

# 전자파 차폐용 탄성 탄소 복합체



**황 소 안**

인하대학교 화학공학과  
박사과정



**심 상 은**

인하대학교 화학공학과  
교수

## 1. 전자파 차폐 소재 소개

대중에게 더 나은 경험과 편의를 제공하기 위한 전자 기기 및 통신 시설의 광범위한 활용은 전자, 전기 및 통신 분야의 발전을 이루었으며 이에 따라 5G 통신 시대가 시작되었다. 5G 통신 기기는 기존의 통신 주파수인 2 GHz 이하 대역보다 더 높은 3.5 GHz와 28 GHz를 사용한다. 높은 주파수 대역의 전자부품에서 발생하는 전자파 신호는 노이즈를 만들며 노이즈가 전자 부품 신호에 간섭하여 전자 기기의 동작에 영향을 주며 전자파에 노출된 세포는 세포를 구성하는 성분인 물이 전자파를 흡수하여 조직 세포의 온도가 상승한다. 전자파가 인체에 노출되는 위험도를 정량화 하기 위해 전자파가 사람이나 동물의 몸에 영향을 주는 정도를 숫자로 표현한 값을 전자파 흡수율(SAR: Specific Absorption Rate) 이라 하며 국제 권고 기준은 2 W/kg 이하, 한국 및 미국의 권고 기준은 1.6 W/kg 이하이다. 시중에 판매되는 휴대 전화의 최대 SAR 수치는 0.4 - 1.2 W/kg이다. 스마트폰 등의 통신 장비는 5G 통신의 보급으로 인해 기기의 출력이 상승할 것이며 다기능, 경량화와 소형화에 의해 전자 부품의 고밀도 집적화가 심화될 것이다. 이에 따른 전자파의 간섭과 인체 노출은 현대 사회의 중요한 문제점이며 이를 해소하기 위한 전자파 차폐 소재 개발의 수요가 급증하고 있다.<sup>1</sup>

최근 10 년 동안 높은 차폐 성능과 넓은 차폐 주파수를 갖는 전자파 차폐 소재의 개발이 이루어졌다. 전자파 차폐를 위

해서 폴리머에 금속 및 탄소 기반 물질과 같은 전도성 필러를 포함하는 전도성 복합소재를 사용한다.<sup>2</sup> 금속은 외부 전기장에 관계없이 전류가 흐르지 않으면 금속 내부의 전기장은 0이고, 금속 표면이 전기장에 놓이면 자유 전하는 내부적으로 정렬되어 외부 전기장을 상쇄한다.<sup>3</sup> 이러한 이유로 금속 등의 전도성 물질은 전자파를 차단할 수 있다. 그러나 전자파 차폐에 사용되는 금속 및 합금은 부식이 잘 일어나며 비중이 높다. 또한 가공이 어렵고 내스크래치성이 불리한 단점이 있다.<sup>4</sup> <sup>5</sup> 금속 및 합금을 사용한 전자파 차폐 소재를 개선하기 위해 탄소 소재가 사용된다. 탄소 소재는 가볍고 부식이 일어나지 않으면서 전도성이 매우 높아 기존의 금속을 사용한 전자파 차폐 소재의 문제점을 해결할 수 있어 대체제로 주목받고 있다. 탄소 소재는 결합 상태와 관련이 있는 열적으로 활성화된 호핑 현상에 의해 전자파를 효과적으로 차단할 수 있다.<sup>6</sup> 금속 필러는 높은 전도성에 의한 전자파의 반사 메커니즘만 존재하지만 탄소 소재는 전도성이면서 전자파를 흡수하는 메커니즘도 존재하여 탄소 소재를 충전한 복합체의 수요가 증가하고 있다.

## 2. 전자파 차폐 이론 소개

전자파 차폐는 입사하는 전자파가 다른 공간에 전파되지 않도록 차단하는 것이며, 전자파의 반사, 전자파의 흡수, 전자파의 다중반사의 합으로 표현된다.<sup>7</sup>

- 1) 전자파 반사: 전자파는 복합체의 표면에서의 매질간 임피던스 차이에 의해 반사되며 주로 금속 등의 전도성 소재에서 발생한다.
- 2) 전자파 흡수: 탄소 소재는 유전 손실(dielectric loss)을 통해서 전자파를 흡수하며, 자성 재료는 자성 손실(magnetic loss)을 통해서 전자파를 흡수한다. 복합체 내에서 흡수된 전자파는 열로 소실된다.
- 3) 전자파 다중반사: 복합체내에서 전자파의 산란 등으로 인해 전자파가 다른 방향으로 전달되는 것이다. Figure 1은 전자파의 다중반사를 나타낸 것이다.

