한국정밀공학회지 제 23 권 제 8 호 (2006 년 8 월)
Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, No. 8, August 2006

메탈 파우더와 나노 카본 블랙/섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과에 관한 연구

한길영#, 김진석*, 안동규**

A Study on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of the Metal Powders and Nano Carbon black /Fiber Reinforced Epoxy composites

Gil Young Han#, Jin Seok Kim* and Dong Gyu Ahn**

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the electromagnetic interference(EMI) shielding characteristics of fiber reinforced composites. We fabricated glass and carbon fiber reinforced composites filled with metal powder and nano carbon black. The measurements of shielding effectiveness(SE) were carried out frequency range 300MHz – 1GHz for commercial purposes such as electric or telecommunication devices. The return loss and loss due to absorption were also measured as a function of frequency in the micro wave(300MHz-1GHz) region. It is observed that the SE of the composites is the frequency dependent, increase with the increases in filler loading. The Mg metal powder filled composite showed higher SE compared to that of carbon black. The Mg metal powder/epoxy composite was shown to exhibit up to 40dB of SE. The results indicates that the composite having higher filler loading can be used for the purpose of EMI shielding as well as for some microwave applications.

Key Words : Electromagnetic interference (전자파 간섭), Shielding effectiveness (차폐 효과), Carbon black (카본 블랙), Micro wave (마이크로파)

1. 서론

산업화가 급속하게 진행됨에 따라 대기오염, 수질오염 및 소음공해 등과 같은 환경오염이 크게 증가하고 있다. 이러한 환경오염은 눈, 코, 귀를 통하여 확인을 할 수 있지만 제 4 의 공해라 불리는 전자파는 보이지도 않고 들리지도 않는데 그 심각성이 있다.[1] 현대의 인간은 전자파에 둘러싸여 살고 있다고 해도 과언이 아닐 만큼 인간의 몸은 다양한 종류의 전자파에 노출되어 있다. 이러한 전자파가 인체에 직접적인 영향을 미쳐 장애를 일으키거나 디지털 기기의 오작동을 유발하고 산업기기의 오작동을 일으켜 산업재해를 유발할 수도 있다. 또한, 생체리듬의 불균형을 가져오고 가임 여성들의 유산 및 기형아 출산과 혈액암, 뇌암 등 여러 가지 질병들을 유발시킬 수 있다고 보고되고

☞ 접수일: 2005 년 10 월 13 일; 게재승인일: 2006 년 6 월 16 일
교신저자: 조선대학교 기계공학과
E-mail kybhan@mail.chosun.ac..kr Tel. (062) 230-7130
* 조선대학교 대학원 기계공학과
** 조선대학교 기계공학과

있다.[2]

휴대폰 전자파의 경우 인체, 특히 뇌에 악영향을 미친다는 주장은 매우 설득력이 있다. 휴대폰이 다른 가전 제품보다 주목 받는 이유는 휴대폰에서 방출하는 전자파의 독특한 성질에 기인한다. 대부분의 가전제품이 극 저주파인 반면 휴대폰에서 방출하는 전자파는 극 고주파를 방출한다. 이것은 접촉하는 부위의 온도를 높이는 열 효과를 가지고 있어 일정 체온을 유지하고 있는 인체에서 특정부위의 온도가 상승 한다면 이 부분의 생리적인 리듬이 깨지고 두부에 밀착되어 사용하기 때문에 더 위험성이 높다고 할 수 있다.[3]

최근 EMI(electromagnetic interference), EMS (electromagnetic susceptibility), EMC(electromagnetic compatibility)등과 같이 전자제품이나 통신기기 등에서 방출되는 전자파가 인체에 미치는 영향에 대한 관심이 급증하고 있으며, 전자파를 차폐 및 흡수할 수 있는 재료개발의 필요성이 절실히 요구되고 있는 실정이다.[4-10]

