

복합재료의 평면전자파 차폐효과

(Electromagnetic Shielding Effectiveness of the Composite Materials in the Far Field Region)

정연춘* · 강태원* · 정낙삼**

(Yeon Choon Chung* · Tae Weon Kang* · and Nak Sam Chung**)

요약

다양한 복합재료의 평면 전자파 차폐효과를 플랜지형 동축선 측정치구를 사용하여 평가하였다. 이들 측정결과로부터 제품의 외장재로 사용할 다양한 차폐재료의 선택 우선순위를 결정할 수 있다. 전자파차폐기능 복합재료의 차폐 성능은 재료에 포함된 금속분말이나 금속섬유의 종류와 함량에 크게 의존하며, 최적 함량의 결정과 최적 첨가재의 선택이 매우 중요함을 알았다.

Abstracts

The electromagnetic shielding effectiveness of the various composite materials in the far field region is investigated using the flanged coaxial transmission line sample holder. From these results, we can determine the preference ranking of the various composite materials to use the housing materials of electronic products. These materials have different shielding performances in proportion to the types and volume fractions of metallic powders and metallic fibers included in composite materials. Therefore determination of the optimum volume fraction and the choice of the suitable filler are very important in the design of shielding composites.

I. 서론

전자파차폐(electromagnetic shielding)기법은 전자파장해(electromagnetic interference / compatibility, EMI / EMC) 규제에 대응하기 위해 피시험기의 전자파장해 특성을 제어할 목적으로 이용되며, 전기적

특성이 잘 알려진 금속재료를 전통적으로 사용해 왔다. 그러나 근래에 들어 금속재료에 비해 값이 싸고, 가벼우며, 가공하기가 쉬운 플라스틱 재료 및 복합재료(composite materials)등이 개발되어 제품의 외장재로 널리 사용되고 있으며, 민수용 전기, 전자제품 등의 외장재(housing materials)로서 급속히 금속재료를 대체해 나가고 있는 실정이다. 그러나 이들 재료는 전자파 차폐효과를 전혀 가지지 않으므로 복사방출(radiated

* 한국표준과학연구원 전자기 연구부
 ** 한국표준과학연구원 기술지원부장

emission, RE)규제는 물론, 특히 복사내성(radiated susceptibility, RS)에 관한 규제에 효과적으로 대응하기 어렵다. 따라서 이들 재료에 도전성을 부가하여 전자파차폐효과를 갖도록 하기 위해 도전성도료의 도포, 또는 부전해도금 등을 하고 있으며, 각종의 도전성 고분자재료 및 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1, 2].

이러한 복잡한 재료는 금속재료와 달리 전기적특성을 명확히 알 수 없기 때문에 재료의 전자파차폐효과를 이론적으로 예측할 수 없고, 측정에 의해서만 그 성능이 파악되는 어려움이 있다. 따라서 선진국의 많은 산업체에서 이러한 재료의 전자파 차폐효과 측정법에 관심을 기울이기 시작하였고, 근래에 들어 미 국립표준기술연구원(NIST)과 재료시험협회(ASTM) 등에서 표준화된 측정방법을 제시하고 있는 실정이다[3, 4].

본 논문에서는 플랜지형 동축선 측정치구(flanged coaxial transmission line sample holder)를 사용하여 시중에서 쉽게 구입할 수 있는 다양한 복합재료의 평면파(plane wave) 차폐효과를 평가하였으며, 각종 재료의 전자파 차폐효과의 상대적 우위 등에 관해 살펴 보았다.

II. 전자파 차폐효과

전자파차폐용 복합재료는 중합체(polymer) 지지체(matrix)에 각종의 금속성 섬유(fiber)나 분말(powder)을 첨가하여 만든 재료이다. 이러한 복합재료의 제작에 사용되는 전형적인 지지재료는 에폭시(epoxy), 실리콘 고무(silicon rubber), 폴리에틸렌(polyethylene) 등이 흔히 사용되며, 주로 가공을 용이하게 하고, 임피던스 정합을 쉽게 해준다. 첨가재료는 전도성 손실 재료로서 은도금 유리구(silver coated glass sphere), 니켈 도금 그래파이트 분말(nickel coated graphite)이 널리 쓰이며, 기타 금속 분말이나 탄소섬유 등도 흔히 사용되고 있고, 유전손실 첨가재료로서 $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ 와 $0.67Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3 - 0.33PbTiO_3$ 를 비

롯하여 이들 재료를 도금한 각종 재료, 그리고 마이크로파 유전체 공진기 재료인 $Ba_2Ti_4O_{20}$ 등도 많이 활용되고 있다. 그리고 근래에 들어 저주파 자기장 차폐기능의 보완을 위해 페라이트(ferrite) 분말을 비롯하여 스테인레스 강 섬유(SUS fiber) 등이 많이 활용되고 있다. 이러한 전형적인 복합재료의 개발 이외에, 기존의 플라스틱 재료 등을 금속화(metallization)시키는 방법으로서 도전성 도료(conductive paints) 분사, 아연아크분사(zinc arc spraying), 도금(metal coating), 판금(metal plating), 금속증착(evaporation) 등이 활용되고 있으며, 구조의 다층화 및 경박단소화, 광대역화 등을 통해 성능 개선을 추진하고 있다[2, 5].

