

나일론66/탄소필러 복합체의 물리적 성질에 대한 제조방법의 영향

김유신 · 신경민 · 심창업* · 이정석* · 김연철†^{ORCID}

공주대학교 신소재공학부 고분자공학전공(IT융합기술연구소), *에나인더스트리(주)
(2018년 2월 9일 접수, 2018년 3월 6일 수정, 2018년 3월 21일 채택)

Effect of Fabrication Methods on the Physical Properties of Nylon 66/Carbon Filler Composite

Yu Shin Kim, Kyung Min Shin, Chang Up Sim*, Jung Seok Lee*, and Youn Cheol Kim†^{ORCID}

Major in Polymer Science and Engineering(Institute of IT Convergence Technology), Kongju National University,
1223-34 Cheonan way, Cheonan 31080, Korea

*ENA Industry, 144 mojeon 1 way Seok-eup, Cheonan 31045, Korea

(Received February 9, 2018; Revised March 6, 2018; Accepted March 21, 2018)

초록: 본 연구에서는 나일론66/탄소필러 복합체의 기초 물성 및 전자파 차폐 성능에 대한 제조방법의 영향을 고찰하였다. 탄소필러 종류로는 카본블랙(CB), 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT), 니켈코팅 탄소섬유(Ni-CF)가 사용되었다. 제조방법으로는 CB/MWCNT에 대한 마스터배치(master-batch, MB)와 Ni-CF 투입방법을 고려하였다. MB의 CB와 MWCNT 함량은 20 wt%로 고정하여 다이 온도 기준으로 280 °C의 이중압출기(twin screw extruder)에서 제조하였다. 또한 Ni-CF 투입방법은 주 투입구(main feeder)와 부 투입구(side feeder)로 달리하여 복합체를 제조하였다. MB를 적용한 나일론 66/CB/CNT/Ni-CF 복합체의 경우, 용융 흐름성과 전기적 특성이 개선됨을 복소점도 및 표면저항으로부터 확인하였고, Ni-CF가 부 투입구에 투입되는 경우 전자파 차폐 성능이 큰 폭으로 증가하는 것을 확인하였다.

Abstract: In this study, the effect of fabrication method on the basic properties and electromagnetic interference (EMI) shielding performance of the nylon66/carbon filler composites was discussed. The carbon fillers such as carbon black (CB), multi-walled carbon nanotube (MWCNT), and nickel coated carbon fiber (Ni-CF) were used. The master-batch (MB) of CB/MWCNT and feeding method of Ni-CF were used as fabrication methods. The concentration of CB and MWCNT in MB was fixed at 20 wt% and MBs were fabricated by using a twin screw extruder at die temperature of 280 °C. The composites were prepared with two different feeding methods that Ni-CFs were fed separately at main and side feeder. The improvements of melt flow and electrical properties were confirmed from complex viscosity and surface resistance in the case of nylon 66/CB/CNT/Ni-CF composites fabricated through MB, and EMI shielding performance increased largely when Ni-CF was fed into the composites at side feeder.

Keywords: nylon66, carbon filler, electrical property, feeding method, master-batch.

서 론

최근의 자동차에 기존의 내연기관 자동차에 장착되지 않았던 전기 전자 부품들이 상대적으로 많이 장착됨에 따라 자동차 전자부품들의 안전성을 확보하고 각 전자부품간의 상호간섭 효과를 파악하기 위한 전자파 적합성 기준이 강화되고 있다. 또한 사용 전자기기의 기능 확대에 따라 전자파 사용대역이 점점 고주파 대역으로 이동하는 등 일상생활에서 전자

기와 공해가 꾸준히 증가하는 추세이다. 또한 전자기기에서 방출되는 전자파에 따른 차량 전장 부품의 성능저하, 안전사고 등에 대한 우려가 크게 증가하면서, 심각한 사회 문제로 대두되고 있다. 따라서 자동차 내 전장부품에서 발생하는 전자파의 차폐 필요성이 점차 증대되고, 전자파 방해에 대한 국제적인 규제는 점차 강화되고 있으며 여기에 대응하기 위하여 많은 노력이 이루어지고 있다. 이러한 노력은 자동차에 적용 증가가 예상되는 전장부품에서 발생하는 전자파로 주변 전자기기의 오작동을 초래할 수 있고, 센서 및 컨트롤러 등 각종 전장부품에서의 오작동은 급발진 등 자동차 안전문제와 더불어 방출된 전자파가 인체에 발열을 유발하는 등의 직접적인 피해 또한 가능하기 때문이다.¹ 전자파 간섭과 방사에

