분쇄형 탄소 섬유/나일론 복합재료의 전기적 성질과 전자파 차폐 효율

김창제 · 최형도* · 서광석 · 윤호규†
고려대학교 재료공학과, *한국전자통신연구원 전자파 환경연구팀
(2003년 2월 8일 접수, 2003년 3월 26일 채택)

Electrical Properties and Electromagnetic Shielding Effectiveness of Milled Carbon Fiber/Nylon Composites

Chang Je Kim, Hyung Do Choi*, Kwang S. Suh, and Ho Gyu Yoon†
Department of Materials Science, Korea University, Anam-dong, Sungbuk-gu, Seoul 136-701, Korea
**Advanced Radio Technology Department, Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejon 305-350, Korea*
†e-mail : hgyoon@korea.ac.kr
(Received February 8, 2003;accepted March 26, 2003)

초록 : 나일론의 종류에 따른 분쇄형 탄소 섬유/나일론 복합재료의 직류 및 교류 전도도, 그리고 전자기파 차폐 효율을 조사하였다. 탄소 섬유의 함량이 약 7 vol%에서 전도도가 급격하게 증가하는 percolation 전이가 관찰되었다. 나일론 46을 기저 수지로 하였을 경우 더욱 높은 전기 전도도를 나타냈으며, 계면 결합제의 적용 여부에 따라 전도도의 차이가 발생하였다. 온도증가에 따라 전도도가 증가하는 negative temperature coefficient 현상을 나타냈으며, percolation 전후의 탄소 섬유 함량에서의 주파수에 따른 전도기구를 완화와 공진 현상으로 각각 달리 설명할 수 있었다. 회로망 분석기를 통하여 측정한 전자기파 차폐 효율은 전도도 및 탄소 섬유의 함량에 따라 증가하였으며, 높은 전도도 영역에서의 전자기파 차폐 효율은 반사에 의한 차폐가 지배적이었다.

ABSTRACT : DC and AC electrical conductivity and electromagnetic interference shielding effectiveness of milled carbon fiber/nylon composites were investigated with the kind of nylon matrix. Percolation transition at which the conductivity is sharply increased was observed at about 7 vol% of milled carbon fiber. Nylon 46 as a matrix was more effective to obtain high electrical conductivity than nylon 6, and the difference in conductivity was occurred by the treatment of coupling agent. Frequency dependence of AC conductivity could be explained by relaxation phenomenon at just below percolation and resonance phenomenon at 40 vol% of carbon fiber, respectively. Negative temperature coefficient phenomenon was found in all composites. Electromagnetic interference shielding effectiveness was increased with the concentration of carbon fiber. At a high conductivity region the return loss was more dominant to the total shielding effectiveness than the absorption loss.

Keywords **:** *milled carbon fiber/nylon composites, electrical conductivity, percolation, electromagnetic interference shielding effectiveness, return loss.*

1. 서론

전자기기의 대량보급에 따라 가전제품, 사무기기, 생산공장의 설비기계 제어에 이르기까지 모든 제품에 고밀도 집적회로의 전자부품이 사용되어 계산, 기록, 감지, 제어 등의 임무를 핵심적으로 해낼 수 있게 되었다. 이들 전자제품은 급속한 기술적 진보를 이루어 나날이 소형 고밀도화로 진행되어 왔으며, 이러한 제품의 경박단소화는 앞으로 끊임없이 진전될 것이다. 그 반면 이들 제품의 구동에너지는 극히 미소한 전류로 충당하고 있고 고주파영역의 펄스신호로 움직여지기 때문에 여기서 발생되는 전자파가 불필요한 복사파로 외부로 누출된다.

이렇게 누출된 전자기파는 주변 전자기기의 공간으로 퍼져 나쁜 영향을 주게 되거나 다른 기기의 오동작을 초래하는 등 큰 문제점으로 부각되고 있다.[1]

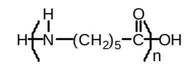
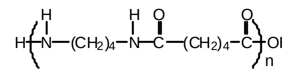
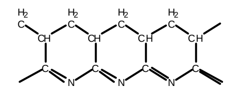
고분자재료는 낮은 밀도, 무게에 비해 높은 강도 및 경도, 뛰어난 내구성 및 성형성 등으로 인해 항공우주 산업, 자동차산업, 건축 및 가전기기에 이르기까지 널리 사용되고 있으며, 산업이 발달함에 따라 그 수요가 더욱 증가하여 기존의 소재를 고분자로 대치하는 추세이다.[2-4] 또한 전자산업의 발달로 인해 전자기기의 사용이 극대화되면서, 이들 기기에서 발생하는 전자기파를 차폐하기 위하여 전기전도성을 필요로 하는 영역까지 그 사용범위가 확대되었다. 일반적으로 고분자 소재는 그 단독으로보다는 특성이 우수한 재료를 복합화한 복합재료의 형태로 사용되는데, 전도성 고분자 복합재료는 절연체인 고분자 수지에 전도성 충전제를 첨가하여 재료에 전기 전도성을 부여함으로써 금속에 비하여 가볍고 유연성이 있으며 부식되지 않고 충전제의 종류 및 함량에 따라서 전자기파 차폐 효율의 조절이 가능하고 물성조절이 용이하기 때문에 대전방지 (ESD, electrostatic dissipation) 및 전자파 차폐 (EMI, electromagnetic interference)용 재료로 많이 쓰이고 있다.[5-7]

전자 및 전기기기에 사용되는 고분자재료의 내열성 요구에 따라 코넥터, 단자, 웨이퍼 캐리어 등의 재료로써 나일론 46의 응용이 검토되고 있으나 대부분의 탄소섬유 충전 고분자 복합재료에 대한 전기적 특성은 나일론 6,6이나 폴리카보네이트 등에 국한되어 보고되어지고 있다.[8-10] 따라서 본 연구에서는 열적/기계적인 특성이 우수한 나일론 46과 나일론 6에 탄소 단섬유와 비교하여 배합에 유리한 분쇄형 탄소 섬유 (milled carbon fiber)를 첨가하여 복합재료를 제조하였으며, 직류와 교류 전기 전도도 (electrical conductivity, ó) 및 전자기파 차폐 효율 (electromagnetic interference shielding effectiveness, EMI SE)과 차폐 기구에 대하여 조사하였다.

