

복합재료를 이용한 전파흡수 구조물 개발현황



김진봉

(KIMM 재료기술연구부)

- '90 - '94 인하대학교 항공우주공학과(학사)
- '94 - '96 한국과학기술원 항공우주공학과(석사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 연구원



김태욱

(KIMM 재료기술연구부)

- '79 - '83 서울대학교 항공공학과(학사)
- '83 - '85 서울대학교 항공공학과(석사)
- '85 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서론

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 전투기의 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.

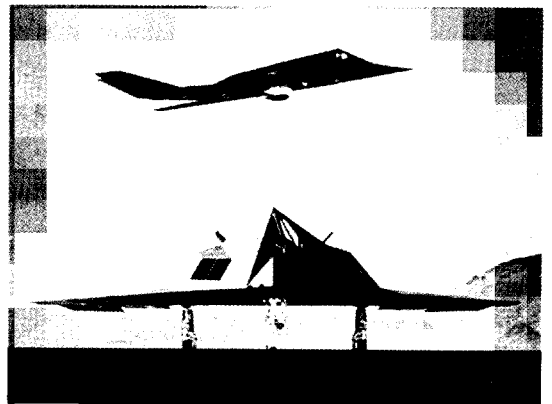


그림 1. F-117A 스텔스 전투기

레이더에 감지되지 않는 스텔스기술의 개발은 제2차 세계대전 이후 급격한 레이더의 발달과 함께 발달하게 되었다. 최초의 스텔스기술은 1945년경 히틀러의 치하에 있던 독일에서 J.

Jaumann에 의하여 시작되었는데, B-2기 형태의 합판으로 만들어진 동체에 슛을 집착시켜 전자파를 흡수함으로써 스텔스 기능을 구현하였다. 독일이 개발한 최초의 실전에 사용가능한 전투기는 Lippisch에 의하여 개발된 Me 163으로, 최근의 미국의 최선에 전략 전투기인 F-22와 그 형태가 유사한 것으로 알려져 있다.

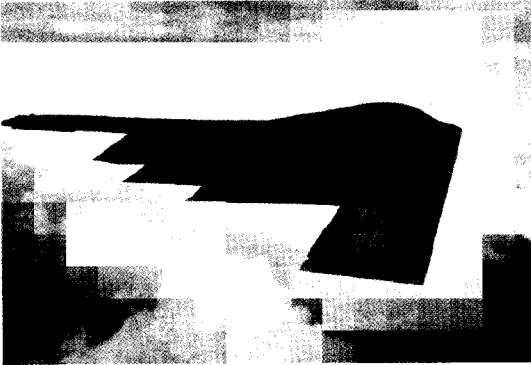


그림 2. B-2 스텔스 전폭기

스텔스 기술은 전후에 계속해서 독일과 영국, 미국 등의 선진국에서 연구가 진행되어 왔는데 특히 미국은 1960년대에 화이트-페트슨(Wright-Patterson) 공군기지를 중심으로 Lockheed, Northrop 등 항공기 제작업체와 함께 스킨크 워크스(Skunk Works)라는 극비 프로그램을 수행하여 상당한 기술의 발전을 이루었으며, U-2, SR-71, B-2, F-117A와 같은 항공기는 실전에 배치되었다. SR-71은 232°C에서 510°C에 이르는 운항시의 온도 때문에 90% 이상의 구조물이 티타늄으로 제작되었으나 탄소섬유 복합재료가 프로토타입으로 시험되기도 하였다. B-2 폭격기는 주로 구조적인 이유이긴 하지만, 수천 파운드의 달하는 것으로 추정되는 복합재료를 사용하였고 F-22는 주날개구조물을 탄소섬유강화 복합재료로 제작하여 감소된 무게의 도움으로 After-Burner 없이도 음속 3으로 비행이 가능한 등, 복합재료의 사용은 날로 확대되고 있다. 특히 전자파나 적외선(Infrared)등을 차단하는 기능성 재료의 역할은 물론 동시에 하중을 지탱하는 구조

적인 역할을 동시에 수행할 수 있는 복합재료의 특성은 고성능의 항공기를 설계함에 있어서 더 자유롭고 고기능성의 설계를 가능하게 한다. 여기서는 스텔스 기술에 대한 개념과 기본적인 원리, 전자파흡수구조(RAS : Radar Absorbing Structure), 및 전자파흡수재료(RAM : Radar Absorbing Material)의 종류, 복합재료의 전자파흡수특성에 대하여 고찰하기로 한다.