†To whom correspondence should be addressed.
younkim@kongju.ac.kr, ORCID[®]0000-0003-1094-7460
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

의해 자동차 급발진 및 오작동 등의 문제를 유발하는 것을 전자과장에(electromagnetic interference, EMI)라 하며, EMI의 영향은 정밀도가 크고 밀집도가 높은 부품을 많이 사용하는 장비일수록 민감하기 때문에 소형화, 고집적화, 고속화 및 다기능화를 지향하는 현대 전기·전자 및 통신산업 등에 있어서 장애요소로 대두되고 있다.² 따라서 전자과장에 대한 대책방안으로 엄격한 규제가 마련되어 있으며, 전자과 차폐 기능을 가진 자동차부품 소재에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다.³⁻⁸ 탄소나노튜브(carbon nanotube, CNT), 카본블랙(carbon black, CB), 탄소섬유(carbon fiber), 그래핀(graphene) 등과 같은 탄소재료는 전도성 성질이 우수하기 때문에 전자과 차폐에 매우 효과적이며,^{9,10} 전자과 차폐를 목적으로 하는 자동차용 고분자 복합소재에 전도성 필러로 많이 사용되는 재료이다. 본 연구실에서는 이들 소재를 이용하여 자동차 부품에서 요구하는 전자과 차폐 성능 40 dB 이상을 만족하는 탄소 필러 함량에 대한 연구를 진행한 결과 CNT 단독보다 CB를 혼합사용 시 CNT의 연결되지 않은 전도성 가지(dead network branches) 사이에 bridge 역할을 하여 전기적 특성에 상승효과(synergistic effect)를 나타내는 것으로 보고되었고,¹¹ 탄소 필러의 고함량에 의한 용융 흐름성 문제로 가공 조제에 대한 연구가 추가적으로 진행되었으며,¹² 이 과정에서 전기적 특성 등이 복합체 제조방법에 따라 달라지는데 이는 탄소 필러의 분산성, 섬유의 중형비 및 배향 등에 기인하는 것으로 확인되었다. 고분자 복합체의 용융 흐름성과 물성 등은 탄소 필러(CB, CNT 등)의 분산성과 연관이 있고, 필러 분산성 향상을 위해서는 필러를 고농축시킨 마스터배치(master-batch, MB)의 적용여부가 중요하다. 또한 섬유의 중형비 및 배향은 전자과 차폐 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 파악되고, 섬유의 중형비 및 배향은 복합체 및 시편의 제조방법에 따라 크게 차이 나는 것으로 이전의 연구에서¹¹⁻¹⁴ 고찰되었다. 자동차 전장부품의 경우 일정 수준 이상의 내열도를 요구하기 때문에 베이스수지로 지방족 폴리아미드계 소재가 주로 사용되고 있으며, 이들 중 나일론66이 주로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서는 나일론66 수지에 CB, MWCNT, Ni-CF 등 전도성 필러를 혼합하여 나일론66/CB/CNT/Ni-CF 복합체를 제조하고 물성을 평가함에 있어서, ① CB와 MWCNT의 MB 적용, ② Ni-CF 투입 시 주 투입구와 부 투입구에 의한 투입 방법 및 평가 등을 통하여 복합체의 제조방법이 물성에 미치는 영향을 체계적으로 고찰하고자 하였다.

실 험

재료. 나일론66은 선진폴리머사(Korea)의 MI 73 g/10 min, 용점 260 °C, 밀도 1.13 g/cm³, 표면저항 1×10⁹ ohm인 A3W를 사용하였고, 카본블랙(carbon black, CB)은 평화약품사(Korea)의 직경 34 nm, pH 9, DBP Absorption 495 mL/100 g

인 KETJENBLACK EC 600JD를, 다중벽 탄소나노튜브(multi walled carbon nano tube, MWCNT)는 CNT사(Korea)의 직경 10~40 nm, 길이 1-25 μm, 순도 93%인 CTUBE 100을 사용하였으며, 니켈 코팅된 탄소섬유(nickel coated carbon fiber, Ni-CF)는 불스원신소재사(Korea)의 직경 7 μm, 밀도 2.65~3 g/cm³, 전기전도도 ≥8.2×10³ Ω/cm, 인장강도 ≥2.5 GPa이며 길이가 6 mm인 MCF chop carbon fiber를 사용하였다. 산화방지제는 Ciba Specialty Chemicals사(Korea)의 IRAGANOX 1010을 0.3 wt%로 적용하였다. 시료를 녹이는데 쓰인 용매는 삼전순약(Korea)의 포름산(formic acid, 85.0%)을 사용하였다.