2. 실험

시약 및 재료. 본 실험에 사용된 기저 수지는 나일론 46(Stanyl®, TE-300, DSM)과 나일론 6 (Technyl®, 1021, Rhodia)을, 전도성 충전제로는 평균길이 150 μm(aspect ratio, L/D = 21)인 PAN계 분쇄형 탄소 섬유 (milled carbon fiber, Torayca, MLD-1000, Toray Industry Inc.)를 사용하였다. 또한 나일론과 탄소 섬유의 계면결합력을 향상시키기 위하여 실란계 계면 결합제 (γ-aminopropyltrimethoxysilane, S320, Chisso Co., Japan)를 사용하였다. 원재료들의 특성을 Table 1에 나타내었다. 나일론은 습기에 약하므로 80 ℃의 진공 오븐에서 24시간 건조시킨 후 밀봉 보관하였다.

Table 1. Description of Raw Materials

material	structure	volume resistivity (Ù·cm)
Nylon 6		1×10^{14}
Nylon 46		5×10^{14}
carbon fiber		2×10^{-3}
coupling agent	$NH_2(CH_2)_3Si(OCH_3)_3$	-

시편의 제조. 기저 수지와 탄소 섬유의 혼합은 나일론 46과 나일론 6에 대하여 각각 310, 250 ℃에서 internal mixer (bench kneader, Shokai Ltd., Japan)를 이용하여 60 rpm으로 10분간 혼합하였다. 물성 측정을 위한 시편은 가열 프레스 (Carver Inc., USA)를 이용하여 기저 수지로서 나일론 46을 적용 시에는 320 ℃에서, 나일론 6은 260 ℃에서 조성물을 충분히 녹인 후 2.2 MPa의 압력으로 30분간 가압하여 제조하였다.

측정. 전도도는 3466A Digital Multimeter (Hewlett-Packard, USA)로 전압을 가하고 6512 Programmable Electrometer (Keithly, USA)로 전류를 측정하여 구하였다. 측정 시편의 전도도는 값이 낮은 경우 ($\leq10^{-8}$ S/cm)에 직경 40 mm, 두께 0.5 mm인 원판형을, 값이 높은 경우 ($\geq10^{-8}$ S/cm)에 $60\times60\times1$ mm 시편을 4-단자법을 이용하였으며, 전극과의 접촉저항을 최소화하기 위하여 전극과 시편의 접촉면에 silver paste를 도포하였다. 온도 및 주파수에 따른 전기 전도도 및 유전율은 복소유전율 측정기 (Broadband Dielectric Analyzer, Novocontrol GmbH, Germany)를 이용하여 측정하였다.

평면파의 전자기파 차폐 효율은 직경이 133.0 mm인 측정시편을 ASTM D4935-89에 따른 회로망분석기 (Agilent 8722ES network analyzer, Agilent, USA) 및 2-port flanged coaxial holder (EM-2107, Electro-Metrics, USA)를 이용하여 50 MHz 1.5 GHz의 범위에서 측정하였다.

압축실험은 $10\times10\times24$ mm의 시편을 Sintech 45/G 만능시험기 (MTS system Co., USA)를 이용하여 1 mm/min의 속도로 압축하여 측정하였다. 측정은 시편 종류마다 5회씩 실시하여 그 평균값을 취하였다. 시편의 파단면은 SEM (S-2700, Hitachi, Japan)을 이용하여 1000배로 확대

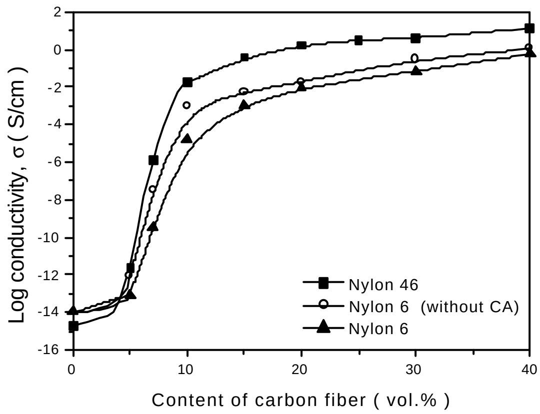


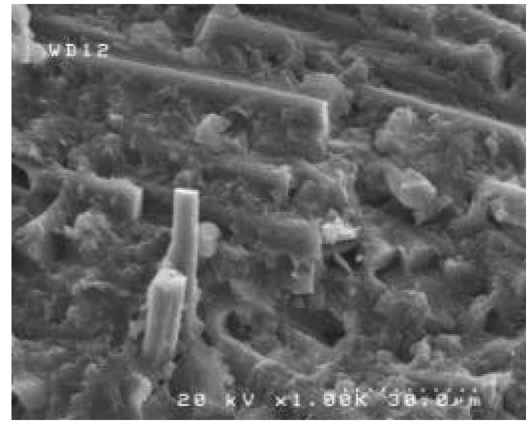
Figure 1. DC conductivity of nylon 6 and nylon 46 composites with the content of carbon fiber.

하여 관찰하였다.

