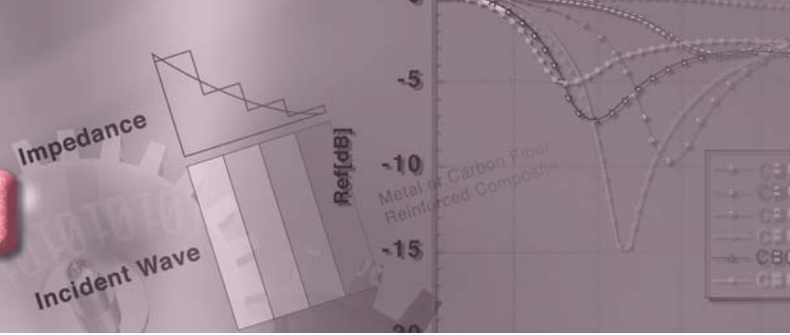


기술현황분석



전자파 흡수 복합재료 기술



김 태 옥

□한국기계연구원
공정연구부 책임연구원
□twkim@kmail.kimm.re.kr



김 진 봉

□한국기계연구원
공정연구부 선임연구원
□jbkim@kmail.kimm.re.kr

관심 분야

- 고분자 기지 복합재료 성형 및 제조
- 고분자 기지 복합재료 특성 연구

- 전자파흡수 복합재료, 후판 복합재료 성형
- 복합재료 피로특성 연구

1. 서 론

전자파 흡수에 관련된 기술은 상업기술로서는 유해한 전자파를 차폐 및 흡수하여 고성능의 전자기기를 보호하는 기술로서 주로 MHz의 주파수 영역에서 활용될 수 있으며, 군사기술로서는 스텔스 기술 및 레이더 안테나 제작기술의 일환으로 주로 GHz의 주파수 영역에서 활용 될 수 있다.

최근에 있어서는 위성방송, 휴대폰 등의 상업용 주파수영역이 극초단파(UHF: 300 MHz ~ 3 GHz)까지 확대되어 수 GHz의 주파수에서의 군사기술과 상업기술의 영역사이의 경계가 점점 멀어지고 있다. 극초단파이상의 라디오파(SHF: 3 GHz ~ 30 GHz)에서의 주파수는 주로 레이더에서 많이 사용되고 있는데, 이 영역에서의 전자파 흡수기술은 주로 군사기술에 국한된다.

현대전에서 상대방의 레이더에 감지되지 않는 스텔스 기능은 전쟁의 승패를 좌우할 수 있는 중요한 전략적 요소이다. 최근의 걸프전에서 이미 잘 입증된 바와 같이 현대전에서의 승패는 제공권의 선점에 크게 의존하고 있다. 전투 시에 상대의 후방까지 깊숙하게 침투하여 목표물을 공격하고 아군의 손실을 최소로 줄일 수 있는 뛰어난 기능의 항공기는 전쟁의 승패를 좌우하는 매우 중요한 요소이다.

걸프전에서 활약상이 돋보인 F-117A 스텔스 전폭기의 경우 천여 번이 넘는 출격에서 단 한 대의 손실도 없이 이라크의 중무장된 목표물을 성공적으로 파괴함으로써 항공기의 생존성(Survivability)을 제고할 수 있는 중요한 기술로서의 스텔스(Stealth) 기능에 대한 관심이 새롭게 부각되었다. [1][2]

스텔스 항공기는 매우 다양한 요소에 대하여 설계를 하여야 하는데 먼저 육안으로 보아서 보이지 않도록

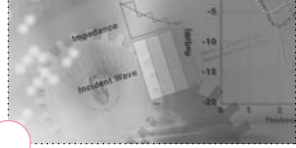


그림 1. F-117A 스텔스 전투기

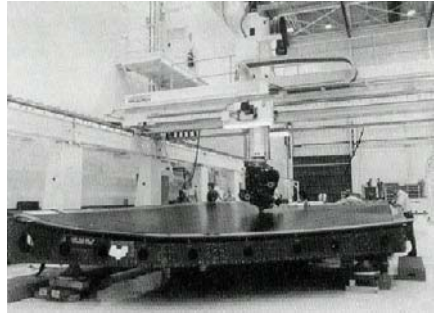


그림 2. B-2 전폭기의 날개구조물 제작을 위한 탄소섬유/에폭시 복합재료 금형

록 해야 하는데 이를 위하여 표면에 특수한 도색을 하기도 하며 엔진의 완전연소를 유도하여 배기가스에 의한 식별을 방지한다. 또 소음을 방지하기 위하여 기체와 엔진 및 엔진의 장착위치를 재설계하기도 한다.

기체구조물과 엔진에 의해 발생하는 적외선(Infrared) 탐지 가능성을 최소화하여야 한다. 최근에 개발된 탄소-탄소 복합재료(Carbon- Carbon Composite)는 초고온환경에서도 뛰어난 구조적 특성을 가지므로 엔진의 노즐부위에 적용되어 효과적인 적외선 차단제로 사용된다. 또한 B-2 전폭기와 같이 엔진을 동체에 삽입시킴으로 외부에 노출되는 열량을 줄이기도 한다. 또한 레이더 탐지면적(RCS : Radar Cross Section)을 최소화하여야 하는데 이를 위해서는 기체를 재설계하거나 전자파흡수구조(RAS : Radar Absorbing Structure)나 전자파흡수재료(RAM : Radar Absorbing Material)를 이용할 수 있다.