CB, MWCNT MB 및 복합체 제조. 나일론66, MWCNT, CB를 80 °C 진공오븐에서 6시간 이상 건조시킨 후 이축압출기(바우테크 BA-19, L=760 mm, D=19 mm, L/D=40)를 사용하여 150 rpm, 280/280/280/280/280/280/270/265 °C의 조건에서 CB와 MWCNT 함량을 각각 20 wt%로 하여 MB를 제조하였으며, 최종적으로 나일론66/CB/CNT/Ni-CF 복합체에 CB와 MWCNT의 함량이 2 wt%가 되도록 MB와 동일한 가공조건으로 복합체를 제조하였다. 이때 Ni-CF의 함량은 이전의 타 연구결과를¹⁵ 고려하여 20 wt%로 고정하였다. MB를 적용한 시편과 구분하기 위해 MB를 적용하지 않은 복합체를 PA/CF로 명명하였다. MB 적용 여부에 따른 복합체의 물성 평가에는 압축시편이 이용되었으며, 압축시편은 280 °C의 가열프레스를 이용하여 제작하였다.

Ni-CF 투입 방법에 따른 복합체 제조 및 시편제작. 나일론66/탄소필러 복합체 제조 시 나일론66, 탄소 필러(MB 포함)들은 80 °C 오븐에서 6시간 이상 충분히 건조한 후, 나일론66, MB, Ni-CF를 주 투입구에 한 번에 투입하는 방법과 나일론66과 MB는 주 투입구에 Ni-CF는 부 투입구에 분리 투입하는 방법으로 달리하여 MB 제조방법과 동일한 가공조건에서 이축압출기를 이용하여 나일론66/CNT/CB/Ni-CF 복합체를 제조하였다. 이때 부 투입구는 주 투입구로부터 다이 방향으로 485 mm 떨어진 곳에 위치하고, CNT와 CB는 함량은 본 연구실의 기존 연구결과¹¹ 임계농도인 2 wt%로 고정하였으며, Ni-CF의 함량은 전자과 차폐 성능 40 dB를 만족하는 수준인 20 wt% 이상에서 30 wt%로 변경하여 투입하였고, 산화방지제는 모든 시편에 대해 0.3 wt%를 첨가하였다. 기계적 물성 및 전기적 특성을 측정하기 위한 시편은 사출기(SeiEX 130)를 이용하여 50 rpm, 285 °C에서 제작하였다.

분석 및 측정. 나일론66/탄소필러 복합체의 인장특성은 만능시험기(Qmesys QM100T, universal testing machine, UTM)를 이용하여 압축시편의 경우 1 mm 두께, 사출시편의 경우 3 mm 두께의 dog-bone 형태의 시편으로 cross head speed 5 mm/min으로 측정하였다. 굴곡시험은 압축시편의 경우 50×13×2 mm, 사출시편의 경우 125×12×6 mm를 3점 굽힘시험방법으로 cross head speed 1 mm/min에서 측정하였다. 인장시험은 ASTM D638을, 굴곡시험은 ASTM D790을 준용