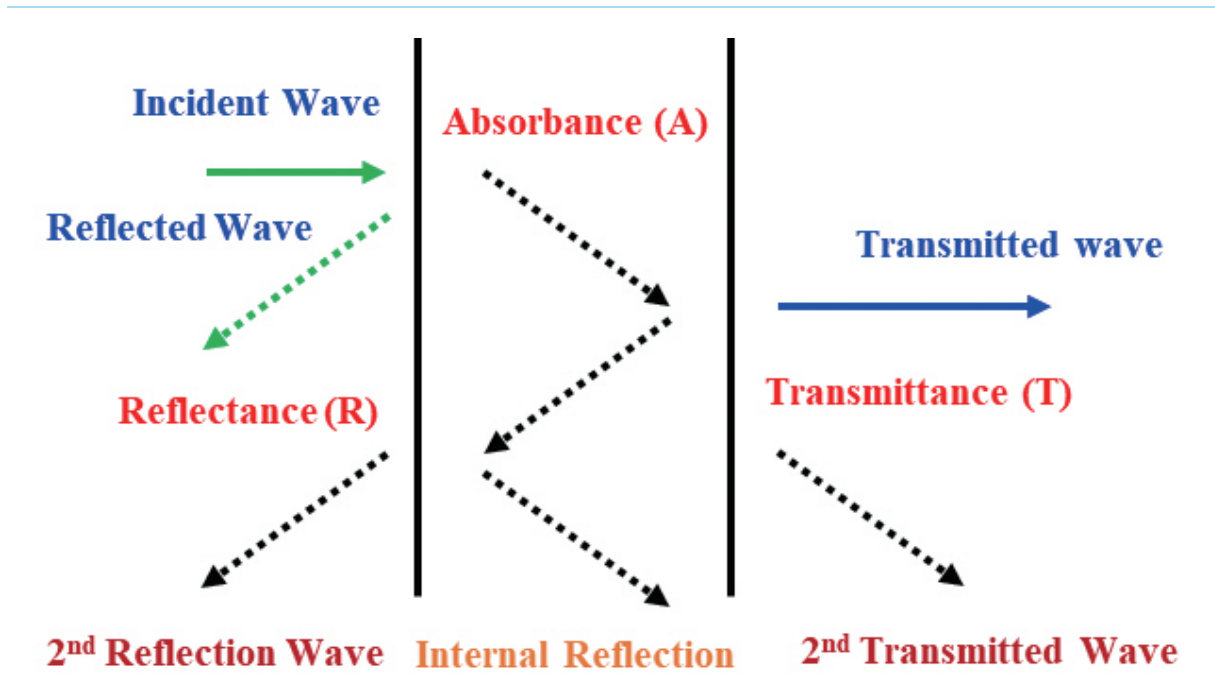


Figure 1. Schematic showing EMI shielding mechanism.

### 2.1 전자파 차폐 성능 (EMI SE: Electromagnetic Interference Shielding Effective-ness)

전자파 차폐란 입사하는 전자파를 감쇄하여 다른 공간으로 전파되는 것을 막는 것이며 복합소재의 전자파 차폐성능은 전자파의 반사, 흡수, 다중반사로 결정되며 EMI SE는 이들의 합으로 표현할 수 있다. 2 포트 VNA(Vector Network Analyzer)에서 얻을 수 있는 4 종류의 산란계수(S parameter:  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{22}$ ) 로 전자파의 반사와 전자파의 투과도를 계산할 수 있다. 전자파의 반사와 전자파의 투과도는 산란계수를 이용하여 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

$$R(\text{Reflection, 전자파의 반사}) = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \quad (1)$$

$$T(\text{Transmission, 전자파의 투과}) = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2 \quad (2)$$

전자파의 반사와 투과도에 상용 로그를 취하여 전자파의 반사량은 식 (3), 전자파의 흡수량은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$SE(R) = 10 \log\left(\frac{1}{1-R}\right) = 10 \log\left(\frac{1}{1-|S_{11}|^2}\right) \quad (3)$$

$$SE(A) = 10 \log\left(\frac{1-R}{T}\right) = 10 \log\left(\frac{1-|S_{11}|^2}{|S_{21}|^2}\right) \quad (4)$$

