

# 레이더 위장용 전자파 차폐 섬유소재

변성원, 박재기, 김기영

한국생산기술연구원 섬유소재본부 산업용섬유팀

## 1. 서 론

최근 우주항공, 자동차, 환경, 바이오산업과 같은 첨단산업에서는 기존소재의 성능 한계를 초월하는 신소재 수요 증가와 고성능 소재 개발의 중요성이 증대됨에 따라, 미래를 대비한 산업용 섬유산업분야에서도 기존소재의 성능 한계를 초월하여 환경친화성, 초경량성, 극한기능성, 복합기능성 등과 같은 고성능, 고·다기능성의 새로운 개념의 소재 및 응용기술 개발이 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도 전기전도성이 부여된 기능성섬유 소재는 단순한 대전방지(anti-static)와 제전(electrostatic dissipation) 기능을 탈피하여 전자파차폐용(electromagnetic interference shielding) 소재로 응용이 대폭 확대되고 있다. 최근 전자기술의 발달로 전기·전자 제품과 통신기기의 사용이 급증하면서, 이들 기기로부터 나오는 전자파는 상호 간섭으로 다른 기기의 오작동을 초래하고 인체에 여러 가지 악영향을 미치는 등 여러 전자파장애를 동시에 유발시키고 있다. 이러한 전자파장애에 대한 대책으로 각종 엄격한 규제가 마련되어 전자파를 차폐할 수 있는 전자파차폐용 소재 및 섬유제품에 대한 관심도 점차 높아져 가고 있는 실정이다[1]. Table 1에는 도전성능에 따른 도전성 섬유의 응용분야를 보여주며, 표에서 보는 바와 같이 방진, 방폭 작업복, 연료 필터, 전자파 방호재, 기능성 의류, 국방 분야에서의 스텔스 기능까지 적용범위가 매우 넓은

신소재 분야이다. 특히 전자차폐·흡수 성능을 이용한 스텔스는 상대 적에게 탐지되지 않도록, 육안은 물론 레이더에 포착되지 않는 은폐기술로서 현대 무기체계와 비무기체계에 있어서 필수사항이 될 만큼 그 중요성은 점점 커지고 있다. 특히 무기체계의 스텔스화는 은밀 기동성을 높임으로써 먼저 적을 발견하고 공격하는 것을 가능하게 함으로써 생존력(survivability)을 높여 아군의 물·인적 피해를 최소화하고 전술적으로 우위에 설 수 있는 국방분야에서의 첨단 핵심기술이다. 본 고에서는 먼저 스텔스 기능의 종류와 기본적인 원리를 살펴보고, 전자파차폐·흡수에 대한 이론 및 측정방법, 전자파차폐용 섬유의 종류와 제조 방법, 그리고 이를 이용한 레이더 위장용 섬유소재에 대하여 간단히 고찰해 보고자 한다.

## 2. 스텔스기술

### 2.1. 스텔스 종류

일반적인 스텔스라고 하면 지난 걸프전과 이라크 전쟁에서 그 위력을 발휘한 최초의 스텔스 비행기 F-117을 생각하지만 스텔스 기능은 넓은 의미에서 상대의 레이더나 적외선 탐지기, 음향 탐지기 및 육안에 의한 탐지까지를 포함한 모든 탐지(detection) 기능에 대응하는 은폐 기능을 포괄적으로 의미하며, 좁은 의미에서는 F-117 폭격기와 같이 상대의 레이더망에 포착되지 않는 항공기의 은폐기능을 의미하

Table 1. 전도성 섬유용의 주요용도[1,3]

전기저항 수준	역 할	제 품	용 도	용도분야
고	제 전	방진 작업복	먼지오염 방지	반도체, 정밀기기
		방폭형 작업복	인화폭발 방지	화학, 식품, 의약품, 병원
		내장재, 자동차 시트, 카펫	먼지오염 방지	병원, 자동차, 건축
		일반 의류	정전기 및 불쾌감 방지	패션의류
		필터	분진폭발 방지	환경, 화학, 식품, 의약품
중	제 전	방폭형 작업복	인화폭발 방지	화학, 식품, 의약품
		연료 필터	연료폭발 방지	자동차, 비행기
		제전장치	제전에 의한 공정향상 및 오염제거	섬유, 플라스틱, 종이, 고무, 복사기, 전자
		도전 작업복	정전기 유도장해 방지	전자, 전기, 전력회사
		반도체 포장재	정전기 방지	전기, 전자
저	전자파차폐	전자기 차폐재	전자기기 EMI에 의한 오작동 방지	방송국, 고주파, 전자기기, 정밀기기, 회로 필터
		전자파 방호재 (얇치마, VDT 필터 등)	전자파 차폐에 의한 인체 보호	전기, 전자, 가전제품
		기능성 의류 (전자파 차단 주머니, 유방암 방지 Bra)	전자파 차폐에 의한 인체 보호	패션의류, 보건
		면상발열체(전기장판, 보온의류, 도로 융설장치)	발열	패션의류, 보건, 건축
		Radar·적외선감지 차폐시설, 도청방지 텐트, 전투기, 군함	스텔스	국방

기도 한다[2].

먼저 육안관측을 피하기 위한 스텔스 기술은 가장 원시적인 은폐기술로서 주변 환경과 비슷하게 하는 위장막 사용과 위장도색 기술이 있다. 항공기, 전차, 군용 트럭 등의 색상에 운용되는, 주위환경과 가장 가깝게 하거나 빛 반사율을 최대한 줄이기 위한 저광택 도색이나 F-15나 F-16 전투기에서 카노피를 편광적층판(polarized laminate)으로 사용한 것 등의 예가 있다. 두 번째로 열감지(열영상 관측)와 적외선 탐지를 피하는 은폐기술은 레이더 스텔스 기술과 마찬가지로 스텔스 기술의 중요한 영역으로 여겨지고 있다. 항공기, 전차, 군용 트럭 등은 동력장치는 엄청난 양의 열과 적외선을 방출할 뿐만 아니라 적외선을 이용한 군사장비가 확대됨에 따라 이에 대응하여 열원이나 배기가스를 냉각시킴으로써 열과 적외선 방출을 최대한 억제하는 방향으로 가고 있다. 세 번째로 소음저감기술을 통한 음파탐지기로부터 피하는 기술로서 무소음 잠수함에 핵심

적으로 사용되고 있다. 마지막으로 현대 스텔스 기술의 원조라 할 수 있는 레이더를 피하는 스텔스 기술은 적의 레이더의 전자파를 흡수하는 방법, 전자파 간의 간섭을 이용하여 산란시키는 방법, 레이더에 포착될 수 없는 다른 방향으로 전자파를 반사하는 방법 등으로, 이러한 방법들을 통해 레이더탐지 면적(radar cross section, RCS)을 감소시키는 기술은 스텔스의 핵심 기술이다.

첨단 스텔스기술은 2차 세계대전 이후 레이더 기술의 발전과 미소 냉전을 걸치면서 비약적인 발전을 해왔으며 항공기로부터 시작된 스텔스 기술은 현재 미사일, 무인비행기, 항공모함, 함정, 잠수함, 차량, 전차에 이르기까지 다양한 분야에 적용되고 있으며 세계 각국은 스텔스 무기체계 도입과 무장화로 군사 전력의 향상을 꾀하고 있다. Figure 1은 스텔스 기술을 주도하고 있는 미국의 스텔스 무기체계를 보여준다. 국내 또한 레이더 반사 면적, 적외선 신호, 방사 소음 등을 감소시키는 스텔스 기

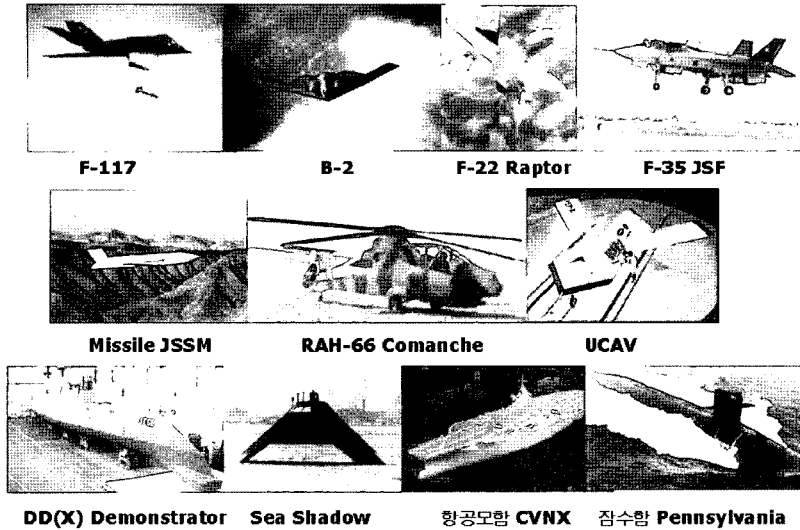


Figure 1. 미국의 스텔스 무기체계[4].

술을 복합화하여 무인전투기(unmanned combat aerial vehicle, UCAV), 한국형 전투기 사업(korea fighter experiment, KFX)과 한국형 구축함 사업(korea destroyer experiment, KDX), 스마트무인기기술개발 사업에 적극적으로 적용할 계획이다.

