

유리섬유강화 나노 복합재료의 전자기파 차폐 효과 비교

정우균* , 안성훈# , 원명식**

Comparison of Electromagnetic-wave Shielding Effect in Glass Fiber Reinforced Nano Composites

Woo-Kyun Jung* , Sung-Hoon Ahn # and Myung-Sik Won**

ABSTRACT

The research on electromagnetic shielding has been advanced for military applications as well as for commercial products. Utilizing the reflective properties and absorptive properties of shielding material, the replied signal measured at the rear surface or at the signal source can be minimized. The shielding effect was obtained from materials having special absorptive properties and structural characteristics such as stacking sequence. Recently researchers studied the electromagnetic properties of nano size particles. In this research {glass fiber}/{epoxy}/{nano particle} composites(GFR-Nano composites) was fabricated using various nano particles, and their properties in electromagnetic shielding were compared. For the visual observation of the nano composite materials, SEM(Scanning Electron Microscope) and TEM(Transmission Electron Microscope) were used. For the measurement of electromagnetic shielding, HP8719ES S-parameter Vector Network Analyser System was used on the frequency range of 8 GHz ~12GHz. Among the nano particles, carbon black and Multi-Walled Carbon Nano-Tube (MWCNT) revealed outstanding electromagnetic shielding. Although silver nano particles (flake and powder) were expected to have effective electromagnetic shielding due to their excellent electric conductivities, test results showed little shielding characteristics.

Key Words : Electromagnetic-wave Shielding (전자기파 차폐), Glass Fiber Reinforced Composite Material (유리섬유강화 복합재료), Nano composites (나노 복합재료)

1. 서론

전자기파 차폐는 재료의 반사특성과 흡수특성을 이용하여 차폐층의 배면 또는 신호발생지로의 수신신호를 최소화하는 것으로, 전자기파의 유용한 사용과 더불어 인체에 위해한 전자파로부터의 차

단이라는 상업적인 목적뿐만 아니라 레이더 탐지 회피 등의 군사적 목적으로도 중요한 의미를 가진다.

전자기파로부터의 영향을 최소화하기 위하여 높은 전자기파 흡수특성을 지닌 페라이트, 카본블랙, 금속입자 등의 재료¹⁻⁶를 이용하거나, 전자기

** 접수일: 2004년 9월 20일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

교신저자: 서울대학교 기계항공공학부

E-mail ahnsh@snu.ac.kr Tel. (02) 880-7110

** 국방과학연구소

파 입사각의 영향이나 다층의 적층구조 등의 구조 특성^{1, 7, 8}을 이용하여 전자기파를 흡수하는 연구가 이미 수행되어 왔으며, 근래에는 은 나노입자, 카본 나노 섬유 등의 전자기적 특성에 대한 다양한 연구⁹⁻¹⁶가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 카본블랙, 금속입자 등의 재료를 제외한 은(Ag) 나노 입자 및 카본나노튜브 등을 항공기나 자동차등의 전자파 차폐 재료로 사용하기 위한 적용분야는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 나노 복합재료의 전자기파 차폐 특성에 대하여 실험하여 기존의 연구결과와 비교하고, 나노 복합재료의 높은 전자기파 차폐 효과와 섬유강화 복합재료의 우수한 구조적 성질을 가지는 항공기, 자동차용 섬유강화 나노 복합재료를 제작하는데 관심을 기울였다. 이를 위하여 에폭시 수지에 분말형태의 나노 입자들을 균질하게 분산시킨 유리섬유강화 복합재 시편을 제작하고, 레이더 운용 대역인 8~12 GHz 에서의 전자기파 차폐효과를 측정하였다.

2. 전자기파 차폐효율

전자기파의 차폐는 재료의 1)유전적 특성, 2)자성 특성, 3)전도성 등에 따라 각기 차폐 특성이 달리 나타난다. 유전적 특성에 의한 전자기파 차폐는 전자기파 입사시 발생하는 유전재료 분자의 재정렬 시간 지연 현상으로 설명할 수 있으며, 자성특성은 자성재료가 전자기파를 받게 될 때 발생하는 회전현상으로 인한 전자기파 에너지의 발열전환으로 설명할 수 있다. 또한 전도성에 의한 전자기파 차폐는 재료의 전도성에 따라 표면에 유도되는 전류로 인한 전자기파의 에너지 전환으로 설명된다.

