

탄소나노튜브와 스테인레스강 단섬유를 함유한 폴리프로필렌 복합체의 전기저항 및 기계적 특성

정종기 · 박기훈 · 방대석 · 오명훈* · 김봉석** · 이종근†

금오공과대학교 에너지융합소재공학부, *금오공과대학교 신소재시스템공학부, **쌍크루트
(2013년 11월 15일 접수, 2013년 12월 13일 수정, 2013년 12월 20일 채택)

Electrical Resistivity and Mechanical Properties of Polypropylene Composites Containing Carbon Nanotubes and Stainless Steel Short Fibers

Jong Ki Jung, Kihun Park, Daesuk Bang, Myunghoon Oh*, Bongseok Kim**, and Jong Keun Lee†

School of Energy and Integrated Materials Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 730-701, Korea

*School of Advanced Materials and System Engineering, Kumoh National Institute of Technology, 61 Daehak-ro, Gumi 730-701, Korea

**Thinker Route Co., LTD, Gumi Electronics & Information Technology Research Institute,

Cheomdangieop 1-ro 17, Sandong-myeon, Gumi 730-853, Korea

(Received November 15, 2013; Revised December 13, 2013; Accepted December 20, 2013)

초록: 본 연구에서는 이축 스크류식 압출기를 이용하여 폴리프로필렌(PP)에 도전성 필러인 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)와 스테인레스강 단섬유(SSF)를 첨가하여 복합체를 제조하였으며, 이에 대한 표면저항 및 기계적 특성을 조사하였다. 표면저항을 측정한 결과 PP/MWNT에 소량의 SSF를 첨가하였을 때 더 낮은 MWNT 함량에서 percolation threshold가 나타났다. 그리고 제조된 복합체에 대한 인장시험 결과 순수 PP와 비교해서 파괴점 신장률은 감소하였으나 탄성률과 강도는 증가하였다. 또한 동역학분석을 통하여 MWNT와 SSF 복합체의 저장탄성률과 $\tan \delta$ 에 미치는 영향을 조사하였으며, SEM을 이용하여 필러들의 모폴로지 및 복합체의 파단면을 관찰하였다.

Abstract: Polypropylene (PP) composites containing conductive multi-walled carbon nanotube (MWNT) and stainless steel short fiber (SSF) were manufactured using a twin screw extruder and characterized their surface resistivity and mechanical properties in this work. Surface resistivity measurements showed that the percolation threshold appeared at a lower MWNT loading when a small amount of SSF was added to PP/MWNT composites. Tensile modulus and strength of the composites increased but elongation-at-break decreased greatly compared to pure PP. Also, the effects of MWNT and SSF on storage modulus and $\tan \delta$ from dynamic mechanical analysis for the composites were examined, and the morphologies of fractured surface and the fillers were observed using a scanning electron microscope.

Keywords: polypropylene, multi-walled carbon nanotube, stainless steel short fiber, surface resistivity, tensile properties.

서 론

도전성 고분자 수지는 전자기 차폐와 정전기 방지 등을 위한 다양한 산업분야에 사용되고 있다. 고분자 수지는 무게가 가볍고 저가이며 비강도가 높고 상대적으로 쉽게 가공할 수 있는 특성을 가지고 있으므로 이를 이용하여 전도성을 가지는 물질을 개발하기 위한 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 고분자 수지에 도전성을 부여하기 위하여 많이 사용하는 방법은 높은 전도성을 가지는 탄소나노섬유,^{1,2} 탄소나노튜브³⁻⁷ 등 나노 사이즈나 탄소 단섬유(short carbon fiber, SCF),⁸⁻¹² 스

테인리스강 단섬유(stainless steel short fiber, SSF)¹³⁻¹⁶ 등 마이크로 사이즈의 필러를 첨가하여 복합화를 시키는 것이다.

고분자 수지가 도전성을 가지기 위해서는 percolation threshold 이상으로 전도성 필러를 첨가하여 고분자 전체에 걸쳐서 연속적인 네트워크를 형성해야 한다. 이와 같은 연속 네트워크를 형성하기 위해서는 전도성 입자가 서로 접촉하거나 100 Å 이하의 대단히 짧은 거리로 떨어져 있어야 한다.¹⁷ 단섬유의 경우 도전성을 부여할 때 영향을 주는 요소로 투입량, 종횡비(aspect ratio), 방향성(orientation), 분산정도 등을 들 수 있다. 전도성 섬유의 투입량은 섬유의 종류에 크게 의존하는데 SCF와 SSF를 비교하면 같은 양에서 $10^5 \Omega$ 의 저항 값을 얻기 위해 SCF의 경우 최소한 10 wt%가 필요한 반면에 SSF는 5 wt%만 필요한 것으로 보고되어 있다.¹⁸ 섬유의

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: jklee@kumoh.ac.kr

길이(혹은 종횡비)도 전도성에 크게 영향을 미친다. 종횡비가 감소하면 percolation threshold 농도가 증가하는데 이는 입자와 입자 사이에 접촉할 수 있는 확률이 줄어들기 때문이다. 또한 SCF의 경우는 아주 단단하고 취약하여 압출이나 사출 동안 쉽게 파단이 되며 이러한 파단은 섬유길이를 감소시키므로 전도성에 악영향을 미친다.¹⁸ 그리고 필러의 균일한 분산도 전도도에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나이다. 섬유의 방향성은 가공 공정과 관련된 특성인 소재의 수축이나 뒤틀림에도 영향을 주며, SSF의 경우는 가공할 동안 변형이 가능하므로 몰딩(molding) 동안 섬유가 휘어질 수 있어 배향이 적게 일어나 우수한 치수 안정성을 보인다.