하였다. 복합체의 가공특성을 상대적으로 비교하기 위해 복소점도를 측정하였으며, 직경 25 mm의 원형 압축시편을 동적유변학측정기(Anton paar MCR301)를 이용하여 280 °C에서 0.9 mm gap 간격의 parallel plate, 주파수 0.01-100 Hz 범위에서 측정하였고, 변형(strain)은 strain sweep 결과 선형 점탄성이 유지되는 20%로 고정하였으며, 흐름성을 확인하기 위해 오션과학의 용융지수 측정기(Coad. 1001)를 이용하여 ASTM D1238 규격을 준용하여 275 °C, 2.16 kg 조건에서 측정하였다. 섬유 형태학적 분석을 위해 주사전자현미경(Tescan Mira3, scanning electron microscope, SEM)과 광학현미경(optical microscope, OM, Nanoinside MSDM-1250)을 이용하였다. SEM은 시편의 관찰표면을 금박 코팅을 하여 가속전압 20 kV으로 관찰하였고, OM은 시료를 상온에서 포름산에 녹여 100배율 렌즈를 이용하여 촬영하였다. 표면저항은 표면저항 측정기(LORESTA-GP사 MCP-T610, resistivity tester)를 이용하였으며, 표면저항실험은 두께 2 mm, 2×2 cm의 정사각형 모양의 시편으로 4-Point Probe로 측정하였다. 전자파 차폐성능을 측정하기 위해 KS C 0304의 시험규격에 따라 차폐효과시험지그(ELECTRO-METRICS사 EM-2107A(shielding effectiveness test fixture))를 이용하였으며, 측정된 결과 분석은 네트워크분석기(Agilent사 E5071C, network analyzer)를 사용하였다. 차폐시편은 두께 2 mm, 지름 14 cm 이상의 원형 모양의 시편으로 사출성형으로 제조하여 사용하였다.

결과 및 토론

마스터배치 적용에 따른 나일론66/CNT/CB/Ni-CF 복합체의 물성. 기존의 연구결과들에 따르면, 열가소성 고분자/탄소필러 복합체의 전기적 특성에 대한 탄소계 필러의 분산이 매우 중요한 것으로 알려져 있다.¹⁶ 마스터배치 적용이 CB와 MWCNT의 나일론66 내의 분산성 및 물성에 미치는 영향을 파악하기 위해 마스터배치가 적용된 복합체의 물성을 평가하였다. Figure 1은 CB와 MWCNT에 대해 마스터배치를 이용하여 제조한 나일론66/CNT/CB/Ni-CF 복합체의 압축성형 시편의 기계적 물성을 비교한 것이다. CB(MB)는 CB에 MB가 적용된 경우이고, CNT(MB)는 CNT에 MB가 적용된 경우이며, CB(MB)+CNT(MB)는 CB와 CNT 모두에 MB가 적용된 경우를 나타낸다. 나일론66/CNT/CB/Ni-CF, 나일론66/CNT/CB(MB)/Ni-CF, 나일론66/CNT(MB)/CB/Ni-CF, 나일론66/CNT(MB)+CB(MB)/Ni-CF에 대한 인장강도는 각각 19.6, 26.5, 30.1, 29.2 MPa로 MB 적용 시 인장강도가 증가함을 알 수 있었고, 특히, CNT 단독으로 MB가 적용된 복합체의 인장강도가 가장 큰 폭으로 증가하였다. 일반적으로 탄소필러들 중에서 CNT의 경우 분산이 가장 어려운 것으로 알려져 있는데, CNT가 MB로 적용될 때 높은 전단력을 받아서 1차적으로 CNT의 분배혼합(distributive mixing)과 함께 길이가

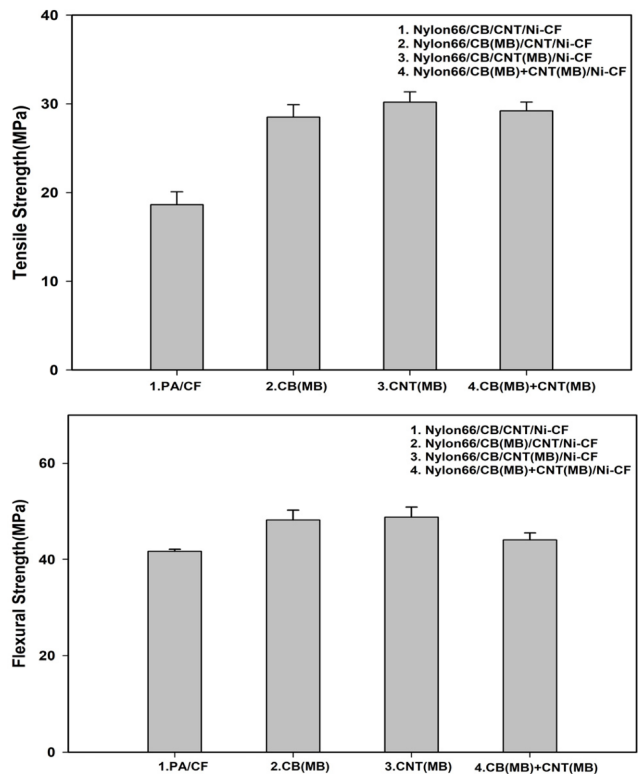


Figure 1. Mechanical properties of nylon66/CB/CNT/Ni-CF (20 wt%) composites fabricated by master batch.