한편, 다층의 구조로 구성된 물질을 통과하는 전자기파는 Fig. 1 과 같이 물질의 표면에서 반사와 투과가 발생하며 다시 내부에서 다중반사와 소멸간섭, 투과를 반복하여 최종적으로 입사방향으로 반사신호를, 배면층으로 투과신호를 방출하게 된다.

이러한 물질의 전자기파에 대한 차폐정도는 차폐효율로 나타내는데, 차폐효율은 입사 전자기파의 세기(P_i)와 투과 전자기파(P_T)의 세기의 비로 정의되며 단위로 데시벨(dB)을 사용한다. 또한 전자기파의 세기는 전기장의 제곱에 비례하므로 입사전기장(E_i)과 투과 전기장(E_T)으로 식(1)과 같이 표현할 수 있다.¹⁷

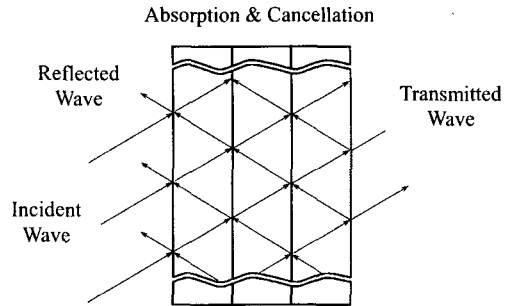


Fig. 1 Schematic structure of multilayer material

$$SE(\text{Shielding Efficiency}) = 10 \log(P_i / P_T) = 20 \log(E_i / E_T) \quad (1)$$

어떠한 재료를 통과하는 전자기파의 투과율(T : Transmittance), 반사율(R : Reflectance), 흡수율(A : Absorbance)은 전자기파의 입사전기장(E_i)과 투과 전기장(E_T), 반사된 전기장(E_R)으로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$T = |E_T / E_i|^2 \quad (2)$$

$$R = |E_R / E_i|^2 \quad (3)$$

$$A = 1 - R - T \quad (4)$$

식(1)~(4)를 통하여 전자기파 차폐효율을 식(5), (6)과 같이 구할 수 있다.

$$SE_R = -10 \log(1 - R) \text{ (dB)} \quad (5)$$

$$SE_A = -10 \log(1 - A) = -10 \log(T / (1 - R)) \text{ (dB)} \quad (6)$$

3. 실험

3.1 재료

실험에 사용된 유리섬유강화 나노 복합재는 Br 계 에폭시 수지에 4 종의 나노 입자(Table 1)를 분산시킨 후 (주)KPI 의 KN1800 평직(Plain weave) 유리섬유에 도포시켜 프리프레그를 제작하고 이를 적층하여 시편을 제작하였다.

MWCNT 와 CB 은 유전재료로서 기존의 연구결과¹로부터 광대역에서의 전자기파 차폐특성 예측이 가능하였으나, 첨가재료의 고유 특성에 따라 상이한 결과를 보일것으로 판단되어 선정하였으며, SNF 및 SNP 는 전도성이 우수한 은(Ag)을 모재료

Table 1 Nano particles used in this study

Nano Particle	Average Diameter (nm)
Multi-Walled Carbon Nano-Tube (MWCNT)	15
Carbon Black(CB)	40
Silver Nano Flake (SNF)	40
Silver Nano Powder (SNP)	40

로 하는 나노 입자¹²⁻¹⁵로서 나노 크기에서도 탁월한 전도성을 바탕으로 우수한 전자기와 차폐특성을 보이는가를 확인하기 위해 선정되었다.

