= 20\log(e^{at}) + 20\log\left\{ \frac{(1+K)^2}{4K} \right\} + 20\log\left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1}\right)^2 e^{-2\alpha t} \right\} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 K 는 전자파 임피던스(Z_w)와 차폐재료 임피던스(Z_m)의 비, t 는 재료의 두께, α 는 전자파의 전파상수($=a + jB$), α 는 전자파의 감소상수이다.

식 (3)에서 첫째 항을 흡수손실(absorption loss, A)이라 하고, 두 번째 항을 반사손실(reflection loss, R)이라 하며, 세 번째 항을 다중반사에 의한 보정항(multi-reflection correction, M)이라 한다. 따라서 전자파 차폐효과는 식 (4)에 나타낸 것처럼 입사하는 전자파의 흡수와 반사, 그리고 매질의 경계면 사이에서의 다중반사의 합으로 이루어지고, 차폐하고자 하는 전자파의 특성에 따라 이들 각각의 손실을 활용하여 효과적으로 전자파를 차폐시킬 수 있음을 알 수 있다.¹³

$$SE(dB) = A + R + M \quad (4)$$

즉, 전자기 에너지가 차폐재료에 도달하면 반사, 투과 및 흡수의 세 가지 형태로 전자파의 경로가 분산되고, 여기서 시스템 내부에 기준을 두면 반사 및 흡수를 합해서 차폐란 의미로 쓰인다.¹⁴

전자파 차폐재료로 전기적 특성이 잘 알려진 금속재료가 전통적으로 많이 이용되어 왔으나, 금속재료에 비해 값이 싸고, 가벼우며, 가공하기 쉬운 플라스틱재료 및 복합재료 등이 개발되어 전기 및 전자제품의 재료로서 금속재료를 대체해 나가고 있는 실정이다.⁴ 특히 플라스틱재료는 대부분의 전자파를 투과하는 특성을 가지고 있어 전도성 충전재를 함께 사용하는 것이 효과적이라 알려져 있다.

탄소재료는 비중이 낮고 전기적 성질이 우수하여 전자파 차폐재료로서의 응용 가능성이 높아 많은 연구가 진행 중이다.¹⁵⁻¹⁸ 이 중 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 탄소나노섬유(carbon nanofiber), 그래핀(graphene) 등은 전기적 성질이 우수하여 도전손실을 증가시키기 때문에 전자파차폐에 효과적으로 이용될 수 있다.¹⁹⁻²¹

일반적으로 복합재료의 전자기적 특성은 충전재의 전기전도도 및 형상으로부터 영향을 받는다. 형상적인 측면으로 볼 때 세장비(aspect ratio)가 크고, 직경이 작을수록 전자파 흡수 및 반사에 효율적이라고 알려져 있다.²²⁻²⁴

특히 전도성 충전재로 가장 많이 사용되는 MWCNT는 흑연면(graphite sheet)이 나노 크기의 직경으로 둥글게 말려 관 모양을 이루고 있는 것으로, 그 관의 지름이 수십 나노미터에 불과하며, 세장비는 거의 1000배에 이른다.^{25,26} 또한 다른 충전재보다 전기적·기계적 물성 또한 우수하여 MWCNT를 복합재료의 충전재로 사용한다면 기존의 다른 충전재보다 적은 양으로도 뛰어난 전자파 차폐 효과 및 기계적 물성을 나타낼 것으로 예상된다.

본 연구에서는 MWCNT를 사용하여 나노복합재료를 제조하였으며, MWCNT의 함량 변화가 MWCNT/PP 나노복합재료의 전자파 차폐효과와 기계적 특성에 대해 미치는 영향에 대해 고찰하고자 하였다.

실 험

재료. 본 연구에서 매트릭스로 사용된 수지는 호남석유화학(주)의 PP SJ-150을 사용하였다. 충전재는 나노솔루션에서 CVD로 제작한 MWCNT TCM220-10(purity: 95 wt%, diameter: ~10 nm, length: 10~20 μm)를 사용하였다.