## 2.2. 레이더 스텔스의 원리

레이더는 현재 군사용과 민수용으로 가장 중요한 목표 감지기이다. 다른 어떤 감지기에 비교해서도 어떤 기후조건에서도 사용되고 장거리 목표물 감지 까지도 해낼 수 있다. 또한 정확한 거리측정을 할 수 있는 감지기 중의 하나이다. 레이더는 다양한 군사목적 뿐만 아니라 항해용·항만용·항공용·항공기탐재용·기상용·중계용 등 민수용으로도 널리 쓰이고 있다. 레이더는 radio detection and ranging (RADAR)의 약자로서 기본원리는 안테나를 통하여 전자파를 발사하여 어느 목표물에 부딪히면 일부가 되돌아 나오는 반사파의 에너지를 수신, 검파, 분석하여 그 목표물의 종류, 크기, 방위(bearing)를 알 수 있게 하는 것이다. 레이더는 주로 마이크로파가 사용되며 송신되는 마이크로파는 송신 에너지가 초당 약 16만 2000마일의 속도로 전파되는 정속성을 이

용한다. 전파가 1 마일 가는데는  $6.18 \mu\text{s}$ 가 걸리며, 1마일을 왕복하는 시간  $2 \times 6.18 = 12.36 \mu\text{s}$ 를 1 레이더 마일(radar mile)이라 한다. 레이더에 사용되는 주파수 대역과 주파수 대역에 따른 용도는 Table 2에 제시하였다.

레이더에 대응하는 스텔스는 전자파의 메커니즘 상에서 에너지 파동, 즉 전파가 입사되는 단계에서 반사파를 조절·통제함으로써 레이더 탐지면적을 최대한 줄여 레이더에 탐지될 가능성을 낮

추어 자신이 노출당하지 않도록 하는 기술과 방법이다. 레이더탐지면적은 목표물에서 반사되어 온 전자파와 같은 양의 전자파를 반사할 수 있는 가상의 원형 투영 면적으로 정의되며 다음 레이더의 기본 공식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 R^2} \quad (1)$$

여기서,  $P_t$ 와  $P_r$ 는 송신과 수신되는 전자파의 파워(power),  $G$ 는 송신 안테나의 게인(gain),  $A_r$ 은 수신 안테나의 면적,  $R$ 은 안테나와 목표물과의 거리,  $\sigma$ 는 레이더 탐지면적이다. 참고로 스텔스 항공기인 F-117A와 B-2 폭격기의 레이더 탐지표적을 점보제트기나 다른 물체와 비교한 자료를 Table 3에 제시하였다. 표를 보면 스텔스 폭격기인 B-2의 레이더 탐지면적은 점보제트기의 만분에 일에 불과하며 사람의 백분의 일, F-117A의 십분의 일에 불과하다. 레이더 상에서 볼 때 B-2 폭격기는 거대한 덩치에도 불구하고 참새와 같은 수준의 레이더 탐지면적을 유지할 수 있는 것은 입사하는 전자파를 레이더의 방향이 아닌 다른 방향으로 산란시키는 반사파 감소 형상화(shaping) 방법과 입사하는 전자파를 흡

Table 2. 레이더 주파수 운영대역[5]

Band Name	Frequency Range	Wavelength Range	Notes
HF	3-30 MHz	10-100 m	coastal radar systems; 'high frequency'
P	< 300 MHz	1 m+	'P' for 'previous', applied retrospectively to early radar systems
VHF	50-330 MHz	0.9-6 m	very long range, ground penetrating; 'very high frequency'
UHF	300-1000 MHz	0.3-1 m	very long range (e.g. ballistic early warning), ground penetrating, foliage penetrating; 'ultra high frequency'
L	1-2 GHz	15-30 cm	long range air traffic control and surveillance; 'L' for 'long'
S	2-4 GHz	7.5-15 cm	terminal air traffic control, long range weather, marine radar; 'S' for 'short'
C	4-8 GHz	3.75-7.5 cm	a compromise (hence 'C') between X and S bands; weather
X	8-12 GHz	2.5-3.75 cm	missile guidance, marine radar, weather, medium-resolution mapping and ground surveillance; in the USA the narrow range 10.525 GHz $\pm$ 25 MHz is used for airport radar.
Ku	12-18 GHz	1.67-2.5 cm	high-resolution mapping, satellite altimetry; frequency just under K band (hence 'u')
K	18-27 GHz	1.11-1.67 cm	from Germankurz meaning 'short'; limited use due to absorption by water vapour, so Ku and Ka were used instead for surveillance. K-band is used for detecting clouds by meteorologists, and by police for detecting speeding motorists. K-band radar guns operate at 24.150 $\pm$ 0.100 GHz.
Ka	27-40 GHz	0.75-1.11 cm	mapping, short range, airport surveillance; frequency just above K band (hence 'a') Photo radar, used to trigger cameras which take pictures of license plates of cars running red lights, operates at 34.300 $\pm$ 0.100 GHz.
mm	40-300 GHz	1 - 7.5 mm	millimeter band, subdivided as below
V	40-75 GHz	4.0 - 7.5 mm	-
W	75-110 GHz	2.7 - 4.0 mm	used as a visual sensor for experimental autonomous vehicles, high-resolution meteorological observation

수 또는 간섭을 통해 소멸시키는 전자파흡수재료가 사용되고 있기 때문이다.

평면 도체는 입사 에너지의 방향으로 전반사로 에너지가 되돌아가기 때문에 스텔스 효과가 가장 낮다. 원통과 같이 단일 곡면을 가지는 표면은 입사 에너지를 산란시키는데, 그 정도는 원뿔형에서 더욱 강하게 나타나 스텔스 효과가 가장 크다. 그러나 일반적인 상식과는 달리 함정이나 항공기의 스텔스는 Figure 1에서 보는 바와 같이 주로 평면 모양을 하고 있다. 평면은 직각에 가깝게 전파가 닿았을 때에는 강한 반사를 일으키나 그 이외의 각도에서는 입사 방향으로 전반사되지 않는다. 마치 평면거울이 빛을 반사하는 것은 정면으로 대하는 순간만이고 조금이라도 각도가 변하면 빛은 보이지

않게 되는 것과 같다. 이와는 달리 곡면의 경우에는 어느 각도에서나 항상 어느 정도의 레이더파를 반사한다. 따라서 최근의 스텔스 항공기나 함정의 무기체계는 평면형상으로 하되 다면체 형식을 하고 있다. 이러한 형상화 방식은 스텔스 기술 중에 차지하는 비중은 크지만 100% 은폐를 할 수 없고, 일반적으로 스텔스 성능을 향상시키기 위한 형상설계와 공기역학적으로 비행성능을 향상시키기 위한 형상설계와 상반되는 경향이 있어 레이더 탐지면적과 비행성능을 절충하여 최적의 형상을 결정하는 작업이 중요하다.

레이더 탐지면적을 줄이는 두 번째 방법은 레이더를 흡수하는 재료인 전자파흡수재(radar absorbing materials, RAM)를 사용하는 방법이다. 일반적으로

Table 3. 레이더 탐지면적 비교[2,6]

	RCS[m <sup>2</sup> ]
점보제트기	100
B-17 수송기	80
B-47 폭격기	40
B-52 폭격기	10
F-16 전투기	5
인간	1
작은 새	0.01
곤충	0.00001
F-117A 스텔스 폭격기	0.1
B-2 스텔스 폭격기	0.01
F-22 Raptor, 스텔스 전투기	0.0065
AGM-129 크루스 미사일	0.001

RAM은 고무나 폴리머 등의 절연성 매질에 각종 유전손실이나 자성손실을 일으킬 수 있는 탄소나 카르보닐 철 또는 아철산염과 같은 페라이트 재료를 첨가하여 도료나 코팅재료 만들어 표면에 칠하면 적의 레이더파를 흡수하게 된다. 최근 들어 전파흡수재료는 군사용뿐만 아니라 상용으로도 응용의 확대가 가능해 많은 연구가 이루어지고 있으며 자세한 내용은 전자파 차폐섬유소재와 함께 4절에서 논하기로 하겠다.

### 3. 전자파 이론

#### 3.1. 전자파란

전자파의 원래 명칭은 전자기파(electromagnetic wave)로서, 공간상에서 전기장이 시간적으로 변화하게 되면 그 주위에 자기장이 발생하고, 또한 자기장이 시간적으로 변화하면 그 주위에 전기장이 발생하게 되어 전기력선(전계)과 자력선(자계)이 서로 유도하여 Figure 2와 같이 파의 진행방향과 직각을 이루고 공간에서 전파되는 합성 파동이다. 그림과 같이 전기장파는 전기의 힘이 수직으로 미치는 공간을 말하며 보통 미터당 볼트(V/m)로 표시하고, 자기장파는 자기의 힘이 수평으로 미치는 공간을 말하며 단위는 밀리가우스(mG)로 표시한다. 따라서 빛이나 X선, 그리고 방송이나 무선통신용 전파는 모두 전자파이다[1].

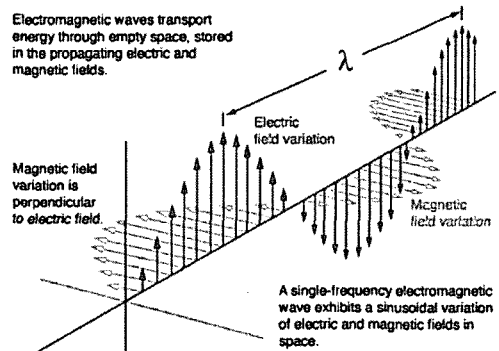


Figure 2. 전자파의 파동.