이론적인 전자파 차폐효과(shielding effectiveness)는 그림 1과 같이 무한히 큰 차폐면에 의해 신호의 송신부와 수신부를 구분하고, 차폐면에 수직으로 입사하는 전자파가 반사하고, 흡수되고, 투과하는 메커니즘에 의해 결정된다. 일정한 입사전력 P_1 에 대해 재료를 통과해 수신하는 수신전력을 P_2 라 하면 재료의 전자파 차폐효과는

$$SE(dB) = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (1)$$

으로 정의되며, 재료의 두께와 전기적특성 등을 고려하여 계산하면

$$\begin{aligned} SE(dB) &= 20 \log \left[e^{\alpha t} \frac{(1+K)^2}{4K} \right. \\ &\quad \left. \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right\} \right] \\ &= 20 \log e^{\alpha t} + 20 \log \frac{(1+K)^2}{4K} \\ &\quad + 20 \log \left\{ 1 - \left(\frac{K-1}{K+1} \right)^2 e^{-2\gamma t} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

여기에서, K = 파동임피던스(Z_w)와 차폐재료 임피던스(Z_m)의 비(= Z_w/Z_m),

γ = 전자파의 전파상수(= $\alpha + j\beta$),

α = 전자파의 감쇠상수,

t = 차폐재료의 두께,

의 식을 얻을 수 있다. 식(2)의 첫째항을 투과손실(penetration loss) 또는 흡수손실(absorption loss :

A_{dB} 라 하고, 두번째 항을 반사손실(reflection loss : R_{dB})이라 하며, 세번째 항을 다중반사에 의한 보정항(multireflection corrections : B_{dB})이라 부른다[6, 7].

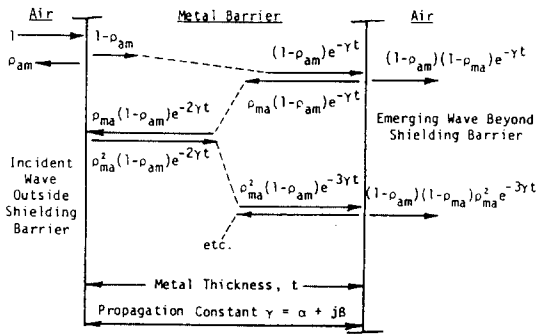
금속재료에서의 전자파 감쇠상수는 잘 알려진 표피 두께(skin depth)의 역수와 같은 값을 가지며, 따라서 흡수손실은 다음의 식

$$A_{dB} = 20 \log e^{\alpha t} = 8.686 t_{mm} / \delta \quad (3)$$

여기에서, t_{mm} = 차폐재료의 두께(mm),

$$\delta = \text{재료의 표피두께(mm)}$$

으로 표현된다. 위의 식으로부터 흡수손실은 근역장과 원역장에 관계없이 입사하는 전자파의 감쇠상수와 재료의 두께에 관계하고, 따라서 재료의 두께와 선택된 재료의 전기전도도와 투자율에 의존함을 알 수 있다. 이러한 손실은 특히 다른 종류의 손실 메커니즘에 비해 저주파 자기장 차폐에서 매우 효과적으로 활용되는 손실 메커니즘이다. 대부분의 금속재료에 있어서, 높은 전기전도도를 가지는 경우는 비교적 낮은 투자율을 가지며, 비교적 높은 투자율을 가지는 경우는 낮은 전기전도도를 갖는 것이 보통이다. 주어진 두께에 대해 철과 같은 자성재료는 구리나 은과 같은 비자성재료보다 큰 손실을 가지며, 일반적으로 입사하는 전자파의 주파수가 증가함에 따라 흡수손실이 증가하게 된다. 복합재료에서도 대개 첨가재로 들어가는 금속성분의 전기적 성질과 체적비(volume fraction)에 따라 흡수손실이 크게 좌우된다.



[그림 1] 재료의 전자파차폐효과

[Fig. 1] Electromagnetic shielding effectiveness of materials

반사손실은 입사하는 전자파의 파동 임피던스(wave impedance)와 차폐재료의 전기적 성질에 의해 결정되는 특성 임피던스(characteristic impedance)와의 부정합(mismatch)에 의해 결정되며,

$$R_{dB} = 20 \log \frac{(1 + K)^2}{4K} \quad (4)$$

으로 표현된다. 위의 식에서 K 는 파동 임피던스와 재료의 특성 임피던스의 비(ratio)이므로 전자파원의 임피던스 특성에 의해 근역장에서 전기장(고임피던스 전자파원, $Z_w \cong 120\pi \cdot \lambda / 2\pi r$)차폐, 자기장(저임피던스 전자파원, $Z_w \cong 120\pi \cdot 2\pi r / \lambda$)차폐, 그리고 원역장에서의 평면파($Z_w = 120\pi$)차폐로 구분되어 결정된다. 따라서 금속재료에서 원역장에서의 평면파 반사손실은

$$R_p(dB) = 108 + 10 \log \frac{\sigma_r}{f \cdot \mu_r} \quad (5)$$

여기에서 f = 입사 전자파의 주파수(MHz),

σ_r = 재료의 비전기전도도,

μ_r = 재료의 비투자율.