3.2 시편 제작

전자기와 차폐측정을 위한 시편은 Epoxy 수지에 나노 첨가제를 각각 5wt%로 첨가하여 초음파 분산기(Sonicator)를 이용, 2 시간 동안 분산 후 유리섬유직물에 균질하게 도포하여 제작한 프리프레그를 Fig. 2의 성형과정을 통해 제작하였다. 나노 첨가제의 무게를 5wt%로 고정시킨 이유는 항공기 등에 적용시 중량의 증가를 최소화할 목적으로 판단하였다. 한편, 초음파 분산기를 이용한 재료분산과정에서 CB, SNF, SNP는 7wt%까지는 첨가제 함량에 따른 수지의 점도증가 현상이 나타나지 않았으나 MWCNT의 경우 6wt% 이상에서는 점도가 증가하는 현상을 보여 도포가 어려워 실험 기준을 5wt%로 고정하였다.

섬유강화 복합재료의 전자기와 차폐특성은 적층된 매질의 두께와 섬유 방향성에 영향을 받으므로¹ 대칭구조를 유지하며 각각 8장 / 16장의 프리프레그를 적층하여 두께가 다른 2종과 프리프레그의 적층각도를 변화시킨 2종의 시편을 제작하였으며(Cross ply $[(0_4)_s]$, Quasi isotropic $[(0/45)_2]_s$), 나노 재료 첨가에 따른 차폐성능의 변화를 비교하기 위하여 첨가제를 포함하지 않고 Epoxy 만을 도포하여 기준이 되는 시편을 별도로 제작하였다. 제작된 시편의 종류를 Table 2에 정리하였다.

나노 입자들의 결정형체와 크기 및 구조를 확인하기 위하여 TEM (Transmission Electron Microscope, JEM-3000F) 사진을 촬영하였다. 제작된 시편의 나노 첨가제의 균질한 분산여부 및 섬유와 수지의 분포를 확인하기 위하여 SEM (Scanning Electron Microscope, JSM-5600)와 EPMA (Electron Probe Micro Analyzer, JXA-8900R)를 촬영하였다.

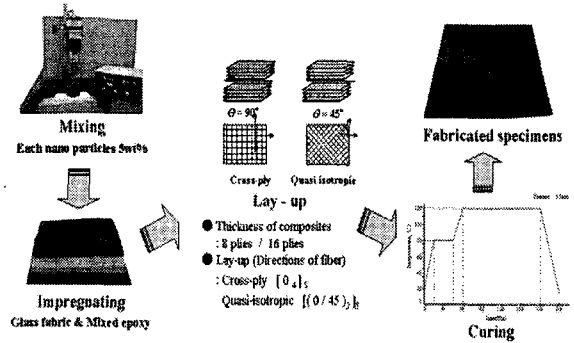


Fig. 2 Curing cycle of GFR-Nano composites

Table 2 Specimens tested in this experiment

No	Specimens Name	Added Nano Material	No. of Ply / t (mm)	Lay-up
1	G-8-C	None	8 / 1.25	Cross-ply
2	G-16-C		16 / 2.40	
3	G-8-Q		8 / 1.30	Quasi-isotropic
4	G-16-Q		16 / 2.40	
5	CNT-8-C	MW -CNT	8 / 1.25	Cross-ply
6	CNT-16-C		16 / 2.40	
7	CNT-8-Q		8 / 1.30	Quasi-isotropic
8	CNT-16-Q		16 / 2.40	
9	CB-8-C	CB	8 / 1.30	Cross-ply
10	CB-16-C		16 / 2.35	
11	CB-8-Q		8 / 1.25	Quasi-isotropic
12	CB-16-Q		16 / 2.45	
13	SNF-8-C	SNF	8 / 1.35	Cross-ply
14	SNF-16-C		16 / 2.60	
15	SNF-8-Q		8 / 1.35	Quasi-isotropic
16	SNF-16-Q		16 / 2.60	
17	SNP-8-C	SNP	8 / 1.40	Cross-ply
18	SNP-16-C		16 / 2.65	
19	SNP-8-Q		8 / 1.40	Quasi-isotropic
20	SNP-16-Q		16 / 2.65	

3.3 전자기와 차폐효과 측정

전자기와 차폐효과는 HP8719ES S-parameter Vector Network Analyzer System을 이용하여 측정하였다. 시편을 2-Ports Flanged Coaxial Line Holder에 고정시키고 HP8719ES 회로망 분석기를 통하여 반사신호인 S_{11} 과 투과신호인 S_{21} 을 측정하여 투과

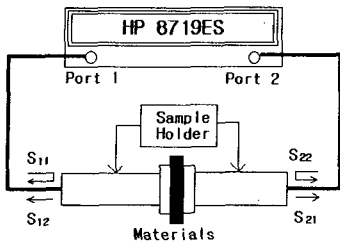


Fig. 3 Test setup for EM shielding measurement

계수와 반사계수를 구하고 이를 계산하여 시편의 흡수에 의한 차폐효과와 반사에 의한 차폐효과를 구하였다(Fig. 3).