금속은 전기 전도도가 크기 때문에 전자파 차폐재로 우수한 재료이지만, 재료에 따라서 가격이 비싸고 그 무게가 무겁다는 단점이 있다. 비강성, 비강도, 굴곡성, 경량성 등이 우수한 섬유강화 복합재료는 전자장치의 하우징(housing) 재료로 많이 사용되고 있지만, 전자파 간섭으로부터 보호될 수 있어야 한다. 고분자 재료가 모재인 복합재료는 전기적으로 절연체이기 때문에 전자파 차폐 효과는 거의 없다. 전자파를 차폐하기 위한 섬유강화 복합재료는 전기 전도도가 큰 메탈 파우더나 카본블랙과 같은 충진재를 혼합하여 사용하는 기술적인 방법이 연구되고 있다. Jana PB 등[11]은 전기적 충진재로 카본블랙, 그라파이트 화이버(graphite fibers), 메탈 화이버(metal fiber), 금속파우더(metal powder)를 모재에 혼합하여 전자파 차폐 효과와 전기적 전도성을 향상 시킬 수 있었다고 보고 하였다. Baker 등[12,13]은 고무(acrylonitrile butadiene rubber)에 강 섬유(steel fiber)를 충진재로 사용하여 전자파 차폐효과를 평가 하였다. Das 등[14]은 탄소섬유 / 카본블랙 / ethylene vinylacetate 복합재료를 제작하여 100 – 2000 MHz 와 8 ~ 12 GHz(X-band range)대역에서 필러의 중량율이 증가 함에 따라 전자파 차폐효과 특성을 고찰하였다.

모재인 에폭시에 메탈 파우더와 전도성 카본블랙을 혼합한 유리섬유와 탄소섬유 강화 복합재료는 균열의 진전을 막고, 기계적 성질을 향상시켜 전자파 차폐효과를 가져옴으로써 가전제품이나 통신장비의 하우징 재료로 사용되기에 매우 적합할 것으로 생각 된다.

그러나, 대부분의 연구들이 고분자 재료의 유전 특성에 관한 것으로 섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과에 관한 정량적인 실험적 연구는 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 티타늄, 니켈, 마그네슘 메탈 파우더와 카본블랙을 혼합하여 첨가한 GFRP / CFRP 의 전자파 차폐효과를 고찰하기 위하여 모재인 에폭시에 카본블랙과 메탈 파우더의 중량비 변화에 따른 섬유강화 복합재료를 제작하여 300 MHz ~ 1 GHz 의 주파수 대역에서 전자파 차폐효과에 대한 특성을 고찰하였다.

2. 메탈파우더/카본블랙/에폭시 복합재료의 제작방법

2.1 재료의 선정

본 연구에서 사용된 카본블랙은 코리아카본블랙의 HI-BLACK 41Y 를 사용하였으며, 물성은 Table 1 과 같다. Table 2 는 본 연구에서 사용한 메탈파우더 입자의 크기를 나타낸다. 강화재인 섬유는 한국화이버사의 유리섬유 로빙 매트(Woven roving met:CM 380 A)와 일방향 탄소섬유 매트(Toray CAT-300)를 사용하였으며, 기지재인 에폭시와 경화제는 각각 LR-67 과 LH-33 으로 한국카본 제품이며, 주로 섬유강화 복합재료의 기지재로 사용되거나 코팅 등에 사용되는 재료이다

Table 1 Typical properties of HI-BLACK 41Y

TRAD NAME	Surface Area (mg/g)	Particle Diameter (nm)	Apparent Density (Kg/m^3)	pH
HI-BLACK41Y	150	19	170	8

Table 2 Mesh of metal powder

종 류	Ti	Ni	Mg
입자크기	500mesh	400mesh	100mesh

2.2 제작방법

카본블랙을 용매인 아세톤과 혼합하여 분산시킨 후, 이 용액과 에폭시를 혼합하여 2000 rpm 으로 30 분 동안 교반 하였다. 이 과정에서 아세톤의 급격한 기화를 막으면서 용액의 점성을 낮게 유지하기 위해 40 ℃로 유지하였다. Fig. 1 은 교반기(homogenizer)와 온도를 유지하기 위한 장치를 보여준다. 이 용액을 상온에서 12 시간, 80 ℃에서 24 시간 동안 오븐에 넣어 용매를 제거하고 카본블랙과 에폭시로만 이루어진 혼합물을 얻었다. 그 후에 이 혼합물과 경화제를 2 : 1 의 비율로 혼합하여 이형제를 바른 몰드에 부어서 섬유매트에 고르게 함침시킨후 80 ℃에서 핫프레스로 압축성형하여 섬유강화 복합재료를 제작하였다. 시험편 제작과정을 Fig. 2 에 나타내었다