특히, 고분자 기지 섬유강화 복합재료는 전자파나 적외선(Infrared)등을 차단하는 기능성 재료의 역할은 물론 동시에 하중을 지탱하는 구조적인 역할을 동시에 수행할 수 있어, 고성능의 항공기를 설계함에 있어서 더 자유롭고 고기능성의 설계를 가능하게 한다.

특히 B-2의 경우 정확한 재료의 종류는 알려지지 않지만 수천 파운드의 탄소섬유강화 복합재료가 사용되었다.

본 원고에서는 전자파 흡수 고분자 섬유강화 복합재료의 설계 및 제작기술의 개발에 필요한 기초적인

지식을 제공하고 한국기계연구원에서 기본사업으로 수행한 연구결과에 대하여 기술하고자 한다.

2. 전자파흡수원리 및 반사율의 정의

전자파에너지 흡수는 재료 내부의 굴절률(Index of Refraction of Material : 굴절률은 에너지 전파상수(Propagation Constant)에 의하여 얻어진다.)에 의하여 주어질 뿐인데 이것은 두 복소값인 전기적 값인 유전률(Permittivity, ϵ)과 자기적인 값인 투자율(Permeability, μ)에 관련된 값으로 표현된다. 복소유전율 및 복소투자율은 진공상의 복소유전율($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m)과 복소투자율($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m)에 대한 비값으로 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r = \dot{\epsilon}_r - j\dot{\epsilon}_r''$$

$$\mu/\mu_0 = \mu_r = \dot{\epsilon}_r - j\dot{\epsilon}_r''$$

이러한 복소인자들을 가진 고분자 물질이 전자계(electrical and/or magnetic field)안에 놓여 있을 때 분자가 활성화되어 전자계 형태의 에너지를 열에너지로 변환시키면서 전자파를 흡수하게 되는 것이다.

전자파가 임피던스, Z^0 을 가진 자유공간(자유공간의 임피던스는 377Ω 으로 고유값이다.)을 떠돌다가 임피던스, Z_1 을 가진 유전적 또는 자기적 재료의 표면을 만났을 때 일부의 반사가 일어나게 된다. 이때의 표면에서의 반사율(R)은 아래의 식으로 얻어지게

된다.

$$R = \frac{1 - Z_1/Z_0}{1 + Z_1/Z_0}$$

여기서,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$$

무반사를 얻으려면 반사율(R)이 0 이 되어야 하고 이것은 $Z_0 = Z_1$ 임을 뜻한다. 이러한 조건은 아래의 결과에 의하여 얻어진다.

$$\frac{\mu_1}{\epsilon_1} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0}$$

재료의 표면을 통과한 전자파는 재료의 내부를 통과하게 되는데 이때의 전자파의 흡수는 재료의 유전율 및 투자율과 아래와 같은 관계를 갖는다.

$$\text{Absorbed Energy} \propto f(\sqrt{\mu_1 \epsilon_1})$$

완벽한 흡수재료는 ϵ_1 는 μ_1 와 동일한 큰 값을 가지며 가능한 한 얇은 두께를 가져야 하나, 불행하게도 전자파의 주파수대역에서는 μ_1 의 값이 ϵ_1 과 동일할 수가 없다. 결국, 이러한 문제를 극복하기 위해서는 특별한 설계와 재료의 개발이 필요하게 된다.

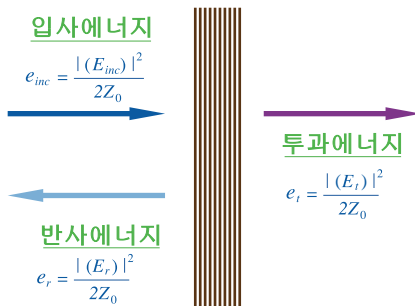


그림 3. 재료의 표면에 입사, 반사, 투과되는 전자파 에너지

$$R = \frac{e_r}{e_{inc}}$$

$$T = \frac{e_t}{e_{inc}}$$

일정한 두께를 갖는 평판에 그림 3과 같이 입사되는 전자파의 에너지 중 반사되는 전자파의 비율은 반사율(R)이라 정의되고 투과되는 에너지의 비율을 투과율(T)이라고 정의된다.

일반적으로 전자파의 반사율은 아래와 같이 dB로 표현이 된다.

$$R(dB) = 10 \log \frac{e_r}{e_{inc}}$$

3. 전자파흡수 재료의 종류

전자파 흡수 재료는 일반적으로 평판형태로서 그 자체가 내부적으로 일정한 형태의 구조를 가진다. 전자파 흡수 재료의 종류는 그 형태에 따라서 크게 Salisbury Screen, Dällenbach Single Layer, Jaumann Absorber, Gradient Multilayer Absorber, Circuit Absorber 등으로 나눌 수 있으며, 물성 조절의 대상에 따라서, 유전흡수제, 자기흡수제로 나눌 수 있다.

고분자 기지 복합재료의 대표적인 형태인 복합재료 적층판은 그 고유한 제작공정 및 형태에 의하여 Gradient Multilayer Absorber의 제작이 매우 용이하다.

