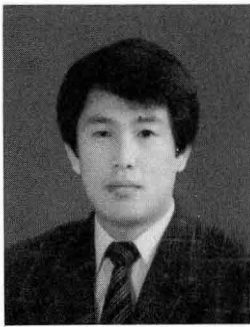


# Stealth기술의 본질 — 전파흡수체의 원리와 응용



曹成佰 / 국방과학연구소  
선임연구원

전파흡수체의 응용분야는 사용목적에 따라  
민수용과 군수용으로 크게 대별된다  
민수용으로는 통신기기의 발달로 인하여 최근  
에 가장 문제가 되고있는 전자파 장애(EMI)대  
책용으로 사용되며 군수용으로는 무기체계의  
생존성 향상(스텔스)으로 사용된다  
여기서는 군수용에 초점을 두어 대표적인 응용  
예를 살펴보았다 (필자 주)

**스텔스** (Stealth)라는 말은 넓은 의  
미로는 「signature의 제거 또  
는 감소」를 뜻하며, 좁은 의미로는 「레이다에  
의한 피탐(被探)방지의 회피」로 생각할수 있  
다. 최근 걸프전에서 위력을 과시했던 병기중  
F-117, B-2등이 스텔스 기술을 사용한 대표적  
인 무기체계이다.

이러한 스텔스 기술은 궁극적으로는 레이다  
단면적(RCS : Radar Cross Section)을 줄이는  
기술로 재료과학적인 측면에서 보면 크게 2가  
지로 대별 할수 있다.

하나는 전자파(또는 전파) 흡수 구조재  
(RAS : Radar Absorbing Structure)이고, 다른  
하나는 전자파(또는 전파) 흡수체(RAM :  
Radar Absorbing Material)이다.

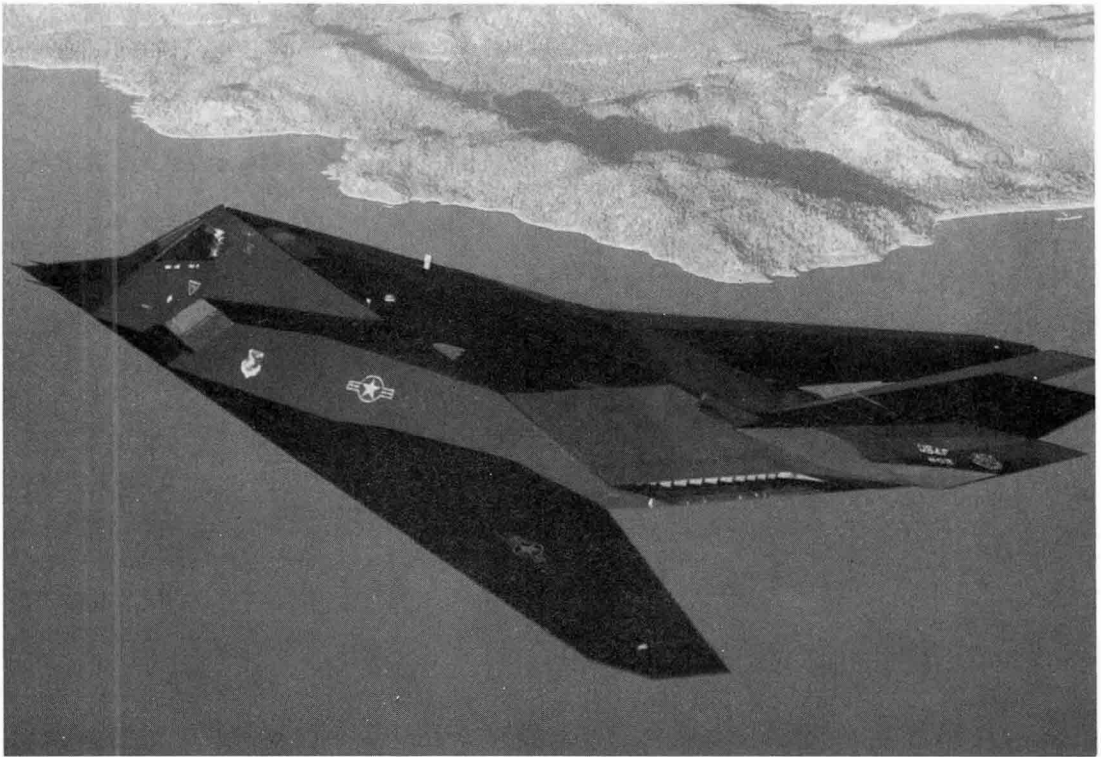
전파흡수 구조재는 무기체계의 새로운 동체  
구조 설계 및 구조변경이 수반됨에 따라 중·장  
기 핵심기술연구를 중심으로 국내 제반 기술  
기반이 확보된후 신규사업에 적용되어야 할  
것이다.