전자파는 광범위한 주파수 영역을 갖는 전자기 에너지이며 Figure 3과 같이 파장의 크기에 따라 감마선, 엑스선, 자외선, 가시광선, 적외선, 전파 등으로 나눌 수 있다. 전파는 다시 초고주파, 고주파, 저주파, 극저주파로 다시 나눌 수 있다. 위성방송, 휴대폰 등의 상업용 주파수 영역이 극초단파(UHF 300 MHz~3 GHz)까지 확대되어, 수 GHz의 주파수를 사용하는 군사 기술(주파수 X(9 GHz, 3 cm), Ku(17 GHz, 1.8 cm)의 센티미터파 영역)와 상업기술의 영역사이의 경계가 점점 벌어지고 있다. 또한 최근에는 인공위성, 목표추적 미사일, 전자유도병기 등에서 탑재능력을 고려하여 소형, 경량화의 레이더 장치가 필요하게 되었고, 폭주하는 통신회선을 집적하여 대량통신이 가능하고 대기중에서 운용될 때 구름, 안개, 비, 분진 등에 대해서도 감쇄 없이 사용할 수 있는 Ka(35 GHz, 8.6 mm), W(94 GHz, 3.2 mm) 밴드라고 일컫는 밀리미터파가 개발되어 레이더로 사용되고 있다(Table 2 참조)[7].

#### 3.2. 전자파 차폐 이론

##### 3.2.1. 재료의 전자기적 물성

대표적인 전자기적 물성으로는 유전율(permittivity), 투과율(permeability), 전기전도도(electrical conductivity) 등이 있으며, 유전손실, 투자손실 및 도전손실이 클수록, 입사하는 전파에 손실을 일으켜서 전자기파 흡수체로서 역할을 하게 된다[4].

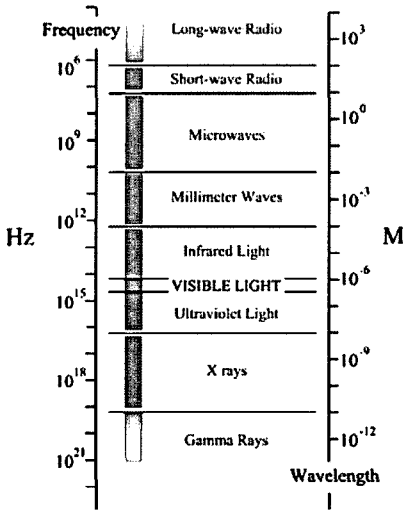


Figure 3. 전자파 스펙트럼(spectrum).

① 유전율

- 유전체(dielectric material), 즉 부도체의 전기적인 특성을 나타내는 값으로 DC 전류에 대한 전기적 특성을 나타내는 것이 아니라, 교류 전자기파의 특성과 직접적인 관련이 있다.
- 외주의 전자계 변화에 대해 물질 내부의 모멘트(moment)가 얼마나 민감하게 잘 반응하여 분극되는 정도를 나타낸다. 유전율은 복소수로 정의되며 아래의 식(2)과 같다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon_r = \epsilon_0 (\epsilon'_r - j\epsilon''_r) \quad (2)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''_r}{\epsilon'_r}$$

여기서,  $\epsilon_0$ 는 진공유전율( $8.854 \times 10^{-12}$  [F/m]),  $\epsilon_r$ 은 비유전율(relative permittivity),  $\epsilon'_r$ 은 유전상수(dielectric constant),  $\tan\delta$ 는 손실탄젠트(loss tangent/dissipation factor)이다.

- 실수항은 전기력을 함유할 수 있는 크기로 전자파의 파장 및 전파에 관련되며, 허수항은 유전 손실항으로 교류 전기장이 걸릴 때 분자들이 재배열되면서 분자들의 마찰에 의해 열로 손실되는 에너지 손실을 의미한다.

② 투자율

- 투자율은 자기장의 힘(H)과 자속밀도(B)의 비를 의미하는 계수로 매질에 따른 자속(magnetic flux)이 얼마나 잘 통과하느냐를 의미한다.
- 외부에서 자속이 들어오면 투자율이 높을수록 자화가 잘 된다. 유전율과 마찬가지로 투자율도 복소수로 정의되며 다음의 식(3)과 같다.

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0 \mu_r = \mu_0 (\mu'_r - j\mu''_r) \quad (3)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 진공투자율( $4\pi \times 10^{-7}$  [H/m]),  $\mu_r$ 은 비투자율(relative permeability)이다.

- 기본적인 사항은 유전율의 경우와 같고 허수항이 나타내는 자성손실은 일반적인 재료에서는 나타나지 않으며 페라이트(ferrite)와 같은 분자 쌍극자를 가지는 재료에서 발생한다.

③ 전기전도율

- 전류를 운반할 수 있는 정도를 나타내는 양으로 비저항의 역수이다.
- 도전 손실 재료의 대표적인 것으로 탄소 구조체 등이 있다.

3.2.2. 전자기파 반사, 투과, 흡수

전파가 전송되다가 다른 매질을 만나게 되면 빛과 마찬가지로 일부는 반사되고 일부는 투과된다. 투과된 전파도 매질의 특성에 의하여 감쇠(흡수)될 수 있다. 이러한 현상을 도식화하면 Figure 4와 같다. 이중 물질의 경계면에서 일어나는 전자파의 반사, 흡수, 투과되는 현상을 매질2의 유전율과 투자율에 의해 결정된다[8,9].

경계면에서 전파의 반사는 매질의 임피던스(impedance, Z)에 결정된다. 임피던스는 전자파의 전계(E)와 자계(H) 성분비로 정의되는데 식(4)에서와 같이 매질의 투자율 대 유전율의 제곱근으로 표시한다.

$$Z = \frac{|E|}{|H|} = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (4)$$

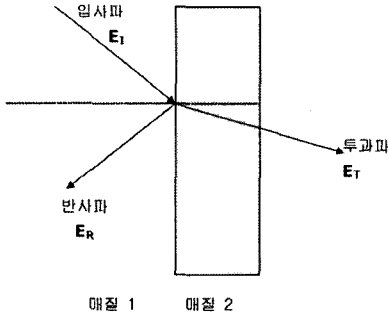


Figure 4. 전자파의 반사와 투과.

Figure 4에서 매질 1로부터 매질 2로 전송되는 전자파의 입사파, 반사파, 투과파의 전계를 각각  $E_I$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ 라 하면 경계면에서 반사계수(reflection coefficient,  $S$ )와 투과계수(transmission coefficient,  $T$ )는 각각 다음 식(5)와 (6)으로 주어진다.

$$S = \frac{E_R}{E_I} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (5)$$

$$T = \frac{E_T}{E_I} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (6)$$

여기서,  $Z_1$ 과  $Z_2$ 는 각각 매질 1과 매질 2의 임피던스이다. 경계면에서 전파의 반사가 일어나지 않기 위해서는 매질 1과 매질 2의 임피던스가 같아야 하고 ( $S = 0$ ), 이러한 조건을 임피던스 정합(impedance matching)이라고 한다. 임피던스 정합이 이루어졌을 때 입사파는 모두 매질 2로 투과되고 그 때의 투과계수는  $T = 1$ 이 된다. 반사손실(reflection loss,  $RL$ )은 입사한 전자파 전력(power,  $P_I$ )에 대한 반사한 전자파 전력( $P_R$ )의 비로서 식(7)과 같이 표현된다.

$$RL(dB) = 10 \log \frac{P_I}{P_R} = \quad (7)$$

$$10 \log \frac{|E_I|^2}{|E_R|^2} = -20 \log \rho$$

여기서,  $\rho$ 는 반사계수의 크기값( $\frac{|E_R|}{|E_I|}$ )이며  $RL$ 이 낮다는 것은 많이 반사되는 것을 의미하므로

$RL$ 이 낮을수록 반사에 의한 차폐가 잘 이루어진다 [10].

### 3.2.3. 전자파 차폐 효율

전자파 차폐성은 반사나 흡수를 통해 외부로부터 입사하는 전자파가 안쪽으로 투과되는 것을 막는 정도를 나타내며, 정량적으로 입사파와 투과파의 비로서 정의한다. 다음 식(8)과 같이 차폐효율(shielding efficiency,  $SE$ )로 표현되며 전자파가 재료를 통과할 때 감쇄되는 상대적 크기인 decibel( $dB$ )로 나타낸다.

$$SE(dB) = 10 \log \frac{P_I}{P_T} = 20 \log \frac{E_I}{E_T} \quad (8)$$

여기서,  $P_T$ 는 투과전력을 의미한다. 차폐효율( $SE$ )은 Figure 5와 식(9)에서 보는 바와 같이 전자기파가 차폐 물질에 입사할 때 임피던스가 다른 물질의 계면에서 반사되는 반사에 의한 차폐효율, 파가 차폐물질 내부를 진행하면서 흡수되어 소멸되는 차폐효율, 그리고 차폐물질의 내부 및 양쪽 계면에서 발생하는 다중반사에 의한 차폐효율로 나누어질 수 있다.

$$SE = SE_R + SE_A + SE_M \quad (9)$$

여기서,  $SE_R$ 는 반사에 의한 차폐효율을,  $SE_A$ 는 흡수에 의한 차폐효율,  $SE_M$ 은 다중반사에 의한 차폐

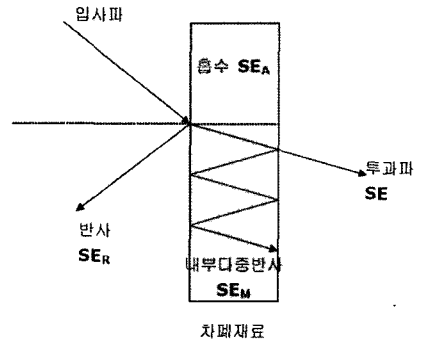


Figure 5. 전자파가 차폐막을 통과할 때 반사, 흡수, 다중 반사 모식도.

효율을 나타낸다.