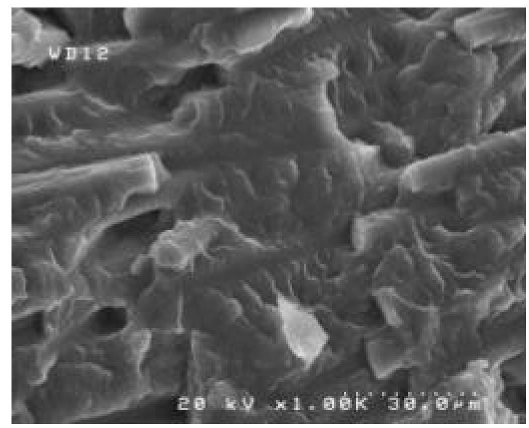
3. 결과 및 토론

조성에 따른 전기 전도도. 상온에서의 탄소 섬유의 함량에 따른 전도도의 변화를 Figure 1에 나타내었다. 7 vol%의 임계함량 (V_c)에서 전도 네트워크를 형성하는 percolation transition 현상을 나타냈으며, 나일론 6 복합재료에서 계면 결합제를 적용한 경우의 전도도가 그렇지 않은 경우보다 낮게 측정되었다. 고분자와 충전제의 표면특성은 복합재료의 기계적 특성 뿐만 아니라 전기 전도도에도 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으며,[10-12] 계면 결합제에 의해 복합재료의 내부 기공 및 수분이 감소되어 전도도를 향상시키는 역할을 하기도 하고, 전도성 충전제의 표면에 고분자 절연막을 형성하여 전도도를 오히려 떨어뜨리는 역할을 하기도 한다. 본 연구에서는 계면 결합제가 탄소 섬유와 나일론 6의 계면 결합력을 향상시켜서 탄소 섬유 표면에 나일론 절연막이 형성되어 전도도를 낮추는 것으로 판단된다.

나일론 46 수지의 전도도가 나일론 6보다 낮은 데에도 불구하고 탄소 섬유와의 복합화에 의해 나일론 46/탄소 섬유의 경우가 높은 전도도를 나타내었다. 기저 수지가 복합재료의 전도도에 영향을 주는 요인에는 기저 수지의 전도도, 결정화도, 그리고 표면장력에 따른 충전제와의 계면결합력 등이 있다.[13,14] 나일론 46 수지의 높은 결정화도는 성형 후의 냉각과정 중에 탄소 섬유의 네트워크 형성을 용이하게 할 수 있고 탄소 섬유와의 낮은 계면 결합력은 절연막 형성을 방해하는 것으로 인해 더욱 높은 전도도를 보이는 것이라 할 수 있다. 이러한 것은 Figure 2의 파단면 관찰을 통해서도 확인할 수 있었으며, 나일론 46 복합재료에서의 탄소 섬유는 나일론 6



(a)



(b)

Figure 2. SEM micrographs of fractured surface of (a) nylon 46 and (b) nylon 6 composites filled with 40 vol% of carbon fiber(× 1000).

복합재료와 비교하여 매끄러운 표면을 보이고 있기 때문에 나일론 46과 탄소 섬유의 계면 접착 특성이 좋지 않다고 판단할 수 있다.

탄소 섬유와 나일론의 계면 결합력을 판단하기 위해서 나일론 복합재료의 압축강도를 측정하여 압축 변형률에 따른 응력의 변화를 Figure 3에 나타내었다. 탄소 섬유가 40 vol% 첨가되었을 때, 나일론 6 복합재료는 순수한 나일론 6에 비하여 높은 응력에서 항복이 일어나고, 또한 파단시의 응력 또한 증가하였다. 따라서 탄소 섬유의 첨가에 따른 기계적인 물성의 향상으로 나일론 6과 탄소 섬유는 우수한 계면결합력을 가진다고 판단할 수 있다. 이와 달리 나일론 46 복합재료의 경우 탄소 섬유를 첨가하였을 때 나일론 46 수지에 비해 압축강도가 감소하였다. 이것은 나일론 46과 탄소 섬유의 계면결합력이 떨어지기 때문으로 판단되며, 따라서 나일론 46 복합재료의 높은 전도도는 나일론 46과 탄소 섬

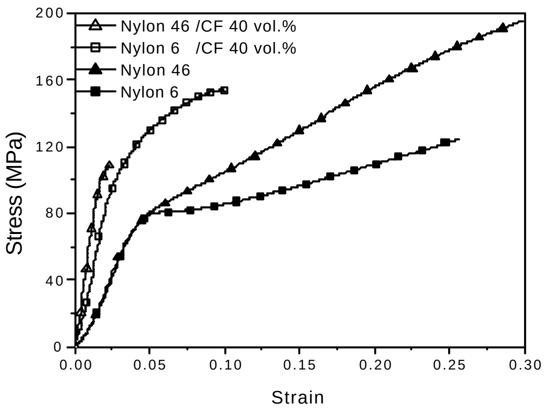


Figure 3. Stress-strain behaviors of nylons and nylon composites containing carbon fiber of 40 vol%.

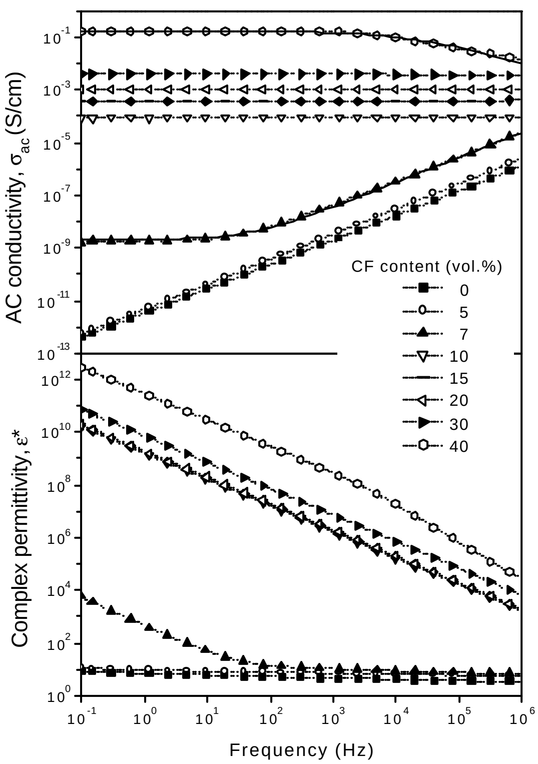


Figure 4. AC conductivity and complex permittivity as a function of frequency for nylon 6/carbon fiber composites. The solid lines of 7 and 40 vol% of carbon fiber in ac conductivity were calculated by eqs. (4b) and (6), respectively.