로 표현되며, 차폐재료의 비전기전도도에 비례하고, 주파수가 증가함에 따라 값이 줄어들음을 알 수 있다. 여기에서 중요한 것은 재료의 비투자율이 재료의 두께와 주파수가 증가함에 따라 값이 줄어들고, 구부림이나 기계적 가공에 의해 값이 크게 변하며, 특히 고투자율 재료일수록 비교적 빨리 포화 현상이 일어난다는 것이다. 복합재료에서의 평면파 반사손실 역시 포함된 첨가재의 전기적 성질에 크게 의존한다. 따라서 적절한 첨가재의 선택과 적정 체적비의 결정은 경제적이며, 효과적인 차폐재를 만드는 데 있어서 매우 중요하다. 특히 부도체 재료 위에 도전성 재료를 도포하는 경우, 큰 전기전도도를 가지는 재료를 도포재료로 선택하여 얇게 도포하더라도, 반사손실을 크게 증가시킬 수 있어 전체적인 차폐효과를 크게 증가시킬 수 있다.

차폐재료의 양쪽 면에서의 임피던스 부정합에 의해 발생하는 다중반사에 의한 보정항은

$$B(dB) = 20 \log \left[1 - \left(\frac{K - 1}{K + 1} \right)^2 e^{-2\alpha t} \right] \quad (6)$$

로 표현되며, 흡수손실이 큰 경우(15 dB이상)는 상대적으로 무시된다.

식 (6)으로부터 전자파 차폐효과는 입사하는 전자파의 흡수와 반사, 그리고 매질의 경계면 사이에서의 다중반사에 의해 이루어지고($SE_{dB} = A_{dB} + R_{dB} + B_{dB}$), 차폐하고자 하는 전자파의 특성에 따라 이들 각각의 손실을 활용하여 효과적으로 차폐시킬 수 있음을 알 수 있다. 우선, 차폐해야 하는 전자파의 특성을 알기 위해 복사 방출잡음의 스펙트럼 특성을 평가해야 하고, 적용하고자 하는 관련 전자파장해 규격에 맞추기 위해 필요한 차폐효과를 얻게 되며, 최종적으로 식 (2)로부터 사용할 적절한 재료의 종류와 두께를 결정할 수 있게 된다. 복사되는 전자파원과 차폐재료면과의 거리가 $\lambda/2\pi$ 보다 크다면 시편은 원역장영역에 놓여 있는 것이 되며, 이 경우 외부전자계에 대한 피시험기기의 전자파내성 평가의 적합성을 위한 차폐기구물의 원역장 차폐효과분석에 주로 응용된다.

III. 측정시스템과 플랜지형 동축전송선 측정치구

1. 전자파 차폐효과 측정시스템

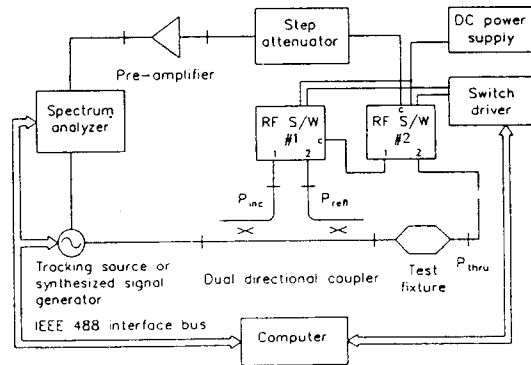
전형적인 전자파 차폐효과 측정법은 일정한 송신전력에 대해 차폐재료가 놓여 있을 때(P_r)와 없을 때(P_r')에 수신되는 수신전력의 차를 측정하므로써 쉽게 결정할 수 있게 된다. 이 때의 수신 전력값의 비는 삽입손실(IL)로서

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_r'} \right) \quad (7)$$

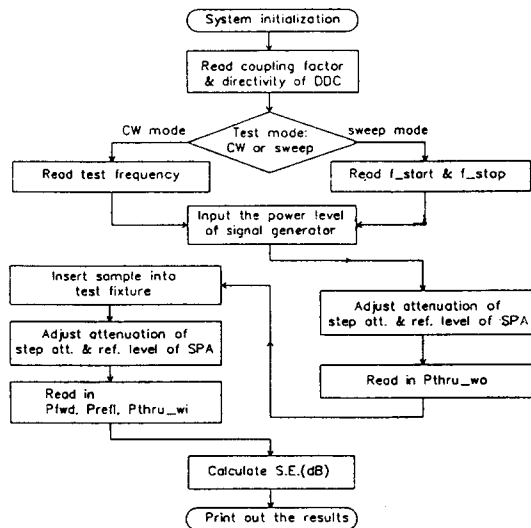
과 같이 표현된다. 따라서 전자파차폐 메카니즘(흡수, 반사, 내부다중반사)에 관계없이 단지 입사하는 전자파에 대해 투과되어 전달되는 전자파의 비로 표현됨을 알 수 있다. 측정시스템 역시 측정치구 내에 시편이 있을 때와 없을 때에 수신되는 전력을 각각 측정하여 두 값의 차를 결정하는 과정이다.