입사된 전자파는 재료내부에서  $exp(-d/\delta)$  지수 함수에 따라 감쇄가 일어난다. 여기에서  $\delta$ 는 전자파가 재료를 통해 진행할 수 있는 깊이를 나타내는 척도로 표면깊이(skin depth)라 하며 입사된 전자파의 세기가  $1/e$ 로 감쇠될 때까지 전자파가 시료 내부로 진행한 길이로 정의한다. 표면깊이는 입사전자파의 주파수 및 매질의 전기전도도와 다음 식(10)과 같은 관계를 가져 일반적으로 전기전도도와 주파수가 높을수록 표면깊이는 작아진다[1].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \omega \sigma}} \quad (10)$$

여기서,  $\omega$ 는 전자파의 주파수,  $\sigma$ 는 전기전도도이다. 따라서 일반적으로 전자파 차폐용으로 많이 쓰이고 있는 금속재료는 전기전도도가 높기 때문에 전자파가 흡수되는 표면깊이가 작아 전자파의 반사에 의한 차폐를 이용한 차폐재료이다. 그러나 앞서 말한 바와 같이 스텔스 재료로서는 전자파를 반사하기보다는 흡수할 수 있는 전자파 흡수재료가 더 많은 관심의 대상이다.

### 3.2.4. 전자파 흡수이론

#### ① 감쇠형(또는 공명형) 전자파흡수체

전자파흡수체의 구비조건은 첫째 계면에서 전자파의 반사가 일어나지 않도록 재료의 임피던스가 공기와 같아야 하며, 둘째 재료의 손실정합계수가 커서 투과된 전자파가 급격히 감쇠되어야 한다. 첫째 조건인 임피던스 정합이 이루어지기 위해서는 재료의 유전율과 투자율 사이에 다음 식(11)이 만족되어야 하나,

$$\epsilon_r = \mu_r \quad (11)$$

현재까지 이러한 재료는 합성이 용이치 않다. 이를 해결하는 방향으로 전자파흡수체의 기하학적 형태를 조절하거나 다층화하는 방법이 이용되고 있다. Figure 6에서와 같이 다층화하거나 흡수체의 모양

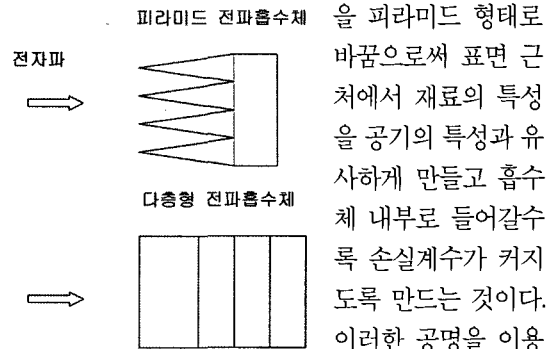


Figure 6. 감쇠형 전파흡수체 유형.

을 피라미드 형태로 바꿈으로써 표면 근처에서 재료의 특성을 공기의 특성과 유사하게 만들고 흡수체 내부로 들어갈수록 손실계수가 커지도록 만드는 것이다. 이러한 공명을 이용한 흡수체는 두께가 커지는 문제점을 갖고 있으나 광대역에 걸쳐 전자파흡수 특성이 우수하여 전파무향실(anechoic chamber)등에 이용되고 있다[9].

#### ② 정합형 전자파흡수체

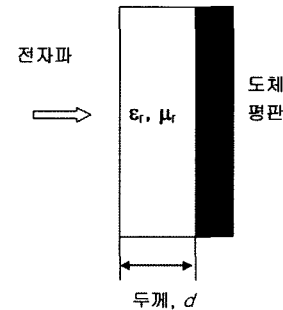


Figure 7. 정합형 단층 전자파흡수체.

정합형 흡수체는 전자파가 완전히 투과하지 못하도록 Figure 7과 같이 배면에 금속판과 같은 전기전도도가 높은 재료가 부착된 흡수체이다. 반사계수가 -1인 재료가 배면에 있을 때 흡수체의 두께가 흡수체내에서의 파장 길이의 1/4이 될 경우에 임피던스 정합이 일어나, 전자파의 반사가 일어나지 않는 흡수체이다. 이러한 흡수체를 1/4 파장두께 전자파흡수체라 한다[9].

전송선로 상에서 거리  $d$ 인 지점의 부하에 걸리는 입력 임피던스( $Z_m$ )는 다음 식(12)와 같다[11].

$$Z_m = Z_o \frac{Z_d + Z_o \tanh \gamma d}{Z_o + Z_d \tanh \gamma d} \quad (12)$$

여기서,  $Z_o$ 는 흡수체의 임피던스,  $Z_d$ 는 거리  $d$ 인 지점에서에서의 임피던스를 말한다. 식(2)와 (4)에 따



르면 흡수체의 임피던스는 다음 식(13)과 같다.

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_o}{\epsilon_r \epsilon_o}} \quad (13)$$

시료의 두께가  $d$ 인 지점은 도체 평판이며 거리는 부하는 단락(short)된 경우이므로  $Z_d = 0$ 이 된다. 따라서 입력 임피던스는  $Z_m = Z_o \tanh \gamma d$ 이다. 정합상태는 입력 임피던스와 공기의 임피던스와 같은 조건이므로 정리하면 식(14)와 같이 된다.

$$\sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}) = 1 \quad (14)$$

여기서,  $f$ 는 주사수이고  $c$ 는 광속이다. 식(14)는 주파수  $f$ 를 가지는 전자파가 전파흡수체를 향해 수직으로 입사한 경우,  $\epsilon$ 와  $\mu$ 의 유전율과 투자율을 가진 재료는 두께  $d$ 에서 정합을 이루는 최적의 조건을 갖는다는 의미이다. 전파흡수체의 설계 시 관심 영역의 주파수 대역은 정해져 있고 유전율과 투자율 또한 물질의 상수 값이다. 따라서 이들의 특성을 잘 조합하여 정합두께가 최소화될 수 있는 전파흡수체를 만드는 것이 관건이다.

### 3.2.5. 전자기적 물성 방법

재료의 전자기적 물성 측정 방법은 다음의 5가지로 분류되며, 각 방법의 특징을 간단히 서술하면 다음과 같다[8].

#### ① 평행 평판(축전기)법(parallel plate(capacitor) techniques)

- Figure 8과 같이 축전기를 형성하기 위해 두 전극 사이에 편평한 판 모양의 재료를 위치시킨 후 LCR 측정기나 임피던스 분석기(impedance

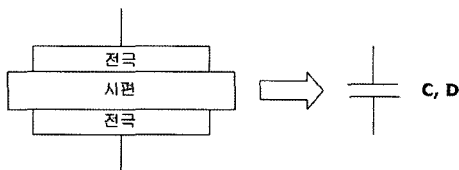


Figure 8. 평행 평판축전법.

analyzer)를 사용하여 capacitance( $C$ )와 dissipation( $D$ )을 측정하고 이 값들을 이용하여 복소유전율을 계산한다.

- 이 방법은 시료의 두께가 10 mm 이내로 제한되며, 표면은 편평한 면이어야 하고, 시료의 손실정도가 적어야 하며 주파수 영역이 100 MHz 이내로 한정되는 단점이 있다. 또한 복소투자율에 대한 정보도 얻을 수 없다.

#### ② 동축 프로브법(반사법)(coaxial probe techniques)

- 개방된 끝을 지닌 동축 프로브나 도파관(waveguide)에 시료를 삽입하고 회로분석기(network analyzer)에 의하여 시료의 반사계수  $S_{11}$ 을 측정하여 재료정수를 구한다.
- 비교적 넓은 주파수 영역(200 MHz~20 GHz)에서 사용가능하고 고체나 액체 상태의 시료에 대해서도 측정이 가능하다. 그러나 고체 시료의 경우 표면은 편평해야 하며 복소투자율을 얻을 수 없는 단점이 있다.

#### ③ 공진법(cavity resonator techniques)

- 높은 Q값(quality factor)을 갖는 움푹 패인 공동(cavity)에 시료를 삽입함으로써 중심 주파수(center frequency,  $f_o$ )와 Q 값에 영향을 미치고, 이런 두 가지 매개변수로부터 시료의 복소유전율이 계산된다.
- 응답이 매우 좁기 때문에 측정 가능 주파수 영역이 협소한 단점이 있으며 좋은 주파수 분해능(1 GHz)을 가진 소스(source)가 필수적이다. 회로분석기가 중심 주파수를 찾고, 이를 기준으로 하여 양쪽으로 -3dB 지점으로부터 Q값을 계산한다.

#### ④ 자유공간 측정법(free space techniques)

- 시료의 밀폐 없이 자유공간에서 시료의 넓은 후판(slab)을 통해 극초단파를 송신하기 위해 안테나를 사용하고 회로분석기로 반사계수와 투과계수를 측정한다. 시료는 크고 편평하고 얇으며 평행한 면을 이루는 것이어야 한다.
- 좁은 공간에서는 사용하기 힘들며 안테나는 시료

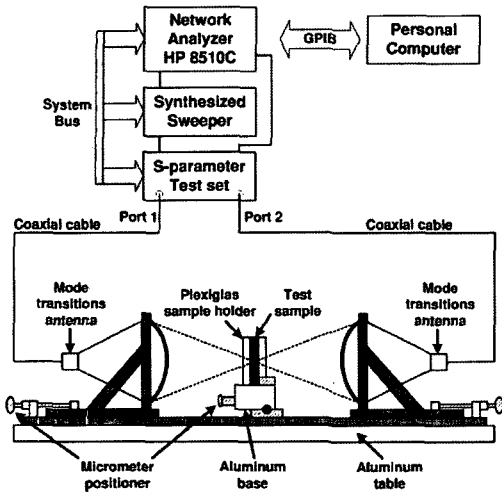


Figure 9. 자유공간 측정 시스템 구성도[12].

로부터의 편평한 원거리 파면을 유지해야 한다.