재료가 가지는 두께, 임피던스, 손실정점값 (Loss Tangent / Dissipation Factor, $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$, $\delta\mu = j\mu''/\mu'$), 등을 조절하고 다양한 재료를 복합적으로 사용함으로써 전자파흡수재료는 협대역의 단일주파수 (Narrow Band and One Frequency)에 대하여 다중주파수 (Narrow Band and Multiple Frequency)

표 1. 레이더의 주파수 운영대역

Band	Frequency Range	Function of a Target Radar
S-Band	2 ~ 4 GHz	Long Range Surveillance
C-Band	4 ~ 8 GHz	Long Range Tracking
X-Band	8 ~ 12 GHz	Short Range Tracking Missile Guidance Mapping, Marine Radar Airborne Intercept
KU-Band	12 ~ 18 GHz	High Resolution Mapping Satellite Altimetry



에 대하여, 또는 광역주파수 스펙트럼 (Broad Band and Spectrum)에 대하여 최적화된 성능을 발휘할 수 있게 된다. 표 1은 레이더의 주파수 운영대역을 나타낸다.

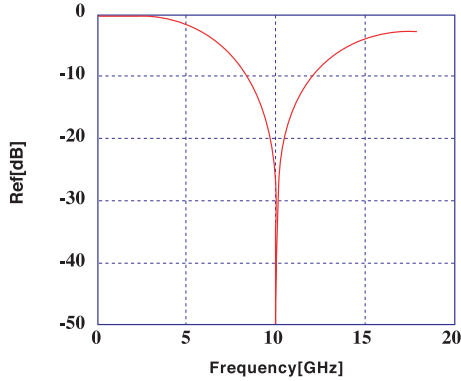


그림 4. 협대역 단일주파수 흡수

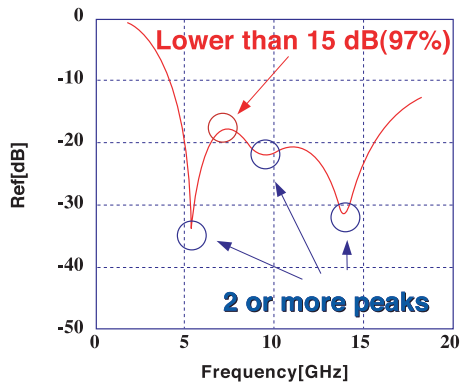


그림 5. 광역주파수 스펙트럼 흡수

Gradient Multilayer Absorber는 한글로 경사다층흡수체로 불리는데, 그 기본적인 구조는 그림 6과 같이 전자파가 입사되는 표면에서 멀수록 임피던스가 작은 값을 가지는 층을 배치하여 두께방향으로 임피던스가 지수함수 형태로 줄어들도록 각 층이 배치된다.

그림 7과 같이 각각 다른 두께와 유전율을 가지는 여러 층으로 구성된 전자파 흡수 재료를 설계하기 위해서 사용되는 해석적인 계산기법은 전송선로이론으로 아래와 같이 간략하게 시술될 수 있다.^[3]

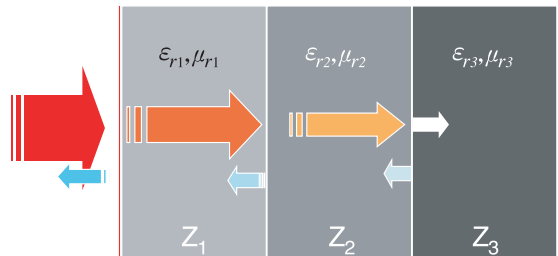


그림 7. 전자파 흡수 재료에 입사되는 전자파의 경로

그림 6에서 전자파가 입사되는 평판과 공간사이의 경계면에서의 반사율은 아래의 식과 같이 얻어진다.

$$R = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}$$

위 식에서 Z_{in} 은 Z_1 과는 다른 값이다. 이 Z_{in} 의 값은 입사면의 왼쪽에 있는 공간에서의 입사면 끝보기 물성치로서 아래 식을 재료의 배면에서부터 입사면까지 반복 계산하여 얻어진 값이다.

$$Z_{in_i} = Z_i \frac{Z_{in_{i-1}} \cosh(rd) + Z_i \sinh(rd)}{Z_i \cosh(rd) + Z_{in_{i-1}} \sinh(rd)}$$

$$\text{단, } r = w \sqrt{-\mu_r \epsilon_r} / c, \quad c : \text{Speed of light}$$

전송선로이론은 계산이 간단하여 전자파 반사율의 계산에 많이 사용되고 있으며, 임의의 입사각을 가지는 전자파의 반사율 계산에 쉽게 응용이 될 수 있다.

4. 다층 전자파 흡수제에서의 전자파 반사율계산

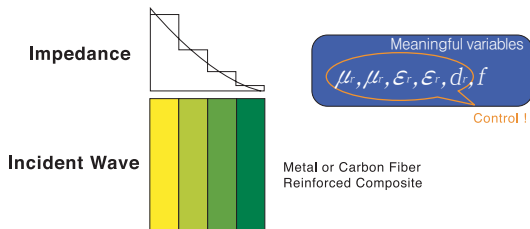


그림 6. 다층형 전자파 흡수재료



다른 방법으로는 추적계산법이 있다.^[4]

이 방법에서는 그림 8과 같이 재료를 이루는 각 층 경계면의 양쪽에서 입사되고 반사되는 전자파들의 관계식을 얻을 수 있다. 또한, 각 층의 양쪽 경계면 사이의 전자파 강도도 전파방정식을 통하여 얻을 수 있다. 이것을 재료를 이루고 있는 모든 경계면에서 반복 계산하면 모든 층 내부와 경계면을 넘나드는 전자파의 관계식을 얻을 수 있게 된다.