2. 스텔스 기술의 개념

스텔스 기술은 최신 복합재료의 등장과 CAD/CAM 기술의 현장 적용으로 비약적인 발전이 가능하게 되었다. 특히 B-2의 경우 정확한 재료의 종류는 알려지지 않지만 수천 파운드의 탄소섬유강화 복합재료가 사용되었다.

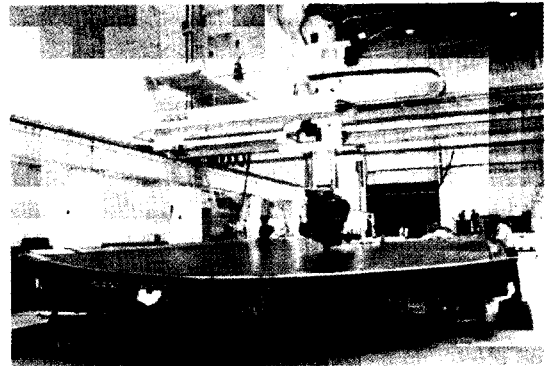


그림 3. B-2 전폭기의 날개구조물 제작을 위한 탄소섬유/에폭시 복합재료 금형

스텔스 항공기는 매우 다양한 요소에 대하여 설계를 하여야 하는데 먼저 육안으로 보아서 보이지 않도록 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 재 설계하기도 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 재 설계하거나 전자파흡수구조(RAS : Radar Absorbing Structure)나 전자파흡수재료(RAM : Radar Absorbing Material)를 이용할 수 있다.

스텔스 기술은 기존의 최신 기술을 총 동원하여 각종 탐지기법을 피하는 기술이라 할 수 있다. 특히, 항공기에 있어서 레이더 탐지면적(RCS)을 최소화하는 스텔스 기술이 설계의 최대 관건이라 할 수 있다.

3. 레이더 탐지면적(RCS)의 정의

레이더(RADAR)는 RAdio Detection And Ranging의 약자로 발신기에서 전파 에너지를 발사하여 목표물에 의해 반사되는 시간 및 형태, 에너지의 양으로써 물체의 거리 및 종류를 인식하는 장비이다. 레이더 탐지면적은 탐지 항공기에 의해 반사되어온 레이더 에너지 양으로 결정하는데 면적(m²)의 단위를 가진다. 즉, 감지하고자 하는 물체에서 반사되어 나온 레이더 파가 수신기에 의해 감지되었을 때 그 에너지와 동일한 에너지를 전반사할 수 있는 가상의 원의 투영 면적을 항공기의 레이더 탐지면적(RCS : Radar Cross Section)으로 정의하고 일반적으로 σ 라 표시한다. RCS의 기준값은 1m²의 전반사 면적을 갖는 원, 즉 직경이 약 1.128m인 원이다. 일반적으로, RCS는 이 기준에 대한 상대면적을 로그 스케일로 환산하여 표시하는데, 이를 상대 RCS이라 하고 다음 식으로 계산된다.

$$\text{Relative Magnitude of RCS(dB)} = 10 \log \sigma$$

기본적인 레이더 거리 방정식(Radar range

equation)은 다양한 방식으로 표현되나 일반적으로 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{4\pi^2} \frac{\sigma}{R^4}$$

여기서, P_t 는 최대 송신파 강도, P_r 는 수신파의 강도, G 는 안테나의 Gain, λ 는 송신파의 파장, R 은 주어진 신호 대 소음비(Signal-to-noise Ratio)에서 목표물을 탐지할 수 있는 레이더에서 목표물까지의 최대 거리이고, σ 는 RCS이다. 이 식으로부터, 항공기의 RCS(σ)가 10분의 1로 줄어들 때, 레이더 탐지거리(R)는 약 44% 줄어듦을 알 수 있는데, 이 경우 실제로 레이더가 탐지하는 항공기의 면적이나 체적에 대한 축소 효과는 더욱 크다. 표 1은 여러가지 비행체의 RCS를 나타낸다.