사용된 전자파 차폐효과 측정시스템은 [그림 2]와 같으며, 측정치구로서 플랜지형 동축전송선치구(flanged circular coaxial transmission-line holder)를 사용하였다. 이러한 측정시스템은 10 MHz ~ 1 GHz의 주파

수대역에서 사용되며, 쌍방향성 결합기와 고주파 스위치를 통해 한개의 스펙트럼분석기로 입사전력과 반사전력, 투과전력을 모두 측정할 수 있도록 되어 있다. 측정시스템의 구성을 위해 HP 85645A 트래킹신호원, HP 8657A 신호발생기, HP 8566A 스펙트럼분석기, R/S RSP 스텝 감쇠기, HP 8411D 신호증폭기, HP 33311B 고주파스위치, Electrometrics DC 3001 쌍방향성결합기 등이 사용되었으며, 퍼스날컴퓨터를 사용하여 [그림 3]에 보인 측정절차로 측정 자동화가 이루어진다.[8]



[그림 2] 전자파차폐효과 측정시스템의 블록선도
[Fig. 2] Block diagram of S.E. measurement system

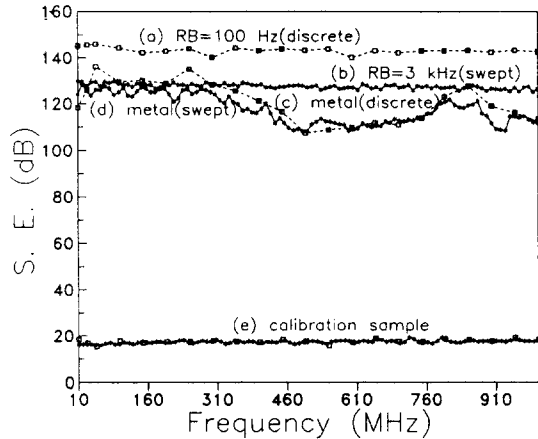


[그림 3] 측정 프로그램의 흐름도
[Fig. 3] Flow chart of S.E. test program

측정시스템의 동작영역(dynamic range)은 스위치의 최대 입력전력, 스텝감쇠기의 최대 입력전력, 수신기 전단 신호증폭기의 최대 입력전력, 수신기의 최대 입력전력, 그리고 측정치구의 특성에 의해 제한되는데, 신호증폭기의 이득 감소 레벨과 스위치의 최대 입력전력 등을 고려하여 신호원의 출력을 +13 ~ +15 dBm으로 고정하였으며, 수신기로 사용되는 스펙트럼분석기의 전단부에 스텝 감쇠기와 신호증폭기를 설치하여 시스템의 동작영역을 넓힐 수 있도록 설계하였다. 본 측정시스템의 동작영역은 트래킹신호원을 사용하는 소인주파수 방법(swept frequency method)과 일반적인 신호발생기를 사용하는 산재주파수 방법(discrete frequency method)에 따라 각기 다르게 나타난다.

[그림 4]는 두 방법에 의한 측정시스템의 동작영역을 나타낸 것이다. [그림 4]에서의 (a)는 산재주파수 방법을 사용한 경우이고, 신호원의 출력을 OFF한 상태에서 스펙트럼분석기의 분해대역폭(resolution bandwidth)을 100 Hz로 줄였을 때 140 dB 이상의 동작영역을 얻을 수 있음을 볼 수 있으며, (b)는 소인주파수 방법에서 스펙트럼분석기의 분해대역폭을 3 kHz로 하였을 때 얻을 수 있는 동작영역이며, 측정 프로그램에서 분해대역폭을 수정하지 않을 때 얻을 수 있는 값이다. 또한 (c)와 (d)는 각각 1.02 mm 두께의 동판을 시편으로 사용하였을 때 얻을 수 있는 두 방법의 동작영역이다. 이러한 결과는 시료로 사용된 동판의 이론적인 차폐효과(800 dB이상)보다 매우 낮은 측정값이 얻어짐을 보이는 것으로서, 측정시스템의 동작영역의 한계는 물론 측정치구 및 시스템에서의 누설 전파 등에 의해 측정값이 크게 제한됨을 알 수 있다. 따라서 실제의 측정시스템의 동작영역은 (a)와 (b)보다는 이론적으로 매우 높은 차폐효과를 갖는 두꺼운 금속판을 이용하여 결정하는 것이 바람직하다. 따라서 (c)와 (d)가 본 측정시스템의 동작영역을 표현하고 있으며, 측정시스템의 동작영역은 전주파수대역에서 110 dB 이상이 됨을 알 수 있다. 그림 (e)는 Electrometrics사에서 제공한 시편을 본 측정시스템으로 측정된 값(16.3 dB(30 MHz), 18.7 dB(1000 MHz))이며, 소인주파수 방법에 의한 결과(*)와

산재주파수 방법에 의한 측정결과(□)가 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한 이들 값은 Electrometrics사가 제공한 측정값(16.3 dB(30 MHz), 18.7 dB(1000 MHz))과 매우 잘 일치하는 것으로서 측정시스템의 정상 동작을 설명해 준다.