반면에 기존 무기체계의 형상 및 설계의 변  
형없이 적용이 가능한 전파흡수체에 대한 연  
구는 비교적 적용이 용이하여, 미국을 비롯한  
선진국을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

전파흡수체는 본질적으로 마이크로파 에너  
지를 열로 변환시키는 기능을 가지고 있다. 즉  
일종의 열변환기로 볼수 있다. 전파흡수체의  
흡수 기구(mechanism)는 근본적으로 물질의  
고주파 손실특성에 따른 것으로, 사용재료에  
따라 도전손실재료, 유전손실재료, 자성손실재  
료로 분류된다.

이들 재료중에서 페라이트(ferrite) 전파흡  
수체는 주로 공명현상에 의한 자성손실을 이  
용한 것으로 정합두께가 다양하여 산업용과  
군사용 등으로 널리 쓰이고 있으며, 성능은 정  
합주파수, 정합두께, 반사감쇠량, 비대역폭 등  
으로 평가하고 있다.

전파흡수체는 적용되는 주파수 대역에 따라  
선택되어야 한다. 일반적으로 민간용에 적용하  
고자 하는 경우에는 대체로 주파수가 정확히



최근 걸프전에서 위력을 발휘했던 F-117(사진)등이 스텔스 기술을 사용한 대표적인 무기체계이다

규정되어 있으므로, 특정 전파흡수체의 적용만을 고려하며, 흡수체의 두께 및 무게에 대해서도 큰 제약을 두지 않는다.

반면에 군사용 전파흡수체는 상대방이 사용하는 전자파의 주파수가 정확히 알려질 수 없을 뿐만 아니라 무기체계의 기동성 등을 감안하여 흡수층의 두께가 얇은것이 요구된다. 즉 군사용도의 전파흡수체는 두께가 얇으며 광대역에서 흡수능력이 우수해야 한다.

이러한 재료의 개발은 각국간의 극비사항에 속하며 기술에 관한 정보획득이 거의 불가능해 자체개발을 피할수 없는 실정이다. 이러한 상황에서 연구개발의 단계는 적정물질의 탐색과 탐색된 정보를 바탕으로한 고성능 전파흡수체 개발로 이어져야 한다.

이 글에서는 3년간의 자체연구 결과 및 기초자료를 토대로하여 전파흡수체의 동작원리와 설계기법, 전파흡수체의 고주파손실 및 전자기적 특성, 전파흡수 특성 및 RCS 감소효과에 대해 살펴보고자 한다.