표 1. 일반적인 비행체의 전자파 탐지면적

	PCS, m ²
Jumbo Jet	100
B-17 Flying Fortress	80
B-47 Bomber	40
B-52 Bomber	10
B-1B Bomber	1.0
Large Fighters	5-6
Small Fighters	2-3
Small Single Engine Plane	1.0
Man	1.0
Small Bird	0.01
Insect	0.00001
F-117A Stealth Fighter	0.1
B-2 Stealth Bomber	0.01

표 1에서 일반 전투기의 경우 RCS가 2~3이고 F-117A 전투기의 RCS가 0.1로 참새와 같은 작은 새의 그것과 같음을 알 수 있는데, 결국 동일한 성능의 레이더를 탑재한 F-117A 전투기와 일반 전투기가 만났을 때에는 일반 전투기는 상대가 있는지 확인도 하지 못한 채 공격을 당하고 만다. B-2 전폭기의 경우 F-117A 전투기보다 기체의 크기가 훨씬 더 큰데도 불구하고

RCS는 0.01 밖에 되지 않는데, 이런 B-2 전폭기가 다른 전투기를 도와 작전을 수행하면 그 위력이 어떨 것인지 쉽게 생각할 수 있을 것이다. 따라서 항공기에 있어서 RCS를 줄이기 위한 기술은 스텔스 항공기를 설계함에 있어서 매우 중요한 기술이라 할 수 있다.

4. RCS를 최소화하기 위한 설계기술

RCS는 고정된 값이 아니고 물체의 재료, 표면 조도, 레이더파가 물체에 부딪히는 각도에 따라 달라진다. 그림 4는 레이더파가 물체에 수직으로 부딪힐 때의 그림이다. 그림에서 보는 것과 같이 레이더파가 물체의 면에 수직으로 부딪힐 때 레이더파는 그 일부가 반사하고 일부는 통과하며 일부는 재료의 내부에서 흩어지거나 흡수된다.

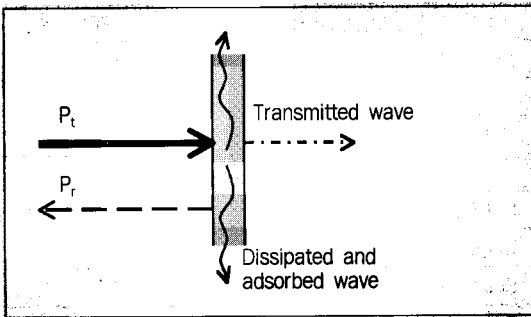


그림 4. 수직으로 부딪히는 레이더파

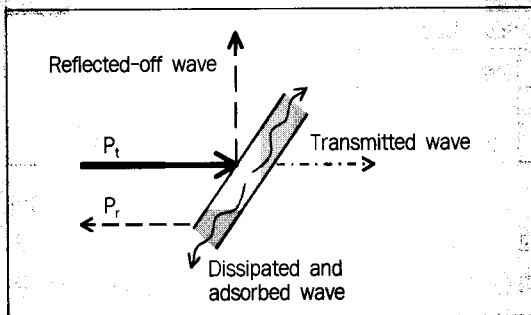


그림 5. 예각으로 부딪히는 전자파

그림 5와 같이 레이더파가 물체의 표면에 예각으로 부딪힐 때에는 반사하는 레이더파의 대부분이 꺾이어서 반사하고 일부만 송신된 방향으로

로 반사하게 된다.

항공기의 레이더 탐지면적(RCS)을 줄이는 방법은 크게 B-2 전폭기처럼 동체가 평면에 가까운 곡면을 이루도록 하는 방법과 표면에서 반사된 전자파들도 F-117A 전투기처럼 상호간섭에 의하여 서로 상쇄가 되도록 하는 방법이 있으며 급격한 곡선이나 복잡한 곡면을 피하여야 한다.