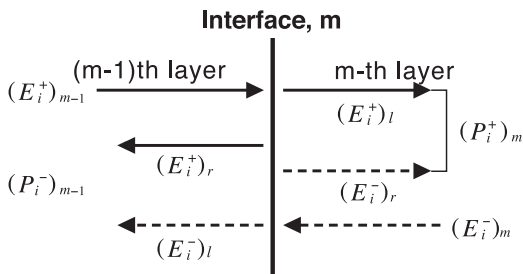


그림 8. 두 층의 경계면에 입사 및 반사되는 전자파

이 방법은 전자파를 이용한 복합재료의 경화연구에 최초로 사용되었으며, 전자파 흡수율, 반사율 및 투과율을 계산하는 데도 쉽게 적용될 수 있다.

추적계산법은 면내 이방성을 가지는 재료에 대한 전자파 반사율의 계산 알고리즘도 잘 개발되어 있으며, 재료 내부의 각 부분이 발산하는 열에너지도 쉽게 계산될 수 있다. 그러나 계산양이 많다는 점이 단점이다.

5. 전자파 흡수 복합재료

복합재료는 대부분의 기계적인 하중을 담당하는 강화섬유와, 섬유와 섬유사이의 하중을 전달하고 형태를 유지해 주는 역할을 하는 수지로 구성된다. 특히, 프리프레그를 여러장 겹쳐서 평판을 제작하는 복합재료 적층판은 경사다층흡수체를 제작하기에 최적의 구조를 가지고 있다.

복합재료를 이루고 있는 주요 수지 및 강화섬유는 모두 비자성체로 비투자율(μ_r)이 1이이고 그 유전율은 표 2과 표 3에 나와 있다.

표 2. 복합재료용 강화섬유의 유전율^{[1][2]}

Fiber	Dielectric Constant. E'/E_0	Loss Tangent/Dissipation Factor, $\tan\delta$
E-Glass	6.1	0.004 - 0.005
D-Glass	4.0	0.002 - 0.003
S-2 Glass	5.2	0.0068
R-Glass	5.2	0.0068
Quartz (Astroquartz [®] - 49)	3.8	0.0001 - 0.0002
Aramid (Kevlar [®] - 49)	3.85	0.01
Polyethylen (Spectra [®] & Dyneema [®])	2.0 - 2.3	0.0002 - 0.0004

Note: Data frequency of 10 GHz at 20° C.
 Polyethylene fibers are ultra - high molecular weight(UHMW).
 S-2 Glass is supplied by Owens Corning fiberglass Corp;
 Astroquartz[®] II is a registered trademark of JPS Glass Fabrics;
 Kevlar[®] is a registered trademark of E.I. DuPont; Spectra[®] is a registered trademark of Allied Signal; Dyneema[®] is a registered trademark of Dyneema VoF.

복합재료의 유전율, 투자율은 기지재료인 고분자에 다양한 물성의 분체를 혼합함으로써 얻을 수 있다. 전자파흡수 복합재료는 유전적 흡수체와 자기적 흡수체의 두 가지로 크게 분류할 수 있다. 유전적 흡수체는 전기저항에 의한 에너지의 손실을 유도하는데 이것은 고분자 기지에 금속의 가루나 파우더, Carbon Black, CNF, CNT등을 첨가함으로써 얻을 수 있다.

중요한 유전적 특성은 유전상수 (Dielectric Constant)와 손실정점값 (Loss Tangent/Dissipation Factor, \tan)인데 이것은 첨가제와 강화섬유 및 수지의 조합이다. 자기적 흡수체는 일종의 자기적 히스테리시스 효과에 기인하는데 이것은 수지에 Carbonyl이나 Iron Ferrite와 같은 물질을 첨가함으로써 얻을 수 있다.

복합재료의 유전율은 이루고 있는 재료들의 유전율 특성에 대하여 일종의 평균값을 반영하는데, 일반적으로 상용되는 복합재료의 유전율은 대체로 유전상수(ϵ_r)가 약 3 ~ 5 사이의 값을 갖는다.

표 3. 복합재료용 수지의 유전율^{[1][2]}

Matrix Resin	Dielectric Constant, E'/E^2	Loss Tangent/Dissipation Factor, $\tan\delta$
Conventional Composite Resins		
Polyester	2.7 - 3.2	0.005 - 0.020
Epoxy	3.0 - 3.4	0.010 - 0.030
Cyanate Ester	2.7 - 3.2	0.004 - 0.010
High Temperature Composite Resins		
Phenolic	3.1 - 3.5	0.030 - 0.037
Polyimide	2.7 - 3.2	0.005 - 0.008
Bismaleimide(BMI)	2.8 - 3.2	0.005 - 0.007
Silicone	2.8 - 2.9	0.002 - 0.006
Polyetherimide(PEI)	3.1	0.004
Thermoplastic Composite Resins		
Polycarbonate (LEXAN®)(GE)	2.5	0.0006
PPO (NORYL®)(GE)	2.6	0.0009
Polysulfone	3.1	0.003
Polyethersulfone (PES)	3.5	0.003
Polyphenylene (Sulfide)(PPS)	3.0	0.002
Polyetheretherketone (PEEK)	3.2	0.003
TEFLON®(PTFE) (E.I.DuPont)	2.1	0.004
Note: Data for a frequency of 10 GHz at 20° C.		