나노복합재료 제조. PP 수지 180 g을 기준으로 MWCNT의 함량을 각각 1, 2, 5, 그리고 10 wt%로 달리하여 기계식 혼합기(internal mixer)를 이용하여 175 °C에서 1시간 동안 100 rpm으로 혼합한 후, 이형제를 바른 두께 1 mm의 몰드를 이용하여 175 °C의 hot press에서 약 8 MPa의 압력으로 압축 성형하여 MWCNT 함량별 MWCNT/PP 나노복합재료를 제

조하였다.

X선 회절분석(XRD). MWCNT/PP 나노복합재료의 결정상과 결정구조를 분석하기 위해 BRUKER사의 X선 회절기(D2 PHASER)를 사용하였으며, Ni-filtered $\text{CuK}\alpha$ radiation을 이용하여 $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, $2\theta = 5\sim 90^\circ$ 까지 스캔하였다.

전기전도도 측정. MWCNT/PP 나노복합재료의 전기적 특성을 고찰하기 위해 4단자법에 의한 면저항 측정기(Mitsubishi Chemical, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 섬유의 체적고유저항치는 식 (5)에 의해 계산하였다.

$$p_v = \left(\frac{E}{I_v}\right)\left(\frac{A}{l}\right) = \frac{R_v A}{l} \quad (5)$$

여기서, E 는 시편에 가해진 전압(V), I_v 는 측정된 전류(A), R_v 는 측정된 저항(R), l 는 시편의 두께(cm), 그리고 A 는 전극의 접촉 단면적(cm^2)을 나타낸다.

체적저항의 측정은 MWCNT/PP 나노복합재료에 4단자의 probe를 직접 접촉시켜 저항값을 측정하였으며, 동일한 복합재료에서 3점 이상을 시험하여 유사값에 대해서 평균값을 취하였다.

전자파차폐 측정. MWCNT/PP 나노복합재료의 전자기차폐 특성은 ASTM D4935-89에 준하여, 전자파차폐 측정기(AGILENT, USA)로 0.3-3 GHz의 주파수 영역에서 분석하였다. 전자파차폐 측정기의 모식도를 Figure 1에 나타내었다. 전자파차폐 분석실험은 전자파 반사와 흡수특성을 확인하였고 반사특성을 S11, 흡수특성을 S12로 분리하여 실험을 진행하였다. 각 실험은 3회 반복실험을 통해 안정화가 되는 시점을 기준으로 데이터를 취하였다.

파괴인성 측정. MWCNT/PP 나노복합재료의 파괴인성 요소 중 임계응력세기인자(critical stress intensity factor, K_{IC})

측정을 위해 ASTM D5045-95에 준하여 5개의 SENB (single edge notched bending) 시편을 제조하고, 만능재료시험기(Universal Test Machine, LR5K plus Lloyd)를 사용하여 측정하였다. 이 때 지지대간 거리와 시편 두께와의 비(span-to-depth ratio)는 4:1로 고정하고 변형 속도(cross-head speed)는 1 mm/min로 유지하였다.

모폴로지 측정. MWCNT/PP 나노복합재료의 형태학적 특성을 관찰하기 위해 액체질소에서 급랭시킨 후 얻은 파단면을 백금 코팅 후(두께:20~30 nm) 주사전자현미경(scanning electron microscope, JEOL, HSM-6400)을 사용하여 1000 배율과 20000 배율로 측정하였다.

결과 및 토론

X선 회절분석(XRD). Figure 2는 MWCNT/PP 나노복합재료의 MWCNT 함량에 따른 XRD 패턴을 나타낸 것이다. $2\theta = 14(110)$, $17(040)$, $18.5(130)$, $21.7(131)$ 에서 각각 PP 격자면(lattice plane)을 나타낸다. 이 XRD 패턴은 본 연구에서 사용된 PP가 전형적인 알파형의 단사형(mono-clinic) 결정구조를 나타냄을 보여주고 있다.²⁷ 그리고 소량의 MWCNT 충전 여부는 PP 매트릭스의 구조변화에 별다른 영향을 끼치지 않는것을 알 수 있다.