최근 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)와 SSF를 동시에 첨가한 우레탄 복합체가 우수한 전자과 차폐 성능을 보인다는 연구가 있으며,¹⁵ 탄소섬유와 SSF 강화 polyetherether ketone (PEEK)의 마찰 및 마모 성능이 개선되었다는 보고가 있다.¹⁶ 본 연구에서는 분산에 유리한 이중 스크류식 압출기를 사용하여 폴리프로필렌에 MWNT와 SSF 전도성 필러를 첨가하여 복합체를 제조하고 이들의 표면저항과 기계적 특성을 조사하였다.

실 험

본 연구에서는 폴리프로필렌(PP, LG화학, granule type), 다중벽 탄소나노튜브(MWNT, Hanwha nanotech, CM-150, 순도: 95%, diameter: 10~15 nm), 그리고 스테인레스강 단섬유(SSF, 316A, diameter: 12 μ m, Descartes Co., Belgium)를 사용하였다. SSF의 경우 연속상의 섬유로부터 5 mm의 길이로 절단된 PP 피막이 입혀진 SSF 펠렛을 사용하였으며 Figure 1에 그 형태를 나타내었다.

PP/MWNT 복합체는 MWNT의 함량을 1, 2, 3, 4, 5 wt%

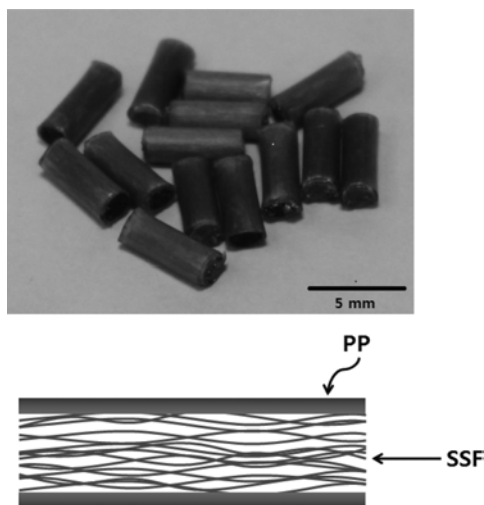


Figure 1. SSF pellets with polypropylene sheath.

로 다양하게 첨가하였으며, PP/MWNT/SSF 복합체는 MWNT 1 wt%에 SSF를 0.5, 1, 3 wt%로 그리고 MWNT 2 wt%에 SSF를 3, 9 wt%로 변화시켜 제조된 시험편에 대한 실험을 진행하였다. 여기서 SSF의 함량은 펠렛 피막의 무게를 제외한 순수 SSF에 대한 것이다.

MWNT와 PP 분말을 혼합하기 위하여 두 물질을 동시에 볼밀(ball mill, WiseMix, 대한과학)로 밀링 처리를 한 것과 MWNT만 먼저 밀링한 후 PP 분말과 혼합하는 두 가지 방법을 비교하였다. 이때 사용한 ball은 재질이 zirconia이며 직경이 5 mm이고 총 300개 사용하여 450 rpm에서 5시간 동안 밀링하였다.

복합 펠렛의 제조. 본 실험에서는 이중 스크류식 압출기(intermeshing co-rotating type, Bautek, BA-1, Ø11 mm, L/D 40)를 이용하여 PP/MWNT 및 PP/MWNT/SSF 복합 펠렛을 제조하였다. 이때 압출조건은 배럴(barrel) 온도를 130~190 °C, 스크류 회전속도는 220 rpm 그리고 원료 투입 회전속도는 60 rpm으로 고정하였다.

표면저항 측정용 시험편 제작. 표면저항 측정을 위한 시험편은 핫 프레스(heating press controller: 국제싸이언)를 이용하여 가로×세로=85 mm×85 mm인 몰드에 제조한 복합 펠렛을 넣어 250 °C의 온도와 10 MPa의 압력을 가하여 30분 동안 유지하였고, 압력이 하강할 때 30분의 추가 압력을 가하여 두께 1~2 mm 판상의 형태로 제작하였다.

인장 및 동역학적 특성 측정용 시험편 제작. 제조한 복합 펠렛을 이용하여 인장 및 동역학적 특성 분석용 시험편을 사출기(Pro-WD80, Dongshin Hydraulics com., Ltd., Korea)를 이용하여 제작하였다. 이때 사출조건은 호퍼에서 노즐까지 온도를 170~200 °C로 설정하였으며, 금형은 상온으로 유지하였고, 냉각시간은 30초로 설정하였다.

분석. 표면저항: 표면저항측정기(4-point probe, TA Instruments, cmt-sr1000n)를 이용하여 10회 측정 후 평균하였다. 이 측정기는 10^{-3} ~ 10^8 Ω /sq 범위의 표면저항을 측정할 수 있다.