4. 결과 및 토의

4.1 형태 분석

사용된 나노 재료는 15~40nm 의 평균직경을 보였으며, 각 재료마다 독특한 형상을 지니고 있었다.

4.1.1 나노입자의 형태 : TEM

MWCNT 는 평균 15nm 의 직경을 보이며 세장 비(Aspect ratio) 는 1000 이상으로 나타났다.

카본블랙은 얇은 쉘의 형태를 나타내었으며 평균 40nm 의 직경을 보였다.

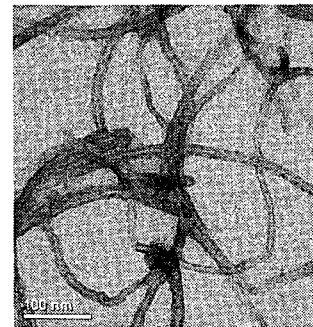
SNF 와 SNP 는 입자가 방향성을 갖는 형상으로 관찰되었는데 이는 은(Ag)의 탁월한 전도성과 연관이 있을 것으로 추정되었다. SNF 와 SNP 의 차이는 제조업체 제조과정상의 차이로 각기 다른 형상의 입자가 생산되었다. 두 종류의 은 나노입자는 모두 평균 40nm 의 직경을 보였으며 SNF 는 얇은 박편의 형상을 나타내었고, SNP 는 변형된 타원의 구와 같은 형상을 보였다.

Fig. 4 는 실험에 사용된 재료의 TEM 사진이다

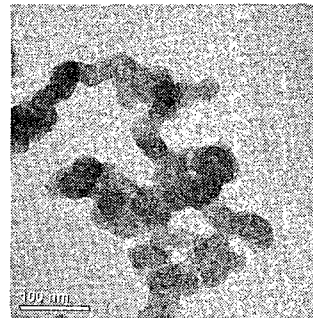
4.1.2 GFR-나노 복합재의 구조 : SEM

SEM 사진을 통하여 GFR-나노 복합재의 구조를 확인하였다.

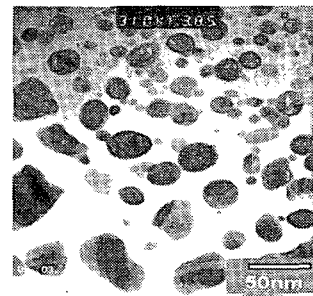
1,000 배 및 2,000 배의 배율에서 수지와 섬유의 배열을 확인할 수 있었으나 첨가된 재료들의 분산 여부는 확인이 불가하여 10,000 배의 배율로 관찰한 결과 나노 재료들의 분산모습을 일부 확인할 수 있었다.