F-117A 전투기 경우 전체 동체를 각진 모서리를 가진 평면으로 구성하였으며 전투기에서 비교적 복잡한 형상을 지닌 엔진 흡입구(Inlet Guide Vane)를 날개 위에 두고 전자파흡수복합 재료로 제작된 사각형의 망(Grid)을 덮어 RCS를 줄였고, 날개의 앞전(Leading Edge)의 직경도 줄였으며 뒷전(Trailing Edge)도 제비날개처럼 만들어 뒤에서 다가오는 상대에 대한 RCS도 줄였다.

5. 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 허수값인 전기적인 값인 유전률(Permittivity, μ)과 자기적인 값인 투자율(Permeability, e)에 관련된 값으로 표현된다. 이러한 허수인자들을 가진 고분자 물질이 전자계(electrical and/or magnetic field)안에 놓여 있을 때 분자가 활성화되어 전자계 형태의 에너지를 열에너지로 변환시키면서 전자파를 흡수하게 되는 것이다.

레이더파가 임피던스, Z_0 을 가진 자유공간을 떠돌다가 임피던스, Z_1 을 가진 유전적 또는 자기적 재료의 표면을 만났을 때 일부의 반사가 일어나게 된다. 이때의 반사율(R)은 아래의 식으로 얻어지게 된다.

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

여기서,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{\mu_1}{\epsilon_1}}$$

무반사를 얻으려면 반사율(R)이 0이 되어야 하고 이것은 $Z_0 = Z_1$ 임을 뜻한다.

이러한 조건은 아래의 결과에 의하여 얻어진다.

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

따라서, 완벽한 흡수재료는 ϵ_1 는 μ_1 와 동일한 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.

재료가 가지는 두께, 임피던스, 손실정접값(Loss Tangent/Dissipation Factor, $\tan \delta$), 등을 조절함으로써 전자파흡수재료는 협대역의 단일 주파수(Narrow Band and One Frequency)에 대하여, 다중주파수(Narrow Band and Multiple Frequency)에 대하여, 또는 광역주파수 스펙트럼(Broad Band and Spectrum)에 대하여 최적화된 성능을 발휘할 수 있게 된다. 표 2는 레이더의 주파수 운영대역을 나타낸다.

표 2. 레이더의 주파수 운영대역

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

6. 전자파흡수재료(RAM)를 이용한 레이더파의 흡수

적절한 전자파흡수재료(RAM)는 전자파의 투

사각을 이용한 항공기의 형상과 더불어 레이더 탐지면적을 줄이는 필수적인 요소가 된다. 여러 가지 전자파흡수재료(RAM)가 존재하지만 대표적인 몇 가지와 함께 전자파흡수복합재료(RACM : Radar Absorbing Composite Material)를 중점적으로 소개하고자 한다. 일반적으로 2~12GHz의 주파수는 협대역에 속하며 12~18GHz의 주파수는 광대역에 속하는데 현재 운영되는 대부분의 레이더는 협대역에서 운영되며 4~5년 내에는 광대역인 KU-BAND의 주파수를 가지는 레이더가 많이 쓰일 것으로 예상된다.

6.1 Salisbury Screen

초기의 전자파흡수재료의 형태는 Salisbury Screen이라 불리는 전자파 공명형의 흡수재료이다. 이 재료는 1940년대에 개발된 것으로 자유공간의 저항값인 단위면적당 377Ω 의 전기적 저항을 가진 표면(screen)과 원하는 전파의 $1/\lambda$ 파장의 거리에 도체인 후면을 가진 형태이다. 1959년에 McMillian에 의하여 유사한 재료가 만들어 졌는데 이것은 두 면 사이에 유연한 발포고무를 넣은 형태이다. 이러한 형태의 재료는 그림 6과 같이 앞판에서 최초의 반사된 전자파와 반사판인 뒷판에서 반사된 전자파의 상쇄효과를 이용한다.