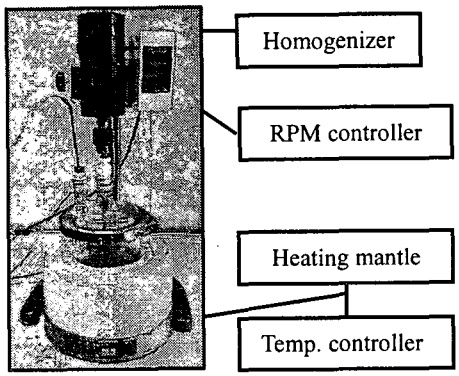

Fig. 1 Homogenizer and temperature control system

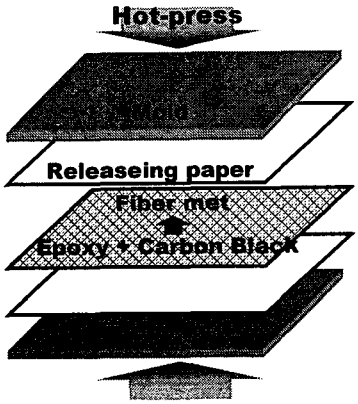

Fig. 2 Manufacturing process of electromagnetic interference shielding specimens

티타늄, 니켈, 마그네슘 메탈파우더 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%, 40 wt%를 에폭시에 혼합하여 교반기를 이용하여 2000 rpm 으로 30 분간 교반하였으며, 핫프레스를 이용하여 동일한 시험편을 제작하였다.

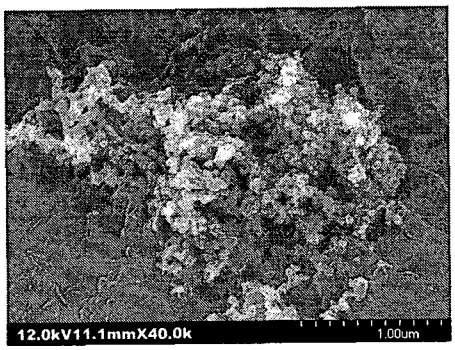

Fig. 3(a) Microstructures of carbon black powder

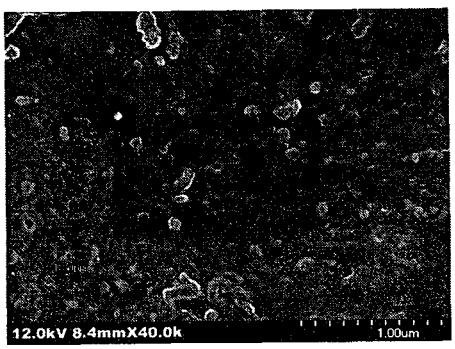

Fig. 3(b) Microstructures of specimen with 1.3wt% carbon black

Fig. 3 (a)는 카본블랙의 입자를, Fig. 3 (b)는 1.3 wt%의 카본블랙이 첨가된 에폭시 복합재료 표면의 주사 전자 현미경(scanning electro microscopy : SEM) 사진이다. Carbon black 이 에폭시 사이에 잘 분포되어 있음을 확인할 수 있었다

핫프레스로 압축 성형한 두께 1.8mm 의 판넬(panel : 300mm x 170mm x 1.8mm)을 각각의 시험 조건별로 5 개씩 제작하였다. 전자파 차폐 측정실험을 하기 위해 다이아몬드 휠톱(powermet 2000 abrasive cutter)으로 절단하여 200mm x 150mm x 70mm 인 박스형태로 제작하였으며, 각각의 모서리 부분을 밀폐시키기 위하여 시험편 제작과정과 동일한 혼합비로 제작한 혼합물을 이용하여 모서리

부분을 밀폐시켰다. 박스형태로 제작한 형상을 Fig. 4 에 도시하였다.