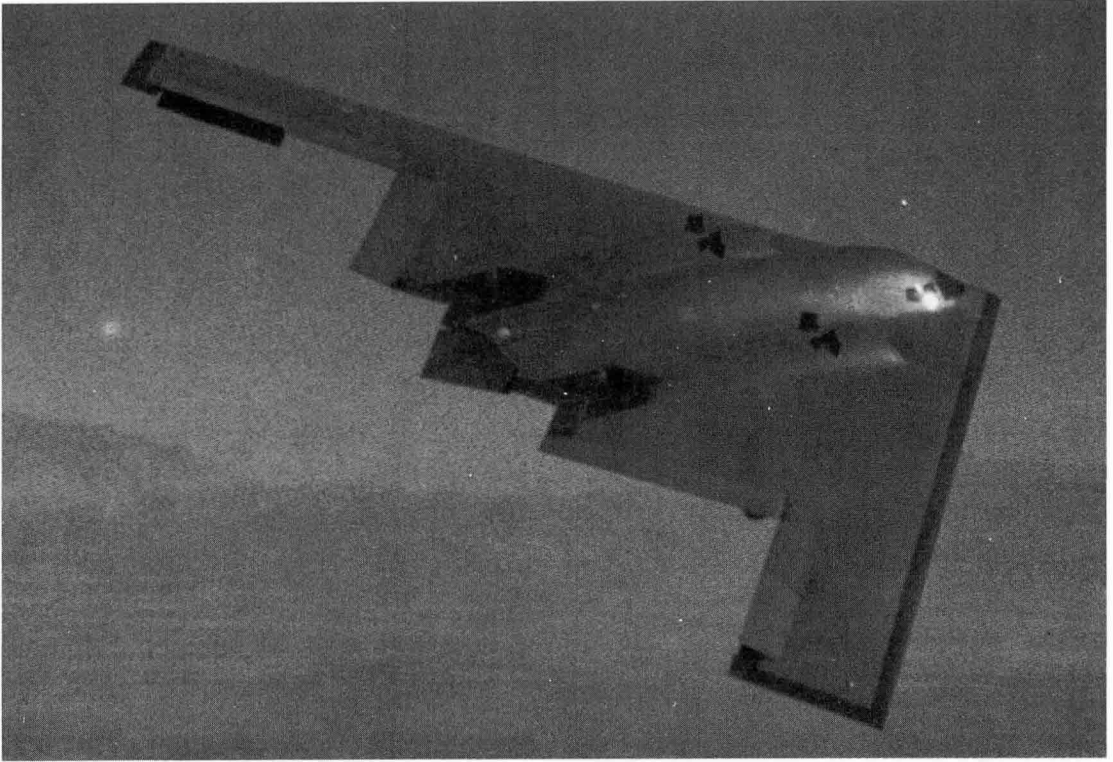
### 전파흡수체의 분류

현재 연구개발 되어진 전파흡수체를 사용형태, 구성, 재질에 따라 분류하여 기술하고자 한다. 첫째, 사용형태에 따라 분류하면, 구조형, 침부형, 도장형 등 크게 3종류로 분류할수 있으며, 각각의 특성 및 장단점을 비교하면 다음과 같다.

구조형은 전파흡수체 자체에 기계적 강도를 보유 하여 2차 구조물로 사용되며 구조가 단순화·경량화 되어야 한다.

침부형은 금속 구조물 표면에 전파흡수재료를 접착시키는 형태로 곡면에도 적용이 용이하며 고무판재가 주류이다. 이러한 형태는 비교적 재료의 선택이 자유롭기 때문에 양호한 전파흡수 특성을 얻을수 있는 장점은 있으나, 구조물에 전파흡수체를 설치하므로 중량 증가의 단점을 내포하고 있다.

도장형은 금속구조물 표면에 전파흡수체를 일정한 두께로 도장하는 것으로 침부형에서는



스텔스 기술은 재료과학적 측면에서 전파흡수 구조재와 전파흡수체로 나뉜다. 사진은 B-2 스텔스 폭격기

대처 불가능한 복잡한 3차원 곡면에도 사용 가능하다는 잇점이 있다.

둘째로 전파흡수체를 구성에 따라 분류하면 크게 단층형과 다층형 등 2가지로 분류할 수 있다.

단층형은 전파흡수재료가 균일한 재료로 구성되어 있으며 제작이 비교적 용이하다는 장점 등이 있으나 사용주파수 대역이 좁다(협대역)는 단점도 있다.

이에 반해 다층형은, 특성이 다른 여러가지 재료를 중첩시키는 것으로 사용주파수 대역이 넓다(광대역)는 장점이 있다.

셋째로 재질에 의한 분류를 하면 3종으로 분류할 수 있다. 페라이트계는 재료의 자성손실을 이용한 재료이고, 카본계, 세라믹계는 도전손실을 이용한 전파흡수재료이다.