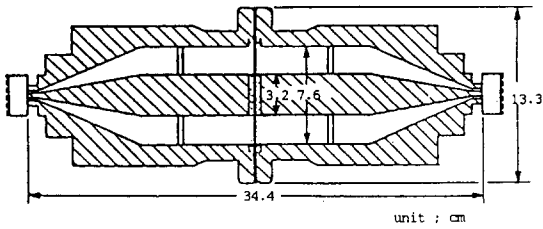


[그림 4] 플랜지형 동축선 측정치구를 사용한 측정시스템의 동작영역

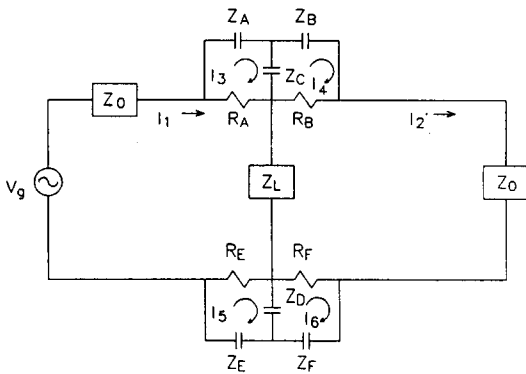
[Fig. 4] Dynamic range of the S.E. measurement system using the flanged coaxial transmission line holder

2. 플랜지형 동축선 측정치구

플랜지형 동축전송선 측정치구는 [그림 5]에 보인 것으로서 미 국립표준기술연구원(NIST)에서 개발한 것으로 두 개의 큰 동축 플랜지 사이에 디스크형의 시편을 넣고 전자파를 입사시키면 시편을 통한 용량성 결합으로 TEM 모우드의 신호를 전파시키게 된다. 이러한 측정치구는 ASTM에서 '83년에 제정한 ASTM E 7-83 규격의 연속 동축선 측정치구(Circular coaxial transmission-line holder with continuous conductor)의 단점을 보완한 것으로서 내부 도체의 외경이 3.2 cm, 외부 플랜지의 외경이 13.3 cm, 내경이 7.6 cm이며, 시편의 모양이 와셔형이 아니고 디스크형으로 되어 있다. 또한 기준시편은 양쪽의 동축 전송선이 시편을 통해 용량성 결합을 할 수 있도록 두 조각으로 되어 있



[그림 5] 플랜지형 동축선 측정치구
[Fig. 5] Flanged coaxial transmission line holder



[그림 6] 플랜지형 동축선 측정치구의 등가회로모델
[Fig. 6] Equivalent circuit model of the flanged coaxial transmission line holder

으며, 내, 외부 동축선 사이는 비어 있다. 따라서 두 조각으로 이루어진 기준시편을 측정치구 사이에 끼운 다음 기준레벨을 측정하고, 다시 디스크형의 시편을 측정치구 사이에 끼운 다음 수신되는 전력을 측정하고 나면 두 값의 차로부터 시편 재료의 전자파 차폐효과가 결정된다[3, 4, 9]. 이때 양쪽 부분의 치구는 시편을 통해 용량성 결합을 해야 하므로 나이론 스크류를 사용하여 양쪽 부분의 플랜지를 결합하게 된다. 이러한 나이론 스크류는 금속 스크류와는 다르게 접촉 임피던스의 섭동을 시편과 병렬이 되게 유지시켜 준다. 이러한 측정치구를 사용할 때의 측정 주파수대역은 1 MHz ~ 1.8 GHz 정도인데, 주파수 하한은 측정기기의 주파수한계에 의해 제한되며, 주파수 상한은 치구의 물리적 크기에 의한 공진주파수에 의해 제한된다.

플랜지형 동축선 측정치구의 등가회로는 [그림

6]과 같다. 플랜지와 시편 사이의 접촉저항은 R_A, R_B, R_E, R_F 이며, 두 플랜지 사이의 용량성 결합은 Z_A, Z_B, Z_E, Z_F 이고, 플랜지와 시편 사이의 용량성 결합은 Z_C, Z_D 로 표현되었다. 이러한 등가회로에 Kirchhoff의 법칙을 적용하여 출력 임피던스 Z_D 에 전달되는 전류 I_2 를 구할 수 있으며, 따라서 출력단에서 수신되는 수신전력을 구할 수 있다. 만약 시편이 없다면 $Z_L \rightarrow \infty$ (개방회로)이고, 결과적으로 $B \rightarrow \infty$ 이다. 따라서 시편이 없는 상태에서의 수신전력을 계산할 수 있다. 최종적으로 전자파 차폐효과로 정의되는 삽입손실은