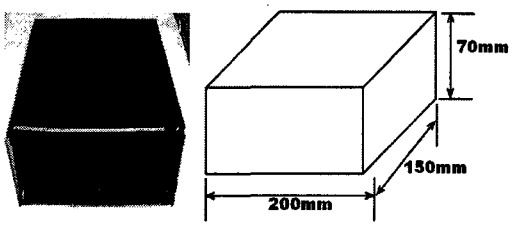

Fig. 4 Shape of electromagnetic interference shielding specimens

3. 메탈파우더/카본블랙/에폭시 복합재료의 전자파 차폐 측정방법

전자파 차폐효과를 측정하기 위하여 외부에서의 전자파에 대한 영향을 차단할 수 있는 공간인 차폐실이 설치 되어있는 EMC 시험 시스템을 이용하여 전자파 차폐 측정실험을 하였다. 본 연구에서는 전자파 측정 실험장치 시스템(EMC test system : Rohde & Schwarz)을 사용하였으며, Fig.5 에 측정장비와 시험편의 적용법을 도시 하였다.

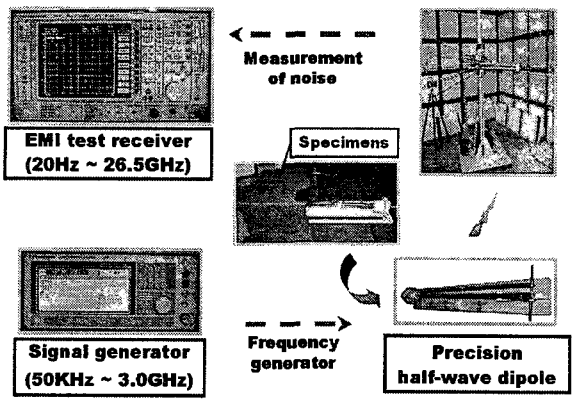

Fig. 5 Photographs of EMC test system (Rohde & Schwarz)

제작한 각 시험편의 전자파 차폐효과를 측정하기 위하여 주파수 발생장치에서 발생하는 주파수대의 전자파를 half-wave dipole 안테나를 통하여 방출한다. 그 양을 EMI test receiver 에서 측정한 후 200mm x 150mm x 70mm 사이즈의 시험편에 half-wave dipole 안테나를 넣고 주파수를 발생시키면 발생된 전자파를 시험편에서 차폐 · 흡수하고 차폐 · 흡수하지 못한 전자파를 EMC test receiver 에서 측정하여 EMSE(dB)의 양을 도시 함으로써 시험편을 설치하지 않았을 때의 전자파 방출양과 시험편 설치후의 전자파 방출양의 차이를 얻음으로써 전자파 차폐효과를 측정할 수 있었다.

전자파 차폐 측정실험은 동일조건에 대하여 각각 3 회씩 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 GFRP/CFRP 의 전자파 차폐효과

각각의 시험편에 대하여 3 회씩 전자파 차폐 측정실험을 한 결과 동일한 측정결과 값을 얻을 수 있었다.

Fig. 6 은 주파수 범위에 따라 시험편을 적용하지 않은 Dipole Antenna 에서 발생하는 전자파의 방출 양(A1)과 메탈파우더 및 카본블랙을 첨가하지 않은 GFRP(G1)와 CFRP(C1)의 주파수 범위에 따른 전자파 차폐 효과를 나타내었다.