페라이트계는 사용주파수 대역이 다양하다는 장점이 있으며, 카본계는 양호한 전파흡수 특성이 달성되면 경량인 전파흡수체 실현이 가능하다.

세라믹계는 내열성이 우수하기 때문에 초음속기에 적용이 가능하고 또한 경도가 높기 때문에 방탄을 겸해서 외피에 사용할 수 있다.

일례로 이 글에서 주로 언급되는 페라이트 전파흡수체는 침부형, 단층형, 페라이트계에 속함을 알 수 있다. 이상 전파흡수체 분류에 대해 살펴보았다.

앞에서 언급한 일련의 사항들로부터 알 수 있는 것은 전파흡수체 사용시 적용기종 및 적용위치에 따라 적절한 사용형태, 구성, 재질을 선택하여 사용해야 한다는 것이다.

#### 전파흡수체의 동작원리

전파흡수체의 구비조건은 첫째, 계면에서 전파의 반사가 일어나지 않도록 재료의 임피던스가 공기와 같아야 하고, 둘째, 재료의 손실계수가 커서 투과된 전자파가 급격히 감쇠되어야 한다.

첫째 조건인 임피던스 정합을 이루기 위해

서는 재료의 유전율과 투자율이 같은 값을 가져야 한다. 현재까지 이러한 재료를 합성하는 것은 용이하지 않다. 따라서 흡수체의 형상을 피라미드형, 원추형, 적층형 등으로 가공하여 경계에서는 공기의 특성과 재료의 특성을 유사하게 만들며 흡수체 내부로 진행할수록 손실을 크게 하는 것으로 감쇠형이라 지칭한다.<sup>1)</sup>

이러한 흡수체의 원리는 재료의 손실에 관계없이 원하는 주파수에서 4분의1 파장 이상의 두께를 필요로 하므로 두께가 두껍다는 단점을 가지고 있다. 그러나 광대역에서 전파흡수특성이 우수하여 전파무향실 등에 이용되며 도전손실을 이용한 카본계 전파흡수재료가 대표적인 예이다.

두번째의 조건을 이용한 것이 페라이트 전파흡수체이다. 페라이트 전파 흡수체의 기본구조는 반사체인 금속판 위에 페라이트를 코팅한 구조이다.

이러한 것은 단층의 전파흡수체 후면에 금속판을 부착하여 금속판에서의 반사영향과 전파흡수체의 전면의 반사를 잘 조절하여 공명현상을 일으켜 전면에 반사파와 서로 상쇄시

키도록 하는 것이 주된 전파흡수 원리이다.

이와동시에 공기중의 임피던스(377Ω), 전파흡수체의 임피던스를 일치하게 하는것(정합되는 것)도 수반되는데, 이러한 형태를 정합형이라 부른다.

이 단층형 전파흡수체의 흡수원리를 전파가 진행함에 따라 순차적으로 설명하면 아래와 같다.

- 전파흡수체에 전파가 입사될때(전계는  $E_0$ ) 일부는 표면에서 반사( $E_{r1}$ )되고 나머지는 전파흡수체 내부에 투과된다.