짧아지면서 2차 압출 시 분산성이 향상되기 때문에 해석할 수 있다. 굴곡강도의 경우도 인장강도와 마찬가지로 마스터배치가 적용되지 않은 복합체에 비해 약간 증가하는 것을 볼 수 있었고 CNT가 마스터배치로 적용된 시편에 대해 보강효과가 가장 우수하게 나타났다.

Figure 2는 마스터배치 적용 여부에 따른 복합체의 용융지수를 나타낸 것이다. 마스터배치가 적용된 복합체의 용융지수가 증가하고 있는데, 이는 복합체의 가공성 측면에서 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 이와 같은 용융지수의 증가는 두 가지 원인으로 예상되는데, 첫 번째는 마스터배치를 이용한 복합체 제조 시 분자량의 감소 가능성이다. MB 제조에 사용된 나일론66에서 분자량 감소가 나타날 수 있으나, 앞에서 언급한 MB가 적용된 복합체의 기계적 물성이 증가하는 결과에 비추어 볼 때 분자량의 감소가 존재한다 하여도 물성에 영향을 주는 수준은 아닌 것으로 판단된다. 두 번째는 필러의 분산과 관련된 것으로 마스터배치를 적용하지 않은 복합체의 경우 탄소필러들의 뭉침 현상으로 인해 MI가 낮는데 반해, 마스터배치를 적용한 복합체의 경우 필러 뭉침이 감소하여 매트릭스 수지 내에 고르게 분포되어 수지의 흐름특성이 효과적으로 반영되기 때문에 MI가 증가한 것으로 유추할 수 있다. 특히 CNT를 마스터배치한 복합체의 경우 흐름성이 크게 증가하였는데, 이는 MB 제조과정에서 중형비가 존재하

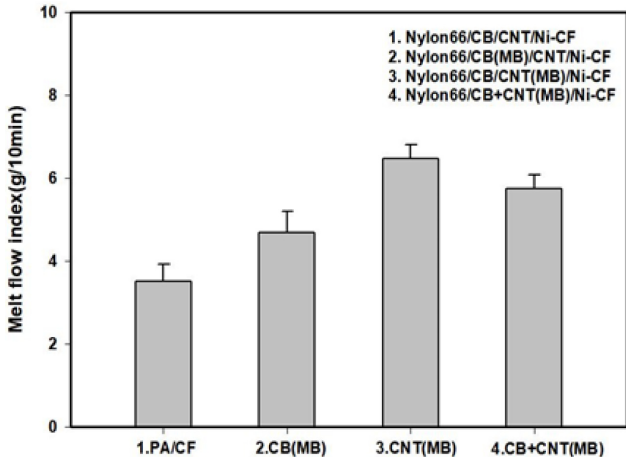


Figure 2. Melt flow index of nylon66/CB/CNT/Ni-CF(20 wt%) composites fabricated by master batch.

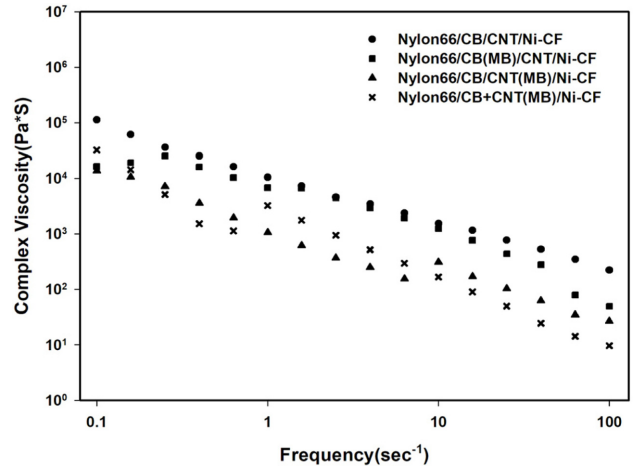


Figure 4. Complex viscosity of nylon66/CB/CNT/Ni-CF(20 wt%) composite by master batch.