전자파의 반사량과 흡수량을 더하여 전자파 차폐 성능을 구할 수 있으며 이를 식 (5) 로 나타낼 수 있다.<sup>8</sup>

$$SE(T) = SE(R) + SE(A) = -20 \log(S_{21}) \quad (5)$$

## 2.2 투자율 (Permeability)

자기가 발생하는 원인으로 전자의 공전(orbit magnetic moment; L)과 자전(spin magnetic moment; S), 원자핵의 자전(nuclear magnetic moment; n)이 있으며 주로 원자의 3d orbital 전자의 자전(spin)에 의해 물질은 자성을 띤다. 자기장에 의해 재료가 자성을 띠는 현상을 자화(magnetization) 이라고 하며 자기장에 의해 받는 힘의 세기를 자력(magnetizing Force; H) 이라고 한다. 자력은 자속밀도(magnetic flux density; B)를 생성하는데 필요한 자석과 전류의 능력을 나타내는 척도로 투자율은 자속 밀도와 자력 곡선의 기울기이다. 투자율은 물질이 자기장에서 자화하는 정도와 자속이 흐르는 정도를 나타내며 값이 클수록 재료의 자화가 용이하다. 투자율은 전파의 주파수에 영향을 받으며 복소수 형태 식 (6)으로 표현할 수 있다. 복소 투자율의 실수부( $\mu'$ )는 상대 투자율을 나타내며 복소 투자율의 허수부( $\mu''$ )는 투자 손실을 나타낸다. 투자율은 공진 주파수는 반비례 관계이며 주파수가 증가하면 자력과 자속밀도 사이의 위상지연이 발생한다.

$$\mu_c = \mu' - j\mu'' = |\mu|(\cos\theta - j\sin\theta) \quad (6)$$

## 2.3 유전율 (Permittivity)

유전율은 외부 전계에 의한 전하의 전기분극(polarizaion)으로 전기 쌍극자의 형성 정도를 가늠하는 척도이며 유전율은 외부 전계에 의한 전기 분극으로 전하가 축적되는, 물질이 전하를 저장할 수 있는 능력의 척도가 된다. 또한 유전율로 자유전하가 거의 없는 유전체와 부도체의 성질을 나타낼 수 있다. 일반적인 물질의 유전율은 비유전율 ( $\epsilon_r$ ) 이며 이는 매질 유전율( $\epsilon$ )과 진공 유전율( $\epsilon_0$ )의 비로 나타낸다. 유전율의 단위는 F/m(farad per meter)이나 비유전율은 무차원 수이며 유전체의 종류에 따라 수치가 달라지고 그 값은 항상 1보다 크다. 대기의 유전율은 1에 수렴하며 유전율이 증가하면 물질은 더 많은 전하를 저장할 수 있다.

유전율은 주파수 및 온도에 영향을 받으며 복소수로 나타낼 수 있다. 복소 유전율은 교류성 전계 (전자기파)의 주파수 증가 등에 따라 유전체가 반응하는 정도를 복소수 형태로 정의한 유전율이며 식 (7)의 형태로 나타낼 수 있다. 복소 유전율의 실수부는 상대 유전율(유전 상수,  $\epsilon'$ )을 나타내며 복소 유전율의 허수부 ( $\epsilon''$ )는 유전 손실을 나타낸다.

$$\epsilon_c = \epsilon(1 - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon}) = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0\epsilon_r = \epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (7)$$

## 2.4 손실 탄젠트 (Loss tangent)

매질 내에서 파동성 에너지가 열 에너지 등으로 손실되는 유전 손실 (dielectric loss)은 유전율의 손실 탄젠트로 나타낼 수 있으며 이는 식 (8)로 표현할 수 있다. 전도성 물질의 경우 전도전류밀도( $J_c$ )와 변위전류밀도( $J_d$ )의 비로 손실 탄젠트를 나타낸다. 양 도체는 전도 전류가 변위 전류보다 매우 크며 불완전 도체 내에서는 전자기파가 저항에 의해서 전하의 자유로운 이동이 제한되어 에너지가 열로 손실된다. 유전 물질의 손실 탄젠트(유전 손실)는 복소 유전율의 허수부와 실수부의 비이며 식 (8)로 나타낸다. 복합체의 유전 손실은 높은 주파수를 가진 교류 전자기파가 가해졌을 때 분극이 주파수와 동일한 속도로 발생하지 못하고 이웃 쌍극자들과 마찰을 일으켜 열이 발생하는 것이다. 따라서 전자파 차폐 소재로 유전손실이 높은 소재를 고려해볼만 하다. 탄소 소재는 전도성이 높으면서 결합 상태에 의해 열적으로 활성화된 호핑 현상이 높은 유전 손실을 발생할 수 있어 전자파를 효과적으로 차단할 수 있다. 이는 기존의 금속 소재와는 다른 탄소 소재의 장점이다.

$$\tan\delta_\epsilon = \frac{J_c}{J_d} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (8)$$

자성 필러를 충전한 복합체는 매질 내에서 자기장이 열 에너지 등으로 손실되는 자성 손실(magnetic loss)이 발생하며 이는 투자율의 손실 탄젠트인 식 (9)로 나타낼 수 있다.<sup>9</sup>