$$IL = 20 \log \left| 1 + \frac{AC}{B(A+C)} \right| \quad (8)$$

$$A = Z_0 + \frac{R_B \{ Z_A (Z_B + Z_C) + Z_B (R_A + Z_C) \}}{(Z_A + Z_C + R_A)(Z_B + Z_C + R_B) - Z_C^2} + \frac{R_F \{ Z_E (Z_F + Z_D) + Z_F (R_E + Z_D) \}}{(Z_E + Z_D + R_E)(Z_F + Z_D + R_F) - Z_D^2}$$

$$B = Z_L + \frac{R_A R_B Z_C}{(Z_A + Z_C + R_A)(Z_B + Z_C + R_B) - Z_C^2} + \frac{R_E R_F Z_D}{(Z_E + Z_D + R_E)(Z_F + Z_D + R_F) - Z_D^2}$$

$$C = Z_0 + \frac{R_A \{ Z_B (Z_A + Z_C) + Z_A R_B + Z_C \}}{(Z_A + Z_C + R_A)(Z_B + Z_C + R_B) - Z_C^2} + \frac{R_E \{ Z_F (Z_E + Z_D) + Z_E (R_F + Z_D) \}}{(Z_E + Z_D + R_E)(Z_F + Z_D + R_F) - Z_D^2}$$

이 성립한다. 만약 시스템이 이상적(측정치구와 시편 사이의 완전한 접촉)이라고 가정하면 모든 기생 임피던스(R_A, Z_A 등)는 단락되며, 이러한 경우 $A \rightarrow Z_0, B \rightarrow Z_L, C \rightarrow Z_0$ 이고, 따라서

$$IL = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2Z_L} \right| \quad (9)$$

이다. 그러나 현실적으로 기생임피던스는 존재하여, 시스템 오차에 기여하게 된다. 동작주파수가 증가함에 따라 용량성 임피던스 Z_A, Z_B, Z_E, Z_F 는 감소한다. 만약 시편의 표면 전기전도도가 극히 나쁘다면, $R_A, R_B \gg |Z_C|$ 이고, $R_E, R_F \gg |Z_D|$ 이며, 따라서 $B \approx Z_L + Z_C + Z_D$ 가 성립하며, 결과적으로

$$IL = 20 \log \left| 1 + \frac{Z_0}{2(Z_L + Z_C + Z_D)} \right| \quad (10)$$

이 성립한다. 위의 식으로부터 요구되지 않는 임피던스

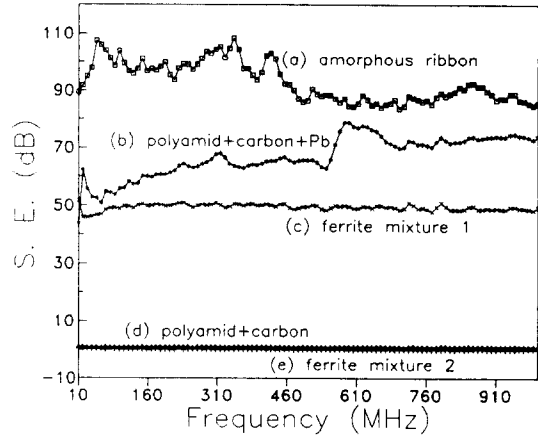
Z_c , Z_0 가 삼입손실 측정에 기여함을 알 수 있고, 비록 표면이 절연되어 있는 시편이라 할지라도 시편과 측정치구 사이의 이러한 용량성 임피던스가 작아지도록 하는 것이 요구됨을 알 수 있다.

IV. 다양한 복합재료의 평면 전자파 차폐효과

앞에서 설명한 측정시스템과 측정치구를 사용하여 실제 시중에서 판매되고 있는 다양한 차폐재료(금속재료, 자성손실 복합재료, 도전손실 복합재료 등)의 평면파 차폐효과를 평가하였으며, 그 결과를 아래 그림에 보였다. [그림 7]은 유전성의 중합체에 금속 및 자성분말을 혼합시킨 복합재료의 차폐효과이다. 그림의 (a)는 2 mm 정도의 폭을 가진 비정질 자성 리본(ribbon)을 잘게 잘라 에폭시 수지에 붙인 것으로서 매우 높은 평면파 차폐효과를 가진다. 이러한 재료는 저주파 자기장의 차폐에도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 그림의 (b)와 (d)는 각기 폴리아미드계열 중합체에 탄소 분말을 혼합한 것으로서, (b)는 후면에 납을 추가하여 다층화한 것이다. 그림의 (b)에서와 같이 전혀 전자파 차폐효과를 가지지 않는 경우가 후면에 납층을 추가함으로써 매우 높은 차폐효과를 얻을 수 있음을 알 수 있고, 이러한 재료는 매우 구부러기가 쉬우며, 접착성을 추가할 수 있어 전자파차폐 테이프로 활용될 수 있다. 그림의 (d)에 보인 결과는 재료에 포함된 탄소분말의 함량이 적어 분말입자 사이에서 용량성 결합이 일어나지 못함에 따라 도전 채널(conductive channel)이 형성되지 않는 것으로 생각되며, 탄소섬유의 함량을 증가시켜 혼합물 자체의 차폐효과도 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다[10]. 그림의 (c)와 (e)는 금속분말에 페라이트 분말을 혼합한 것으로서 포함된 분말의 함량에 따라 각기 다른 차폐효과를 가짐을 나타낸다.