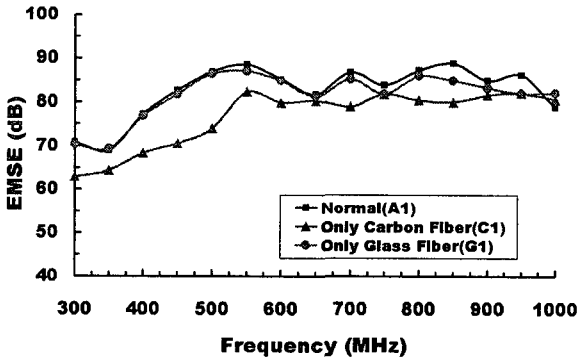

Fig. 6 Shielding effectiveness as a function of frequency measured in the 300-1000MHz range of CFRP(C1) and GFRP(G1)

시험편을 적용하지 않은 경우(A1)와 GFRP(G1)를 적용한 경우가 거의 일치하여 차폐효과가 거의 나타나지 않았음을 알 수 있었다. CFRP(C2) 적용시 저주파 대역에서 약간의 차폐효과를 보였으나 650 MHz 이후에는 차폐효과가 아주 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이는 전기 전도도가 큰 재료가 전자파 차폐 효과에 우수함을 알 수 있었다. 탄소섬유의 전기 전도도는 유리섬유에 비해서 크고,

유리섬유는 오히려 절연성이 우수한 재료이다. 따라서 Fig. 6 에서 나타난 CFRP(C2)가 GFRP(G1)보다 저 주파수대에서 높게 나타난 것은 탄소섬유 매트와 유리섬유 매트에 대한 전기 전도도 특성에 기인한 것으로 판단되었다.

4.2 메탈 파우더의 첨가량에 따른 전자파 차폐효과

메탈파우더의 첨가량에 따른 전자파 차폐효과를 측정하기 위하여 중량비 10 wt%, 20 wt%를 에폭시에 첨가하여 300mm x 170mm x 1.8mm 의 시험편을 제작하였다. 메탈파우더를 첨가하여 시험편을 성형할 때 2.2 절과 같은 방법으로 교반기를 이용하여 교반시켜 성형하였으나 메탈파우더의 중량으로 인한 영향으로 핫프레스로 성형할 때 두께의 한쪽 면으로 침전되는 현상이 발생하였다. 따라서 성형후 메탈파우더가 침전되는 면이 전자파 차폐 측정실험을 할 때 박스형태 시험편의 안쪽면이 되도록 제작하여 실험 하였다.

제작한 판넬 시험편을 컴퓨터 모니터 앞 5 Cm 이내에 두고 전자파 차폐측정기 Catcher (Pulse)를 이용하여 측정한 결과 10 wt%, 20 wt%에서는 차폐효과가 거의 없음을 보였다. 또한 40 wt%이상의 경우는 30 wt%보다 차폐효과가 우수할 것으로 예측되나 중량이 무거워지는 단점 때문에 본 연구에서는 30 wt%에 대한 EMC 시험편을 제작하여 실험결과를 비교하였다.

Fig. 7 과 Fig. 8 은 Ti 파우더 와 Ni 파우더를 각각 30 wt%씩 혼합한 시험편의 주파수 범위 300MHz ~ 800MHz 에 따른 전자파 차폐효과를 나타내었다.

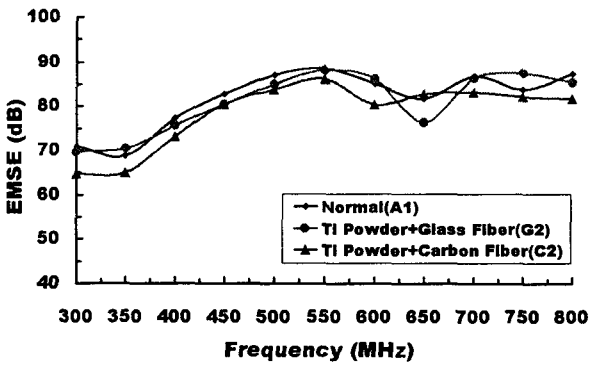

Fig. 7 Shielding effectiveness as a function of frequency measured in the 300-800MHz range of GFRP(G2) and CFRP(C2) with mixed 30wt% Ti-powder

Ti 파우더를 혼합하여 제작한 GFRP 의 경우 차폐효과가 거의 나타나지 않았으며, CFRP 의 경우는 약 5 dB 미만의 적은 양의 차폐효과를 관찰 할 수 있었다. 이는 Ti 파우더가 전자파 차폐에 큰 효과를 주지 못하는 것으로 판단된다.