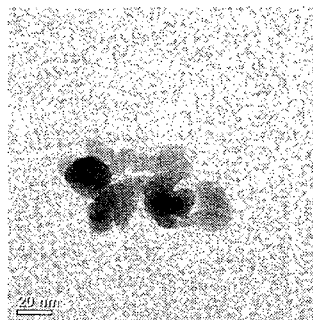
(a) MWCNT



(b) Carbon Black



(c) Silver Nano Flake



(d) Silver Nano Powder

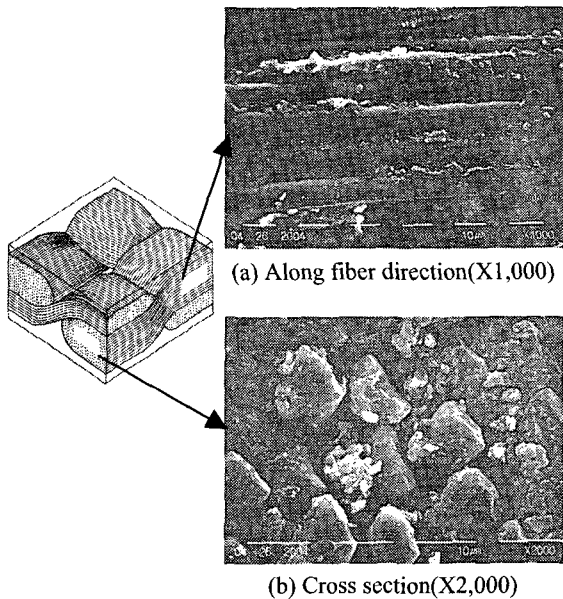
Fig. 4 TEM pictures of Nano particles

Fig. 5 (a)는 1,000 배의 배율로 섬유 표면의 측면을 길이방향으로 촬영한 사진이며, (b)는 2,000 배의 배율로 섬유를 수직 절단한 단면을 촬영한 사진이다.

Fig. 5 (a)에서 섬유와 섬유 사이에 충전되어 있는 것은 나노 재료가 첨가된 수지이며, (b)에서 흰색의 조각들은 시편을 절삭 가공하는 과정에서 발생한 유리섬유의 조각이다.

앞서 언급한 바와 같이 수지내에 함유된 나노 재료들은 배율이 낮아 관찰되지 않았다.

Fig. 5 (c)는 MWCNT가 첨가된 시편을 10,000 배의 배율로 촬영한 사진이다. 사진에서 수지에 분포되어 있는 튜브형상의 MWCNT를 확인할 수 있었다.



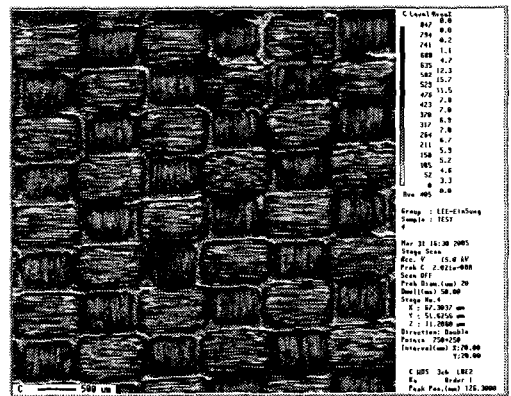
(C) MWCNT in GFR-nano composites(X10,000)

Fig. 5 SEM pictures of GFR-Nano composites

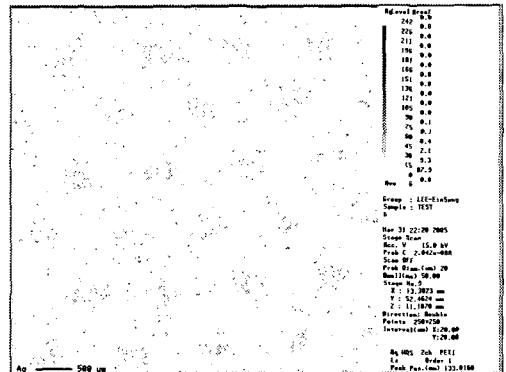
그러나, CB와 SNF, SNP는 SEM을 통하여 수지에 분산되어 있는 모습의 확인이 제한되어 EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)를 통하여 섬유와 섬유 사이의 수지에 분산되어 있음을 확인하였다. (Fig. 6)

Fig. 6 (a)는 CB를 첨가한 시편에 대한 탄소(C) 원소의 검출 결과이다. 그림에서 어두운 부분은 유리섬유 직물의 사이와 에폭시 수지에 분산되어 있는 CB의 탄소 성분이며, 밝은 부분은 유리섬유를 포함한 다른 원소로서 그림을 통하여 섬유와 섬유 사이에 균질하게 분산되어 있는 CB의 모습을 확인할 수 있다.

Fig. 6 (b)는 SNF가 첨가된 시편에 대한 은(Ag) 원소의 검출 결과로서, 어두운 부분이 은의 분산 모습이며 밝은 부분은 유리 섬유 및 에폭시의 다른 원소가 충전되어 있는 부분이다.