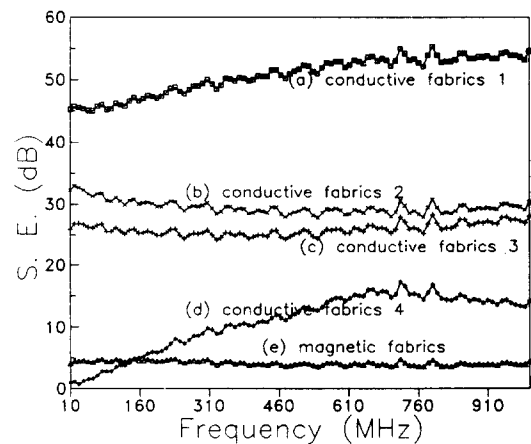
[그림 8]은 전자파 차폐용 보안기 및 의류, 커튼 등의 제작에 사용되는 차폐섬유(fabrics)로서, 그림의 (a), (b), (c)는 일본에서 제작한 것이며, (d)와 (e)는 국내에서 제작한 것이다. 그림의 (a), (b), (c), (d)에 포함된 금속의 종류와 함량은 명확히 알 수 없으나, 주로 구

리와 아연 등으로 도금된 섬유 필라멘트를 천으로 짠 것으로 판단되며, 섬유의 색상과 부드러움을 비교해 볼 때 차폐효과가 높은 것일수록 금속성분이 많이 함유되어 있는 것으로 보인다. 그림의 (e)는 페라이트 분말을 섬유에 함유시킨 것이나, 적은 량의 자성재료가 포함되었으며, 재료의 특성상 섬유에 포함시키기가 어려운 것으로 생각된다.



[그림 7] 금속분말 및 페라이트 분말을 혼합한 복합재료의 전자파 차폐효과

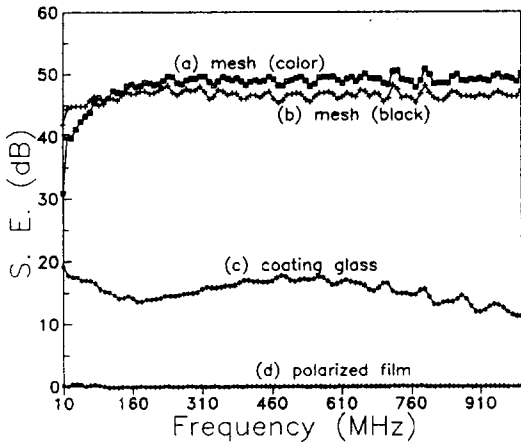
[Fig. 7] S.E. of composite materials including metallic powders and ferrite powders



[그림 8] 전자파 차폐섬유의 차폐효과

[Fig. 8] S.E. of the electromagnetic shielding fabrics

[그림 9]는 텔레비전 및 컴퓨터 모니터의 보안기로 사용되는 제품의 전자파 차폐효과를 나타낸 것이다. 이 값은 보안기 제작에 사용되는 재료의 우선순위를 보인 것으로 제품으로 제작된 이후는 제품의 형태(대개, 보안기 패널의 상, 하, 좌, 우로 많은 전자파가 빠져 나오며, 모니터의 전면과 측면을 덮을 수 있는 경우가 보다 효과적이다)에 따라 값이 다르나, 재료의 차폐효과보다 특성이 크게 떨어진다. 그림의 (a)와 (b)는 일본에서 제작한 것으로서 섬유 필라멘트에 구리를 코팅한 다음 천으로 짠 재료이다. 그림의 (c)는 유리기판 위에 금속 재료를 다층 코팅한 것이며, (d)는 종래에 보안기로 많이 사용되어온 전형적인 광학 편광판이다. 이들 결과로부터 광학적 편광기능만을 가지는 재료의 경우, 전혀 전자파 차폐효과를 가지지 못함을 알 수 있으며, 금속 증착유리보다 차폐섬유망으로 된 보안기가 보다 높은 전자파 차폐효과를 가지는 것으로 보이나(특별한 경우, 그렇지 않는 경우도 있다) 광학적인 투시도가 보다 나쁘므로 각기 장단점이 있는 것으로 보인다.