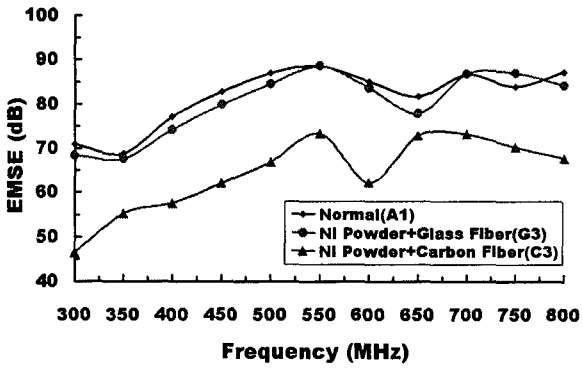

Fig. 8 Shielding effectiveness as a function of frequency measured in the 300-800MHz range of GFRP(G3) and CFRP(C3) with mixed 30wt% Ni-powder

Ni 파우더를 혼합하여 제작한 GFRP(G3)의 경우 차폐효과가 거의 나타나지 않았지만, CFRP(C3)의 경우 550 MHz 에서 약 20 dB 의 차폐효과가 있음을 알 수 있었다. Ni 파우더를 CFRP 에 적용한 경우 Ti 파우더 보다는 양호한 차폐효과를 얻을 수 있었다.

Fig. 9 는 Mg 파우더 30 wt%를 혼합한 시험편의 주파수 범위에 따른 전자파 차폐 효과를 나타내었다.

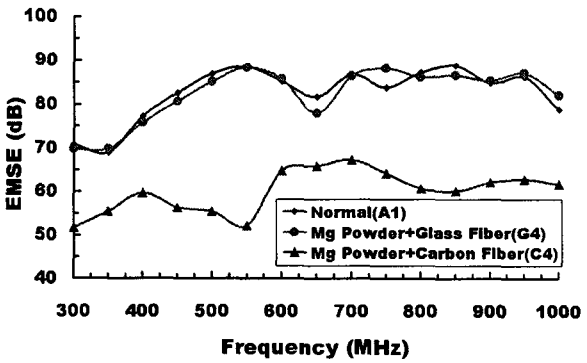

Fig. 9 Shielding effectiveness as a function of frequency measured in the 300-1000MHz range of GFRP(G4) and CFRP(C4) with mixed 30wt% Mg-powder

Mg 파우더를 혼합하여 제작한 GFRP(G4)의 경우도 차폐효과가 거의 나타나지 않지만, CFRP(C4)의 경우 550 MHz 에서 약 35 dB 의 차폐 효과가 있음을 알 수 있었다.

Fig. 7 ~ 9 의 실험 결과 Ti, Ni, Mg 파우더를 충진재로한 CFRP 시험편의 경우 Mg 파우더가 가장 우수한 전자파 차폐효과를 가지고 있음을 알 수 있었다. 메탈파우더의 경우 3 종류의 시험편 모두 성형할 때 중량으로 인한 침전이 있었다. 따라서 두께방향으로 고르게 분산시킬 수 있는 성형방법의 필요성이 절실하다고 판단하였다.

4.3 카본블랙의 첨가량에 따른 전자파 차폐효과

카본블랙을 2.0 wt%이상 첨가할 경우 수지의 점성이 높기 때문에 시험편 성형이 어려웠다. 따라서 카본블랙의 첨가량이 증가하면 할수록 전자파 차폐효과가 우수할 것으로 예측되나 본 연구에서는 중량비 1.3 wt%와 1.6 wt%의 실험결과를 비교 하였다.