(a) Carbon detection of CB composites (X100)



(b) Ag detection of SNF composites (X100)

Fig. 6 EPMA results of GFR-Nano composites

그림에서 알 수 있듯이 은 나노 입자는 섬유와 섬유 사이에 균질한 형태로 분산되어 있으나 검출되는 양이 Fig. 6 (a)의 CB 에 비하여 상당히 적음을 알 수 있다. 이는 복합재 내에서 부피 비로 판단할 경우 밀도가 높은 은 나노 입자의 5wt%는 전체 부피에 대비하여 지극히 소량이기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 전자기파 차폐효과 분석

측정된 전자기파 차폐효과를 실험의 변수로 판단했던 재료에 따른 특성과 두께에 따른 특성, 그리고 재료의 방향성에 따른 특성으로 구분하여 분석하였다. Fig. 7 은 10GHz 를 기준으로 8~12GHz 에서의 전자기파 차폐효율의 분포이다.

4.2.1 재료에 따른 차폐 효율 비교

재료에 따른 차폐효과는 첨가제가 미첨가 된 유리섬유강화 복합재료를 기준으로 4 종의 첨가제를 첨가한 각각의 유리섬유강화 나노복합재의 전자기파 차폐효과를 비교하였다. 각각의 재료는 두께방향 대칭구조로 설계되어 양 방향의 차폐효율은 거의 동일하게 나타났다.

Fig. 7 에서 알 수 있듯이 첨가제가 포함되지 않은 유리섬유강화 복합재료(G8C, G8Q, G16C, G16Q) 는 약간의 차폐특성만을 보였으나 카본블랙과 MWCNT 를 첨가한 유리섬유강화 나노 복합재료 (CB & CNT series)의 경우 두드러진 차폐효과를 나타내었다.

특히, MWCNT 의 경우는 카본블랙의 3 배 가까운 33dB 이상의 탁월한 차폐특성을 보였다.

이로써 CB 와 MWCNT 가 복합재료에 유전적 특성을 부여하는 유전재료로서 광대역에서 우수한 전자파 차폐특성을 나타냄을 알 수 있다.

반면 SNF 와 SNP 를 첨가한 나노 복합재의 경우는 나노 입자가 첨가되지 않은 유리섬유강화 복합재와 거의 동일하게 낮은 전자파 차폐 특성을 보였는데, 이는 은 나노 입자의 높은 밀도로 인하여 5w%의 함량이 극히 소량이라 특별한 전도적 특성을 나타내지 못하는 것으로 판단된다. 또한 전도성 재료의 광대역에서의 전자기파 차폐효과에 대한 고찰도 확인되어야 할 부분으로 판단된다.

4.2.2 두께에 따른 차폐효율 비교

8 장의 프리프레그를 적층하여 제작된 시편의 경우 평균 1.30mm 의 두께로, 16 장의 프리프레그를 적층한 시편은 평균 2.50mm 의 두께로 제작되었다.

Fig. 7 에서 볼 수 있듯이 나노 입자가 첨가되지 않은 시편의 경우 오차범위 내에서 약간의 증가 경향을 보였으나, CB 와 MWCNT 의 경우는 두께가 두 배 증가함에 따라 차폐효율도 두 배 이상 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 두께의 증가에 따라 적층구조 내에서 다중반사를 통한 흡수 소멸현상이 증가한 것으로 판단된다.

한편, SNF 와 SNP 의 경우는 두께에 따른 차폐효율에 있어서도 특별한 성능의 변화를 보이지는 않았다. 이는 금속성의 나노 입자들이 반사층을 형성하여 전자기파가 다층구조 내부로 진입하는 것을 방해하기 때문인 것으로 추정되며, 이에 대한 추가적인 연구가 요망된다.