전기전도도. Figure 3에 MWCNT의 함량에 따른 MWCNT/PP 나노복합재료의 체적저항 결과를 나타내었다. MWCNT의 함량이 증가할수록 전기전도도가 향상되어 있었다. 나노복합재료의 체적저항은 점점 감소되는 경향을 나타내었는데, 이는 MWCNT의 우수한 전기적 성질로 인하여 MWCNT의 양이 PP 매트릭스 상에서 많아질수록 전기전도도가 향상되었기 때문이다. 특히 Figure 3에서 알 수 있듯이 MWCNT의 함량이 2 wt%일 때 체적 저항 값의 명확한 감소를 보이는데, 이는

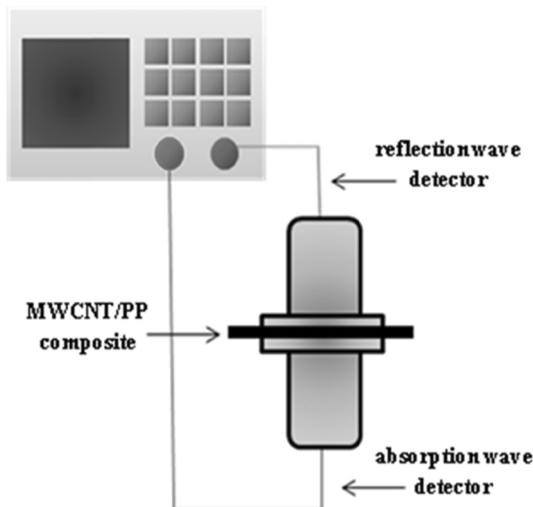


Figure 1. Apparatus of EMI shielding testing.

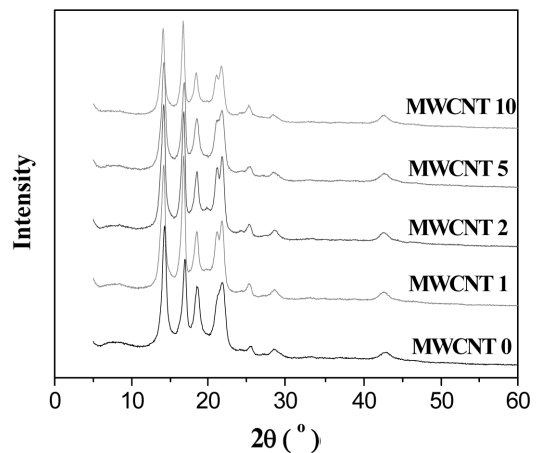


Figure 2. XRD spectra of MWCNT/PP nanocomposites as a function of MWCNT content.

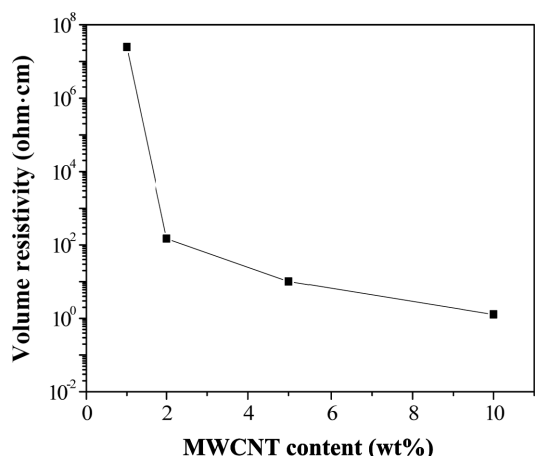


Figure 3. Volume resistivity of MWCNT/PP nanocomposites as a function of MWCNT content.

PP 매트릭스 내에서 MWCNT의 전도성 네트워크가 형성됨으로써 자유전자의 hopping이 자유롭게 이루어지면서 percolation threshold 현상이 발생했기 때문이라 판단된다.²⁸