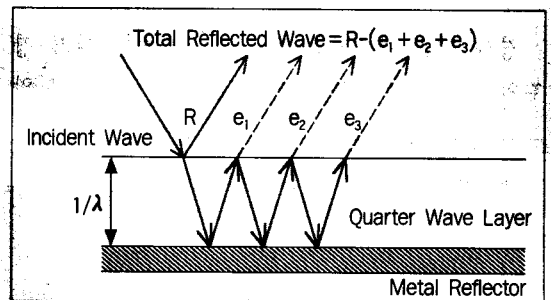


그림 6. Salisbury Screen

이러한 흡수재는 그 원리상 협대역에서의 흡수재로 이용되는데 약 30dB(99.9%) 이상의 효과를 가진다. 그러나 이러한 형태의 흡수재료는 환경에 매우 민감하고 기계적 유연성이 적으며

두께에 민감하기 때문에 고가의 제조비가 소요 된다.

6.2 단층 흡수재(Single Layer Absorber)

초기의 단층 흡수재는 유전적 혹은 자기적 전자파흡수기능을 가진 넓고 두꺼운 판재형태의 Dällenbach 층이다. 이것은 면내의 유전률 및 투자율을 증가시켜 재료의 굴절률((Refractive Index : $\sqrt{\mu\epsilon}$) 또는, 전파상수(propagation constant)라 한다)을 증가시킴으로 Salisbury Screen에 비해 매우 극적인 두께의 감소(두께는 $\sqrt{\mu\epsilon}$ 에 반비례)를 얻을 수 있다. 이러한 형태의 흡수재의 앞면을 통과하여 내부에 침투한 전자파 에너지는 뒷면에 의해 반사하기 전에 일부가 흡수되고 나머지는 뒷면에서 반사한 후에 흡수된다. 에너지가 전판에 도달하면 반사된 전자파는 앞면을 투과하여 뒷면에서 반사되어 나오는 전자파와 180°의 위상차에 의하여 서로 상쇄하게 된다. Dällenbach 층 형태의 흡수재는 Salisbury Screen에 비하여 25%의 두께로 동일한 효과를 얻을 수 있지만 두께는 더 두꺼운 편이다.

6.3 경사 다층 흡수재(Graded Multilayer Absorber)

경사 다층 흡수재는 Dällenbach 층을 여러 장 쌓아 놓은 형태이다. 각 층은 그림 7과 같이 앞

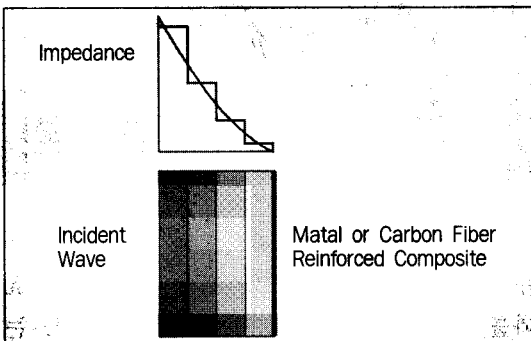


그림 7. Graded Multilayer Absorber

면에서 뒷면으로 갈수록 임피던스가 지수형태로 감소하도록 설계되어 있다.

각 층의 전기적 특성은 수지에 들어가는 첨가제를 조절함으로써 원하는 대로 얻을 수 있다.

6.4 Jaumann 흡수재(Jaumann Absorber)

Jaumann 흡수재는 Dällenbach 다층 흡수재와 유사한데 그림 8과 같이 여러 장의 얇은 저항성 플라스틱 막을 이용하여 구성한다.

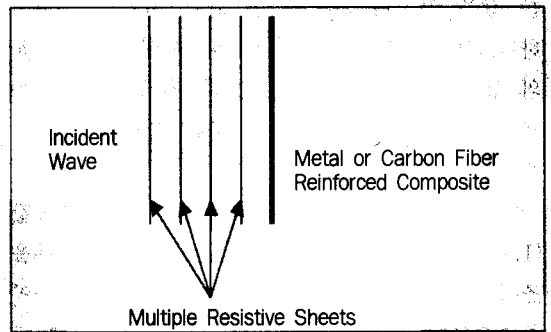


그림 8. Jaumann Absorber

Jaumann 흡수재는 각 장의 임피던스를 조절함으로써 원하는 흡수특성을 얻을 수 있다. 이러한 각 장은 하니콤코어(Honeycomb Core)나 다른 플라스틱 구조물을 이용하여 분리하는데 그 거리는 1/λ의 흡수 배로 한다.