· 일반적인 측정 시스템의 구성도는 Figure 9에 나타내었고 반사손실을 측정하여 전자파 차폐 효율을 계산할 수 있다.

⑤ 전송선법(투과반사법(transmission line techniques))

· 도파관이나 동축관과 같은 전송선(transmission line)에 시료를 삽입하고 회로분석기를 사용하여 S-매개변수(S-parameter: 입출력단의 전압 비를 나타내는 특성지표, 뒤의 숫자가 입력단을 앞의 숫자가 출력단을 의미)  $S_{11}$ (또는  $S_{22}$ )과  $S_{21}$ (또

는  $S_{12}$ )을 측정함으로써 투과계수와 반사계수를 구하고 재료정수를 계산하는 방식의 측정법이다. 이때 시료는 밀폐된 전송 라인의 단면을 완전히 채워져야 틈 사이에서의 손실을 방지할 수 있다.

· 전송선법을 다른 측정방법들과 같이 주파수 측정 영역과 손실에 따른 특성을 정리하면 Figure 10과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 전송선법은 비교적 높은 손실에 대해서도 측정이 용이하고 넓은 주파수 측정 영역을 갖는 장점이 있다.

3.2.6. 전자파 차폐 측정 방법

전자파 차폐효율을 측정하는 방법은 전자파를 입사하여 차폐재료를 투과하여 나오는 전자파의 power를 직접 측정하여 차폐효율을 계산하는 방법과 전기 전도도를 측정하여 이론식에 의하여 차폐효율을 간접적으로 측정하는 방법이 있다[1,13,14].

① 직접 측정방법

ASTM-D-4935 규격은 직접적인 측정방법으로서 signal generator에서 발생된 전자파가 시료 홀더에 있는 시료를 투과되어 나오는 전자파를 receiver에서 측정하여 전자파 차폐효율을 측정한다. 이 때 시료의 규격은 ASTM-D-4935를 따른다. 특히, 위의 장치를 사용하면 시료의 표면에서의 반사 및 시료의 내부에서의 흡수에 의한 상대적인 차폐 정도를 다음과 같은 식으로 측정할 수 있다[1].

$$T_r + R_e + A_b = 1 \tag{15}$$

여기서,  $T_r$ ,  $R_e$ ,  $A_b$ 는 각각 투과도(transmittance), 반사도(reflectance), 흡수도(absorbance)를 나타내며, 아래의 식(16)과 (17)에 의해 투과도와 반사도를 측정 후 식(15)를 이용하여 흡수도를 계산하여 반사도와 흡수도를 비교하면 흡수에 의한 차폐와 반사에 의한 차폐를 상대적으로 비교할 수 있다.

$$T_r = \frac{E_T^2}{E_I^2} = |S_{21} \text{ (or } S_{12})|^2 \tag{16}$$

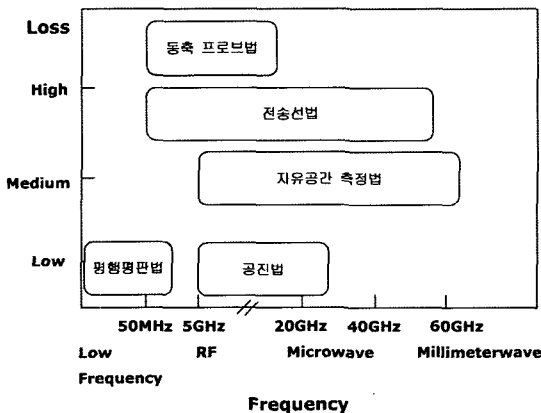


Figure 10. 주파수와 재료 손실에 따른 전자기적 물성 측정 방법 비교[8].

$$R_e = \frac{E_R^2}{E_I^2} = |S_{11} \text{ (or } S_{22})|^2 \quad (17)$$

② 차폐재료의 임피던스 측정에 의한 간접 측정  
반사손실에 의한 전자 차폐가 주된 기구일 때에는 RF 임피던스 분석기를 사용하여 각 주파수 대역에서 입사 전자파의 파동 임피던스(wave impedance,  $Z_w$ )와 시료의 특성 임피던스(characteristic impedance,  $Z_m$ )를 측정하여 전자기파 차폐 효율과 반사손실을 다음의 식에 의해 측정할 수 있다.

$$SE(dB) = 20 \log \frac{(1+K)^2}{4K} = 20 \log \frac{(Z_w + Z_m)^2}{4Z_w Z_m} \quad (18)$$

여기서,  $K$ 는 파동 임피던스와 특성 임피던스의 비이며,  $Z_w = 377\Omega$ 을 사용한다.

### ③ 체적비저항 측정에 의한 간접 측정

가장 간편한 방법으로 역대에 이르는 고가장비인 전자파 차폐효율 측정장비 및 임피던스 분석기와 같은 측정장비를 사용할 수 없을 경우에 시료의 체적비저항( $\rho_B$ )을 측정하여 체적비저항과 전자기파 차폐효율의 관계로부터 대략적인 전자기파 차폐효율을 추정할 수 있다.

$$\rho_B(\text{ohm} \cdot m) = |S|^2 \frac{td}{l} \quad (19)$$

여기서,  $t$ ,  $d$ ,  $l$ 는 각각 시료의 두께, 너비, 길이이다.

### 3.2.7. 레이더탐지면적(RCS) 측정방법

레이더용 전자차폐 측정방법인 경우 사용주파수가 높기 때문에 위에서 언급한 측정방법들은 측정오차가 크므로 정밀도 및 신뢰성에 문제가 생긴다. 고주파영역에서의 RCS를 직접 측정하여 전자파 차폐특성의 대표적인 반사손실(reflection loss) 얻는 방법이다. 실험 장치에 대한 개요도는 Figure 11과 같다. 전반사를 일으키는 금속평판과 그것과 동일한 크기의 전자파 차폐재료의 최대 RCS를 비교하여 그 차이를 측정함으로써 반사손실을 계산할 수 있

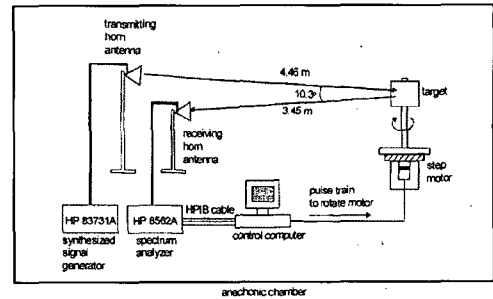


Figure 11. 반사손실을 측정을 위한 RCS 측정 장치 개요도[8].

다. 이 방법은 전파무향실에서 이루어지므로 외부 외란을 적게 받는다. 또한 측정하고자 하는 물체 없이 신호와 전자기와 무반향 챔버의 벽과 물체의 반침대 등에서 반사되어 나오는 신호를 합하여 잡음 신호의 크기를 조정한다. 그 상태에서 목표물을 돌려가면서 주위장치에 의한 영향을 제거한 물체만의 RCS를 측정한다. RCS 측정 방법은 직접적인 레이더 스텔스 성능을 알 수 있다는 장점이 있지만 반사손실 이외의 재료 물성 등의 측정이 불가능하고 비교적 큰 샘플이 필요하다는 단점이 있다[15].

## 4. 전자파차폐 섬유소재

전자파에 대한 인체 유해성의 위협으로 전자파의 규제가 범세계적으로 강화되고 있는 추세이며 이미 미국에서는 호르몬 분비 이상과 암유발 등의 질병이 전자파와 연관성이 있다는 연구가 보고된 바 있어 전자파 차폐의 필요성이 더욱 부각되고 있다. 그러나 아직 국내의 플라스틱 도전체 제조기술은 선진국에 비해 많이 낙후된 상태이며, 차폐재의 대부분도 미국과 일본에서 수입하고 있는 실정이다. 일반적으로 전기부도체인 고분자나 섬유에 전자파 차폐효과를 높이는 방법은 체적 고유저항 수치를 낮추기 위해 고분자 매트릭스 수지에 전도성 충전재를 혼합하여 압출, 방사하는 방법이고, 알루미늄, 코발트, 금, 구리, 니켈, 아연, 철, 탄소 등 전기전도성 입자 및 박막을 코팅하는 후가공 방법과 금속섬유

를 사용한 방법이 있다. 도전성 물질에 의한 후가공 방법은 금속피막형성법(진공 증착법, 스퍼터링(sputtering), 무전해도금법), 구리화합물 고착법, 금속박막 라미네이팅법, 도전성수지 코팅법 등으로 나눌 수 있다[1,3,13].

#### 4.1. 후가공에 의한 전자파 차폐섬유

##### 4.1.1. 금속피막형성법

섬유표면에 알루미늄, 구리, 니켈이나 은 등의 금속피막을 형성시켜 전자파 차폐성을 부여하는 방법으로 전자파차폐 효과도 좋고 대량의 가공도 가능하며, 처리 기술에 따라 진공 증착법, 스퍼터링(sputtering) 증착법, 무전해도금법 등 3가지로 구분된다.

**진공 증착법:** 진공 증착법은 진공 중에서 금속, 금속화합물 또는 합금을 가열, 증발시켜서 증발금속 또는 증발금속 화합물을 목적물질의 표면에 응축하게 하여 박막(薄膜)을 형성시키는 방법이다. 알루미늄을 이용한 증착법은 알루미늄을 1,400 °C 정도의 온도에서 용융시킨 다음 가공 장치 내에  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  torr 정도의 고진공을 걸어주면 용융된 알루미늄 증기가 비산되어 섬유표면에 균일하게 부착되면서 냉각드럼과의 접촉으로 냉각되면서 고착되는 가공법이다. 최근에는 부식포상에 알루미늄 진공 증착을 하여 전자파차폐 용도로 사용한 예가 보고 되어 있다: 일반적으로는 진공 증착법은 섬유표면의 요철과 일정두께 이상으로는 가공하기 어려운 점이 있고, 섬유표면과 접착력이 작고 대기중에서 금속이 산화되어 시간이 지남에 따라 차폐효율이 감소한다.