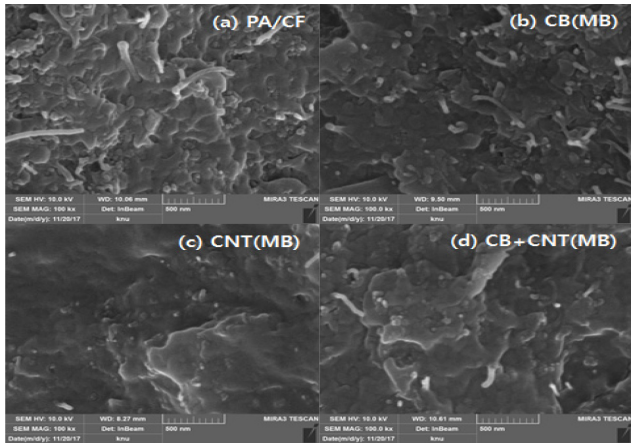


Figure 3. SEM images of nylon66/CB/CNT/Ni-CF(20 wt%) composites fabricated by master batch.

는 CNT의 경우 길이가 감소하는 분산혼합 형태가 나타나기 때문으로 해석할 수 있다.

마스터배치에 따른 CNT의 길이 감소는 Figure 3의 SEM 사진을 통해 확인하였으며, 사진과 같이 마스터배치를 적용하지 않은 경우인 Figure 3(a)의 평균 CNT 길이(약 400 nm) 대비 CNT가 MB로 적용된 복합체의 SEM 사진인 Figure 3(c)의 평균 CNT 길이(약 50 nm)가 감소한 것을 확인할 수 있다.

Figure 4는 동적유변학측정기를 이용하여 마스터배치를 적용하지 않은 복합체와 각각의 마스터배치를 적용한 복합체를 주파수에 따른 복소점도로 나타낸 것이다. 마스터배치를 적용한 복합체의 복소점도가 전 주파수영역에서 낮은 값을 보여주었으며, 특히 CNT가 마스터배치로 적용된 경우 감소 폭이 크게 나타났다. 결론적으로 나일론66 복합체의 기계적 물성과 용융 흐름성을 고려할 때 CNT에 마스터배치를 적용하는 것이 유리한 것으로 평가되었다.

탄소섬유 투입 방법에 따른 나일론66/CNT/CB/Ni-CF 복합체의 물성. 이전의 연구결과에¹¹ 따르면, 전자파 차폐 성능의 경우 Ni-CF를 주 투입구와 부 투입구에 분산 투입할 때와 사출성형 시편에서 우수한 특성을 나타내었다. Figure 5에 나타낸 것처럼 일반적으로 전자파 차폐 성능은 섬유 배향과 길이가 중요한 요인으로 작용하게 되는데, 고분자 내 섬유의 배향이 전자파와 같은 방향(0°)보다 수직방향(90°)을 지향방향으로 두는 것이 전자파 차폐 성능에 유리하다.¹⁴ 전자파 차폐 성능을 측정하기 위한 시편을 사출성형으로 제조할 때 원판 형태 시편의 게이트(gate)에서 방사(radial) 방향으로 흐름이 발생하여 전자파 측정방향과 수직방향으로 섬유 배향이 발생하게 되어 차폐 성능이 우수하게 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

Figure 6은 Ni-CF의 함량과 필터 투입방법에 따른 복합체의 사출시편에 대한 전자파 차폐 성능을 나타낸 것이다. 동일한 조성임에도 불구하고, 부 투입구에 탄소섬유를 투입하는 경우 전자파 차폐 성능이 큰 폭으로 상승하는 것을 알 수 있다. 이는 탄소섬유가 주 투입구에 투입되는 경우 압출기 내의 체류시간이 길고 전단응력을 더 많이 받게 되어 탄소섬유가 파괴되어 중형비가 낮아져 섬유 배향이 상대적으로 감소하기 때문에 전자파 차폐 성능이 감소하는 것으로 유추할 수

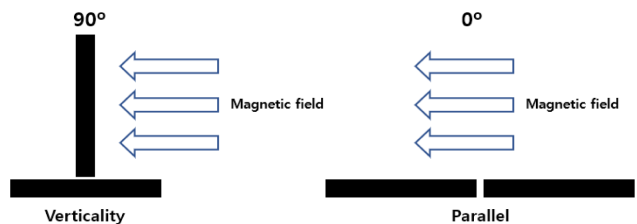


Figure 5. Correlation between fiber orientation and EMI shielding effectiveness.