6.5 전자파흡수복합재료(RACM : Radar Absorbing Composite Material)

현재의 레이더는 일반적으로 1~18 GHz의 주파수의 전자파를 사용한다. 일단 적의 레이더의 사용주파수를 알면 전자파흡수재료와 전자파흡수구조는 이러한 주파수대역으로 최적화된다. 그러나 새로운 레이더체계가 계속해서 개발되고 따라서 전자파흡수재료도 더 넓은 대역에서 효과적으로 작용하여야 한다. 최근의 전자파흡수재료에 대한 연구는 전자파흡수재료가 보다 넓은

주파수대역에서 우수한 성능을 발휘할 수 있는 방향으로 집중되고 있다. 전자파흡수재료는 유전적 흡수재와 자기적 흡수재의 두 가지로 크게 분류할 수 있다. 유전적 흡수재는 전기저항에 의한 에너지의 손실을 유도하는데 이것은 섬유강화 복합재료의 수지에 카본이나 흑연 또는 금속의 가루나 파우더를 첨가함으로써 얻을 수 있다. 중요한 유전적 특성은 유전상수(Dielectric Constant)와 손실정접값(Loss Tangent/Dissipation Factor, $\tan \delta$)인데 이것은 첨가제와 강화 섬유와 수지의 조합이다. 자기적 흡수재는 일종의 자기적 히스테리시스 효과에 기인하는데 이것은 수지에 Carbonyl이나 Iron Ferrite와 같은 물질을 첨가함으로써 얻을 수 있다.

6.5.1 유전흡수재

유전흡수재는 두께방향으로 유전률이 변화하도록 제작된 재료로써 Graded Absorber라고도 불린다. 이것은 전자파흡수재료의 기지에 첨가하는 첨가제의 양의 비율을 두께방향으로 변화시켜 제작한다. 유전흡수재는 자유공간으로부터 전자파가 직접 투사되는 표면의 임피던스를 자유공간의 그것과 일치시켜 표면에서 전자파의 반사를 최소화시켜 대부분의 전자파가 전자파흡수재료 내로 투과되게 하는데, 이때에 재료의 내부의 소실계수(Loss factor)에 의하여 전자파가 확산되거나 흡수되게 한다. 이것은 전자파흡수재료의 두께방향으로 임피던스를 지수형태로 증가시킴으로 가능하다.

6.5.2 자기흡수재

자기흡수재는 자기적 물질을 첨가한 Polyisoprene, neoprene, nitrile-rubber, silicone, urethane, fluoroelastomers와 같은 탄성을 가진 고분자물질로 구성된다. Ferrites와 다른 자기적 물질이 이러한 첨가제가 될 수 있다. 자기흡수재는 재료의 두께와 자기적 특성을 조절함으로써 매우 높은 투사율을 얻을 수 있다. 자기흡수재는 일반적으

로 뒷면에 전반사율을 가지는 재료를 덧붙여 사용하게 된다. 적당한 첨가제의 선정과 재료의 두께방향으로의 분포를 조절함으로써 원하는 주파수대역에서 원하는 성능을 발휘할 수 있도록 만들 수 있다. 자기흡수재는 일반적으로 유전흡수재보다 두께가 얇고 0.50~1.25 mm의 두께로 일정하게 또는 일정한 각도로 두께가 변하는 형태의 다양한 모양으로 제조될 수 있다. 어떤 자기흡수재는 동일한 성능의 유전흡수재에 비하여 약 1/10배의 두께로 제작될 수도 있다. 또한 전자파가 수직이 아닌 각도에서 전파될 때에도 우수한 전자파흡수특성을 보인다. 또한 RAM 코딩한 재료처럼 투사된 레이더 에너지로 인하여 발생하는 표면전류를 제거하는데 뛰어나다. 1개나 2개의 주파수에 대하여 최적화된 특수한 자기흡수재는 반사율을 20~25dB(99~99.7%)까지 줄일 수 있다. 일반적인 자기흡수재도 1개나 2개의 주파수에 대하여 최적화되었을 때에는 두 주파수사이에서 10~15dB(90~97%)의 흡수율을 가진다. 광대역용 자기흡수재는 일반적으로 12dB(95%)의 흡수율을 가진다.