전자파 차폐. Figure 4는 0.3~3 GHz의 주파수 영역에서 MWCNT/PP 나노복합재료의 MWCNT 함량 및 주파수에 따른 전자파 차폐효과를 나타낸 결과이다. Figure 4(a)는 주파수영역에 따른 흡수된 전자파를 나타낸 것이며, MWCNT의 함량이 증가할수록 차폐 효율은 증가했다. 그러나 앞서 확인한 Figure 3에서 2 wt%의 나노복합재료에서 약 10² ohm·cm 값을 가짐으로써 percolation threshold 현상을 발견할 수 있었으나, 2 wt% 이하의 MWCNT를 함유한 나노복합재료에서는 PP의 차폐효과와 눈에 띄는 차이를 발견할 수 없었다. 전기전도성이 percolation threshold 값을 보인 이후로도 5 wt%일 때 약 10¹ ohm·cm 값을 가지며, 10 wt%일 때 약 10⁰ ohm·cm 값을 가짐으로써 10배 정도 전기전도성의 증가와 Figure 4(a)에서 약 15 dB의 차폐효과의 향상을 확인할 수 있었다. 이는 전기전도성의 percolation threshold 농도 이상의 값부터 본격적인 나노복합재료의 차폐효과가 향상됨으로 판단된다. 또한 약 2 GHz의 특정 주파수대에서 10 wt%의 경우 약 40 dB(99%)의 차폐효과를 보이며, 다른 주파수대에서 보다 차폐효과가 더 우수하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 매트릭스인 PP의 고유특성으로 생각할 수 있으며, 약 2 GHz의 특정 주파수대에서 사용을 목적으로 하는 경우 매트릭스로 PP를 선택한다면 차폐성능이 더욱 우수한 복합재료를 제작할 수 있을 것으로 예상된다.

Figure 4(b)는 주파수영역에 따른 반사손실(reflection loss, RL)을 나타낸 결과로써, 반사손실이란 공기 중에서 진행하던 전자파와 차폐 물질의 표면과의 임피던스 부합으로 인해서 전자파가 물질 내부로 통과하지 못하고 반사되어 발생하는 것으로 그 크기는 식 (6)으로 표현된다.²⁹

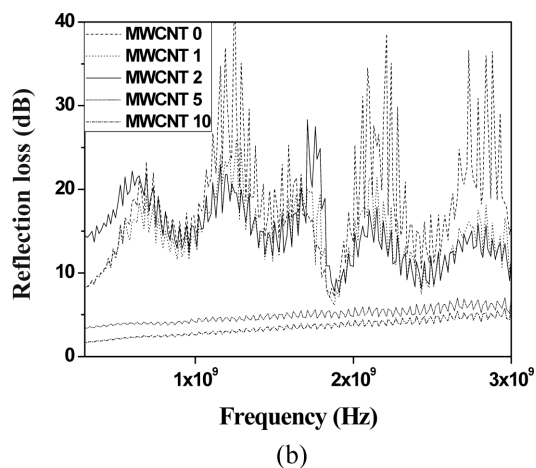
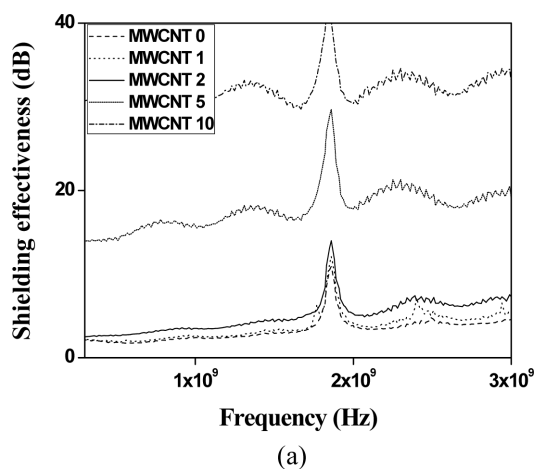


Figure 4. Electromagnetic interference shielding effectiveness of MWCNT/PP nanocomposites as a function of MWCNT content: (a) absorption; (b) reflection.

$$RL(dB) = 20 \log \left(\frac{E_{inc}}{E_{ref}} \right) \quad (6)$$

여기서 E_{inc} 는 입사전계, E_{ref} 는 반사전계이다.

RL값이 낮다는 것은 반사되는 전자파가 많다는 것을 의미하므로 RL값이 낮을수록 반사에 의한 차폐가 잘 이루어진 것이다. Figure 4(b)에서 복합재료의 MWCNT의 함량이 증가할수록 RL값이 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 MWCNT의 함량이 증가할수록 공기와 나노복합재료간의 임피던스 차이가 증가하여 나노복합재료의 표면에 전자파의 반사가 증가하기 때문이라 판단된다.³⁰ 또한 Figure 4(a)에서 확인했던 것과 마찬가지로 특정주파수인 약 2 GHz에서의 PP의 우수한 차폐효과로 인해 2 GHz에서는 MWCNT의 함량에 의한 RL값의 큰 감소는 없었으나, 약 1~1.5, 2~2.5, 그리고 2.5~3 GHz의 주파수영역에서 MWCNT의 함량에 따른 RL값이 확인하게 감소함을 확인할 수 있었다.