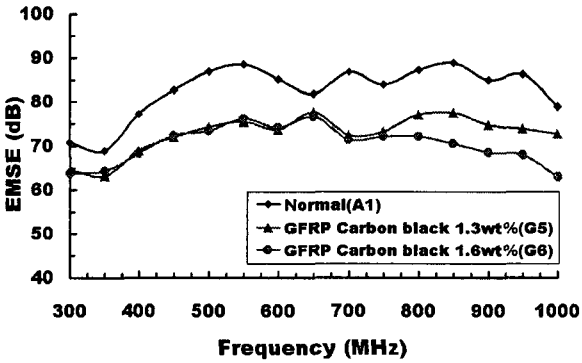

Fig. 10 Shielding effectiveness as a function of frequency measured in the 300-1000MHz range of GFRP with mixed carbon black 1.3wt%(G5) and 1.6wt%(G6)

Fig. 10 은 시험편을 적용하지 않았을 때(A1)의 전자파 방출양과 유리섬유에 카본블랙을 각각 1.3 wt%(G5), 1.6 wt%(G6)씩을 혼합하여 제작한 시험편을 적용 하였을 때 주파수 범위에 따른 전자파 차폐 효과를 나타낸 것으로 주파수 650 MHz 이하에서는 G5 와 G6 시험편에서 거의 같은 차폐효과가 나타남을 알 수 있었으며, 약 800 MHz 이상의 주파수 대역에서 G6 가 약간 더 우수한 차폐효과를 나타냄을 알 수 있었다. GFRP 의 경우 카본블랙의 첨가량이 650 MHz 이하의 저주파 대역에서는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

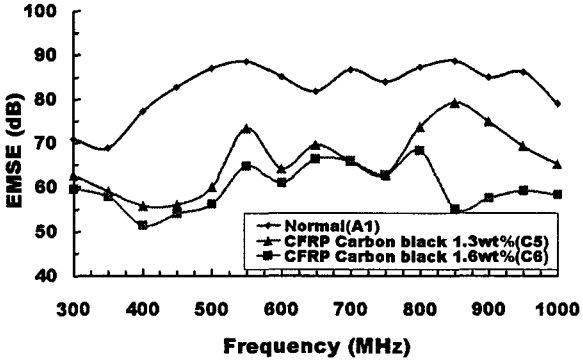

Fig. 11 Shielding effectiveness as a function of frequency measured in the 300-1000MHz range of CFRP with mixed carbon black 1.3wt%(C5) and 1.6wt%(C6)

Fig. 11 은 탄소섬유에 카본블랙을 각각 1.3 wt%(C5), 1.6 wt%(C6)씩을 혼합하여 제작한 시험편을 적용했을 때 주파수 범위에 따른 전자파 차폐효과를 나타낸 것으로 카본블랙 함량의 증가로 인한 차폐효과의 차를 발견할 수 있었으며, 주파수 550 MHz 에서 약 35 dB, 850 MHz 에서 약 40 dB 의 차폐효과가 나타남을 알 수 있었다.

카본블랙을 충진재로 한 GFRP 와 CFRP 에 대한 전자파 차폐효과는 전기 전도도가 우수한 섬유매트가 영향을 줄 수 있는 변수가 된다고 판단하였다.

5. 결론

본 연구에서는 실험을 통하여 메탈파우더와 카본블랙을 충진재로 한 섬유강화 복합재료의 전자파 차폐효과를 측정하여 인체에 유해한 전자파를 차폐할 수 있는 재료를 개발하고 전기· 통신장비의 하우징 재료, 항공기, 선박 등의 구조재료로 응용할 수 있도록 개발하고자 하였다.

실험을 통한 연구결과 GFRP 의 경우는 메탈파우더를 충진재로 사용할 경우 차폐효과가 거의 나타나지 않았다. 이는 유리섬유매트가 탄소섬유 매트에 비해 전기 전도도가 훨씬 낮기 때문인 것으로 생각되었다. 따라서 유리섬유에 금속원소를 코

팅하여 성형한다면 훨씬 더 개선될 것으로 판단하였다. CFRP 는 Ni 파우더와 Mg 파우더를 각각 30 wt%씩 첨가한 경우 주파수 550 MHz 에서 각각 약 15 dB 과 35 dB 의 차폐효과를 나타냈다. Mg 파우더가 Ti, Ni 파우더보다 더 우수한 차폐특성을 가지고 있음을 알 수 있었으나 메탈파우더를 충진재로 한 시험편을 성형할 때 메탈파우더의 중량으로 인한 침전이 발생하였다. 메탈파우더를 두께 방향으로 일정하게 분포할 수 있는 성형방법의 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단하였다.