$$\tan\delta_\mu = \frac{\mu''}{\mu'} \quad (9)$$

## 3. 전자파 차폐용 탄성 탄소 복합체

### 3.1 카본 블랙 (Carbon black)

카본블랙은 탄화수소의 열분해에 의해 생성되는 작은 입자 크기의 탄소 안료이다. 카본 블랙은 고무 화합물의 내구성과 강도를 증가시키는데 사용되며 1차 입자가 아닌 입자 응집체로 존재하여 복합체 내에서의 분산성이 매우 중요하다.<sup>10</sup> 카본블랙을 사용한 SBR 복합체로 20 dB를 달성하려면 높은 카본블랙 함량(35 wt%, 8–12 GHz, t= 0.65 cm) 혹은 보다 두꺼운 두께(15.3 wt%, 8–12 GHz, t=7 cm)로 복합체를 제조해야 한다.<sup>11</sup> 가황 EPDM은 조금 더 높은 EMI SE를 달성할 수 있지만 여전히 높은 함량의 카본 블랙(35 wt%, 8–12 GHz, t = 5.5 mm)을 필요로 한다.<sup>12</sup> 카본블랙 입자 간의 네트워크 형성으로 인한 전기 전도성의 증가는 EMI SE의 증가와 밀접한 관련이 있으며(Figure 2) 고무의 블렌딩을 통한 카본 블

랙의 분산도 증가로 복합체의 EMI SE를 증가시킬 수 있다.<sup>13</sup> NR 70/BR 30 블렌딩 고무 복합체는 25 vol%의 카본 블랙 함량으로 2 mm의 두께로 20 dB의 EMI SE를 달성할 수 있다.<sup>14</sup>

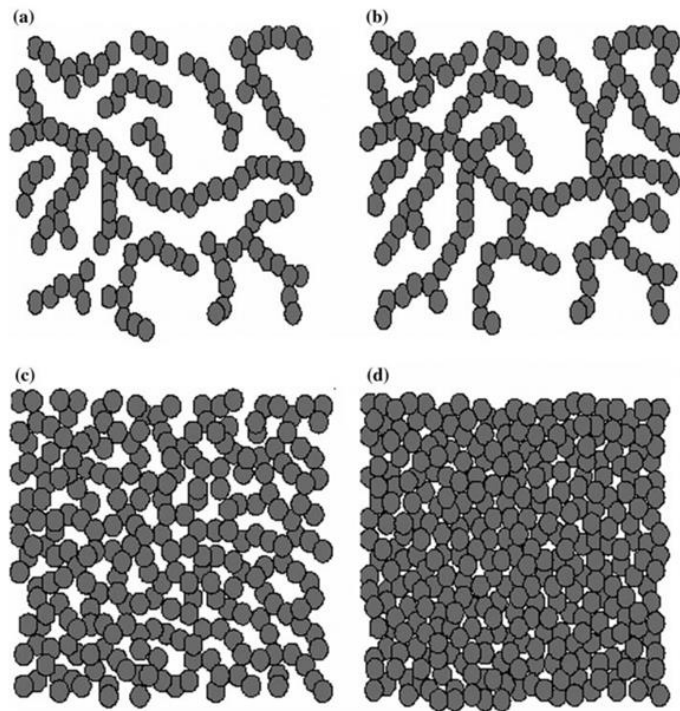
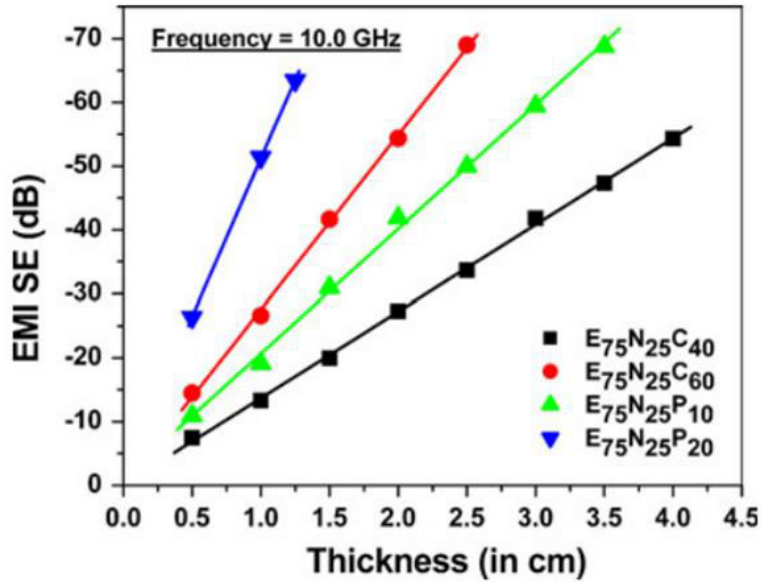


Figure 2. Conductive network systems (a) at percolation, (b) just above percolation, (c) above percolation, and (d) far above percolation.<sup>13</sup>

### 3.2 그래핀 (Graphene)

그래핀의 2차원 구조로 그래핀은 전자파 차폐 소재로 각광받고 있으며 낮은 충전함량으로도 높은 EMI SE를 달성할 수 있다. Figure 3 (C and D)에서 그래핀은 흑연과 비교하여 네트워크 형성이 우수하여 흑연 대비 전도성이 우수하다. Figure (E and F)에서 그래핀은 흑연보다 전자파를 반사할 수 있는 면적이 넓어 다중 산란에 유리하므로 전자파 차폐에 보다 유리하다.<sup>15</sup>