결론적으로 말하면 주파수 영역 전체에 걸쳐 5 wt% 이상

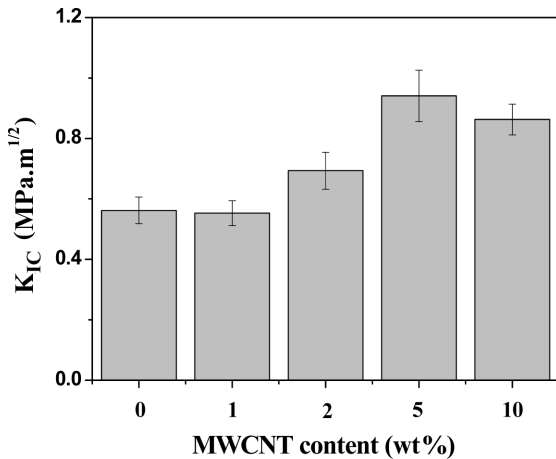


Figure 5. K_{IC} of MWCNT/PP nanocomposites as a function of MWCNT content.

의 MWCNT를 함유한 나노복합재료의 차폐효과가 크게 향상됨을 확인할 수 있었으나, MWCNT의 함량이 2 wt% 이하인 나노복합재료에서의 차폐효과의 향상은 미미함을 확인할 수 있었다.

파괴인성 측정. 나노복합재료의 MWCNT 함량에 따른 K_{IC}는 ASTM D5045-95에 준하여 응력과 크랙 길이의 함수로 된 식 (7)과 (8)을 사용하여 측정하였다.³¹

$$K_{IC} = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot f(a/W) \tag{7}$$

그리고

$$f(A) = \frac{(2+A)[0.886+4.64 \cdot A-13.32 \cdot A^2+14.72 \cdot A^3-5.6 \cdot A^4]}{(1-A)^{3/2}} \tag{8}$$

여기서 P는 하중, W는 시편의 폭, B는 시편의 두께를 나타내며, a는 시편의 크랙 길이를 나타낸다. 식 (8)에서 A는 a/W를 나타낸다.

Figure 5에 식 (7)과 (8)을 이용하여 구한 나노복합재료의 K_{IC}값의 결과를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 MWCNT 함량이 증가함에 따라 5 wt%까지는 K_{IC}값이 증가했으나, 그 이상의 MWCNT에서는 오히려 K_{IC}값이 감소하였다. 이러한 현상은 과량의 MWCNT가 PP 내에서 서로 뭉침으로 인해 나노복합재료의 기계적 특성을 저하시킨 것으로 판단된다.³²

모폴로지. Figure 6은 MWCNT/PP 나노복합재료의 파단면을 나타낸 것으로써 나노복합재료의 형태학적 특성이 함량에 따라 차이가 있음을 확인하였다. 즉, MWCNT가 들어가지 않은 PP의 파단면 (a)의 경우 단면의 형태가 굉장히 매끄러운 반면 MWCNT가 함유된 나노복합재료의 파단면 (b)와 (c)의 경우 MWCNT의 함량이 증가할수록 복잡한 형태를 띠고 있는 것을 확인하였다. 이는 MWCNT의 함량이 증가할수록 복합재료 내에서 외부로부터 힘에 대한 저항성이 크게 작용했다는 것을 보여주는 것으로써, MWCNT의 함량이 증가할수록 파단 시 저항력이 커졌기 때문이라 판단된다.³³ 또한 (d)와 (e)의 파단면을 통해 MWCNT의 분산정도를 보면, 나노복합재료 내의 MWCNT의 함량이 2 wt%일 때 MWCNT가 매트릭스 내에 비교적 고르게 분포하고 있음을 알 수 있으나 5 wt%일 때에 비해 덜 고르고 조밀한 분포상태를 보인