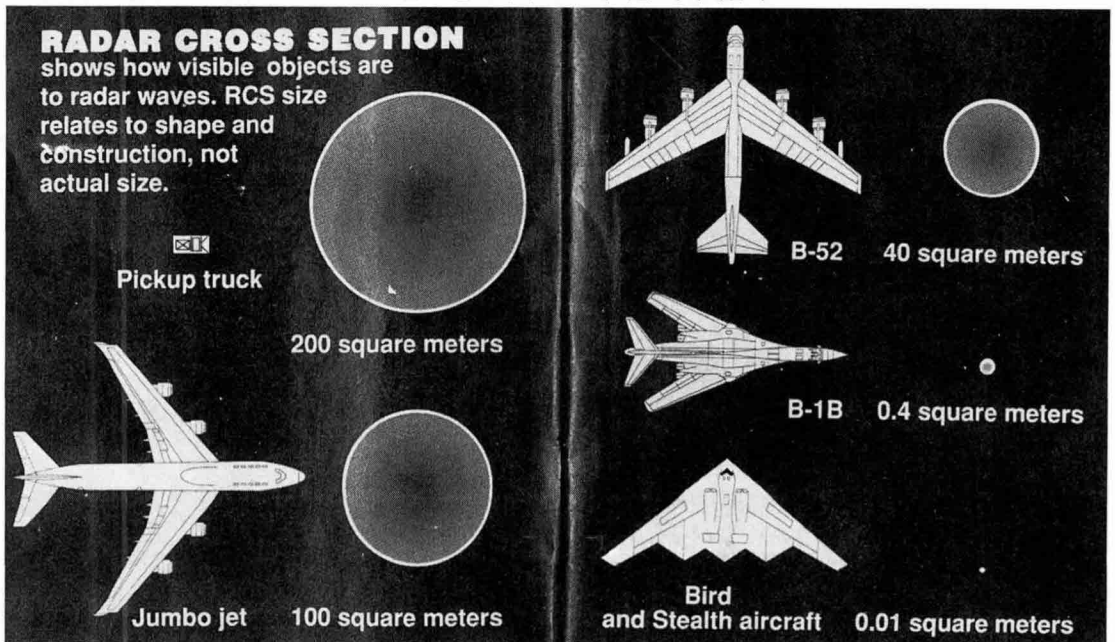
- 내부에 투과된 전파는 전파흡수체의 감쇠정수에 의해 지수적으로 감쇠한다.

- 전파흡수체의 두께가 얇으면 후면 금속판에 도달되는 전계의 크기는 충분히 적어지지 않으며 금속판에서 완전반사가 일어난다.

- 반사된 파는 전파흡수체 중에 감쇠가 받아들여지지 않음에 따라 역행하여 전파흡수체 표면에 도달하게 된다(그때의 전계를  $E_{r2}$ ).

- 이 역행파  $E_{r2}$ 는 표면의 경계면에서 일부 반사되어 전파흡수체 내부에 전파되고( $E_{t2}$ ) 나머지는 투과되어 전파흡수체 표면 밖으로 반

스텔스 기술은 궁극적으로는 레이더 단면적(RCS)을 줄이는 기술이다  
아래 사진은 점보제트기와 B-52, B-1B 및 스텔스기의 RCS 차이를 나타내준다



사 된다( $E_{r2}$ )

흡수체 표면에서의 반사파를 모두 합하면 반사계수(S)는 다음과 같이 표시되어 진다.

$$S = \frac{E}{E_0} = \frac{\Sigma E_{rn}}{E_0}$$

전파의 감쇠는 경로에 따라 지수적으로 감쇠함으로 대부분의 감쇠가 일어난다고 볼 수 있다. 따라서 반사전계  $E_{r1}$ 과  $E_{r2}$  사이에  $180^\circ$ 의 위상차가 생기면 전파흡수체의 반사계수가 0(zero)이 된다.

흡수체의 두께가 파장의 1/4이 되었을 때 이러한 조건을 만족하므로, 이러한 흡수체를 4분의1 파장형 전파흡수체라 부른다.

반사계수를 재료의 고유 특성인 복소 비유전율( $\epsilon r$ ), 복소 비투자율( $\mu r$ )을 사용하여 나타내면 아래식으로 변형된다.

$$S = \frac{\sqrt{\mu r / \epsilon r} \tanh(j 2 \Pi d / \lambda_0 \sqrt{\mu r / \epsilon r}) - 1}{\sqrt{\mu r / \epsilon r} \tanh(j 2 \Pi d / \lambda_0 \sqrt{\mu r / \epsilon r}) + 1}$$

따라서 원하는 주파수에서 무반사 흡수체(반사계수  $S=0$ )를 설계하기 위해서는 복소 비유전율, 복소 비투자율 및 두께를 적절히 조합하면 가능하나 이들 변수를 제어하는 것이

전파흡수체를 제조 및 설계하는데 가장 어려운 기술로 알려져 있다.