유간의 낮은 계면 결합력에 기인함을 확인할 수 있었다.

주파수 변화에 따른 교류 전도도. Figure 4는 탄소 섬유/나일론 6 복합재의 주파수에 따른 상온에서의 교류 전도도 변화를 탄소 섬유 함량별로 나타낸 것이다. Percolation 이전의 탄소 섬유 함량에서 주파수 증가에 따라 교류 전도도가 직선적으로 증가하고 있으며, percolation 영역이라고 할 수 있는 7 vol%에서는 일정한 값을 유지하다가 특정 주파수 이상에서 역시 직선적으로 증가하고 있다. 이러한 일정한 값을 유지하다가 직선적으로 증가하는 경향은 percolation 또는 percolation 보다 약간 높은 함량에서의 주파수에 따른 전도도로 알려져 있으며, 전도 네트워크를 형성하고 있는 cluster의 크기, 함량 및 분포 등으로 설명되어지고 있다.[15,16] 여기서는 주파수 $\omega^{0.95}$에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 교류 전도도 $\sigma_{ac}(\omega)$는 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 주파수 지수 s가 0.95에 해당한다. 또한, 특정 주파수 이하에서 일정하게 유지되는 전도도는 직류 전도도 σ_{dc}와 일치하였다.[17]

$$\sigma_{ac}(\omega) = \sigma_{dc} + A\omega^{s} \tag{1}$$

여기서 A는 온도에 의존하는 상수이다.

Percolation 영역에서의 탄소 섬유/고분자 복합재료에서 탄소 섬유간의 고분자는 유전체 역할을 하게 되어, 이때의 주파수에 따른 교류 전도도의 변화는 Figure 5(a)와 같은 RC 회로로 설명할 수 있다.[18-20] 이 등가회로의 세 성분을 R_C, R_P, C_P라고 하면 복소 임피던스(complex impedance), Z^*는 식 (2)와 같고, 전기적인 상수들은 식 (3)과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{1}{Z^*} = \frac{1}{R_C + \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_P} + j\omega C_P}} \tag{2}$$

$$\frac{1}{Z^*} = \frac{1}{R - jX} = Y^* = \sigma_{ac} + jB \tag{3}$$

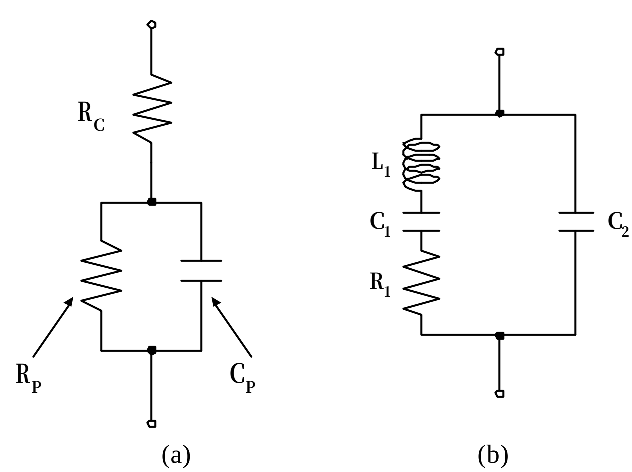


Figure 5. Equivalent circuit model for filler-matrix composites; (a) relaxation and (b) resonance model.

여기서 R, X, Y^*, B, C_0는 각각 resistance, reactance, admittance, susceptance, 진공중의 capacitance를 의미한다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 복합재료의 교류 전도도는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma_{ac} = \frac{\frac{1}{R_P}\left(\frac{1}{R_C}+\frac{1}{R_P}\right)+(\omega C_P)^2}{R_C\left\{\left(\frac{1}{R_C}+\frac{1}{R_P}\right)^2+(\omega C_P)^2\right\}} \tag{4a}$$

위 식은 주파수에 대한 응답속도가 매우 빠른 이상적인 경우를 가정한 것으로서, 실제 복합재료에서는 분자간의 상호작용, 고분자와 충전제 사이의 상호작용, 기공 등으로 인하여 모멘트의 회전이 심한 방해를 받게 되어 응답속도의 지연이 발생한다. 따라서 주파수 지수는 다음과 같이 2가 아닌 변수 s로 가정할 수 있다.

$$\sigma_{ac} = \frac{\frac{1}{R_P}\left(\frac{1}{R_C}+\frac{1}{R_P}\right)+(\omega C_P)^s}{R_C\left\{\left(\frac{1}{R_C}+\frac{1}{R_P}\right)^2+(\omega C_P)^s\right\}} \tag{4b}$$

탄소 섬유가 7 vol% 첨가된 복합재료에 식 (4b)를 적용한 경우를 Figure 4에 실선으로 나타내었다. 실험값과 잘 일치하고 있으며 이때의 s 값은 0.95, 식 (2)에서 나타낸 기울기와 일치하였다. 즉, 주파수가 낮을 때 교류전도도는 $1/(R_C+R_P)$로 일정하다가 특정 주파수에서 $\omega^{0.95}$에 비례할 것으로 예상할 수 있다.

탄소 섬유의 함량이 증가함에 따라서 각각의 탄소 섬유는 매우 조밀하게 되어서 내부 접촉저항인 R_P성분이 급격히 감소하게 된다. 따라서 전체저항 (R_C + R_P)는 R_C와 같게 되어 주파수에 무관한 ohmic current를 유지한다.