인장 특성: 인장 특성을 분석하기 위하여 만능 재료시험기(universal test machine, Shimadzu, AG-50kNX Plus)를 이용하여 상온에서 측정하였다. ASTM D638에 따라 시험을 실시하였으며, 로드셀(load cell)은 50 kN을 사용하였고, crosshead의 속도는 50 mm/min으로 설정하였다. 각 시험별로 5~6회씩 측정하여 평균하였다.

동역학적 특성: 동역학적 특성을 분석하기 위해 동역학 분석기(dynamic mechanical analyzer, Q800, TA Instruments)를 사용하였으며 이로부터 저장탄성률(storage modulus)과 $\tan \delta$ 를 얻었다. 온도 구간은 -50~120 °C이며, 승온 속도는 2 °C/min, 진동수는 1 Hz로 고정시켰으며 진폭 0.2 mm에서 dual cantilever mode로 측정하였다.

모폴로지: 전계방사형 주사전자현미경(field emission

scanning electron microscope: FE-SEM, JEOL/JSM-6700F)을 사용하여 인장시험 후 파단면과 MWNT의 형상을 관찰하였다. 측정에 사용한 모든 시편에 charge dissipation을 위해 표면에 백금(Pt)으로 코팅하였다.

결과 및 토론

MWNT의 전처리 효과. 불밀 효과: MWNT의 불밀링 효과를 조사하기 위하여 밀링 처리를 하지 않은 MWNT와 불밀 처리된 MWNT 1 wt%에 0.5, 1, 3 wt%의 SSF를 첨가하여 제조된 복합체의 표면저항을 측정하였으며 그 결과를 Figure 2(a)에 나타내었다. 이 결과를 보면 1 wt% MWNT만 함유한 복합체(MWNT-1 wt%)와 0.5 wt%의 SSF를 추가로 첨가한 복합체(MWNT-1 wt%/SSF-0.5 wt%)의 경우는 표면저항치가 $10^6 \sim 10^7 \Omega/\text{sq}$ 정도로 MWNT의 밀링 효과가 나타나지 않았다. 그러나 SSF양을 1 wt%(MWNT-1 wt%/SSF-1 wt%)와

3 wt%(MWNT-1 wt%/SSF-3 wt%)로 증가시킨 경우 밀링 처리한 것이 약 $10^2 \Omega/\text{sq}$ 로 저항치가 크게 낮아졌다. 그리고 Figure 2(b)에는 PP 분말과 2 wt%의 MWNT를 동시에 밀링한 것(PP/MWNT-2 wt%, milled together)과 MWNT만 밀링한 후 2 wt%를 PP 분말과 혼합(MWNT-2 wt%+PP, milled alone)하여 압출공정으로 복합 펠렛을 제조하고 이것을 핫 프레스로 시험편을 제작하여 표면저항을 측정한 결과를 나타내었다. PP와 MWNT를 동시에 밀링하였을 때 약 $10^5 \Omega/\text{sq}$ 의 표면저항 값을 나타내었으나 MWNT만 밀링한 경우는 약 $10^2 \Omega/\text{sq}$ 로 크게 감소하였다. 따라서 MWNT만 밀링하고 이를 PP와 혼합하여 사용하는 것이 가장 효과적이며, 밀링된 MWNT에 SSF가 첨가될 경우 표면저항을 낮추는데 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

모폴로지 관찰: Figure 3(a)와 (b)는 각각 MWNT를 불밀로 처리하기 전과 후의 모폴로지를 SEM으로 관찰한 사진이다. 불밀링 전 (a)에는 둥근 형태의 큰 입자와 작은 입자가 동시에 존재하고 있으나, 5시간 동안 밀링을 한 후 (b)에는 입자가 미세해지며 입자 모양도 날카로운 형태로 변화되었다. 이러한 밀링은 수지 내 MWNT의 분산성 향상에 크게 기여한 것으로 보인다.

또한 본 연구에서는 PP와 MWNT를 혼합하기 위하여 이들을 동시에 불밀 처리한 것과 MWNT만 밀링한 후에 PP와 혼합하는 두 방식으로 처리한 복합체에 대한 전기저항을 측정하여 비교하였다(Figure 2(b) 참조). 그 결과 후자의 방법을