### 전파흡수체의 고주파 특성 및 설계방안

전파흡수체 중에서 감쇠형 전파흡수체인 도전성 전파흡수체 및 유전성 전파흡수체는 전파암실 및 건물의 내장재로 주로 사용되며, 함정, 항공기, 차량 등 무기체계에 사용하기에는 흡수체의 두께가 두껍고 강도면에서 약하므로 이용에 많은 제약이 따른다.

따라서 무기체계에 적용이 용이한 자기흡수체, 즉 4분의1 파장형 흡수체의 고주파 특성에 대해 살펴보면 다음과 같다.

자기흡수체는 자성손실을 이용한 것으로 자성손실은 자성을 유발하는 스핀(spin)의 운동이 외부자장 변화를 따라가지 못하여 생기는 것으로 손실재료로는 금속 자성재료와 산화물 자성재료가 사용되고 있다.

그러나 일반적으로 산화물 자성재료인 페라이트를 고무, 플라스틱등 비자성재료와 혼합한 복합페라이트나 페라이트 소결체를 전파흡수

미국이 차세대기로 개발중인 YF-22기. 상당한 수준의 스텔스 기술이 적용될 것으로 예상된다





체로 사용한다.

페라이트(소결페라이트)는 VHF, UHF대에서 우수한 전파흡수특성을 가진다.

그러나 1GHz 이상의 마이크로파 영역에서는 페라이트 분말을 비자성재료인 고무나 플라스틱과 같은 절연물에 혼합한 복합페라이트가 사용된다.

소결페라이트는 거의 100MHz 부근에서 자기완화 현상이 일어나며 고무에 혼합한 복합페라이트는 3000MHz(3GHz) 부근에서 동일현상이 일어나는 것을 보이고 있다.

이 외에도 복합페라이트 전파흡수체는 유연성을 가져 시공이 용이할뿐 아니라 페라이트의 화학조성의 변경, 페라이트분말과 비자성재료와의 혼합비, 페라이트의 입자경에 의해 전자적 특성을 제어할수 있는 장점을 가지고 있다.

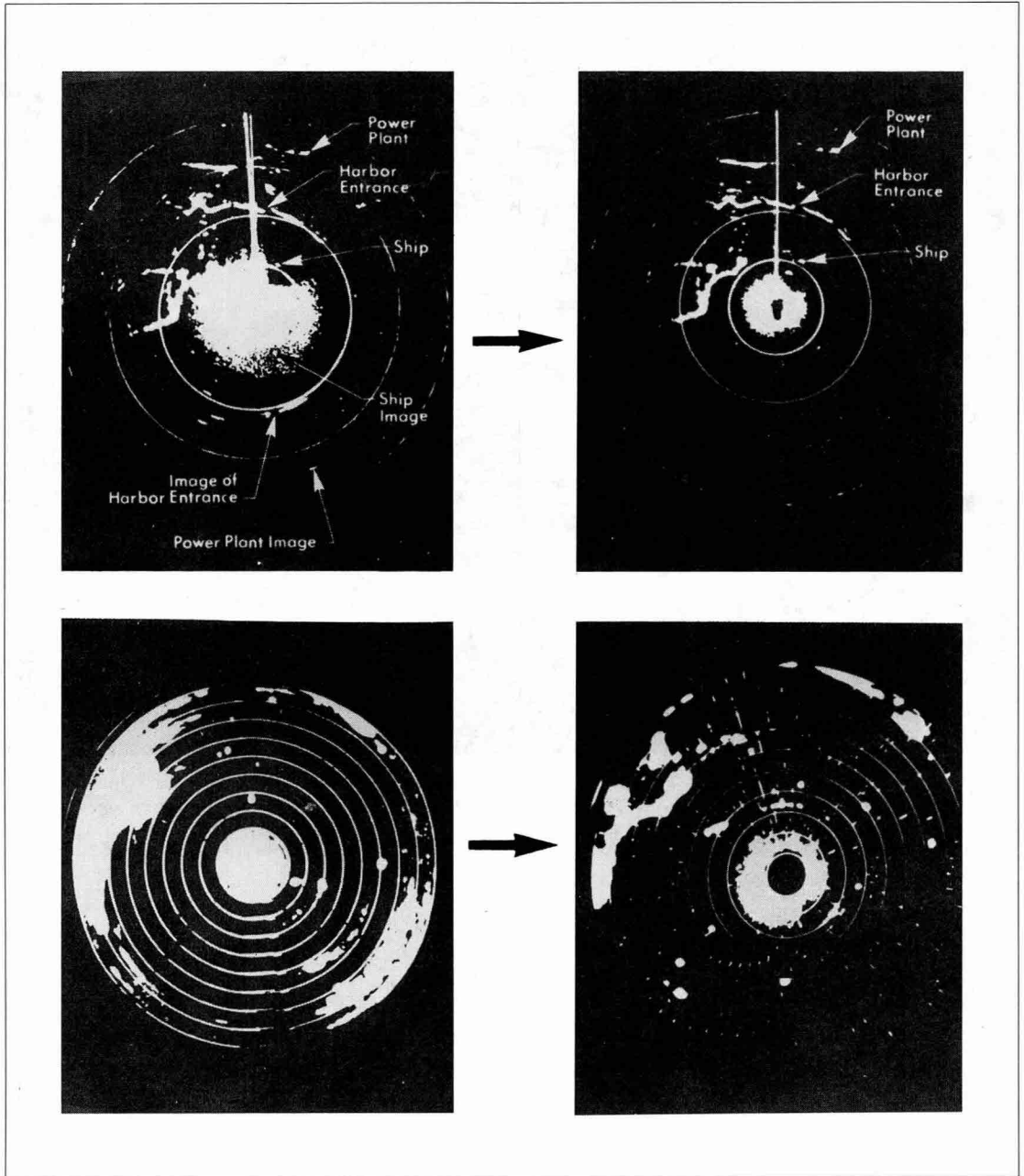
전파흡수체 설계를 위하여 6개 변수에 대한 정합조건의 해를 구하여 도식화 하는 일련의