Zongping Chen은 그래핀 PDMS 폼을 1 mm 이하의 두께로 만들어 X 밴드에서 33 dB의 EMI SE를 보였다. 또한 그래핀 폼의 전도성이 0.6 S/cm에서 2.1 S/cm으로 증가하자 EMI SE가 15 dB에서 33 dB로 증가하였다. 또한 그래핀을 2.7 wt% 충전하여 전기전도도 6.74 S/cm, 1.6 mm의 두께로 EMI SE 25 dB를 보이는 그래핀 폼을 만들었다. (Figure 4) 그래핀 함량이 증가하면서 기공이 증가하여 밀도가 0.06 g/cm<sup>3</sup>까지 감소하였다.<sup>1</sup>

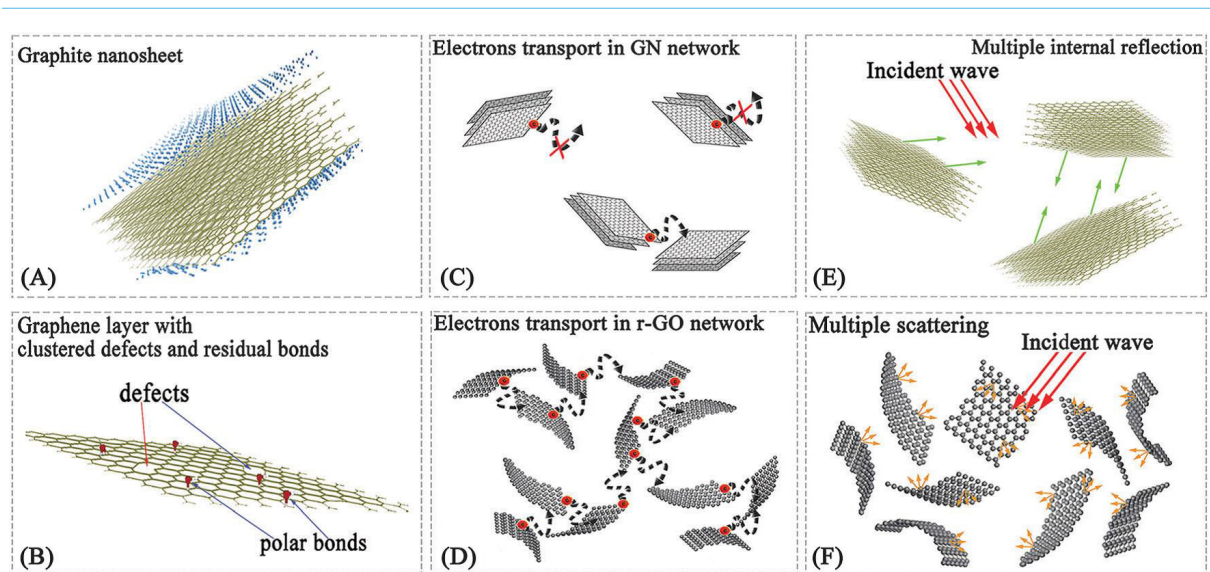


Figure 3. (A and B) Microstructure of GN and r-GO. (C and D) Electron transport network of GN and r-GO. (E and F) Microwave propagation model in GN and r-GO composites.<sup>15</sup>

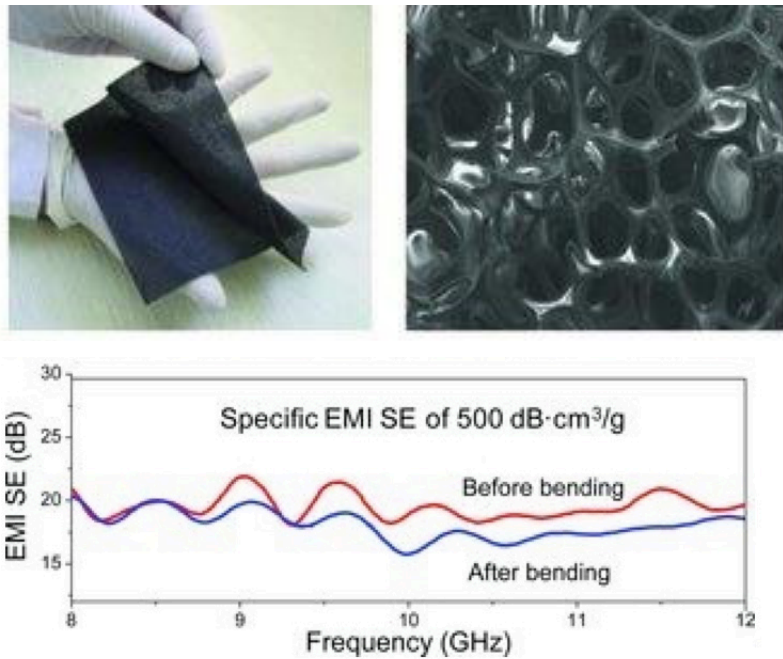


Figure 4. A lightweight graphene foam composite with a density of  $0.06 \text{ g/cm}^3$ .<sup>1</sup>