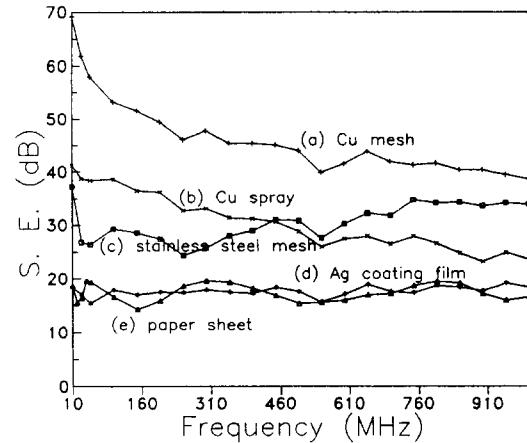


[그림 9] 텔레비전 및 모니터용 보안기의 전자파 차폐효과

[Fig. 9] S.E. of the shielding screen for T.V. and computer monitors

[그림 10]은 산재주파수 방법으로 측정된 기타 재료의 전자파 차폐효과이다. 그림 (a)는 구리망, (b)는 미국의 Prime Chemicals Technology Co.의 액상 구리분

말 혼합물을 아크릴판 위에 도포한 재료의 차폐효과이다. 두 그림에서 주파수에 따라 같은 경향을 보이고 있음을 볼 수 있으며, 이러한 경향은 흔히 금속구리판에서 얻을 수 있는 것이다. 외관은 플라스틱 재료의 미려함을 그대로 유지시킨 채로, 액상 구리분말 혼합물을 플라스틱 외장재의 안쪽에 도포하여 전자파 차폐효과를 증진시킬 수 있음을 알 수 있다. 현재 매우 다양한 금속 분말이 포함된 액상 혼합물이 시판되고 있으며, 외장재와의 접착성을 강화시키기 위해 다양한 액상 수지가 응용되고 있다. 그림의 (c)는 스테인레스 철망으로서 주파수에 따른 특성이 구리망과 다름을 알 수 있는데, 이는 철망의 흡수손실이 비교적 낮은 주파수(100 kHz 정도)에서부터 상승하여 거의 1 GHz의 주파수까지 구리망에 비해 크게 상승하기 때문에 전체적인 차폐효과를 주파수의 증가에 따라 증가시키게 되는 것이다. 그림의 (d)는 폴리에틸렌 필름위에 은을 증착시킨 박막의 전자파 차폐효과이며, (e)는 국내에서 개발된 전자파 차폐 종이의 차폐 특성을 나타낸다.



[그림 10] 기타 재료의 전자파 차폐효과
[Fig. 10] S.E. of the other materials

V. 결 론

시중에서 쉽게 구할 수 있는 다양한 복합재료의 평면 전자파 차폐효과를 플랜지형 동축선 측정치구를 사용하여 측정하였다. 이들 재료의 측정결과로부터 외장재로

사용할 재료의 우선 순위를 결정할 수 있다. 복합재료의 평면파 차폐효과는 주로 첨가재의 전기적 성질과 함량에 의해 크게 의존하며, 적정 함량이 될 때까지 전허도전성을 띠지 않고, 따라서 전자파 차폐효과가 없다. 전자파차폐기능 복합재료의 설계시 적절한 첨가재의 선택과 적정 함량의 결정은 매우 중요하다. 이는 적정 함량 이상의 첨가재를 포함시키더라도 전자파 차폐효과를 크게 증가시키지 못하고, 오히려 고가인 첨가재의 낭비를 초래할 수 있어 경제적이지 못하기 때문이다.

앞으로 다양한 첨가재의 함량(체적비)에 따른 전자파 차폐효과의 변화를 조사할 예정이다. 또한 유효매질이론(effective medium theory)[11]등을 이용하여 복합재료의 전기적 성질과 첨가재의 최적 함량등을 결정하고, 나아가서 전자파 차폐효과를 이론적으로 예측할 수 있는 방법에 대해 연구할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Donald R. J. White and M. Mardiguian, *Electromagnetic Shielding*, A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Vol. 2, Gainesville, Virginia : Interference Control Technologies, Inc., 1988.
2. 清水康敬 等, 電磁波の吸收と遮蔽, 日經技術圖書(株), 1989.
3. Perry F. Wilson, Mark T. Ma and J. W. Adams, "Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials : Part I. far-field source simulation," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 239-250, Aug. 1988.
4. ASTM D4935-89, "Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials," Sept. 1989.
5. S. J. Jang, "Microwave absorbent composites," Technical seminar, ETRI, 1992. 7. 20.
6. Richard B. Schulz, V. C. Plantz, and D. R. Brush, "Shielding theory and practice," IEEE Trans. Electromagn. Compat., Vol. 30, No. 3, pp. 187-201, Aug. 1988
7. Henry W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, New York, J. Wiley pub., 1976, pp. 137-172.
8. 정연춘, 강태원, 정낙삼, "전자파차폐효과 측정시스템의 구현." Vol. 4, No. 2, pp. , Sep. 1993
9. 정낙삼, 정연춘, 강태원, "전자파차폐 및 흡수기능 복합재료의 성능 평가기술개발," 제1차년도 연구보고서, KRISS-93-076-IR, 한국표준과학연구원, 1993.
10. H. C. Kim and S. K. See, "Electrical properties of unidirectional carbon-epoxy composites in wide frequency band," J. Phys. D : Appl. Phys. 23, pp. 916-921. 1990.
11. R. Landauer, "Electrical conductivity in inhomogeneous media," AIP Conference Proceedings, No. 40, pp. 2-45, 1978.