탄소 섬유가 그 이상 첨가되었을 때는 탄소 섬유간의 3차원 네트워크가 활발하게 이루어져 고분자 내의 탄소 섬유 네트워크는 마치 인덕터와 같은 역할을 하게 되어 복합재료의 전도도는 공진 현상이 나타나는 RLC 회로로 나타낼 수 있다. 이에 관해 Debye는 기체에서 공진에 의한 전도도의 변화를 Figure 5(b)와 같은 등가회로로 설명하였으며, 이때의 임피던스와 전도도는 다음과 같이 쓸 수 있다.[21]

$$\frac{1}{Z^*} = \frac{1}{R_1+\left(\omega L_1-\frac{1}{\omega C_1}\right)^s}+j\omega C_2 \tag{5}$$

$$\sigma_{ac} = \frac{1}{R_1^2+\left(\omega L_1-\frac{1}{\omega C_1}\right)^s} \tag{6}$$

여기서 s는 식 (4a)에서와 마찬가지로 2의 주파수 지수를 갖으나, 이 경우에는 기체와 같은 모멘트의 회전이 이상적인 경우를 가정하여 설명한 것으로, 고분자 복합재료에서는 분자간의 상호작용, 고분자와 충전제 사이의 상호작용, 기공 등으로 인해 모멘트의 회전이 방해를 받아 넓은 공진 주파수 범위를 가지므로 변수로 나타내는 것이 타당할 것이다. Figure 4에 탄소 섬유가 40 vol% 첨가된 시편에 대한 교류 전도도 측정값과 식 (6)을 이용하여 계산한 값을 실선으로 비교하여 나타내었으며 이 때의 s 값은 0.68이었다. 교류 전도도는 공진 주파수($\omega L_1=1/\omega C_1$)에서 최소값을 보이다가 다시 증가할 것으로 예상되며, 측정값을 통해 공진 주파수는 측정한 주파수 대역보다 높은 영역에 있음을 짐작할 수 있다.

온도에 따른 전기 전도도. 주파수가 낮을 때 교류 전도도는 직류 전도도에 수렴하는 것을 이용하여 100 Hz의 주파수에서 탄소 섬유/나일론 46 복합재의 온도에 따른 전도도의 변화를 Figure 6에 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 전도도가 증가하는 NTC (negative temperature coefficient) 거동을 보이고 있으며, 탄소 섬유의 함량이 증가할수록 이러한 거동을 더욱 뚜렷해지고 있다. 그러나 탄소 섬유 함량이 40 vol%의 경우에 있어서는 오히려 온도 증가에 따른 전도도의 증가율이 감소하였다. 탄소 섬유/나일론 46 복합재료의 온도에 따른 전도도는 다음 식과 같이 반도체 물질의 온도에 따른 전도

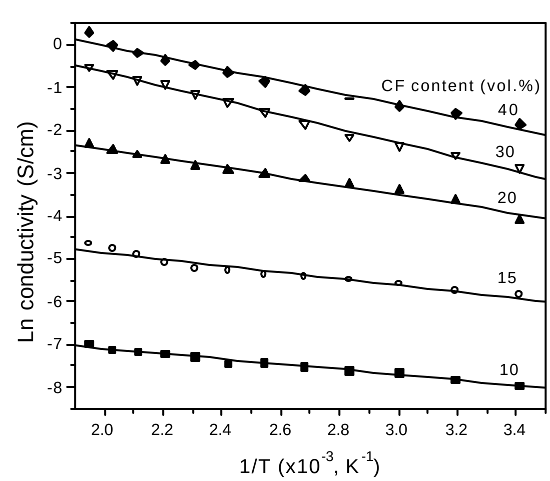


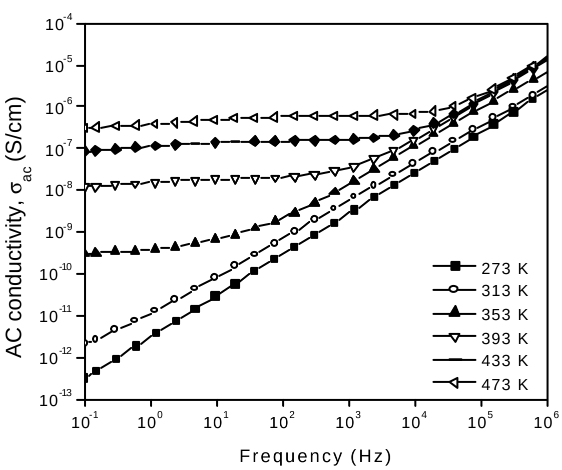
Figure 6. Conductivity as a function of temperature for nylon 46/carbon fiber composites.

도 변화와 유사하게 나타났다.[17]

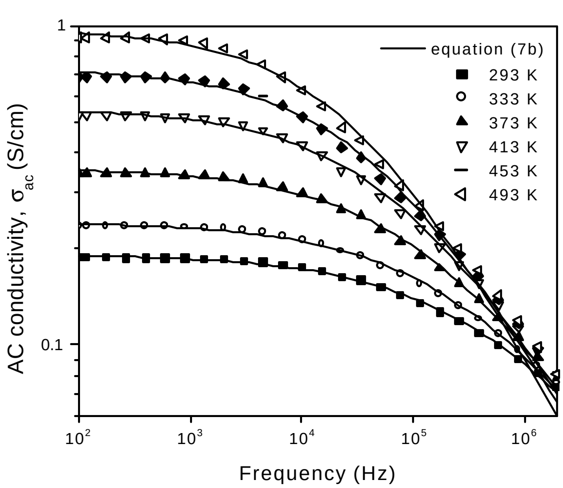
$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\frac{W}{kT}) \qquad (7)$$

Table 2. s_0 and W of Carbon Fiber(CF)/Nylon 46 Composites

CF content (vol%)	s_0 (S/cm)	W (eV)
10	0.00286	0.0532
15	0.03534	0.0652
20	0.74682	0.0923
30	14.89	0.1434
40	16.16	0.1204



(a)



(b)

Figure 7. AC Conductivity with temperature for (a) 5 vol% of carbon fiber filled nylon 6 and (b) 40 vol% of carbon fiber filled nylon 46 composites.

여기서 s_0는 상수, W는 활성화에너지, k는 Boltzmann 상수이며, 탄소 섬유의 함량에 따른 s_0와 W를 Table 2에 나타내었다. 이 결과는 온도증가에 따른 복합재료의 전도도가 열팽창에 의한 탄소 섬유간의 거리증가에 비해 thermal emission의 증가에 더 크게 영향을 받는다는 것을 보여준다.