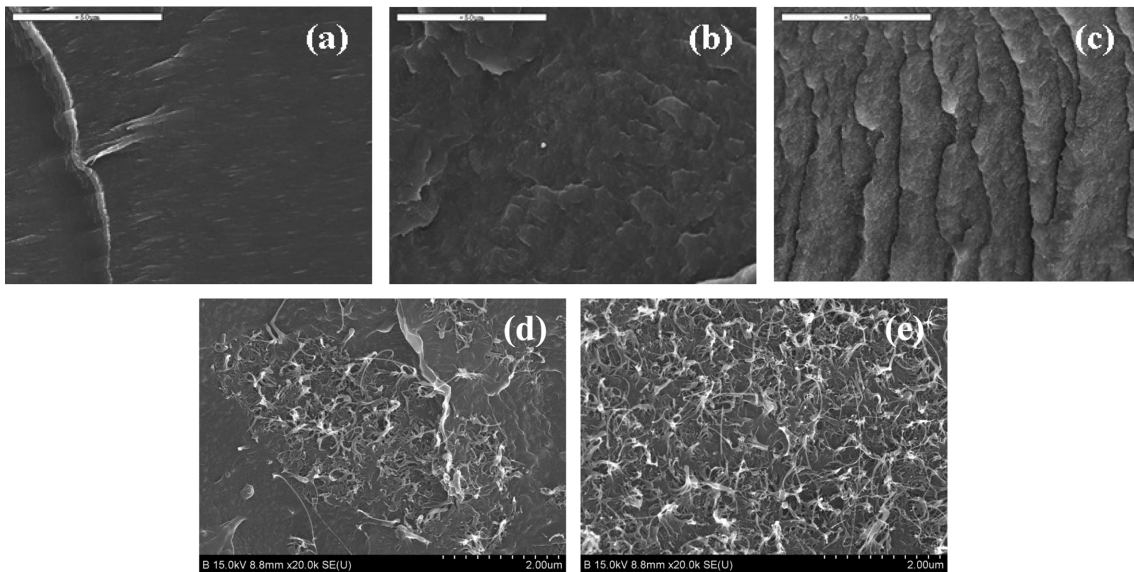


Figure 6. SEM pictures of MWCNT/PP nanocomposites as a function of MWCNT content: (a) 0 wt%; (b) 2 wt%; (c) 5 wt%; (d) 2wt%; (e) 5 wt%.