**스퍼터링 증착법:** sputtering 증착법은 보통  $10^{-1} \sim 10^{-5}$  torr 정도의 진공장치 안에 아르곤(Ar) gas를 주입하고, 양극은 섬유제품으로 하고 음극은 금속을 연결하여 수천 volt의 고 전압을 걸어 방전시키면 아르곤 가스가 양(+)이온이 되어 (-)음 금속이온을 충돌시켜 금속원자를 발생시키고 이 금속원자가 (+)극인 섬유상에 부착하는 원리의 가공법이다. 타겟트 재질로는 Cu, Al, Ni, Cr, Ag, Au, Pt 등 대부분

의 금속물질과, Ti합금, 금속화합물도 사용할 수 있다. Ar+ Ion이 타겟트에 충돌할 때는 500~600 Å/min정도의 복사열을 발생하는데, 최근에는 저온 고속 스퍼터링 장치가 개발되었다. 8,000 Å/min 스퍼터링 공법에서 사용되는 dry process는 wet process(무전해도금법 등)에 비해 장치가 간단하고 합금금속이나 금속산화물 등의 피막형성이 가능하다. 진공증착법보다 섬유의 밀착강도가 우수하여 세탁도 가능하고 30~40 dB정도의 전자파 차폐효과도 나타낸다. 반면, 섬유의 한쪽 면에만 피막 형성이 되는 단점이 있다. 따라서 금속의 산화물, 질화물, 탄화물 가공에 주로 쓰인다.

**무전해도금법(electroless plating (chemical plating, wet metallizing):** 무전해도금법은 섬유표면에 팔라듐(Pd)이나 은(Ag) 같은 귀금속촉매를 침착시키고 황산니켈이나 구리화합물 용액에 침착시키면서 구리나 니켈이온이 화학적 에너지 차로 인해 섬유상의 촉매에 반응하면서 섬유상에 부착되는 원리의 화학적 도금방법으로써 처리시간에 따라 도금두께를 늘릴 수도 있고 섬유상에 균일한 금속피막을 형성시키기 때문에 60~85 dB까지의 높은 전자파 차폐성을 나타낼 수 있다. 섬유표면이 금속막으로 피복되기 때문에 금속색상이 나며 도금두께에 따라 강연도를 조절할 수 있고 드래이프성도 양호한 편이다. 가공공정에서 도금액의 공해문제가 대두되기도 하지만 플라스틱처럼 전처리 공정에서 중크롬산이나 강산을 사용하지 않기 때문에 심각한 문제는 아니다. 금속 촉매로는 산화 환원전위가 높은 귀금속을 사용하는데, 그 예로는 Pd, Pt, Au, Ag 등이 있으며, 환원제로는 금속보다 산화 환원전위가 낮으면서 환원력이 강한  $H_2PO_2$ ,  $NaBH_4$ , formaldehyde, hydrazin 등이 있다. 이 방법은 거의 모든 종류의 섬유에 가공할 수 있으며, 보통 Figure 12와 같은 일

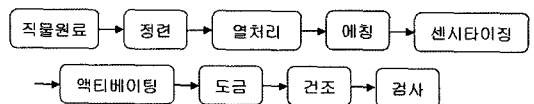


Figure 12. 섬유 무전해도금법[1].

반 공정에 의하여 섬유에 금속이 도금된다. 현재 무전해도금법은 섬유와 같은 불규칙한 표면구조를 갖는 기질에도 적용 가능하고 진공증착이나 스퍼터링에 의해 얻어진 전기전도성 섬유보다 내구성과 차폐 효과가 우수하다고 알려져 있어 가장 많이 사용되고 있는 추세이다.

#### 4.1.2. 구리 화합물 고착법

요오드화 제1구리 또는 황화구리 같은 구리화합물에 아크릴 섬유를 함침시키고 아크릴 섬유의 -CN(시아노기)와 구리이온을 착체로 만들고 고착시켜주는 방법으로써 최근에는 폴리에스터나 나일론 같은 합성섬유에도 가공이 되고 있다. 예로서 폴리에스터 섬유에 가공한 것을 보면 섬유표면에 4  $\mu\text{m}$  정도 두께의 요오드화구리가 형성되며 이때의 전자파차폐효과는 20 dB 수준으로서 낮은 편이지만 정전기 방지용 장갑이나 제전매트 등에 사용되고 있다.

#### 4.1.3. 금속박막 laminating 법

5~20  $\mu\text{m}$  정도 두께의 알루미늄이나 구리와 같은 금속의 박막을 원단에 접착제로 라미네이팅(합포)시키는 방법으로서 전자차폐성은 90 dB 수준이상의 뛰어난 성능을 나타내지만 금속박막의 강연도 때문에 원단의 드래이프성이 거의 없고 주름회복성도 나빠서 의복으로는 거의 사용되지 못하고 특수 작업장의 벽이나 작업대판 등의 용도에 일부 사용되고 있다. 국내에서 생산 가능하기 때문에 해외에서 수입되지 않고 있다.

#### 4.1.4. 도전성 수지 코팅법

은, 구리(Cu)이나 니켈(Ni) 같은 금속, 산화아연(ZnO) 같은 금속산화물 또는 카본블랙 미립자 등을 접착제 수지에 섞어 원단표면에 코팅하는 방법이다. 섬유와의 접착력이나 피막강도가 우수하며 다양한 원단에 적용할 수 있는 방법이기 때문에 많이 사용되고 있지만 30% 이상의 도전성 물질을 넣어도 전자파차폐성능이 20 dB 정도의 수준밖에 되지

않으므로 정전기를 제거해주는 의복이나 인체의 열을 반사하여 보온효과를 높인 원단으로는 사용되지만 전자파차폐 원단으로는 거의 사용되지 않는다.

## 4.2. 금속섬유를 사용한 전자파차폐섬유

스테인레스 스틸이나 구리와 같은 금속을 직경 20  $\mu\text{m}$  굵기의 섬유로 만든 금속섬유는 금속자체가 갖는 뛰어난 도전성과 낮은 체적고유 저항치 때문에 우수한 전자파차폐 효과를 나타낸다. 하지만 금속 자체의 강성과 드래이프성이 나쁜 결점 때문에 금속섬유 단독으로는 사용하는데 한계가 있으므로 면이나 합성섬유 등과 혼방이나 합사하여 원단을 만들어 사용한다. 이 원단들은 주로 정전기로 인한 사고를 방지해주기 위해 주유소나 위험한 화학공장 작업자들이 입는 작업복 등에 사용되지만, 최근에는 금속섬유의 혼방비율을 높여 전자파를 차폐하는 작업복이나 에이프런 등에도 많이 사용되고 있다. 금속섬유 차폐로 만든 원단은 70~90 dB 정도로 뛰어난 전자파차폐 효과를 나타내며, 혼방비율에 따라 40~60 dB의 차폐성능을 갖는 원단을 만들 수 있다.

영남방직의 전자파 차폐소재인 EWSY는 원사로서 동선을 심으로 하고 면섬유로 이 심을 완전히 피복한 코어 방적사다. 피복율은 99.99% 이상으로 이 동선이 밖으로 전혀 노출되지 않는다. 이 전자파 차폐소재인 EWSY는 우수한 차폐효과와 일반 염색법에 의한 자유로운 색상이 특징이며 면이나 모의 본래의 촉감이 변하지 않고, 항균, 소취, 대전방지 및 혈류개선의 위생건강증진 효과와 영구적인 성능을 유지하는 특징을 갖추고 있다.

## 4.3. 전자파 흡수 섬유소재

최근까지 전자파의 차폐재료로서 주로 금속재료를 사용하여 전자파를 반사하여 차폐성능을 얻는 섬유소재가 사용되었다. 그러나 급격한 전기전자 기기의 발전과 전자파환경의 엄격한 규제 때문에 전자파를 반사하는 차폐재료와 더불어 전자파가 흡수

감쇄되는 전파흡수소재 또한 응용범위가 점차 넓어지고 있다. 여러 가지 전자부품이 집적화되고 다양한 통신기들이 네트워크를 형성하여 작동되는 추세에서 전파흡수재료는 효과적으로 전파간섭에 의한 오작동을 막고 전자파환경을 개선할 수 있어, 현재 전파흡수체는 전자기기의 누설전파방지, TV 고스트 방지, 전파암실, 앞서 언급한 군사용도인 레이더 스텔스기술 등에 쓰이고 있다 [9,15,16].

전자파흡수체는 입사한 전자파를 흡수해서 열로 변환하여 반사파가 생기지 않게 하는 특수재료로 사용재료에 따라 도전성, 유전성, 자성, 혼합형으로 크게 4가지로 분류된다. 도전성 흡수재료는 저항체, 저항선 또는 저항피막 등으로 사용되고 입사파에 의해 유기되는 도전 전류에 의해 전파를 흡수한다. 도전성 손질재료에는 카본블랙, 탄소섬유 등이 사용되며 지지재료는 각종 고무 및 고분자 등이 사용된다. 최근 나노기술의 발전에 따라 탄소나노튜브나 나노섬유를 이용한 나노복합재료를 전자파흡수체로 활용하려는 연구가 많이 이루어지고 있다[14]. 유전성 전자파흡수체는 유전손실계수가 큰 재료를 사용하여 전파를 흡수하는 것으로 BaTiO<sub>3</sub>와 같은 세라믹 등이 사용된다. 자성손실을 유발하는 손실 재료로는 페라이트(ferrite)를 이용한 금속 자성재료와 산화물 자성재료 등이 있지만 전파흡수체에는 주로 산화물 자성재료가 주로 쓰인다. 이러한 흡수재료는 고무나 폴리머 등의 절연성 매질에 첨가하여 복합재료 형태로 섬유에 함침(impregnation)시키거나 코팅하여 적용하게 된다.