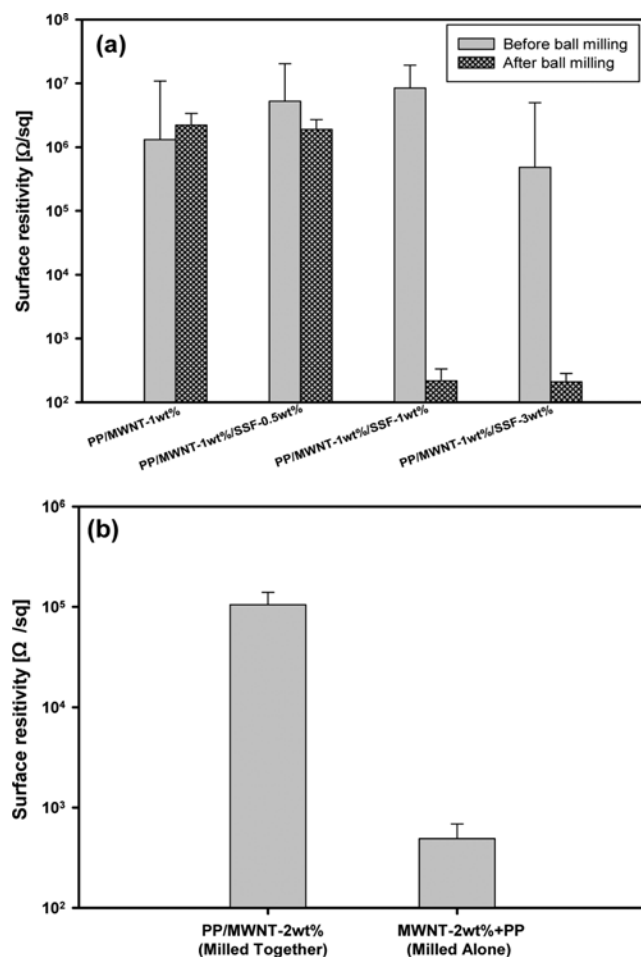


Figure 2. Effects of ball milling of MWNT on surface resistivity: (a) before and after milling; (b) milling MWNT with PP granule (PP/MWNT-2 wt%) and milling MWNT alone followed by mixing with PP granule (MWNT-2 wt%+PP).

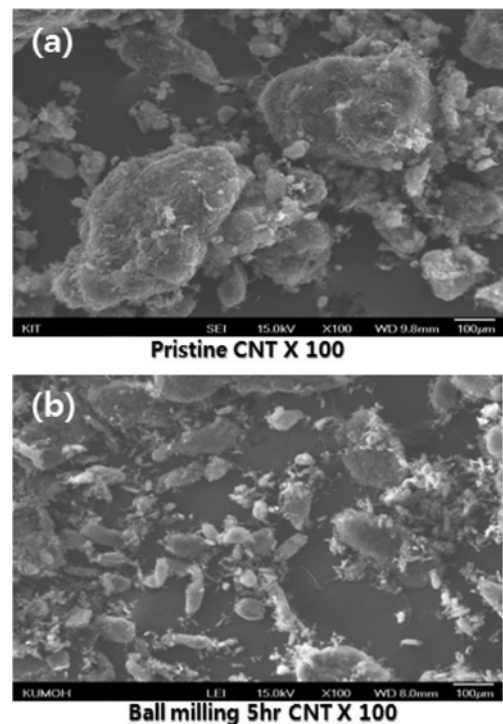


Figure 3. SEM pictures of MWNT (a) before; (b) after ball milling.

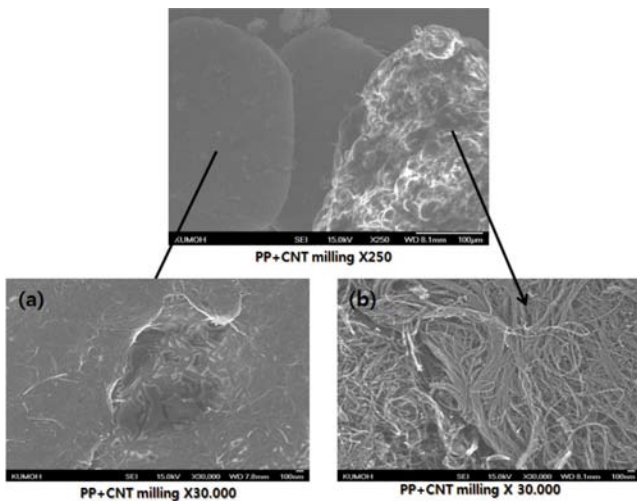


Figure 4. Observation of surface morphology after ball milling of MWNT with PP granule at $\times 250$: (a) PP granule surface at $\times 30000$; (b) MWNT surface at $\times 30000$.

사용하였을 때 동일한 첨가제 함량에서 전기저항이 훨씬 낮아 더 효과적인 방법으로 밝혀져 본 연구에서는 이 방법을 채택하여 모든 실험을 진행하였다. 이러한 효과에 대한 이유를 조사하기 위하여 SEM으로 PP 분말과 MWNT를 동시에 밀링한 후의 모폴로지를 관찰하여 Figure 4에 나타내었다. 이 사진(위)의 좌측은 PP 분말이며 우측은 MWNT 입자이다. 좌측 PP 입자의 고배율 사진인 Figure 4(a)를 보면 입자 표면에 MWNT로 보이는 것이 존재하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 볼밀 과정 중에 서로간의 마찰로 인해 열이 발생하여 PP 분말 표면이 용융되고 여기에 MWNT가 부착하여 나타난 것으로 판단된다. 그리고 Figure 4(b)의 MWNT 입자에는 마찰 열에 의해 용융된 PP가 MWNT의 틈 사이로 침투해 있는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 PP 분말과 MWNT를 동시에 밀링할 경우 마찰열로 인한 PP 입자 표면의 용융과 더불어 입자 자체의 탄성으로 인하여 MWNT의 밀링 효과가 감소하는 것으로 생각된다.