Figure 7(a)는 탄소 섬유가 5 vol% 첨가된 나일론 6 복합재료의 다양한 온도에서의 주파수에 따른 전도도의 변화를 나타낸 것이다. 낮은 주파수와 높은 온도에서는 직류 전도도가 교류 전도도에 지배적인 역할을 하지만 높은 주파수와 낮은 온도일수록 주파수에 의존하는 항이 교류 전도도에 중요한 역할을 하게 된다.

유전 손실이 전도도에 기여하는 유전 완화 현상에 대해서 2가지 상이한 모델이 제안되었는데, 하나는 전하 운반체가 에너지장벽을 가로질러 이동하는 quantum mechanical tunneling (QMT) 모델이고,[18,22] 다른 하나는 활성화된 전하 운반체가 에너지장벽을 뛰어넘어 이동하는 correlated barrier hopping (CBH) 모델이다.[23] QMT 모델에 따르면 교류 전도도에서의 식 (1)에 나타낸 주파수 지수는 온도와 무관한 상수를 갖는다고 하였으나, CBH 모델에서는 온도의 함수로써 나타내었으며, 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = 1 - \frac{4}{\ln(\frac{1}{\omega\tau_0})} \qquad (8)$$

$$s = 1 - \frac{6kT}{\left[W_M - kT\ln(\frac{1}{\omega\tau_0})\right]} \qquad (9)$$

여기서 t_0는 완화시간, k는 Boltzmann 상수, 그리고 W_M은 최대 장벽높이, 즉 activation에 필요한 에너지이다.

탄소 섬유가 5 vol% 첨가된 나일론 6 복합재의 s 값은 0.89 097 사이였으며, 평균 0.91의 일정한 값을 가졌다. 따라서 완전한 전도 네트워크가 형성되지 않은 경우 온도에 따른 전하 운반체의 이동은 터널링에 의한 것으로 판단할 수 있다.

Figure 7(b)는 탄소 섬유의 함량이 40 vol%인 나일론 46 복합재의 교류 전도도를 나타낸 것이다. 낮은 주파수 영역에서는 ohmic current가 형성되어 s_{ac}는 s_{dc}와 일치하였으나, 주파수가 증가함에 따라 공진 현상에 의해 전도도의 감소가 나타나기 시작했다. 본 연구에서 제안한 공진 현상에 따른 전도도의 변화를 설명하는 식 (6)

을 적용한 결과 실험값과 잘 일치하였으며, 온도가 높아질수록 s 값이 0.515에서 0.673으로 증가하였다. 이러한 s 값의 증가는 온도가 높아질수록 복합재가 연화되어 모멘트의 회전이 쉬워지기 때문으로 판단할 수 있다.

전자기파 차폐 효율. 전자기파 차폐 효율은 기저 수지, 탄소 섬유의 함량, 그리고 계면결합제의 첨가여부 등을 변화하여 측정하였다. 전자기파 차폐 효율 (electromagnetic interference shielding effectiveness, EMI SE)은 차폐물질을 통과하기 전의 전력과 통과한 후의 전력의 비로서 정의된다. 따라서 일정한 입사전력에 대해 측정 홀더에 시험하고자 하는 재료를 설치하였을 때와 그렇지 않을 때의 수신 전력의 차, 즉 삽입손실을 측정함으로써 전자기파 차폐 효율을 측정할 수 있고, 그 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[1,24]

$$SE\,(\mathrm{dB}) = 10\log\left(\frac{P_{\mathrm{inc}}}{P_{\mathrm{trans}}}\right) = 20\log\left(\frac{E_{\mathrm{inc}}}{E_{\mathrm{trans}}}\right) \tag{10}$$

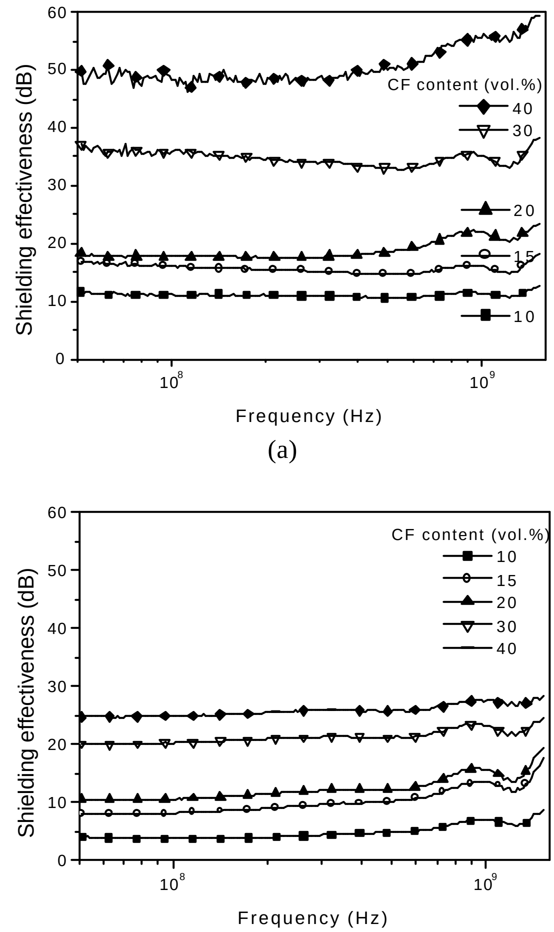
여기서 P_{inc}는 입사전력, P_{trans}는 시편을 통과해 수신되는 수신전력이며, E_{inc}는 입사전계, E_{trans}는 수신전계이다. 평면파가 물질을 통과하면서 차폐가 되는 메카니즘은 전자기파가 차폐 물질에 입사할 때 임피던스가 다른 물질의 계면에서 반사되는 반사손실과, 파가 차폐 물질 내부를 진행하면서 흡수되어 소멸되는 흡수손실, 그리고 차폐 물질의 내부 및 양쪽계면에서 발생하는 다중반사에 의한 손실 등의 총합으로 볼 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SE_{\mathrm{T}} = SE_{\mathrm{R}} + SE_{\mathrm{A}} + SE_{\mathrm{M}} \tag{11}$$

여기서 SE_{R}, SE_{A}, 및 SE_{M}는 각각 반사손실, 흡수손실, 다중반사손실에 의한 차폐 효율이다.