또한 전도성 고분자(intrinsically conductive polymer)의 전자파를 흡수하는 특성을 이용한 전자파차폐재료도 실용화 단계에 있으며 전도성 고분자는 전자파차폐에 사용되는 금속의 역할의 상당부분을 대체할 것으로 예상된다[1,17]. 전도성 고분자는 전기전도도나 유전상수가 금속보다 상대적으로 낮아 skin depth를 증가시켜 흡수에 의한 차폐효과를 상대적으로 증가시킬 수 있으며 합성조건이나 가공조건에 따라 전기전도도나 유전상수를 조절할 수

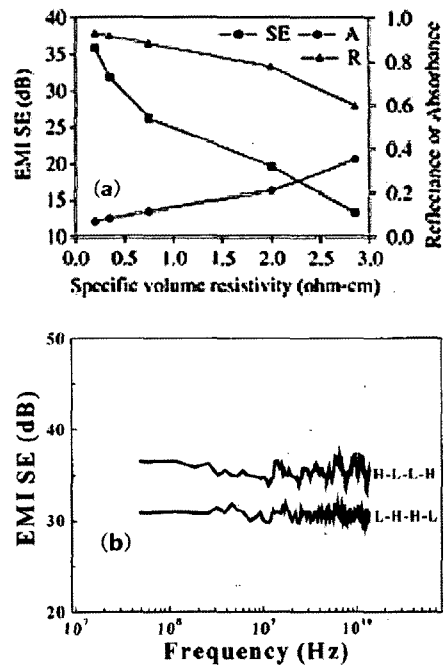


Figure 13. 폴리피롤(polypyrrole) 함침된 복합직물의 전자파차폐성능; (a) PET 복합 직물 (b) nylon 복합 직물 [18,19].

있어 다양한 용도의 전자파차폐에 응용이 가능하다. Figure 13(a)와 (b)는 각각 전기전도성 고분자인 폴리피롤(polypyrrole)이 함침된 PET와 nylon 복합 직물이 30~40 dB 정도의 전자파차폐성능을 보여 준다[18,19]. 복합직물의 체적비저항이 감소할수록 차폐효율은 증가하였으나 흡수에 의한 차폐보다 반사에 의한 차폐가 증가함을 보여주고(Figure 13(a)), 전자파차폐성능을 향상시키기 위해서는 전도도가 서로 다른 다층 구조의 복합체의 제조가 효과가 있음을 나타낸다(Figure 13(b)).

#### 4.4. 스텔스 기술 동향

국내의 전자파 흡수 및 차폐재료/구조와 관련된 스텔스 기술은 개념 정립 단계를 지나 재료의 개발과 적용단계에 이르고 있다[8]. 국내의 대표적인 연구동향은 국방과학연구소의 “광대역 전파흡수체의 설계 및 평가(1991.2~1992.2)”가 있으며, 연구 내용

으로 고무 매질과 Ni-Zn 페라이트 분체의 혼합에 의한 전자파흡수성능 측정 및 자성 흡수체를 이용한 코팅형 전자파흡수체를 제조하였다. 동 연구기관에서 “RCS 감소성 복합재료 연구(1994.5 ~1996. 12)”를 통해 유리섬유/에폭시(epoxy) 복합재료와 Ni-Zn 페라이트 분체의 혼합에 의한 전자파 흡수성능을 측정하였고 자성 흡수체를 이용한 구조용 전자파흡수체를 구현하였으나 무게와 고주파에서의 전자파 흡수 성능에 한계를 보였다. 또한 동연구소는 한국과학기술원과 함께 “EMI/RCS를 고려한 구조물 설계 및 측정 기법 연구(1998.8~2002.8)”를 수행하여 유리섬유/에폭시 복합재료와 카본블랙 분체의 혼합에 의한 전자파 흡수성능을 측정하였고 유전 흡수체를 이용한 구조형 전자파 흡수 구현의 가능성을 보여주었다. 현재는 “다기능 구조재료 기술 개발(2002.6.27~)” 연구과제로 탄소나노튜브를 이용한 샌드위치형과 다층형 유리섬유/에폭시 복합재료의 X-band 주파수에서의 전자파차폐성능에 관해 연구중이며, 연구결과는 Figure 14에 나타내었다. 이

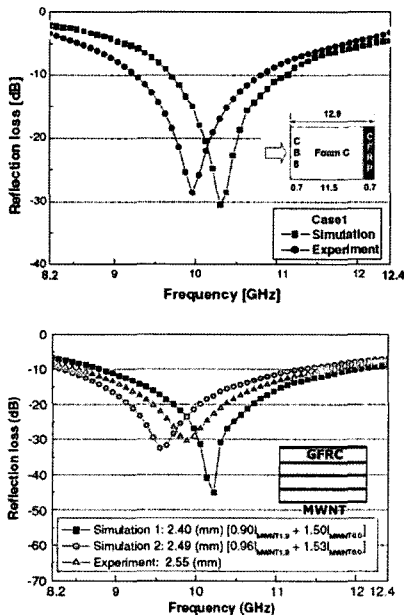


Figure 14. 샌드위치형[12]와 다층형[20] 유리섬유/에폭시 복합재료의 X-band 주파수에서의 반사손실.

Table 4. 국내 RCS 감소기술 수준[8]

RCS 감소 성능 중요 지표	수치	비고
구조 두께	약 2 mm	
90%(10 dB) 주파수 대역	최대 3 GHz	최대 성능 구현시 무게, 두께, 등의 다른 약점 대두
99%(20 dB) 주파수 대역	최대 1 GHz	"

러한 전자차폐성능이 부여된 섬유강화복합재료는 항공기나 선박 등 구조용으로서의 사용과 고기능성의 재료설계를 가능하게 해, 이러한 복합재료의 개발과 응용 분야는 더욱 더 확대될 것이라 기대된다.

RCS 감소기술 연구는 국방과학연구소의 주도 하에 이루어지고 있으며 그 수준은 기본적인 수준으로 현 기술의 취약성을 가지고 있다. RCS 감소 성능의 가장 중요한 지표라 할 수 있는 구조의 두께, 90%(10 dB) 주파수 대역, 99%(20 dB) 주파수 대역, 무게 등의 기술수준을 정리하면 다음 Table 4와 같다. 아래 지표의 결과는 측정 주파수 대역과 재료의 무게 등에 제한 받을 수 있으며, 국내에서는 활발히 연구되어진 분야가 아니고 선진국의 최신 기술 또한 기술 보호로 인하여 자료는 개방되지 않아 동향을 파악하는데 어려움이 있다[8].

항공기나 선박에 적용된 레이더에 걸리지 않는 스텔스 기술은 군사용 위장막(포)과 군복에 그대로 적용되고 있다. 현대의 최첨단 위장막은 레이더 스텔스를 위한 전자파차단은 물론, 육안에 의한 은폐, 열 및 적외선 차단이 복합된 멀티스펙트럼(multi-spectral) 위장용 섬유소재가 생산되고 있는 것으로 알려져 있으며 대표적인 회사로서 스웨덴의 Saab Barracuda사는 개인용 군복, 판초(poncho), 고정형과 이동형 위장포, 쉘터(shelter), 디코이(decoy) 등 다양한 형태의 군사용 섬유제품을 생산하고 있다 (Figure 15)[21]. Ulcan은 이 회사의 가장 기본적인 핵심 제품으로 무게가  $180 \text{ g/m}^2$  이하이며 우수한 강도로 내 인열성이 있고 자외선, 육안, 근접 적외선, 열적외선, 레이더 (radar emissivity  $\sim 0.74$ ) 등에 멀티스펙트럼 은폐 기능을 가지고 있다.

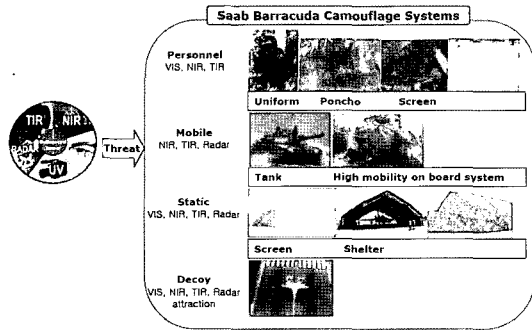


Figure 15. Saab Barracuda사의 다스펙트럼 위장용 섬유 제품.

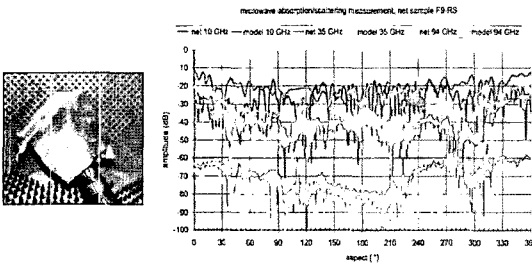


Figure 16. Fibrotex사 제품의 극초단파 흡수율.

Barracuda사 이외에 Fibrotex, Tracor Aerospace (also part of BAE Systems), Valpak Defence, Sioen Industries, Bachmann Camouflage, OGUS, Seyntex and Bridport Aviation Products 등의 회사들도 멀티스펙트럼 위장막을 생산하고 있으며[22], 이들 대부분의 제품들은 그물(mesh)구조를 기초로 작은 천 조각(leaflet)으로 위장하게 되어 있다. 장식된 천 조각과 위장막의 드레이핑(draping)에 의해 레이더의 산란효과가 일어나서 적의 레이더로부터 은폐할 수 있는 스텔스 성능을 가지게 된다. Figure 16는 Fibrotex사의 금속막으로 제조된 F9-RS 위장막 시편의 극초단파의 흡수율과 산란 결과를 보여준다[23].