### 3.3 탄소 섬유 (Carbon fiber)

탄소섬유는 Polyacrylonitrile(PAN) 또는 석유계 잔사유를 원소재로 하여 제조되며 이들의 직경은 50 – 200 nm이며 길이는 50  $\mu\text{m}$  로 형상 종횡비는 250내지 2000이다. 탄소 섬유가 17 wt% 충전된 천연고무 복합체(12 GHz,  $t=3.5 \text{ mm}$ )는 20 dB의 EMI SE를 달성할 수 있다. 보다 유연율이 높은 EVA(Ethylene vinyl acetate copolymer) 복합체(12 GHz,  $t=3.5 \text{ mm}$ )는 8 wt%의 탄소섬유를 충전하여 20 dB의 EMI SE를 나타낸다.<sup>16</sup> 탄소 섬유의 로딩량이 증가하거나 분산성이 향상되어 탄소 섬유 간의 거리가 줄어들면 네트워크의 형성 또한 향상되어 복합체는 더 높은 EMI SE 성능을 나타낸다.<sup>16, 17</sup> Figure 5에서 EVA, NBR(Acrylonitrile butadiene copolymer)을 블렌드한 복합체는 탄소 섬유 10 phr 만으로 최대 70 dB의 EMI SE를 보인다.<sup>18</sup> (10 GHz, 2mm)



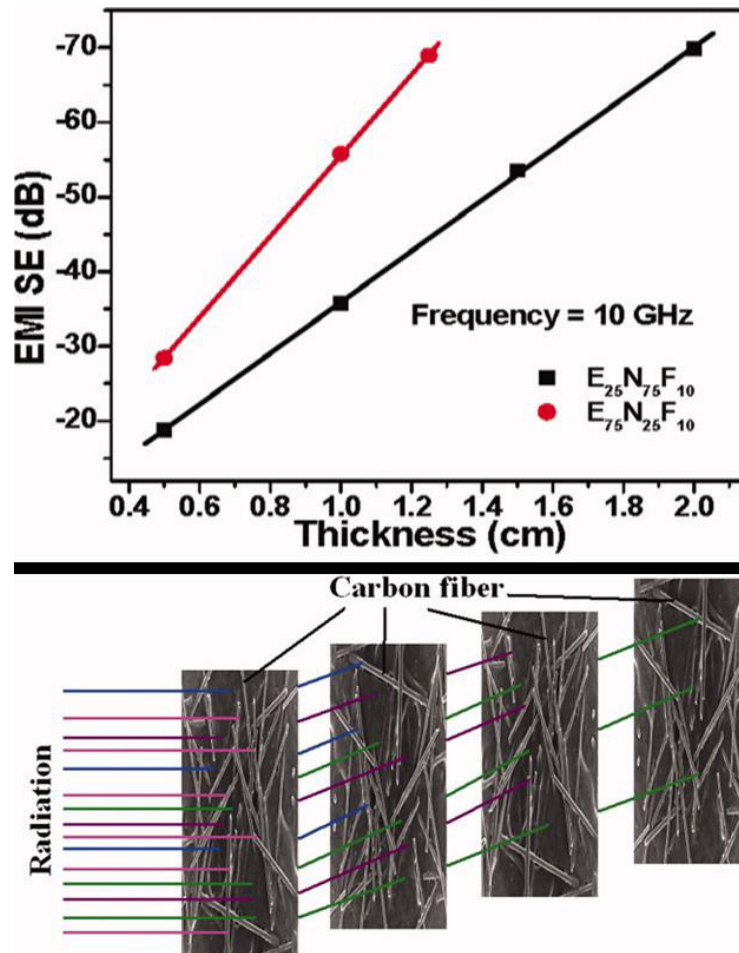


Figure 5. (a) Variation of EMI SE against thickness of composites and (b) mechanism of radiation absorption with increase in composite thickness.<sup>18</sup>

### 3.4 탄소 나노 튜브 (CNT: Carbon nanotubes)

CNT는 직경이 작으며 매우 높은 종횡비를 갖고 있어서 적절하게 분산이 되었다면 기존의 탄소 소재에 비해 매우 낮은 함량 (2 wt% 이하)으로 충분한 전자파 차폐 성능을 보인다. Kato는 1 wt%의 CNT를 불소고무에 첨가하여 0.5 mm의 두께로 EMI SE가 50 dB가 넘는 전자파 차폐 탄성체를 만들었다. Figure 6. (a)에서 CNT의 형상 종횡비의 손상을 최소화하기 위해 용매에 분산하는 방법을 사용하여 높은 기계적 강도를 유지하면서 높은 EMI SE 성능을 나타냈다.<sup>19</sup>