5.1 Carbon Black을 이용한 유전손실 복합재료 연구

Carbon Black은 최근에 고무나 고분자를 기지로 하는 재료의 전자기적 응용분야에 많이 쓰이고 있는 재료이다. Carbon Black은 그 제작 방법과 구조에 따라서 다양한 종류가 존재하는데, 전도성을 위하여 제작된 Carbon Black은 크게 침상(針狀)의 Acetylene Black과 다공(多孔)성 도전성 Carbon Black으로 나눌 수 있다. Acetylene Black은 침상의 형태로 전도성을 유발하지만 다공성 및 도전성 Carbon Black 중공(中空)의 셸(Shell) 형태로서 표면적을 증가시켜 전도성을 유발한다. 그 중 Acetylene Black에 비하여 다공성 및 도전성 Carbon Black은 적은 배합량으로도 더 효과적으로 전도성을 유발하는 것으로 알려져 있다.

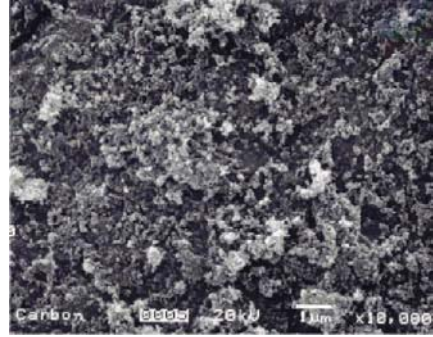


그림 9. Carbon Black의 SEM 사진

표 4. 다공성 전도성 Carbon Black의 사양 (DEGUSSA XE2 grade)

Density	1.87
DBP Absorption	420
Size of Particle	250
Shape of Particle	Porous Aggregation
Dielectric Constant	2.5 ~ 3.0

5.2 Carbon Black이 함유된 전도성 Epoxy 연구

Carbon Black을 수지에 첨가할 때에 수지가 Carbon Black의 넓은 표면에 걸쳐 퍼지게 되는데, 이 현상은 작은 Carbon Black의 첨가량에 대하여 큰 유전율을 유발하는 원리가 되기도 하지만 수지의 점도를 급격하게 증가시키는 원인이 되기도 한다.

Carbon Black의 첨가량에 대한 영향을 관찰하기 위하여 Epoxy 수지에 Carbon Black을 첨가한다. 이를 위해서 3-Roll Milling 기계를 이용하여 YD115 Epoxy (㈜국도화학)와 Carbon Black에 대한 Mater Batch(Carbon Black 4wt%)를 제작하였다. Carbon Black의 첨가량이 더 이상 증가하면 점도가 너무 커서 균일한 교반을 얻을 수가 없다. Master Batch에 다시 YD115 Epoxy와 경화제 KBH1089 (㈜국도화학)을 혼합하여 Carbon Black의 첨가량이 0.0wt% ~ 1.0wt%인 혼합물을 얻었다.

극초단파(SHF) 대역에서의 복소유전율 측정을 위하여 벡터 망분석기(VNA ; Vector Network Analyzer)인 HP8722D와 7 mm 동축선을 사용하



었다. 복소유전율 측정에 사용된 시편은 평판형태의 복합재료 적층판을 동축선에 맞게 기계 가공하여 제작하였다. 실험결과는 Transmission/Reflection 방법으로 GHz 대역에서 연속적으로 측정된 산란계수 (Scattering parameter) 들로부터 Nicolson-Ross-Weir 방법을 사용하여 복소유전율을 계산하여 얻었다. 그림 10은 그 결과이다.^[5]

Carbon Black의 첨가량이 Epoxy의 유전율에 직접적인 영향을 줄 수 있다는 사실을 알 수 있다.