미국의 Marktex사는 Contex<sup>®</sup> 라는 상품명으로 금속, 전파흡수체, 전도성고분자, 탄소섬유, 유리섬유, 일반합성섬유, 폼(foam) 등을 이용하여 다양한 전자파차폐 가스켓과 레이더 위장포 용도로 전도성 직물 및 망(net), 그리고 복합재료를 생산하고 있다 [24]. Figure 17은 전도성 고분자인 폴리피롤이 처

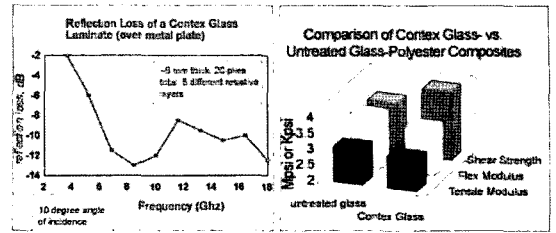


Figure 17. Contex<sup>®</sup> glass fabrics의 반사손실과 기계적 물성[24].

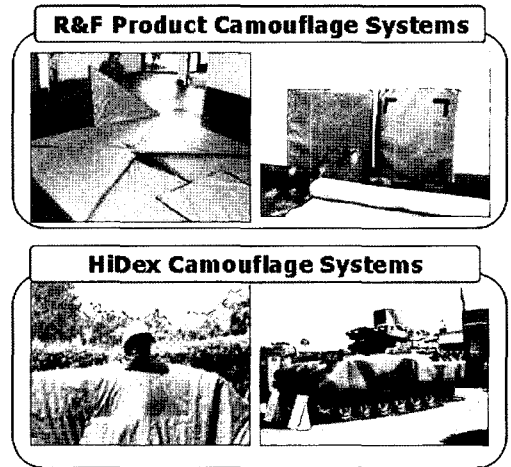


Figure 18. R&F Product사와 HiDex사의 위장포.

리된 유리섬유 복합재료인 Contex<sup>®</sup> glass fabrics의 반사손실과 기계적 물성을 나타내며 일반 폴리에스터 복합재료와 비교하여 거의 기계적 물성 차이가 없음을 보여준다.

그 밖에 스위스의 SSZ AG사는 다층형 직물구조의 다스펙트럼 위장포를 생산하고 있으며, 레이더 반사율이 -10~-2 dB 정도인 전자파차폐 성능을 가지고 있다[25]. 또한 미국의 R&F Product사[26]와 영국의 HiDex[22]사는 폼 형태의 전자파흡수체를 이용한 멀티스펙트럼 위장포를 생산하는 것으로 알려져 있다(Figure 18).

국내에는 1980년대에 레이더에 감지되지 않도록 하는 위장막 기술에 대한 특허 출원을 시작으로 (주)코오롱, 삼양화학공업(주) 등의 기업과 개인이 현재까지 9건 정도의 특허를 출원하였으나, 레이더 은



폐용 위장막을 생산하는 기업은 아직 없는 것으로 보인다. 이들 특허 기술을 보면 대부분이 앞서 설명한 전자파차폐 섬유소재 기술을 응용하여 탄소섬유, 페라이트 재료와 혼합한 다층형 구조를 가지고 있다. 반면에 전자산업의 발전과 전자파 유해성 여부에 대한 논란이 시작된 1990년대를 기점으로 전자파 차폐용 섬유소재 및 제품에 대한 특허 및 실용신안은 급격히 증가하기 시작하였고, 대부분 코팅기술이 사용되었으며 최근에는 무전해도급법에 의한 출원이 점차 증가하고 있는 추세이다[13].

## 5. 결 론

레이더에 탐지되지 않는 스텔스 기술은 국가안보 차원에서 다루는 기술로 자체 기술 개발 없이는 도입이 불가능한 기술이다. 최근 선진국들은 특정 주파수 레이더에 한정되어 있던 스텔스 기능을 적외선, 자외선, 고주파 레이더 영역(30~100 GHz)까지 포함한 광역 스펙트럼 전자파 차폐/흡수에 대한 연구도 상당히 진행하여 상용화한 것으로 알려진다. 한국의 전반적인 스텔스 기술 수준은 시작 단계를 벗어나 항공기나 선박에 적용하여 발전하는 시점에 와 있으나 국내 소재기술과의 연계는 아직 미미한 실정이다. 그러나 국내에서도 여러 가지 전자파 차폐재가 개발되어 다양한 용도로 적용되고 있으며, 섬유소재에 있어서도 전자파차폐성을 부여하는 기술 또한 확보되어 있어 전자파차폐 의류와 휴대전화, 전자제품, 각종 정밀 기기의 가스켓 등 산업용으로 적용되고 있다. 이러한 섬유소재기술의 적극적인 활용과 새로운 전자파흡수재료와 다층구조 등 재료 설계기술 개발이 이루어진다면, 광대역 스펙트럼 전자파 차폐/흡수 재료 제조가 가능해져 스텔스 항공기나 위장막 등 군사용으로 확장 가능하여 선진국 못지 않은 군사 기술력을 가지게 될 것이다. 또한 디지털 무선통신과 전기전자의 발전은 민수용에서도 고주파 대역의 전자파차폐재를 요구하고 있는 만큼 전자파 차폐/흡수 섬유소재의 기술 개발은

가속화될 것이며 이를 응용한 기술은 민수용에서 보다 광범위하고 다양하게 확대 발전될 전망이다.

## 참고문헌

1. 이준영, 주진수, 6T와 섬유산업 전자파차폐 섬유소재, *섬유 기술과 산업*, 7(1), 28(2003).
2. 홍창선, 스텔스 항공기와 복합재료, *한국항공우주학회지*, 24(3), 156(1996).
3. 2000 신기술동향조사 보고서, 고기능성 섬유소재, 2000.
4. <http://www.lowobservable.com>
5. <http://www.answers.com>
6. 김진봉, 김태욱, 복합재료를 이용한 전파흡수 구조물 개발 현황, *기계와 재료*, 10(4), 111(1998).
7. 한영자, 초광대역 레이다파에 대한 위장직물, 한국특허, 1993-0022294.
8. 김친곤, 다기능 구조재료 기술개발 연구보고서, 산업자원부, 2005.
9. 김성수, *한국자기학회지*, 4(3), 285(1994).
10. 김창채, 최형도, 서광석, 윤호규, *폴리머*, 27(3), 201(2003).
11. 박기연, 이상의, 김친곤, 이인, 한재홍, *한국항공우주학회지*, 32(6), 64(2004).
12. Ki-Yeon Park, Sang-Eui Lee, Chun-Gon Kim, Jae-Hung Han, *Compos. Sci. and Technol.*, 66, 576(2006).
13. 전자파 차폐 섬유소재 기술개발동향, 한국과학기술정보연구원, 2004.
14. 전자파차폐용 도전성 수지, 한국과학기술정보연구원, 2003.
15. 안영섭, 김동일, 정세모, *전자기기술학회지* 4(3), 4(1993).
16. 유현영, 전자파흡수체 연구동향 보고서, 원로과학기술인, 2005.
17. 강박광, 전자파차폐용 폴리아닐린, 한국과학기술정보연구원, 2003.
18. M. S. Kim, H. K. Kim, S. W. Byun, S. H. Jeong, Y. K. Hong, J. S. Joo, K. T. Song, J. K. Kim, C. J. Lee, J. Y. Lee, *Synth. Met.*, 126, 233(2002).
19. S. H. Kim, S. H. Jang, S. W. Byun, J. Y. Lee, J. S. Joo, S. H. Jeong, M. J. Park, *J. Appl. Polym. Sci.*, 87, 1969(2003).
20. S. E. Lee, J. H. Kang, C. G. Kim, *Compos. Struct.*, in press, 2006.
21. <http://www.barracuda.se>
22. <http://www.stealth-e.co.uk>
23. <http://www.fibrotex.net>
24. <http://www.marktek-inc.com>
25. <http://www.ssz-zug.ch>
26. <http://www.randf.com>

저자 프로필



**변 성 원**

1987. 한양대학교 섬유공학과 졸업  
 1989. 한양대학교 섬유공학과(석사)  
 1995. 한양대학교 섬유공학과(박사)  
 1995-현재. 한국생산기술연구원 섬유  
 소재본부 산업용섬유팀 팀장 수석연구원  
 (330-825)충남 천안시 입장면 홍천리 35-3  
 전화: 041-5898-567, Fax: 041-5898-250  
 e-mail: byunsw@kitech.re.kr



**박 재 기**

1982. 한양대학교 섬유공학과 졸업  
 1994. 한양대학교 섬유공학과(석사)  
 2000. 성균관대학교 섬유공학과(박사)  
 1984-1991. 상공부 섬유기사  
 1991-1999. 한국생산기술연구원 연구팀장  
 1999-2001. 한국생산기술연구원 기획조정  
 실장  
 2001-현재. 한국생산기술연구원 섬유소재  
 본부 산업용섬유팀 수석연구원



**김 기 영**

1994. 한양대학교 섬유공학과 졸업  
 1996. 한양대학교 섬유공학과(석사)  
 1999. The University of New South Wales  
 섬유공학과(석사)  
 2004. The University of Sydney 기계  
 공학과(박사)  
 2003-2005. The University of Sydney  
 기계공학과 Research associate and  
 Post-doc.  
 2005-현재. 한국생산기술연구원 섬유소재  
 본부 산업용섬유팀 선임연구원