Fletcher는 고무의 종류에 따라서도 EMI SE가 달라지는 것을 확인하였는데 동일하게 CNT를 12 wt% 충전할 때 불소고무의 종류에 따라서 44 dB 에서 78 dB까지 EMI SE가 증가함을 확인하였다.<sup>20</sup>

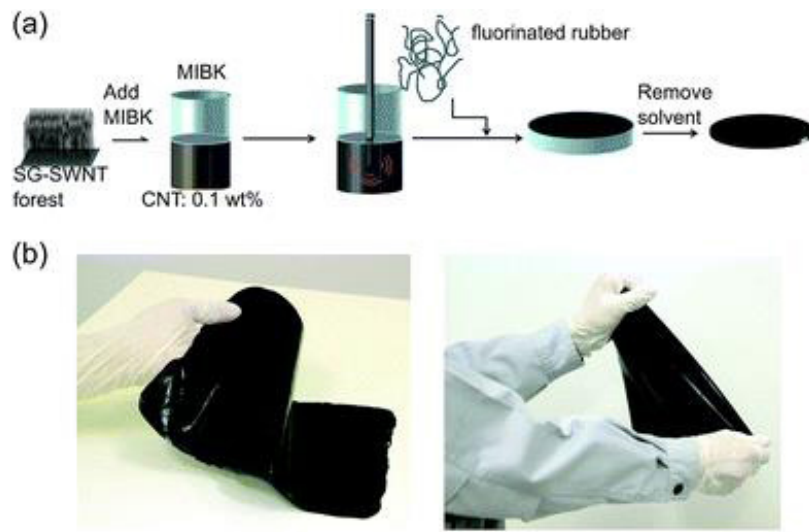


Figure 6. (a) Key steps in fabricating the SG-CNT/fluorinated rubber composite. (b) Photographs of the A4-paper-size SG-CNT/fluorinated rubber sample.<sup>19</sup>

## 4. 결론

우수한 전자파 차폐 소재는 높은 전도성 (일반적으로 1 S/m) 혹은 높은 유전상수를 보인다. 따라서 전자파 차폐 소재로 금속 필러 대신 가볍고 기계적 성질이 우수하면서 내부식성을 지닌 탄소계 필러가 그 자리를 대신하고 있다. 카본 블랙, 탄소 섬유 등 복합체의 기계적 물성을 강화하기 위해 산업적으로 이미 널리 사용하던 탄소계 필러를 그대로 사용하여 전자파 차폐 소재를 제조할 수도 있지만 전자파 차폐에 조금 더 특화된 그래핀과 CNT를 사용하면 더 낮은 충전함량으로도 우수한 성능의 전자파 차폐 복합체를 제조할 수 있다. 또한 충전제의 형상 종횡비는 전자파 차폐 성능에 영향을 미치며 탄소 충전제의 전자파 차폐 성능은 카본 블랙 < 탄소 섬유 < CNT < 그래핀의 순서로 나타낸다(Figure 7).<sup>21</sup> 탄소 충전제의 분산 방법 또한 전자파 차폐 성능에 영향을 끼치며 분산 방법이나 혼합 온도, 혼합 시간, 스크류의 속도 등 공정 변수들을 조절하여 복합체 내에서 탄소 충전제의 형상 종횡비를 유지하는 것이 중요하다.

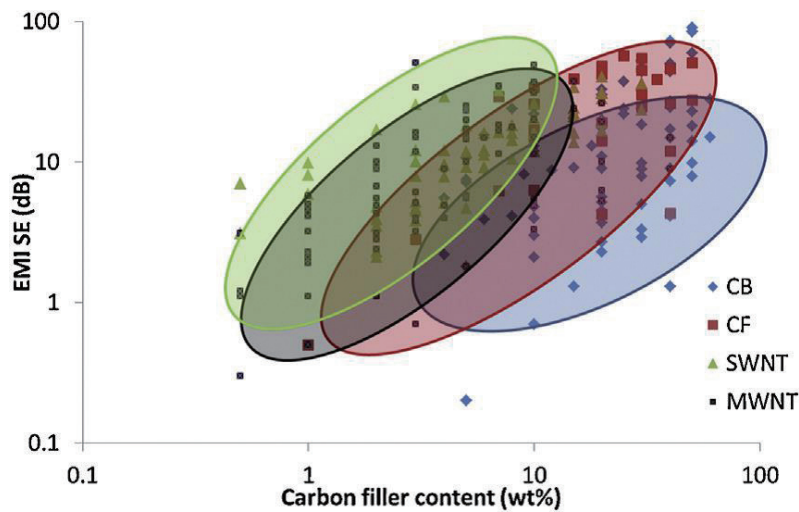


Figure 7. reported SE as a function of the carbon filler content and of the kind of carbon filler.<sup>21</sup>