연구들이 일본과 미국등지에서 행해져왔다. Naito<sup>2)</sup>등은 VHF, UHF영역에서 사용가능한 임피던스 근계적도를 구하였으며, 록히드의 H.T. Hahn 그룹<sup>3)</sup>에서는 유전손실계수를 고려하여 Naito의 설계도를 보완하였다. 또한 ADD<sup>4)</sup>에서도 마이크로파 영역에서 사용가능한 전파흡수체 설계도를 제작하였다..

전파흡수체 설계도는 흡수체의 재료정수만 구하면 무반사가 일어나는 주파수 및 흡수체의 최적두께를 알수 있으며 흡수체의 성능향상을 위한 기술적인 방안도 예측이 가능하므로 전파흡수체 개발에 있어서 가장 중요한 기술 중의 하나이다.

#### 전파흡수체의 RCS 감소효과

전파흡수체의 성능평가는 흡수체의 두께가 정해졌을때 사용주파수 영역에서 전파흡수능(반사감쇠량) 값으로 평가되어진다.



전파흡수체 도포 前(왼쪽(p.46) 사진) 後(오른쪽 사진)의 레이다 해상력

그러나 실제 무기체계에 적용할 때에는 전파흡수체 도포로 인해 RCS(Radar Cross Section) 감소에 어느정도 기여하는지를 알아야만 올바른 평가를 할수 있다.

물론 전파흡수체가 도포된 물체가 도포되지 않은 물체에 비해 RCS가 감소되는 것은 기정사실이나, 현재까지 전파흡수체 도포 유, 무에

따른 RCS 관련 자료들은 스텔스 기술과 함께 비밀로 묶여 있는 상태이다.

여기에서는 전파흡수체의 중요성을 다시한번 강조하는 의미에서 RCS의 기본개념 및 전파흡수체 기술이 일부 부여된 F-117과 B-2를 일례로서 RCS 감소효과에 대하여 간단하게 소개하고자 한다.

일반적으로 물체가 완전흑체(Black body)가 아닌 이상 입사한 전자파를 사방으로 산란 시킨다고 볼수 있다. 어떤 레이더 목표에 일정한 방향에서 입사한 전자파중 일부는 흡수되고 나머지는 대부분 사방으로 산란된다.