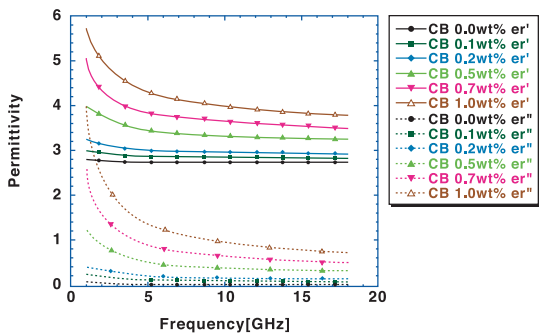


그림 10. Carbon Black을 함유한 Epoxy의 유전율

5.3 Carbon Black이 함유된 E-Glass/ Epoxy 연구

프리프레그에 사용되는 에폭시는 용제를 사용하여 점도를 크게 낮출 수 있으므로 수지에 Carbon Black을 혼합하기가 용이하다. 또한, Carbon Black이 함유된 E-Glass/Epoxy 프리프레그를 제작할 때에는 프리프레그의 두께가 일반적으로 1 mm이하의 두께를 가지므로 일반 Epoxy에 Carbon Black을 첨가하였을 경우보다 용제를 휘발시키기가 용이하다는 이점이 있다. Carbon Black을 프리프레그의 수지의 무게비로 0.0wt%, 2.0wt%, 4.0wt%, 6.0wt%, 7.0wt%, 8.0wt%를 첨가하고 각각 CB00, CB02, CB04, CB06, CB07, CB08이라 하였다. 유전율 측정에 사용된 복합재료 시편은 Carbon Black이 함유된 E-Glass/Epoxy Fabric 프리프레그 18 Ply를 적층하여 2 mm의 두께의 평판을 이용하여 제작되었다. 프리프레그는 (주)한국화이바에서 생산되는 #110 절연용 직물을 사용하여 제작된 것이다.

Network Analyzer를 이용하여 5 GHz에서 18 GHz까지의 유전율을 측정하였는데 그림 11과 그림 12는 유전율의 실수항과 허수항이다.

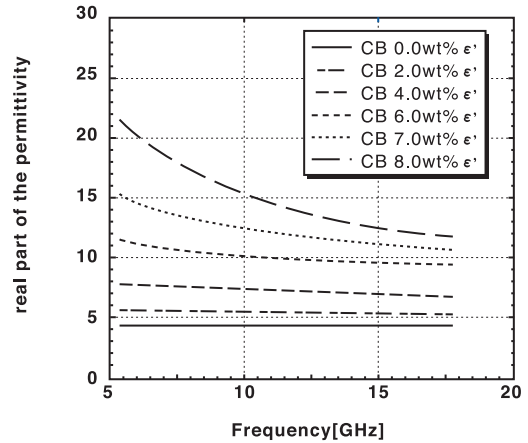


그림 11. Carbon Black이 첨가된 E-Glass/ Epoxy 복합재료 적층판의 유전율의 실수항

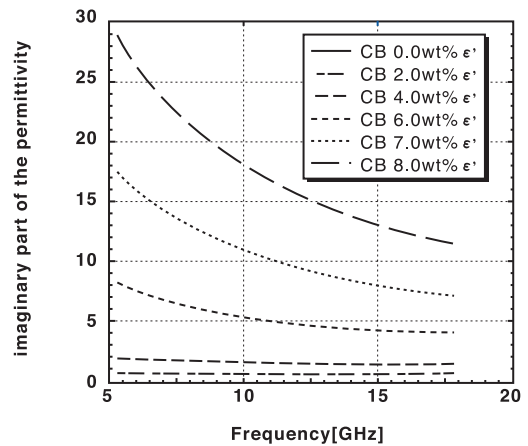
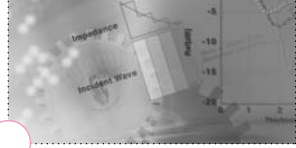


그림 12. Carbon Black이 첨가된 E-Glass/ Epoxy 복합재료 적층판의 유전율의 허수항

5.4 혼합법칙을 이용한 유전율 예측

최근 100여 년 동안 이상적인 저 유전율의 등방성 매질에 전도성 분말이 첨가된 혼합물에 대한 유전율을 모사하는 혼합법칙이 개발되어 왔다.^[6] 그 중 Lichterecker와 Rother에 의해 제시된 식이 대표적 식 중에 하나이다.^[7]



$$(\epsilon^*_{c'})^k = \Phi (\epsilon^*_{i'})^k + (1 - \Phi) (\epsilon^*_{m'})^k$$

위 식에서 $\epsilon^*_{c'}$, $\epsilon^*_{i'}$, $\epsilon^*_{m'}$ 는 각각 Carbon Black이 첨가된 복합재료, Carbon Black, 매질로 사용되는 E-Glass/Epoxy 적층판의 비유전율이고, Φ , k 는 각각 복합재료에서의 Carbon Black의 부피분율과 계수이다. 특히, k 는 상수 값인데 절연성 매질내부에서의 도전성 분말을 통한 전자파의 전달 기구 (Mechanism)에 의해 결정되는 값이다. 이 값이 1일 경우는 도전성 분말이 전자파의 흐름방향에 종방향으로 연속적으로 연결 되어있는 상태를 나타내고, 1일 경우는 분말이 전자파의 흐름방향에 횡방향으로 연결되어 있다는 뜻이다. 낮은 함유율의 도전성 분말이 일정한 질서가 없이 무작위적으로 분포하여 있을 때에는 $k=1/3$ 의 값을 갖는다고 알려져 있다.^[8] 도전성 분말이 함유된 복합재료의 경우 분말의 함유율이 낮을 때와 높을 때에 매질내부에서의 전자기파 전달 기구가 달라지게 된다. 1992년 *Siölzle* 등은 *Lichtenecker-Rother* 식에서의 k 값을 Φ 의 1차 함수로 표현함으로써 분말의 함유율 증가에 의한 전자파 전달 기구의 변화를 혼합법칙에 반영할 수 있도록 하였다.^[6]

사용된 Carbon Black과 복합재료에 대하여서는 아래와 같은 특성을 보인다.^[9]

$$k(\Phi) = \alpha\Phi + \beta$$

$$\alpha = 6.970 - 4.474 \times 10^{-2} \times f$$

$$\beta = 0.145 + 1.200 \times 10^{-3} \times f$$

Carbon Black의 물성은 아래와 같다.

$$\epsilon^*_f = 2.76$$

$$\sigma_f = 24,891 [S/m], \text{ 단, } \epsilon^*_f = \sigma_f / \omega \epsilon_0$$

그림 13과 그림 14는 각각 실험값과 혼합법칙으로 얻은 유전율의 실수항과 허수항을 비교한 그림이다.