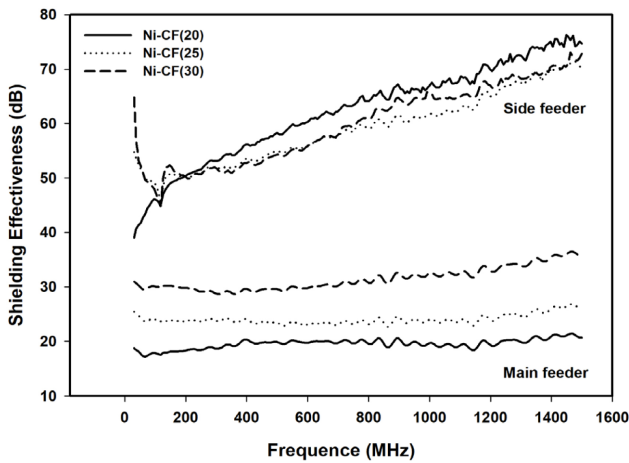


Figure 6. EMI shielding effectiveness of nylon66/CB/CNT(MB)/Ni-CF composites with different Ni-CF feeding method.

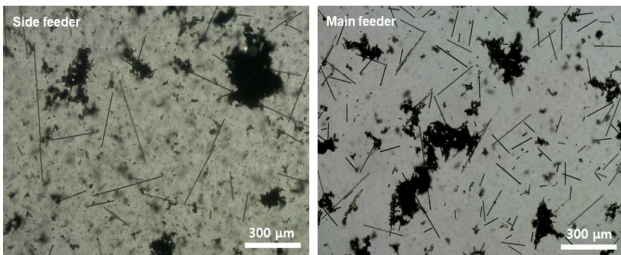


Figure 7. OM images of nylon66/CB/CNT/Ni-CF composites with different Ni-CF feeding method.

있다. 또한 부 투입구에 Ni-CF가 투입된 복합체의 경우 20 wt% 이상에서 Ni-CF 함량에 따라 전자파 차폐 성능에 큰 차이를 나타내지 않음을 보여주는데, 이 결과로부터 Ni-CF 20 wt% 이상의 고함량에서는 함량보다는 부 투입구에 의한 섬유장의 영향이 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있다.

Figure 7은 주 투입구와 부 투입구 제조 복합체 내의 탄소 섬유 길이 변화를 고찰하기 위해 복합체를 용매에 녹인 후 광학현미경으로 촬영한 사진이다. 탄소섬유가 부 투입구에 투입되는 경우 섬유의 길이가 주 투입구에 투입한 복합체보다 길게 유지됨을 알 수 있고, 이는 전자파 차폐 성능에는 유리하게 작용하는 이유이다. 전자파 차폐 성능과는 달리 Ni-CF를 부 투입구에 투입한 복합체의 섬유 중량비와 분산성 측면에서 기계적 물성에는 나쁜 영향을 줄 것으로 예측된다.

Table 1은 CB와 MWCNT의 마스터배치 적용과 Ni-CF의 투입 방법에 따른 제조 복합체의 표면저항을 측정된 결과이다. MB 적용시 CNT만을 단독으로 마스터배치한 시료가 가장 표면저항이 낮았으며 투입 방법에 따른 표면저항의 경우 부 투입구 제조 복합체가 주 투입구 제조 복합체에 비해 표면저항이 상당히 낮은 것을 확인할 수 있고, 이는 Figure 6의 차폐 성능과 반비례 관계를 보이고 있다.

Table 1. Surface Resistivity of Nylon66/CB/CNT/Ni-CF(20 wt%) Composites Fabricated by Master Batch and Different Ni-CF Feeding Method

Sample	Surface resistivity (Ω /sq)
PA/CF	8.59
CB(MB)	6.02
CNT(MB, main feeder)	5.06
CB+CNT(MB)	5.40
CNT(MB, side feeder)	0.48

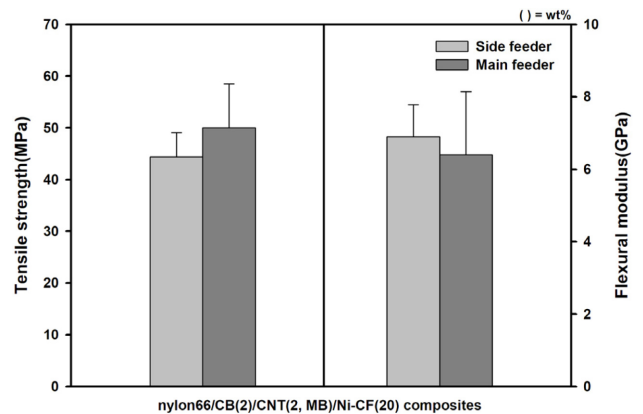


Figure 8. Mechanical properties of nylon66/CB/CNT/Ni-CF composites with different Ni-CF feeding method.