전기저항 측정. MWNT의 함량 변화: Figure 5에는 MWNT의 함량을 1에서 5 wt%까지 변화시켰을 때의 표면저항치를 나타내었다. 1 wt%에서는 표면저항치가 $2.28 \times 10^6 \Omega/\text{sq}$ 로 측정되었으며, 2 wt%로 증가시켰을 때 저항치가 $4.78 \times 10^2 \Omega/\text{sq}$ 로 급격히 낮아졌다. 그리고 최대량인 5 wt%에서는 $51.6 \Omega/\text{sq}$ 까지 감소하였다. 1과 2 wt% 사이에서 관찰되는 저항의 급격한 감소는 MWNT 간에 접촉이 이루어져 연속 네트워크가 형성되는 percolation이 되었다는 것을 의미한다. PP에 펠렛형의 MWNT를 이축압출기를 이용하여 제조한 복합체에서 percolation threshold는 약 3 wt%에서 나타났다.¹⁹

SSF의 함량 변화: 본 연구에서는 SSF가 표면저항에 미치는 영향을 알아보기 위하여 MWNT를 첨가하였을 때

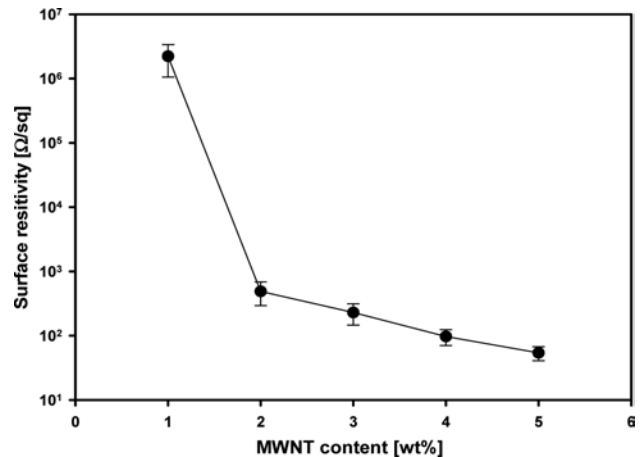


Figure 5. Surface resistivity vs. MWNT content.

percolation이 일어나는 함량인 2 wt% 보다 낮은 1 wt%의 MWNT에 SSF를 0.5, 1, 3 wt%를 첨가하여 제작된 시험편에 대한 저항을 측정한 결과를 Figure 6에 나타내었다. SSF를 최소량인 0.5 wt% 첨가한 경우는 저항치가 약 $10^6 \Omega/\text{sq}$ 로 SSF를 첨가하지 않은 것과 거의 비슷하여 SSF 첨가 효과가 없었다. 그러나 1 wt%로 증가시켰을 때 저항치는 $2.18 \times 10^2 \Omega/\text{sq}$ 로 현저하게 낮아졌으며 Figure 5의 2 wt% MWNT만 첨가한 경우와 비교하였을 때 약 54%가 감소하였다. 그리고 3 wt%의 SSF를 첨가한 경우는 표면저항치가 $2.10 \times 10^2 \Omega/\text{sq}$ 로 1 wt% SSF와 거의 변화가 없었다. 이는 Figure 5의 MWNT만 첨가한 경우와는 달리 percolation 후 추가적인 SSF의 첨가가 표면저항치에 거의 영향을 주지 않는 것을 의미한다. 그 이유는 표면적이 매우 큰 나노 사이즈의 MWNT는 첨가량이 증가함에 따라 percolation network에서 서로간의 접촉 확률이 증가하지만, 마이크론 사이즈의 SSF는 MWNT와 비교하

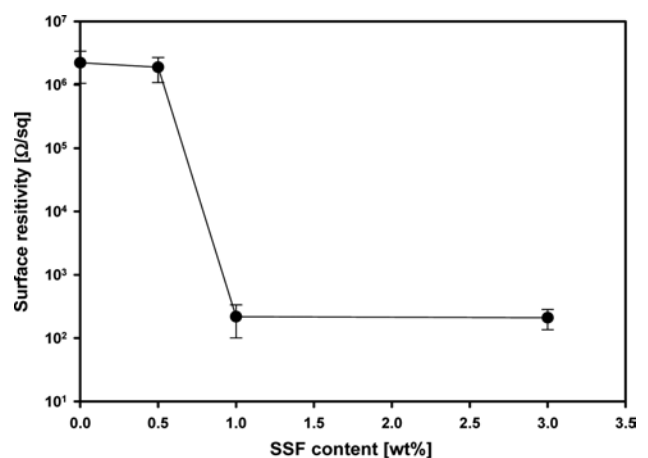


Figure 6. Surface resistivity vs. SSF content in a PP/MWNT-1 wt% composite.

여 표면적이 훨씬 작으므로 전기전도도에 영향을 줄 정도의 접촉이 추가로 일어나지 않아 나타난 현상으로 생각된다. 위의 결과로부터 SSF를 첨가하면 percolation threshold가 더 낮은 함량의 MWNT에서 나타나며, SSF를 MWNT와 함께 사용하면 소량의 첨가로 표면저항을 효과적으로 낮출 수 있는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 SSF의 효과는 percolation threshold 농도 이하로 매트릭스 내에 분포된 MWNT 입자 사이를 SSF가 이어주는 가교 역할을 수행하여 전기전도성을 부여한 것에 기인한 것으로 판단된다.