카본블랙을 충진재로 한 GFRP 와 CFRP 의 전자파 차폐효과는 GFRP 에서는 충진재의 중량율 변화에 따른 변화를 찾을 수 없었으나, CFRP 는 1.6 wt%를 첨가한 경우가 1.3 wt%를 첨가한 경우보다 차폐효과가 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 주파수 550 MHz 와 850 MHz 에서 1.6 wt%를 첨가한 CFRP 가 각각 30 dB 과 40 dB 의 차폐효과를 나타내었다. 따라서 카본블랙을 충진재로 한 CFRP 는 카본블랙의 중량율이 높을수록 전자파 차폐효과가 우수할 것으로 예측 되어지나 본 실험결과 중량율이 2 wt%이상일 경우 기지재료 점성의 증가로 인하여 성형하기 어렵게 되는 단점을 보였다. 앞으로 이러한 문제점을 해결할 수 있다면 더욱더 전자파 차폐효과가 우수한 재료를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2001 년도 조선대학교 교비 연구비의 지원을 받아 연구되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김덕원, "전자파공해," 수문사, p. 1, 1996.
2. Lee, S. J. and Lee, T. I., "A Study on the Effects of Electroencephalogram of Blocking Electromagnetic Wave Materials by using the Nano Siver," J. of the KSCI, Vol. 6, No. 2, pp. 810-813, 2004.
3. Lee, S. J. and Lee, T. I., "A Study on the Effects of Electromagnetic Wave on Human Body," J. of the KSCI, Vol. 6, No. 4, pp. 505-510, 2004.
4. Chin, W. S. and Lee, D. G., "Dielectric Characteristics of the Polymers Containing Nano-size Condictive Carbon Black Powders," J. of the KSCM, Vol. 17, No. 5, pp. 68-77, 2004.
5. Chung, D. D. L., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials," Carbon, Vol. 39, pp. 279-285, 2001.
6. Kim, H. M., Kim, K., Lee, S. J., Joo, J., Yoon, H. S., Cho, S. J., Lyu, S. C. and Lee, C. J., "Charge transport properties of composites of multiwalled carbon nanotube with metal catalyst and polymer: application to electromagnetic interference shielding," Current Applied Physics, Vol. 4, pp. 577-580, 2004.
7. Chen, H. C., Lee, K. C. and Lin, J. H., "Electromagnetic and electrostatic shielding properties of co-weaving-knitting fabrics reinforced composites," Composites Part A, Vol. 35, pp. 1249-1256, 2004.
8. 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.
9. Yuping, D., Shunhua, L. and Hongtao, G., "Investigation of electrical conductivity and electromagnetic shielding effectiveness of polyaniline composite," Science and Technology of Advanced Materials, pp. 1-6, 2005.
10. Jung, W. K., Ahn, S. H. And Won, M. S., "Comparison of Electromagnetic-Wave Shielding Effect in Glass Fiber Reinforced Nano Composites," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 10, pp. 121-128, 2005.
11. Jana, P. B., Mallick, A. K. and De, S. K., "Electromagnetic interference shielding by carbon fiber-filled polychl-oroprene rubber composites," Composites, Vol. 22, pp. 451-455, 1991.
12. Baker, Z. Q., Abelazeez, M. K. and Zihlif, A. M., "Measurements of the 'Magrey DC' characteristics at microwave frequencies," Journal of materials science, Vol. 23, No. 8, pp. 2995-3000, 1988.
13. Oshwa, Z. and Kobayashi, K., "Thermal stability of shielding effectiveness of composites to electromagnetic interference," Polymer degradation and stability, Vol. 35, pp. 33-43, 1992.
14. Das, N. C., Khastgir, D. and Chaki, T. K., "Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fiber filled EVA and NR

based composites," Composites Part A, Vol. 31, pp. 1069-1081, 2000.