Figure 8은 Ni-CF의 함량과 필러 투입방법에 따른 복합체의 사출시편에 대한 기계적 물성을 나타낸 것이다. 부 투입구에 Ni-CF를 투입한 복합체의 기계적 물성이 주 투입구에 투입한 복합체보다 인장과 굴곡 특성이 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 기계적 물성의 감소 정도는 자동차 부품소재로 적용하는데 큰 문제가 없는 수준으로 판단된다.

자동차용 전자파 차폐 소재로 적용 가능한 40 dB 이상의 나일론66/탄소필러 복합체 제조 시 CNT의 경우는 MB로 적용하는 것이 유리하며 Ni-CF의 투입방법에 대해서는 부 투입구에 투입하는 것이 유리한 것으로 판단된다.

결론

나일론66/탄소필러 복합체의 기초물성 및 전자파 차폐 성능에 대한 복합체 제조방법의 영향을 고찰하였다. CB와 CNT에 대한 MB 적용결과 CNT를 MB로 투입하는 경우 물성 개선효과가 가장 우수하였고, CNT의 중량비 감소와 분산성 개선이 확인되었으며, 이는 용융흐름 특성 및 기계적 물성 향상, 표면저항 감소 등의 긍정적 효과를 나타내었다. Ni-CF를 부 투입구에 투입하는 경우 기계적 물성은 다소 감소하지만 복합체의 전자파 차폐 성능은 증가하는데, 이는 부 투입구에

Ni-CF가 투입될 경우 섬유에 파괴가 최소화되어 중황비가 높게 유지되기 때문에 해석되며 OM 사진으로 확인되었다.

감사의 글: 본 연구는 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 “지역특화산업육성사업(R0006388)”와 2017년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No: 20154030200940).

참 고 문 헌

1. D. R. J. White, *Electromagnetic interference and compatibility*, Don White Consultants, Gainesville, 1985.
2. H. B. Shim, M. K. Seo, and S. J. Park, *Polym. Korea*, **24**, 860 (2000).
3. H. I. Kim, J. Yun, Y. Y. Kim, and Y. S. Lee, *Carbon Letters(Korea)*, **12**, 48 (2011).
4. Y. Y. Kim, J. Yun, H. I. Kim, and Y. S. Lee, *J. Ind. Eng. Chem.*, **18**, 392 (2012).
5. A. Goldel, G. Kasaliwal, and P. Potschke, *Macromol. Rapid Commun.*, **30**, 423 (2009).
6. A. T. N. Pires, J. Roeder, R. V. B. Oliveira, M. C. Goncalves, and V. Soldi, *Polym. Test.*, **21**, 815 (2002).
7. D. M. Bigg, *Polym. Compos.*, **8**, 1 (1987).
8. A. K. Mallick, P. B. Jana, and S. K. De, *Composites*, **22**, 451 (1991).
9. C. H. Chung, J. G. Kim, and Y. S. Lee, *Appl. Chem.*, **22**, 138 (2011).
10. V. Eswaraiyah, V. Balasubramaniam, and S. Ramaprabhu, *RSC*, **4**, 1258 (2012).
11. K. M. Shin, C. U. Sim, J. S. Lee, and Y. C. Kim, *Polym. Korea*, **41**, 524 (2017).
12. K. M. Shin, C. U. Sim, J. S. Lee, and Y. C. Kim, *Polym. Korea*, **42**, 478 (2018).
13. C. Y. Huang and C. C. Wu, *Eur. Polym. J.*, **36**, 2729 (2000).
14. J. A. Heiser, J. A. King, J. P. Konell, and L. L. Sutter, *Polym. Compos.*, **25**, 407 (2004).
15. A. Chakraborty, D. Khastgir, N. C. Das, and T. K. Chaki, *Composites Part A*, **31**, 1069 (2000).
16. D. S. Jeong and B. U. Nam, *Polym. Korea*, **35**, 17 (2011).