6.5.3 복합재료의 전자파 흡수성능

일반적인 플라스틱이나 유리섬유나 케블라(Kevlar®: Aramid) 섬유강화 복합재료는 그 자체로는 뛰어난 전자파흡수재료가 될 수 없다. 이 재료들은 실제로는 매우 뛰어난 전자파 반사재료이다. 일반적으로 금속표면은 전자파에너지의 좋은 반사물이기 때문에, 플라스틱이나 유리섬유 및 아라미드 섬유강화 복합재료는 전자파 반사율이 그리 크기 없다고 생각하기 쉽지만 항상 그런 것은 아니다. 평판의 두 표면으로부터 발생하는 전체 반사율(이것은 유전상수의 함수이다)은 두께가 전자파의 파장의 1/4 즉, $\lambda/4$ 일 때 가장 크게 나타난다. 그림 10은 재료의 두께가 $\lambda/4$ 일 때의 유전상수에 대한 반사율의 관계를 보여준다.

그림 9의 결과로 보아서 유전상수가 4.2인 유

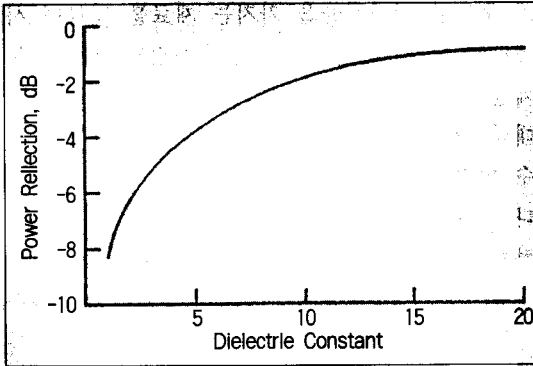


그림 9. 유전상수에 대한 전자파의 반사율

리섬유/에폭시 복합재료는 완전한 금속반사체에 대하여 겨우 4.5dB이 적은 매우 높은 반사율을 가지게 된다. 비금속 재료의 또 다른 문제는 그것의 뒤에 있는 금속구조물이 반사하게 되는 전자파를 완전하게 차단하지 못한다는 것이다.

표 3. 복합재료용 강화섬유의 전기적 특성

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 10GHz 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.

일반적인 플라스틱과 유전복합재료는 유전상수가 1.0인 자유공간 보다 더 큰 유전상수와 더 작은 손실정접값($\tan \delta$)을 가지기 때문에 좋은 전자파흡수재료가 되지 못한다. 일반적인 복합재료용 강화섬유의 전기적 특성은 표 3에 나와 있다.

석영섬유(Quartz fiber)가 전자파 투과에 대하여 가장 뛰어난 유전특성을 보이며 일반적인 E-Glass나 Kevlar®-49 또한 레이돔(Radome)이나 전자파 흡수구조물을 만드는데 적당한 유전특성을 가짐을 알 수 있다.

유전복합재료에 있어서 기지재료는 복합재료의 전체 유전상수와 손실정접값에 대하여 실질적인 역할을 한다. Polyimide나 bismaleimide 또

표 4. 복합재료용 수지의 전기적 특성

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.

는 최근에 새로 개발된 일부의 열가소성수지 (PEEK, PPS etc) 등과 같은 몇몇의 고온용 고분자물질은 가장 좋은 전자파 투과특성을 가진다. 표 4와 표 5는 일반적으로 많이 쓰이는 고분자수지와 섬유강화 복합재료에 대한 전기적 특성을 나타낸다.