기계적 특성. 인장 특성: Figure 7에는 순수 PP와 PP/MWNT-1 wt%, PP/MWNT-1 wt%에 SSF를 0.5 및 1 wt% 첨가한 것 그리고 PP/MWNT-2 wt%와 여기에 SSF를 3, 9 wt% 첨가하여 제작된 복합체에 대한 인장 특성을 나타내었다. Figure 7(a)에서 알 수 있는 바와 같이 순수 PP의 경우는 약 1200 MPa의 인장탄성률을 가지며 MWNT를 1과 2 wt%를 첨가하였을 때 각각 약 1400과 약 1800 MPa로 상승하였다. 이는 PP 매트릭스 내에서 MWNT가 보강제 역할을 수행하고 있다는 것을 의미한다. 또한 PP/MWNT-1wt%에 SSF를 0.5 및 1 wt% 첨가한 경우 두 시험편 모두 인장탄성률이 약 1400 MPa로 SSF 양에 관계없이 거의 동일한 값을 보였다. 또한 PP/MWNT-2 wt%에 SSF를 3, 9 wt%를 첨가하였을 때는 각각 약 1700과 약 1500 MPa로 다소 감소하였다. 따라서 PP/MWNT 복합체에서 SSF가 소량인 0.5 및 1 wt% 경우 거의 영향을 미치지 않으나 3, 9 wt%과 같이 양을 증가시킬 경우 SSF는 기계적 특성을 다소 감소시킨다. 이는 SSF가 PP 수지와와의 계면결합력이 약하여 나타나는 것으로 생각되며, PP와 SSF의 약한 결합력은 이후에 언급할 SEM 파단면을 관찰할 수 있다. Figure 7(b)의 인장강도도 위의 인장탄성률과 유사한 경향을 보였다. 그리고 Figure 7(c)의 파괴점 신장률(elongation-at-break)을 보면 MWNT와 SSF를 첨가하였을 때 모든 시험편에서 약 10% 내외로 낮아졌으며 필러의 함량에 크게 의존하지 않았다.

동역학적 분석: Figure 8에는 DMA 분석으로부터 얻어진 PP/MWNT-1 wt%/SSF-1 wt%에 대한 저장탄성률(E')과 $\tan \delta$ 곡선을 나타내었다. 본 연구에서 사용한 모든 시험편은 유사한 DMA 곡선을 보였으며, 유리질에서 고무상으로 변화하면서 저장탄성률이 급격히 낮아지고 $\tan \delta$ 곡선의 약 10 °C 부근에서 유리전이에 해당하는 피크가 나타났다. 그리고 Figure 9(a)와 (b)에는 모든 시험편에 대한 유리질 상태(-40 °C)와 고무질 상태(100 °C)의 저장탄성률 값을 비교하여 나타내었다. 모든 복합체의 -40과 100 °C에서 저장탄성률 값은 순수 PP에 비해 높은 값을 나타내었다. 그리고 $\tan \delta$ 곡선의 피크 온도로부터 결정된 유리전이온도는 9~11 °C 범위에서 큰 차이를 보이지 않았다.

MWNT/SSF 복합체 파단면. Figure 10에는 MWNT와 SSF가 첨가된 복합체에 대한 인장시험 후의 파단면을 관찰

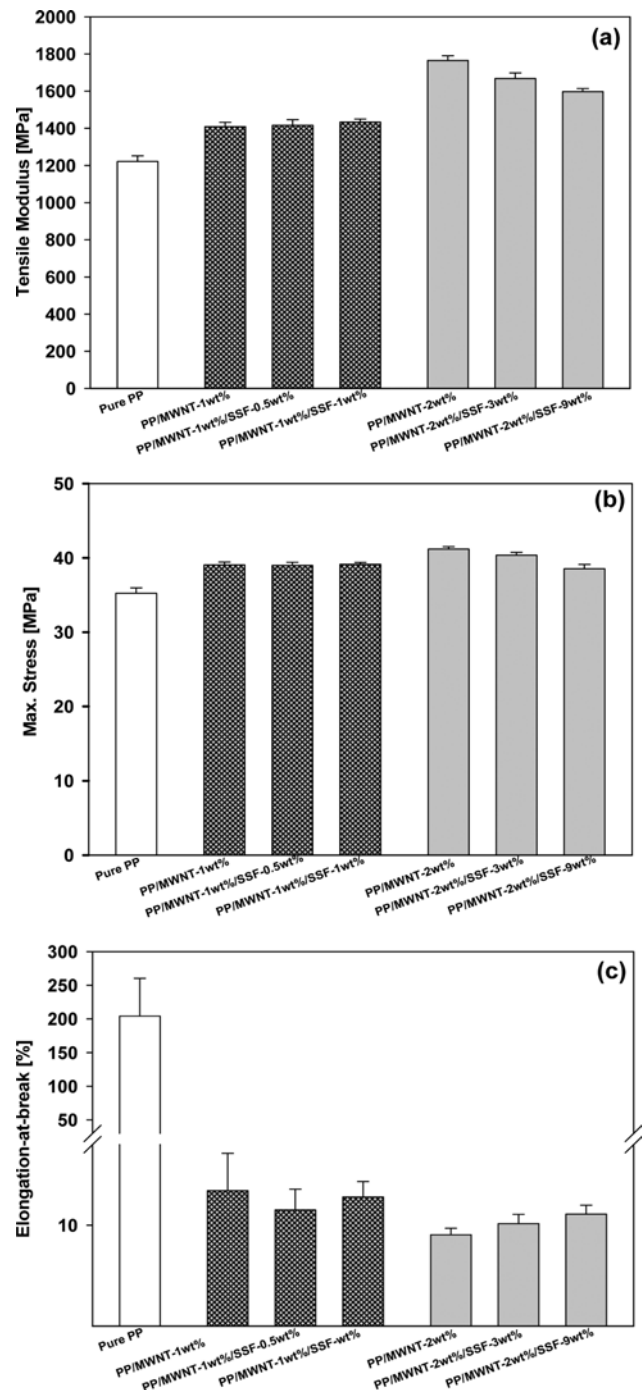


Figure 7. Comparison of (a) tensile modulus; (b) tensile strength; (c) elongation-at-break for different specimens.