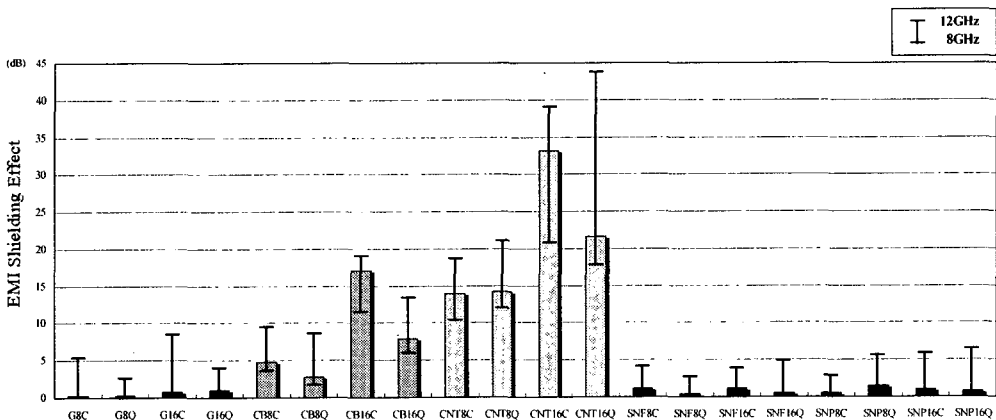


Fig. 7 EM shielding effect of each nano composites

4.2.3 재료의 방향성에 따른 차폐효율 비교

재료의 적층방향에 따른 차폐효과의 차이를 확인하기 위하여 시편제작시 Cross-ply 는 $[0_4]_s$, Quasi-isotropic 은 $[(0/45)_2]_s$ 각도의 대칭구조로 적층하였다. 이때, $[0]$ 은 직조된 프리프레그 1 장을 수직방향으로 적층한 것을 의미하며, $[0/45]$ 는 수직방향으로 1 장과 45 방향으로 1 장의 프리프레그를 적층한 것이다. 섬유강화 복합재료는 섬유의 방향성에 따라 기계적, 전자기적 물성 등이 변하게 되는데, 전자기파의 투과시 섬유의 방향에 따라 적층구조 내부에서의 다중반사에 의한 소멸이 상이하게 발생될 것으로 판단되었다.

CB 의 경우 Cross-ply 로 적층한 구조가 Quasi-isotropic 의 구조로 적층한 시편보다 오차범위 내에서 다소 우수한 차폐특성을 보이는 경향을 보였으며, 나노 입자가 첨가되지 않은 경우와 MWCNT 의 경우는 8 장과 16 장의 적층 구조 모두 오차범위 내에서 유사한 전자기파 차폐 특성을 보였다. 실험을 통하여 적층 방향에 따른 다중반사의 영향요소는 전자기파의 차폐 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 확인되었다.

SNF 및 SNP 는 재료의 적층 구조에 따라라도 특별한 전자기파 차폐특성을 보이지 않았는데, 이는 두께의 경우와 마찬가지로 다중반사에 의한 전자기파 흡수 소멸작용의 제한 때문으로 추정된다.

5. 결론

실험을 통하여 유리섬유로 강화된 나노 복합재의 전자기파 차폐특성에 대하여 확인하였다.

선행되었던 연구결과와 같이 카본블랙이 첨가된 재료는 우수한 차폐특성을 나타내었으며, 카본나노튜브가 첨가된 재료는 카본블랙이 첨가된 나노 복합재보다 탁월한 차폐특성을 보였다. 반면, 은 나노입자는 광대역에서 특별한 전자기파 차폐특성을 보이지 않았는데, 이는 첨가된 은 나노입자의 양이 극히 소량이었다는 점과 전도성 차폐재료의 광대역 전자기파에 대한 차폐특성 등에 대하여 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 실험을 통하여 섬유강화 복합재료와 나노 복합재료의 접목으로 나노 물질의 특성을 기존의 섬유강화 복합재료에 적용하여 보다 우수한 전자기파 차폐 특성을 가진 재료를 확인할 수 있었다.