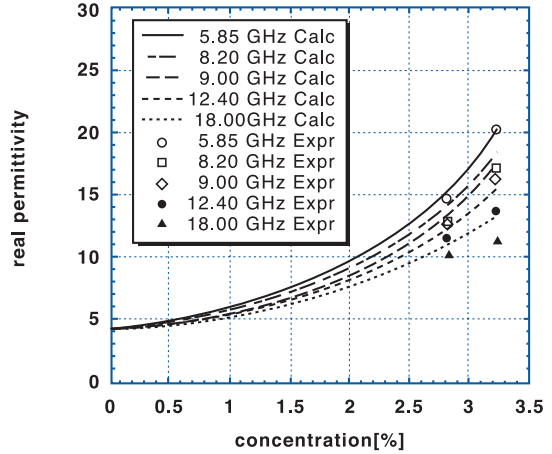


그림 13. 혼합법칙으로 얻은 유전율의 실수항^[9]

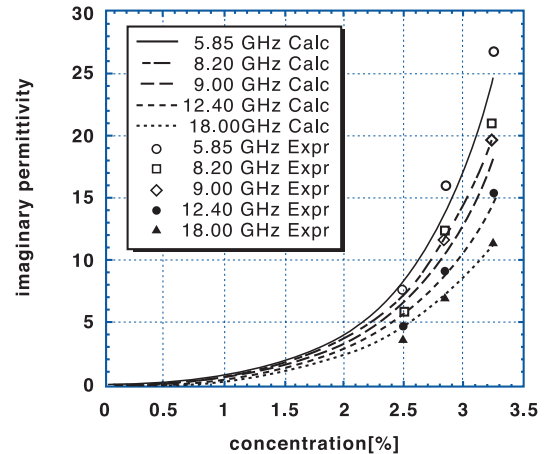


그림 14. 혼합법칙으로 얻은 유전율의 허수항^[9]

5.5 전자파 흡수 복합재료 적층판 설계

전자파 흡수 적층판은 일반적으로 투과되는 전자파를 막고 재료내부에서의 전자파 흡수율을 높이기 위해서 재료의 배면에 금속 등을 이용한 배면 반사층을 둔다. 그림 15는 단층형 전자파 흡수 적층판을 나타낸다. 그림 16은 앞에서 언급된 Carbon Black 함유량을 가진 복합재료 적층판의 두께에 따라서 전자파 반사율의 경향을 보인다.

그림 16에서 최고의 성능을 보이는 적층판은 CB06을 약 2.67 mm 적층하였을 때이고 반사율이

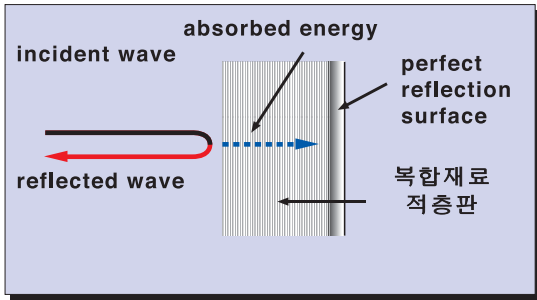


그림 15. 단층형 전자파 흡수 적층판

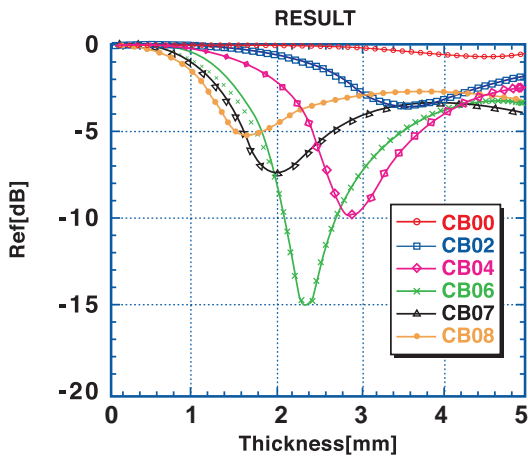


그림 16. 단층형 전자파 흡수 적층판의 성능

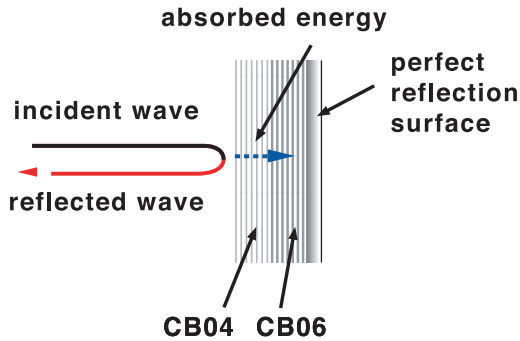


그림 17. 2층형 전자파 흡수 적층판의 형상

약 -15 dB (97%흡수)인 것을 볼 수 있다.