한 것이다. SSF가 전체 매트릭스에 걸쳐 균일하게 분포되어 있으며, 고배율에서는 MWNT가 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있었다. 본 연구에서 적용한 MWNT의 불밀링 처리와 이축 스�크류식 압출기의 사용이 필러들의 균일한 분산에 기여한 것으로 생각된다. 이 사진의 SSF 주위를 보면 공간이

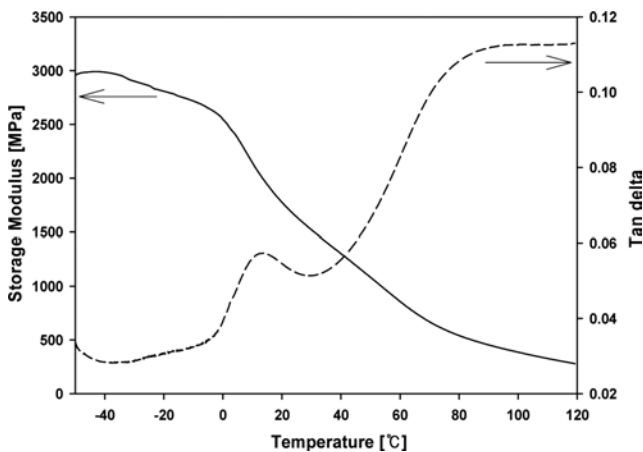


Figure 8. Typical DMA storage modulus and $\tan \delta$ curves for a PP/MWNT-1 wt%/SSF-1 wt% composite.

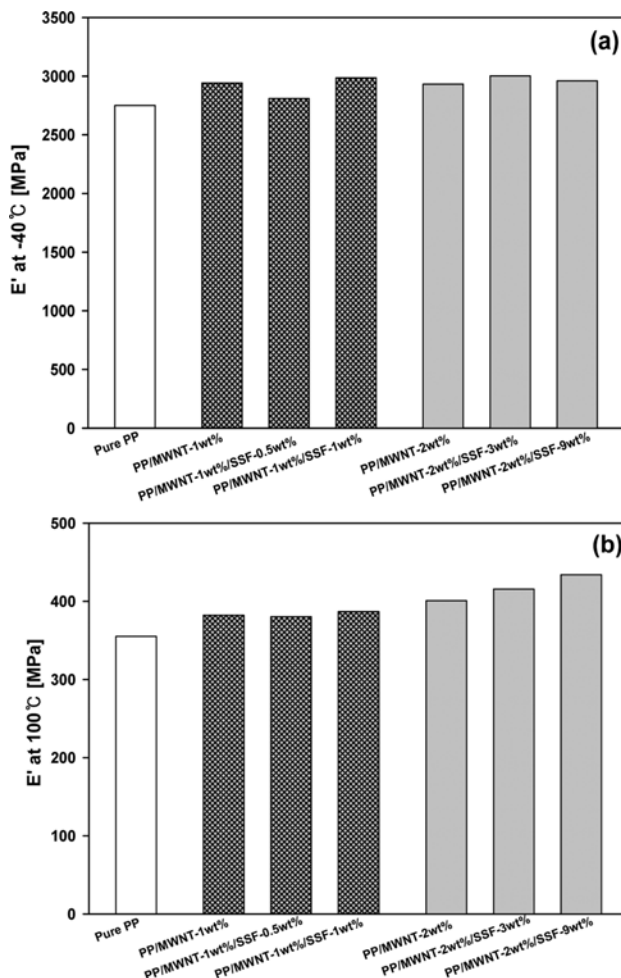


Figure 9. Comparison of storage modulus (a) at -40 °C; (b) at 100 °C.

생성되어 있는 것을 볼 수 있는데 이는 SSF와 PP와의 계면 결합력이 낮아 나타나는 현상이다. 그리고 일부 SSF는 휘어

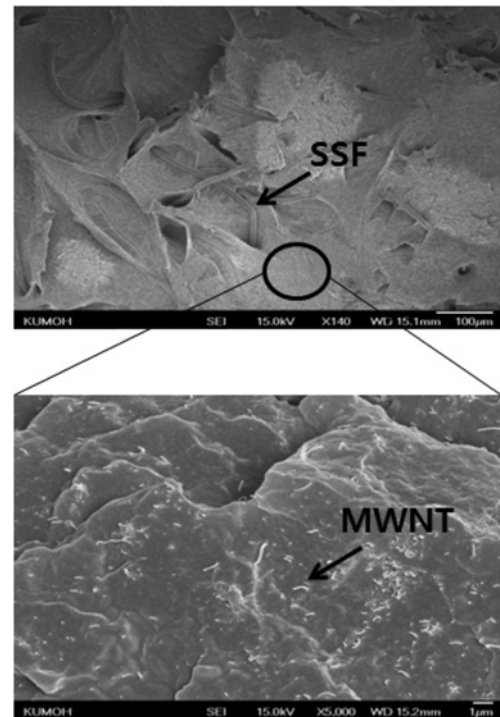


Figure 10. Surface morphology of a PP/MWNT-2 wt%/SSF-3 wt% composite.