Figure 8은 50 MHz 1.5 GHz의 주파수 범위에서 두께가 2 mm인 나일론 복합재의 탄소 섬유의 함량 및 주파수에 따른 차폐 효율을 비교한 것으로서 Figure 8(a) 및 Figure 8(b)는 각각 나일론 6과 나일론 46을 기저 수지로 한 복합재료의 차폐 효율이다. 나일론 46 복합재료가 나일론 6을 기저 수지로 적용하였을 때보다 차폐 효율이 매우 높게 나타났으며 기저 수지에 관계없이 탄소 섬유의 함량이 증가할수록 차폐 효율은 증가하였다. 이러한 것은 나일론 46 복합재료의 전도도가 높은 것이 기인한다.

Figure 9는 각 시편의 주파수에 따른 반사손실 (*RL*)을 나타낸 그림이다. 반사손실은 공기 중에 진행하던 전자기파와 차폐 물질 표면의 임피던스 부정합으로 인해 전



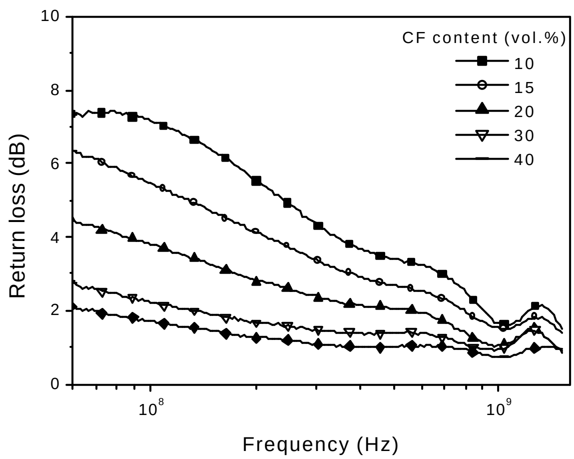
(b)

Figure 8. Shielding effectiveness as a function of frequency for; (a) nylon 6 composites and (b) nylon 4,6 composites (2 mm in thickness).

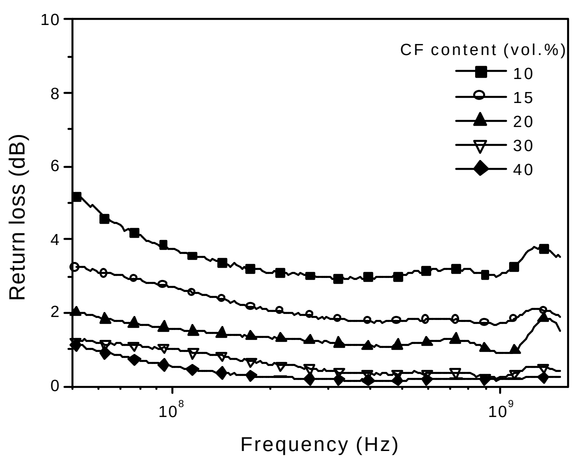
자기파가 물질 내부로 통과하지 못하고 반사되어 발생하며, 그 크기는 다음과 같다.[24,25]

$$RL\,(\mathrm{dB}) = 20\log\left(\frac{E_{\mathrm{inc}}}{E_{\mathrm{ref}}}\right) \tag{12}$$

여기서 E_{inc}는 입사전계, E_{ref} 는 반사전계이다. *RL*이 낮다는 것은 전자기파가 많이 반사되는 것을 의미하므로 *RL*이 낮을수록 반사에 의한 차폐가 잘 이루어짐을 알 수 있다. Figure 9(a)는 나일론 6에 대한, 그리고 Figure 9(b)는 나일론 46을 기저 수지로 한 복합재료의 *RL*을 각각 나타낸 것으로서 탄소 섬유의 함량이 증가할수록 *RL*값은 감소하였다. 이것은 탄소 섬유의 함량이 증가할수록 공기와 복합재간의 임피던스 차이가 증가하여 복합재료의 표면에서 전자기파의 반사가 증가하기 때문이다.



(a)



(b)

Figure 9. Return loss as a function of frequency for; (a) nylon 6 composites and (b) nylon 4,6 composites (2 mm in thickness).

나일론 6 복합재료의 *RL*은 나일론 46 복합재료에 비교하여 높은 주파수 의존성을 보였다. 따라서 측정한 주파수 영역에서 나일론 46 복합재료는 주파수에 따른 임피던스의 변화가 적은 반면, 나일론 6 복합재료는 주파수 증가에 따른 임피던스 변화가 큰 것을 알 수 있다. 한편 Figure 1의 그림에서 언급하였듯이 계면 결합제를 적용하였을 경우의 전도도가 그렇지 않은 경우와 비교하여 낮은 전도도를 나타내었는데, 전자기파 차폐 효율 및 반사손실 (*RL*)에 있어서도 이러한 전도도의 감소로 인하여 낮은 차폐 효율과 *RL*을 나타낼 것으로 예상된다.

Figure 10은 두께가 2 mm인 시편의 종류에 따른 전도도와 100 MHz에서의 차폐 효율의 관계를 나타낸 것으

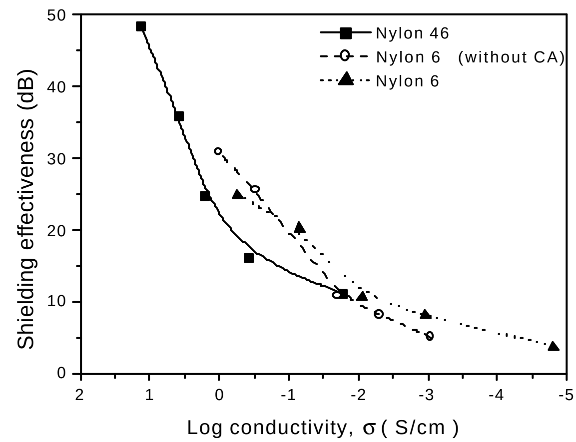


Figure 10. Relations between shielding effectiveness at 100 MHz and conductivity of various composites.