다. 5 wt%일 때, MWCNT가 보다 조밀한 전도성 네트워크를 형성함으로써 나노복합재료 내 자유전자들의 자유로운 hopping이 이루어지며,³⁴ 이러한 MWCNT의 분포형태로 인해 5 wt% 이상의 MWCNT를 함유한 나노복합재료에서 전자과 차폐효과의 향상을 가져옴을 알 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 MWCNT 함량의 변화가 MWCNT/PP 나노복합재료의 전자과 차폐효과와 기계적 특성에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. XRD분석을 통해 결정구조와 결정화도를 관찰하였으며, PP의 전형적인 알파형의 단사형 결정구조를 확인할 수 있었다. 전기전도성 분석결과에서는 MWCNT의 함량이 2 wt%가 될 때 percolation threshold 현상을 확인할 수 있었다. 실험결과 MWCNT의 함량이 증가함에 따라 전자과 차폐효과는 향상되었으며, 이를 통해 MWCNT/PP 나노복합재료가 전자과차폐 재료로서 충분히 적용될 수 있음이 확인되었다. MWCNT/PP 나노복합재료의 파괴인성의 결과로써 K_{IC} 값 역시 MWCNT의 함량이 증가할수록 큰 값을 가지는 것을 확인할 수 있었으나, 5 wt% 이상의 함량에서는 K_{IC} 값이 오히려 감소하였다. 이는 적당량의 MWCNT는 나노복합재료의 기계적 특성을 증가시키나, 과량의 MWCNT가 함유될 경우 매트릭스 내에서 뭉침으로 인해 오히려 기계적 특성을 저하시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 지식경제부의 탄소밸리구축사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- B. R. Kim, H. K. Lee, S. H. Park, and H. K. Kim, *Thin Solid Films*, **519**, 3492 (2011).
- A. A. Al-Ghamdi and F. E. Tantawy, *Compos. Part A : Appl. Sci. Manuf.*, **41**, 1693 (2010).
- C. S. Chen, W. R. Chen, S. C. Chen, and R. D. Chien, *Int. Commun. Heat. Mass.*, **35**, 744 (2008).
- H. B. Shim, M. K. Seo, and S. J. Park, *Polymer(Korea)*, **24**, 860 (2000).
- Y. Y. Kim, J. Yun, Y. S. Lee, and H. I. Kim, *Carbon Lett.*, **12**, 48 (2011).
- B. O. Lee, W. J. Woo, H. S. Song, H. S. Park, H. S. Hahm, J. P. Wu, and M. S. Kim, *J. Ind. Eng. Chem.*, **7**, 305 (2011).
- Y. Y. Kim, J. Yun, H. I. Kim, and Y. S. Lee, *J. Ind. Eng. Chem.*, **18**, 392 (2012).
- G. Y. Han, O. H. Song, and D. G. Ahn, *J. KSPE*, **27**, 71 (2010).
- Y. H. Chen, C. Y. Huang, F. D. Lai, M. L. Roan, K. N. Chen, and J. T. Yeh, *Thin Solid Films*, **517**, 4984 (2009).
- R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **30**, 362 (1988).
- C. Y. Huang and J. F. Pai, *Eur. Polym. J.*, **34**, 261 (1998).
- R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **30**, 187 (1988).
- Z. P. Wu, M. M. Li, Y. Y. Hu, Y. S. Li, Z. X. Wang, Y. H. Yin, Y. S. Chen, and X. Zhou, *Scripta Mater.*, **64**, 809 (2011).
- R. E. Haufler, *J. Phys. Chem.*, **94**, 8634 (1990).
- Q. Liu, D. Zhang, T. Fan, J. Gu, Y. Miyamoto, and Z. Chen, *Carbon*, **46**, 461 (2008).
- Y. Huang, N. Li, Y. Ma, F. Du, F. Li, and X. He, *Carbon*, **45**, 1614 (2007).
- Z. Liu, G. Bai, Y. Huang, Y. Ma, F. Li, and T. Guo, *Carbon*, **45**, 821 (2007).
- S. Bhadra, N. K. Singha, and D. Khastgir, *Curr. Appl. Phys.*, **9**, 396 (2009).
- J. G. Kim, C. H. Chung, and Y. S. Lee, *Appl. Chem. Eng.*, **22**, 138 (2011).
- S. Chae, B. Cho, B. Hong, B. Lee, and H. Byun, *Appl. Chem. Eng.*, **21**, 430 (2010).
- V. Eswaraiyah, V. Sankaranarayanan, and S. Ramaprabhu, *Macromol. Mater. Eng.*, **296**, 894 (2011).
- K. S. Kim and S. J. Park, *Carbon Lett.*, **13**, 51 (2012).
- D. D. L. Chung, *Carbon*, **39**, 279 (2001).
- X. Shui and D. D. L. Chung, *J. Mater. Sci.*, **35**, 1773 (2000).
- P. Chandrasekhar and K. Naishadham, *Synth. Met.*, **105**, 115 (1999).
- S. J. Park and M. K. Seo, *Interface Science and Composites*, Elsevier, New York, 2011.
- C. S. Ha and S. C. Kim, *J. Appl. Polym. Sci.*, **35**, 2211 (1988).
- M. K. Seo, J. R. Lee, and S. J. Park, *Mater. Sci. Eng. A*, **404**, 79 (2005).
- S. Hazra and A. Ghosh, *J. Phys. Condens. Matter.*, **9**, 3981 (1997).
- C. J. Kim, H. D. Choi, K. S. Suh, and H. G. Yoon, *Polymer (Korea)*, **27**, 201 (2003).
- H. L. Ewalds and R. J. H. Wanhill, *Fracture Mechanics*, Edward Arnold, London, 1991.
- J. H. Ko, J. C. Kim, and J. H. Chang, *Polymer(Korea)*, **33**, 333 (2009).
- H. C. Kim, S. Jeon, H. I. Kim, H. S. Choi, M. H. Hong, and K. S. Choi, *Polymer(Korea)*, **35**, 563 (2011).
- J. S. Yang, D. H. Shin, K. Y. Lee, and D. H. Park, *Trans. KIEE*, **56**, 571 (2007).