져 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 SSF의 경우는 단단하고 취약한 특성을 가지고 있는 SCF와는 달리 가공시 손상이 발생하지 않아 전기저항과 기계적 성질에 긍정적 효과를 나타낸 것으로 생각할 수 있다.

결론

이축 압출기를 이용하여 다양한 함량의 다중벽 탄소나노튜브(MWNT)와 스테인레스강 단섬유(SSF)를 첨가한 폴리프로필렌(PP) 복합체를 제조하였으며 이에 대한 표면저항 및 기계적 특성을 조사하였다. 표면저항 측정을 통하여 MWNT는 볼밀 처리한 후에 사용하였으며, SSF는 PP로 피막화된 것을 사용하였다. MWNT 단독으로 사용하여 함량을 변화시킨 복합체에 대한 표면저항 측정 결과 1~2 wt%에서 percolation threshold가 일어났다. 그리고 percolation이 되지 않은 MWNT 1 wt%에 SSF를 1 wt% 첨가하면 저항치가 급격하게 떨어짐을 알 수 있었다. 이는 나노사이즈의 MWNT와 마이크론 사이즈의 SSF를 동시에 사용하면 저항치를 낮추는데 효과적이라는 것을 의미하며, SSF가 전기전도가 가능하도록 분산된 MWNT 입자를 이어주는 가교 역할을 수행하기 때문으로 생각된다. 또한 기계적인 성질인 인장탄성률 및 인장강도가 순수 PP에 비하여 증가하였으며, SSF를 첨가하였을 때 거의 변화가 없거나 다소 감소하는 경향이 있었으나 모든 함량에서

순수 PP보다 높은 값을 가졌다. 이때 파괴점 신장률은 모든 복합체에서 순수 PP에 비해 낮게 나타났다. SEM을 이용하여 파단면을 관찰한 결과 MWNT와 SSF가 균일하게 분포되어 있어 본 연구에서 사용한 볼밀링과 이축 압출기가 분산에 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임(2012H1B8A-2026258).

참 고 문 헌

1. M. H. Al-Saleh and U. T. Sundararaj, *Carbon*, **47**, 2 (2009).
2. B. O. Lee, W. J. Woo, and M. S. Kim, *Macromol. Mater. Eng.*, **286**, 114 (2001).
3. N. C. Das and S. Maiti, *J. Mater. Sci.*, **43**, 1920 (2008).
4. M. Arjmand, M. Mahmoodi, G. A. Gelves, S. Park, and U. T. Sundararaj, *Carbon*, **49**, 3430 (2011).
5. H. M. Kim, K. Kim, C. Y. Lee, J. Joo, S. J. Cho, H. S. Yoon, D. A. Pejakovic, J. W. Yoo, and A. J. Epstein, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 589 (2004).
6. Y. L. Yang, M. C. Gupta, K. L. Dudley, and R. W. Lawrence, *Nano. Lett.*, **5**, 2131 (2005).
7. M. Arjmand, T. Apperley, M. Okoniewski, and U. T. Sundararaj, *Carbon*, **50**, 5126 (2012).
8. T. McNally, P. Boyd, C. McClory, D. Bien, I. Moore, B. Millar, J. Davidson, and T. Carroll, *J. Appl. Polym. Sci.*, **107**, 2015 (2008).
9. V. S. Mironov, M. Park, C. Choe, J. Kim, S. Lim, and H. J. Ko, *J. Appl. Polym. Sci.*, **84**, 2040 (2002).
10. G. H. Motlagh, A. N. Hrymak, and M. R. Thompson, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **45**, 1808 (2007).
11. C. J. Kim, H. D. Choi, K. S. Suh, and H. G. Yoon, *Polymer(Korea)*, **27**, 201 (2003).
12. K. H. Wong, S. J. Pickering, and C. D. Rudd, *Compos. Part A*, **41**, 693 (2010).
13. C. S. Chen, W. R. Chen, S. C. Chen, and R. D. Chien, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, **35**, 744 (2008).
14. X. Sun, Y. Cheng, and H. Wu, *Adv. Mater. Res.*, **472**, 748 (2012).
15. H. Chang, M. J. Kao, K. D. Huang, C. G. Kuo, and S. Y. Huang, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **11**, 1754 (2011).
16. H. Fu, B. Liao, F. J. Qi, B. C. Sun, A. P. Liu, and D. L. Ren, *Compos. Part B*, **39**, 585 (2008).
17. J. Smuckler and P. Finnerty, *Proceedings of the American Chemical Society Meeting*, Chicago, 1983.
18. S. Ward, A. Bolvari, and B. Gorry, *SAMPE J.*, **26**, 9 (1990).
19. D. S. Jeong and B. U. Nam, *Polymer(Korea)*, **35**, 17 (2011).