로서 전도도가 증가할수록 차폐 효율이 증가함을 보여주고 있다. 식 (11)에서 전도성 복합재료의 차폐 효율과 전기 전도도의 관계를 살펴보면 반사에 의한 차폐 효율은 차폐 물질의 비투자율 μ_r, 주파수 f와 함께 전도도에 대수적으로 비례하는 $SE_R \propto \log|\sigma_r/\mu_r f|$의 관계를 갖고, 흡수에 의한 차폐 효율은 전기 전도도의 제곱근에 비례하는 $SE_A \propto \sqrt{f\mu_r\sigma_r}$ 의 관계를 나타낸다. 따라서 차폐 효율이 반사에 기인하는 것이라면 차폐 효율과 $\log \sigma_r$는 직선으로 나타나게 된다. 높은 전도도 영역에서 차폐 효율은 $\log \sigma_r$와 직선적인 관계를 가지므로 본 연구에서의 차폐 효율은 반사에 의한 차폐가 지배적임을 알 수 있다.

4. 결론

분쇄 탄소 섬유를 첨가한 나일론 복합재료는 약 7 vol% 의 함량에서 전기 전도도가 급격하게 증가하는 percolation transition을 보였다. 또한 복합재료에 첨가된 계면 결합제는 충전제의 표면에 절연막을 형성하여 전도도 및 차폐 효율을 떨어뜨리는 것으로써 탄소 섬유와 기저 수지의 계면특성이 전도도 및 차폐 효율에 있어서 중요한 요인임을 알 수 있었다. 모든 조성에서 온도 증가에 따라 전도도가 증가하는 NTC 현상이 나타났으며, 이러한 경향은 탄소 섬유의 함량이 높을수록 뚜렷하게 나타났다. 탄소 섬유가 첨가된 복합재료의 전도기구는 percolation 영역 이전에는 완화 현상으로 설명할 수 있었으며, 이 때의 전도기구는 전하 운반체의 터널링에 의한 것으로 판단된다. 또한 탄소 섬유가 과량 첨가되었을 때는 공진 현상으로 인해 주파수 증가에 따른 전도도의 감소가 발생하였으며, 온도가 높을수록 감소폭 또

한 크게 나타났다. 전도도가 증가할수록 전자기파 차폐 효율은 증가하였고, 반사손실은 감소하였으며, 높은 전도도 영역에서의 차폐 효율은 반사에 의한 차폐가 흡수에 의한 차폐에 비하여 지배적인 역할을 하였다.

References

1. D. R. J. White, *A Handbook on Electrical Noise and EMI Specifications*, Don White Consultants, Virginia, 1972.
2. P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composite*, Marcel Dekker, New York, 1988.
3. B. Z. Jang, *Advanced Polymer Composites: Principles and Applications*, ASM international, USA, chap 3, 1994.
4. J. A. Brydson, *Plastics Materials*, Butterworths, London, 1982.
5. E. D. Feit and C. W. Wilkins, *Polymer Materials for Electronic Applications*, American Chemical Society, Washington, D. C., 1982.
6. T. L. Vigo and B. J. Kinzig, *Composite Application: The Role of Matrix, Fiber, and Interface*, VCH Publishers, New York, 1992.
7. D. D. L. Chung, *Carbon*, **39**, 279 (2001).
8. M. L. Clingerman, E. H. Weber, J. A. King, and K. H. Schulz, *J. Appl. Polym. Sci.*, **88**, 2280 (2003).
9. N. C. Das, T. K. Chaki, D. Khastgir, and A. Chakraborty, *J. Appl. Polym. Sci..*, **80**, 1061 (2001).
10. M. L. Clingerman, J. A. King, K. H. Schulz, and J. D. Meyers, *J. Appl. Polym. Sci.*, **83**, 1341 (2002).
11. P. Mapleston, *Mod. Plast.*, **69**, 80 (1992).
12. P. B. Jana, A. K. Mallick, and S. K. De, *Short Fiber-Polymer Composites*, S. K. De and J. R. White, Editors, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, chap 7 (1996).
13. S. H. Foulger, *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, **37**, 1899 (1999).
14. F. Gubbles, S. Blacher, E. Vanlathem, R. Jérôme, R. Deltour, and F. Brouers, Ph. Teyssié, *Macromol.*, **28**, 1559 (1995).
15. K. Benaboud, M. E. Achour, F. Carmona, and L. Salomé, *Ann. Chim. Sci. Mat.*, **23**, 315 (1998).
16. L. J. Adriaanse, J. A. Reedijk, P. A. A. Teunissen, H. B. Brom, and M. A. J. Michels, *JMC. Phys. Rev. Lett.*, **78**, 1755 (1997).
17. E. K. Sichel, *Carbon Black-Polymer Composites*, Marcel Dekker, New York, 1982.
18. N. F. Mott and E. A. Davis, *Electronic Processes in Non-crystalline Materials*, Clarendon Press, Oxford, p 219 (1979).
19. Y. Song, T. N. Noh, S. I. Lee, and J. R. Gaines, *Phys. Rev. B*, **33**, 904 (1986).
20. C. H. Lai and T. Y. Tseng, *IEEE Trans. Comp. Pack. Manuf. Technol. Part A*, **17**, 309 (1994).
21. A. R. von Hippel, *Dielectrics and Waves*, The M. I. T Press, Cambridge, p 174 (1954).
22. S. A. El-Hassan and M. Hammad, *Phys. Stat. Sol. A*, **185**, 413 (2001).
23. S. Hazra and A. Ghosh, *J. Phys.: Condens. Matter.*, **9**, 3981 (1997).
24. R. B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, **30**, 187 (1988).
25. N. C. Das, D. Khastgir, T. K. Chaki, and A. Chakraborty, *Compos.: Part A*, **31**, 1069 (2000).