반사율을 더 줄이기 위해서는 두 가지 이상의 재료를 사용하여 전자파 흡수 재료를 설계하여야 하는데, 그림 17은 CB04 0.999 mm, CB06 1.998 mm를 사용하여 제작한 전자파 흡수 적층판을 나타낸다.

그림 18은 2층형 전자파 흡수 적층판의 성능을 보여주는데, 단층형 전자파 흡수 적층판보다 성능이 약간 더 개선된 것을 볼 수 있다.

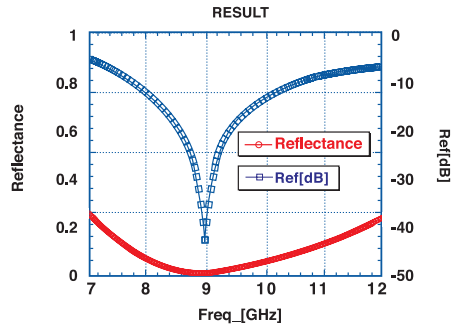


그림 18. 2층형 전자파 흡수 적층판의 성능

6. 향후 과제

전자기기들의 발달과 아울러 레이더의 운용 주파수의 광대역화로 인하여 최근 들어서는 전자파 흡수 문제에서 광역주파수 스펙트럼 전자파 흡수체의 개발이 필수적이다.

광역주파수 스펙트럼 전자파 흡수 적층판을 설계하기 위해서는 일반적으로 다층형의 적층판이 사용된다. 다층형의 전자파 반사율은 각 층의 물성과 두께의 비선형 함수로서, 최적의 물성과 두께를 결정하는 것은 일종의 최적화 문제이다. 이러한 비선형이면서 국소 최적점이 많은 문제를 해결하기 위해서는 최근 들어 유전알고리즘이 성공적으로 많이 사용되고 있다.^[10]

최적화 문제에서 최적화의 목적함수를 어떻게 두는가는 동일한 최적화 알고리즘에 대해서 그 결과와 효율을 결정짓는 주요한 문제이며, 최근의 몇몇 연구자들에 의하여 효과적인 목적함수가 제시되기도 하였다.^{[10][11]}

광역주파수 스펙트럼 전자파 흡수 적층판의 최적화를 위하여 적층판을 이루는 각 층의 복소유전율과 복소투자율을 결정하는 문제와 함께, 그 결정된 물성치를 구현하는 것은 또 다른 문제이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 재료의 물성을 각각 최적화 변수로 사



용하는 대신 재료의 함유율을 최적화 변수로 사용하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다.

전자파 흡수체는 넓은 대역에서 작은 반사율을 가져야 하며 동시에 얇고 가벼워야 경쟁력을 가질 수 있다. 광역주파수 스펙트럼 전자파 흡수체를 개발함에 있어 유전율만을 이용하여 개발된 흡수체는 그 두께와 비중에 한계를 가진다. 따라서 더욱더 경쟁력 있는 기술력을 보유하기 위해서는 투자율과 유전율을 동시에 다룰 수 있는 다양한 재료가 조합된 새로운 재료와 전자기적 특성에 대한 연구가 필수적이다.

참 고 문 헌

- [1] Roger A.Stonier, "Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf(Part I : History and Back ground)", SAMPE Journal, Vol.27, No.5, pp. 9-178, 1991
- [2] Roger A.Stonier, "Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf(Part I : Applications and Design)", SAMPE Journal, Vol.27, No.5, pp. 9-178, 1991
- [3] John D.Kraus, "Electromagnetics", McGraw-Hill Book Company, 3rd ed., 1984
- [4] Woo IL LEE, George S. Springer, "Interaction of Electromagnetic Radiation with Organic Matrix Composites", J. of Composite Materials, Vol.18-July 1984
- [5] James Baker-Javis et al, Transmission /Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability
- [6] M.E. Achour, M. El Malhi, J.L. Miane, F. Carmona, F. Lahjomri, "Microwave Properties of Carbon Black-Epoxy Resin Composites and Their Simulation by Means of Mixture Laws", J. of Polymer Science, Vol. 73, pp969-973, 1999
- [7] Lichtenecker, K., and Rother, K., "Die Herleitung des logarithmischen Mischungsgesetz es aus allgemeinen Prinzipien der stationaren Stomung", Physikalische. Zeitschrift, vol. 32, 255-260, 1931
- [8] Looyenga H., "Dielectric Constants of Heterogeneous Mixture", Physica, Vol. 31, pp401-406, 1965
- [9] 김진봉, 김태욱, "카본 블랙을 함유한 복합재 적층판의 유전율", 한국복합재료학회지, 16권2호, pp48-53, 2003
- [10] David E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989
- [11] J. Perini, L. Cohen, "Design of Broadband Radar Absorbing Material for Large Angles of Incidence", IEEE Tran. on Electromagnetic Compatibility, Vol.35, No.2, May 1993
- [12] 남기진, 이상철, "다층유전체를 이용한 광대역 전자파흡수체의 최적설계", 전자공학회논문집, 제 32권 A판 제 1호, pp.70~78