산란된 전자파중 입사한 방향과 일치하는 쪽으로 산란되는 반사파가 레이더 수신 안테나에 수신되어 신호로서 유효하게 쓰이게 된다. 이것의 척도가 RCS(레이더 반사면적)로 레이더 방정식 속에  $\sigma$ 로 표현되며, 단위는  $m^2$ 으로 표시된다.

점보제트 여객기는 RCS가  $100m^2$ , B-52는  $10m^2$ , 걸어가는 사람은  $1m^2$ 로 비친다. 이에반해 스텔스 기술이 부여된 F-117은 RCS가  $0.1m^2$ , B-2의 경우는  $0.01m^2$ 정도로 추정되며, 이는 대체로 작은새 정도로 레이더 스킵에 비치게 된다.<sup>5)</sup>

그러나 B-2의 RCS가 것처럼 작다고해서 레이더에 의한 피탐지 거리가 같은 비율로 줄지는 않는다. 레이더 피탐지거리는 RCS의  $\sqrt{1/4}$ 에 비례하므로, 예를들어 B-52를 100km에서 발견할수 있는 레이더라면 B-2는 약 20km의 거리에서 발견할수 있다는 것이다.

이처럼 무기체계의 생존성 향상에 엄청난 기여를 하는 RCS 감소기술중에 하나의 방안으로 사용되는 전파흡수체는 국내제반 여건상 확보해야할 핵심기술임을 시사하고 있다.

### 전파흡수체의 응용분야

전파흡수체의 응용분야는 사용목적에 따라 민수용과 군수용으로 크게 대별된다. 민수용으로는 통신기기의 발달로 인하여 최근에 가장 문제가 되고있는 전자파 장애(EMI)대책용으로 사용되며 군수용으로는 무기체계의 생존성 향상(스텔스)으로 사용된다.

여기서는 군수용에 초점을 두어 대표적인 응용 예를 살펴보았다.

최근 해군함정에는 사용주파수 및 사용목적 이 각기다른 다양한 레이더가 장착되어 있으

므로 서로의 상호간섭으로 인한 레이더 에코가 발생하여 목표물의 식별 및 미사일의 방향 추적 레이더와 같은 시스템의 성능을 저하시키고 있다.

이러한 요소로 인해 함정의 방호 및 공격성능의 저하를 야기시키므로 이에대한 대처방안으로 반사가 많이 발생하는 마스트나 레더(ladders)등에 전파흡수체를 도포하여 레이더의 해상력을 향상시키고 있다.

(왼쪽 그림 참조)<sup>6)</sup>

레이더에 탐지되는 면적이 많은 항공기 및 미사일의 공기흡입구, 날개의 전련(leading edge), 동체 수직전련 및 날개의 후련, 배기공 등에 도포하여 항공기의 생존성을 높이고 미사일의 피탐지 확률을 극소화하는데 이용되고 있다. \*

### 참고 자료

- 1) 石野乾·三泡太郎, 「電波暗室」, エレクトロニセラミクス, 88(9), 64-71, 1988
- 2) Y. Naito and Suetake, 「Application of ferrite to electromagnetic wave absorber and its characteristics」, IEEE Trans. MTT, 19, 65-72, 1971
- 3) H.M. Musal, Jr., and H.T. Hahn, 「Thin-layer electromagnetic absorber design」, IEEE Trans. Mag. 25, 3851-3853, 1989
- 4) S.S.Kim, S.B.Jo, K.I.Kwon, K.K.Choi, J.M.Kim, 「Complex permeability and permittivity and microwave absorption of ferrite-rubber composite in X-band frequencies」, IEEE Trans. Mag. 27, 5462-5464, 1991
- 5) 小潼國雄, 《兵機と技術》, 1990년 7월호, p.p11-12
- 6) Richard. N. Jonson, 「Radar-Absorbing Material」, International countermeasures Hand book, 11th edition, E.W.Communication, Palo, Alto.CA.