## 참고문헌

1. Z. Chen, C. Xu, C. Ma, W. Ren, H. M. Cheng, "Lightweight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding." *Adv. Mater.*, **25**, 1296 (2013)
2. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films." *Science*, **306**, 666 (2004)
3. S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, C. R. K. Rao, M. Vijayan, D. C. Trivedi, "EMI shielding: Methods and materials-A review." *J. App. Polym. Sci.*, **112**, 2073 (2009)
4. C. W. Chu, J. Ouyang, J. H. Tseng, Y. Yang, "Organic donor-acceptor system exhibiting electrical bistability for use in memory devices." *Adv. Mater.* **17**, 1440 (2005)
5. C. Xiang, Y. Pan, X. Liu, X. Sun, X. Shi, J. Guo, "Microwave attenuation of multiwalled carbon nanotube-fused silica composites." *Appl. Phys. Lett.* **87**, (2005)
6. S. K. Hong, K. Y. Kim, T. Y. Kim, J. H. Kim, S. W. Park, J. H. Kim, B. J. Cho, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of monolayer graphene."

- Nanotechnology, **23**, 455704 (2012)
7. A. Joshi, S. Datar, "Carbon nanostructure composite for electromagnetic interference shielding." *Pramana*, **84**, 1099 (2015)
  8. J. Yu, X. Huang, C. Wu, P. Jiang, "Permittivity, thermal conductivity and thermal stability of poly (vinylidene fluoride)/graphene nanocomposites." *IEEE TDEI*, **18**, 478 (2011)
  9. J. Yan, Y. Huang, X. Chen, C. Wei, "Conducting polymers-NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> coated on reduced graphene oxide sheets as electromagnetic (EM) wave absorption materials." *Synthetic Metals*, **221**, 291 (2016)
  10. J. Sánchez-González, A. Macías-García, M. F. Alexandre-Franco, V. Gómez-Serrano, "Electrical conductivity of carbon blacks under compression." *Carbon*, **43**, 741 (2005)
  11. G. T. Mohanraj, T. K. Chaki, A. Chakraborty, D. Khastgir, "AC impedance analysis and EMI shielding effectiveness of conductive SBR composites." *Polym. Eng. Sci.*, **46**, 1342 (2006)
  12. P. Ghosh, A. Chakrabarti, "Conducting carbon black filled EPDM vulcanizates: assessment of dependence of physical and mechanical properties and conducting character on variation of filler loading." *Eur. Polym. J.*, **36**, 1043 (2000)
  13. M. Rahaman, T. K. Chaki, D. Khastgir, "Development of high performance EMI shielding material from EVA, NBR, and their blends: effect of carbon black structure." *J. Mater. Sci.*, **46**, 3989 (2011)
  14. M. Madani, "Conducting carbon black filled NR/ IIR blend vulcanizates: Assessment of the dependence of physical and mechanical properties and electromagnetic interference shielding on variation of filler loading." *J. Polym. Res.*, **17**, 53 (2009)
  15. B. Wen, X. X. Wang, W. Q. Cao, H. L. Shi, M. M. Lu, G. Wang, H. B. Jin, W. Z. Wang, J. Yuan, M. S. Cao, "Reduced graphene oxides: the thinnest and most lightweight materials with highly efficient microwave attenuation performances of the carbon world." *Nanoscale*, **6**, 5754 (2014)
  16. N. C. Das, D. Khastgir, T. Chaki, A. Chakraborty, "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites." *Compos. -A: Appl. Sci. Manuf.*, **31**, 1069 (2000)
  17. M. H. U. Al-SalehSundararaj, "A review of vapor grown carbon nanofiber/

- polymer conductive composites.” *Carbon*, **47**, 2 (2009)
18. M. Rahaman, T. K. Chaki, D. Khastgir, “High-performance EMI shielding materials based on short carbon fiber-filled ethylene vinyl acetate copolymer, acrylonitrile butadiene copolymer, and their blends.” *Polym. Composite*, **32**, 1790 (2011)
  19. Y. Kato, M. Horibe, S. Ata, T. Yamada, K. Hata, “Stretchable electromagnetic-interference shielding materials made of a long single-walled carbon-nanotube–elastomer composite.” *RSC Advances*, **7**, 10841 (2017)
  20. A. Fletcher, M. C. Gupta, “Mechanical properties of elastomer nanocomposites for electromagnetic interference shielding applications.” *J. Compos. Mater.*, **48**, 1261 (2013)
  21. J.-M. Thomassin, C. Jérôme, T. Pardoën, C. Bailly, I. Huynen, C. Detrembleur, “Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference (EMI) shielding materials.” *Mater. Sci. Eng. R Rep.*, **74**, 211 (2013)