카본블랙과 탄소나노튜브 등의 첨가물질이 복

합재료의 강도와 강성 등 기계적 물성에 대하여 미치는 영향에 대한 추가적인 실험을 통하여 유리 섬유강화 나노 복합재료의 구조재료로서 사용가능성을 확인할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소의 “광대역 전자파 흡수구조체 설계 / 해석 연구(ADD-03-11-01)”와 BK21 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 실험에 조언해주신 KPI 의 김영근, 김영민님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Oh, J. H., Oh, K. S., Kim, C. G. and Hong, C. S., "Design of radar absorbing structures using Glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges," *Composites Part B*, Vol. 35, pp. 49 - 56, 2004.
2. Pinho, M. S., Gregori, M. L., Nunes, R. C. R. and Soares, B. G., "Performance of radar absorbing materials by waveguide measurements for X-and Ku-band frequencies," *European Polymer Journal*, Vol. 38, pp. 2321 - 2327, 2002.
3. Chung, D. D. L., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials," *Carbon*, Vol. 39, pp. 279 - 285, 2001.
4. Li, G., Hu, G. G., Zhou, H. D., Fan, X. J. and Li, X. G., "Absorption of microwaves in $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ manganese powders over a wide bandwidth," *Journal of Applied Physics*, Vol. 90, pp. 5512 - 5514, 2001.
5. Cheng, K. B., Ramakrishna, S. and Lee, K. C., "Electromagnetic shielding effectiveness of copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites," *Composites Part A*, Vol. 31, pp. 1039 - 1045, 2000.
6. Han, G. Y., Ahn, D. G., Lee, S. K., Kim, M. S. And Kim, J. S., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of metal powder / glass fiber woven roving and carbon fiber unidirection fabric reinforced composite," *Proceedings of the KSPE Spring Annual Meeting 2004*, pp. 950 - 953, 2004.
7. Tretyakov, S. A. and Maslovski, S. I., "Thin

- Absorbing Structure for all incidence angles based on the use of a high-impedance surface," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 38, pp. 175 - 178, 2003.
8. Matous, K. and Dvorak, G. J., "Optimization of Electromagnetic Absorption in Laminated Composite Plates," *Transactions on Magnetics*, Vol. 39, pp. 1827 - 1835, 2003.
 9. Kajima, A., Nakayama, R., Fujii, T. and Inoue, M., "Variation of dielectric permeability by applying magnetic field in nano-composite $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ sputtered films," *Journal of magnetism and magnetic materials*, Vol. 258, pp. 597 - 599, 2003.
 10. Trakhtenberg, L. I., Axelrod, E., Gerasimov, G. N., Nikolaeva, E. V. and Smirnova, E. I., "New nano-composite metal-polymer materials : dielectric behaviour," *Non-Crystalline Solids*, Vol. 305, pp. 190 - 196, 2002.
 11. Talbot, P., Konn, A. M. and Brosseau, C., "Electromagnetic characterization of fine-scale particulate composite materials," *Journal of magnetism and magnetic materials*, Vol. 249, pp. 481 - 485, 2002.
 12. Kim, W. M., Ku, D. Y., Lee, I. K., Seo, Y. W., Cheong, B. K., Lee, T. S., Kim, I. H. and Lee, K. S., "The electromagnetic interference shielding effect of indium-zinc oxide/silver alloy multilayered thin films," *Thin Solid Films*, Vol. 473, pp. 315 - 320, 2005.
 13. Hong, Y. K., Lee, C. Y., Jeong, C. K., Sim, J. H., Kim, K. and Joo, J., "Electromagnetic interference shielding characteristics of fabric complexes coated with conductive polypyrrole and thermally evaporated Ag," *Current Applied Physics*, Vol. 1, pp. 439 - 442, 2001.
 14. Fan, L., Su, B., Qu, J. and Wong, C. P., "Effect of nano-sized particles on electrical and thermal conductivities of polymer composites," *Proceedings of 9th Int'l Symposium on Advanced Packaging Materials*, pp. 193 - 199, 2002.
 15. Ye, L., Lai, Z., Liu, J. and Tholen, A., "Effect of Ag particle size on electrical conductivity of isotropically conductive adhesives," *Electronics Packaging Manufacturing*, Vol. 22, pp. 299 - 302, 1999.
 16. Yang, S., Lozano, K., Lomeli, A., Foltz, H. D. and Jones, R., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites," *Composites : Part A*, Vol. 36, pp. 691 - 697, 2005.
 17. Hong, Y. K., Lee, C. Y., Jeong, C. K., Lee, D. E., Kim, K. and Joo, J., "Method and apparatus to measure electromagnetic interference shielding efficiency and its shielding characteristics in broadband frequency ranges," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 74, pp. 1098 - 1102, 2003.