표 5. 일반적인 복합재료의 전기적 특성

Matrix Resin	Dielectric Constant, E'/E_0	Loss Tangent/Dissipation Factor, $\tan \delta$
Fiberglass*/Epoxy	4.2-4.7	0.007-0.014
Quartz Glass/Epoxy	2.8-3.7	0.006-0.013
Kevlar®-49/Epoxy	3.2-3.7	0.010-0.017
Fiberglass*/Bismaleimide	4.0-4.4	0.006-0.012
Quartz Glass/Bismaleimide	2.5-3.3	0.004-0.009
Fiberglass*/Polyimide	4.0-4.4	0.006-0.012
Quartz Glass/Polyimide	3.0-3.2	0.004-0.008
Fiberglass*/PPS+	4.5	0.018
Quartz Glass/PPS+	3.3	0.002, 0.0008-0.001
S-Glass/PEEK§	4.6	
E-Glass +Polyphenylene Sulfide Resin §Polyetheretherketone Resin Note : Composites based on woven fabric reinforcements and resin prepregs. Data for a frequency of 10 GHz at 20°C.		

6.5.4 전자파흡수복합재료구조물(RACS : Radar Absorbing Composite Structure)의 제작

전자파 흡수특성은 복합재료구조물의 설계를 통하여서도 얻을 수 있다. 이것은 석영유리, 유리강화섬유 또는 아라미드 강화 고분자복합재료로 만들어진 유전특성을 가진 앞면과 전자파 에너지를 흡수하도록 최적화된 수지로 만들어진 복합재료평판과 반사판 역할을 하는 카본/에폭시 평판으로 구성된다. 각 평판의 전자기적 특성과 두께 및 적층순서를 조절함으로써 원하는 주파수에 대한 흡수특성을 얻을 수 있다.

6.6 하니컴코어(Honeycomb Core) 샌드위치 구조를 이용한 전자파흡수구조물 설계

전자파흡수평판은 비금속성의 하니컴코어를 이용하여 제작할 수도 있다. 이러한 하니컴코어는 Salibury Screen과 McMillan 흡수제 및 Jaumann 흡수제를 제작할 때 각 유전특성의 막 사이에서 하중을 전달하는 구조적 기능을 하게 된다. 비금속성 하니컴코어는 일반적으로 노멕스(Nomex)나 유리섬유강화 복합재료를 사용한다. 노멕스 하니컴코어는 습기를 방지하고 원하는 전단강성 및 강도를 얻기 위하여 Phenolic 또는 Polyimide를 코팅하는데 이때 카본을 코팅수지에 첨가하여 전자파 흡수기능을 더한다. 하니컴코어의 두께, 셀 크기, 밀도, 재료는 원하는 전자파흡수특성 및 구조적 특성을 고려하여 결정하여야 한다.

7. 전자파 흡수복합재료(RACM)의 전망

전자파나 적외선(Infrared)등을 차단하는 기능성 재료의 역할은 물론 동시에 하중을 지탱하는 구조적인 역할을 동시에 수행할 수 있는 복합재료의 특성은 고성능의 항공기를 설계함에 있어서 더 자유롭고 고기능성의 설계를 가능하게 한다. 따라서 스텔스 기능 등의 다양한 성능을 요구하는 현대의 항공기에 대한 요구에 부응하여 복합재료의 사용은 더욱더 확대될 것으로 기대된다. 첨단 전자기기의 사용증가로 인한 전자파 오염 또한 심각하여 전자기기의 오작동 및 인체에 미치는 장애에 대한 연구결과도 전자파의 흡수 및 차단기술에 대한 수요를 증가시키고 있다. 그러나 선진국에서 개발된 복합재료를 이용한 전자파흡수재료(RAM)에 대한 자료는 개방되지 않고 있다. 국내에서의 전자파흡수복합재료에 대한 연구는 국방과학연구소, 표준연구소 및 대학에서 일부 수행하고 있지만 아직은 미흡한 수준이다. 따라서 현재에는 복합재료의 기본적 전자

기적 특성 및 구조적, 기능적 복합재료의 역할을 고려한 최적화기술, 복합재료구조물 설계 및 성형기술에 대한 연구가 시급하다.

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.4, pp.9-17, 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.9-18, 1991.
- [3] 정현달, 김덕주, 이윤상, "특정두께를 갖는 이방성 복합재료 구조의 전자파 응답특성연구", 제6회 항공기 개발기술 심포지움, pp.373-386, 1998.
- [4] John D.Kraus, " Electromagnetics", McGraw-Hill Book Company, 3rd ed., 1984.