

# 전자기 간섭 차폐 메커니즘에 따른 차폐 효율 분석

## Analysis of Shielding Effectiveness Based on Electromagnetic Interference Shielding Mechanisms

양현성<sup>1,2</sup> · 전윤석<sup>3</sup> | Hyeonseong Yang · Yun-Seok Jun

<sup>1</sup>Department of Material Science and Engineering, Korea University,  
145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea

<sup>2</sup>Convergence Research Center for Solutions to Electromagnetic Interference in Future-mobility,  
Korea Institute of Science and Technology,  
5 Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea

<sup>3</sup>Department of Polymer Engineering, Pukyong National University,  
45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea  
E-mail: ysjun@pknu.ac.kr

### 1. 서론

전자부품과 무선 통신기술의 급속한 발전 속에서, 전자기기의 성능을 저해하는 전자기 간섭(electromagnetic interference, EMI) 문제가 부각되고 있다. EMI는 특정 주파수의 전자파가 인접 전자부품에 원치 않는 신호를 유입시켜 작동을 방해하는 현상으로, 자율주행 차량의 레이더나 의료기기와 같은 고집적 시스템에서는 치명적 오류를 유발할 수 있다.

기존 EMI 차폐재는 주로 구리와 같은 금속 기반 도전성 소재이며, 높은 전도성으로 인해 입사된 전자파를 반사시켜 차폐 효과를 얻는다. 그러나 이와 같은 반사 방식은 공기와의 임피던스 불일치로 인해 대부분의 전자파가 표면에서 반사되며, 반사파가 다른 부품에 간섭을 유발하는 문제점이 있다.<sup>1-3</sup> 이에 따라, 전자파를 반사하지 않고 흡수하는 소재에 대한 관심이 높아지고 있다. MXene, 그래핀 등 2차원 도전성 소재나 고분자 복합재는 임피던스 정합을 통해 반사를 줄이고 전자파를 내부로 유도하여 흡수를 증가시킬 수 있다. 또한, 철이나 산화철 같은 자성 소재를 활용하면 다양한 손실 메커니즘으로 전자파 흡수를 유도할 수 있다.<sup>3,4</sup>

최근에는 복합재 내 도전성 및 자성 소재의 구조를 정밀하게 설계하여 흡수 성능을 극대화하는 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>1,3</sup> 이러한 고성능 EMI 차폐 소재를 개발하기 위해서는 차폐 메커니즘에 대한 이해와 함께, 차폐 효율(EMI shielding effectiveness)의 정확한 계산 및 분석이 필수적이다. 본 특성분석 강좌에서는 EMI 차폐 메커니즘의 기초 이론과 차폐 효율의 분석 방법에 대해 다룰 예정이다.

### 2. 본론

#### 2.1 주파수 대역에 따른 극초단파(Microwave) 분류

무선 통신과 레이더는 주로 1 mm에서 1 m의 파장을 가진 극초단파를 활용한다. 극초단파는 사용 주파수

Author



양현성

2025 국립부경대학교 고분자공학과 (학사)  
2025-현재 고려대학교 신소재공학과 (통합과정)  
2025-현재 한국과학기술연구원 전자파솔루션융합연구단 학생연구원



전윤석

2009 중앙대학교 화학공학과 (학사)  
2011 토론토대학교 화학공학 및 응용화학 (석사)  
2018 위털루대학교 화학공학과 (박사)  
2020 토론토대학교 기계공학 및 산업공학과 (Post-Doc.)  
2022 한화토탈 복합소재연구팀 책임연구원  
2022-현재 국립부경대학교 고분자공학과 조교수

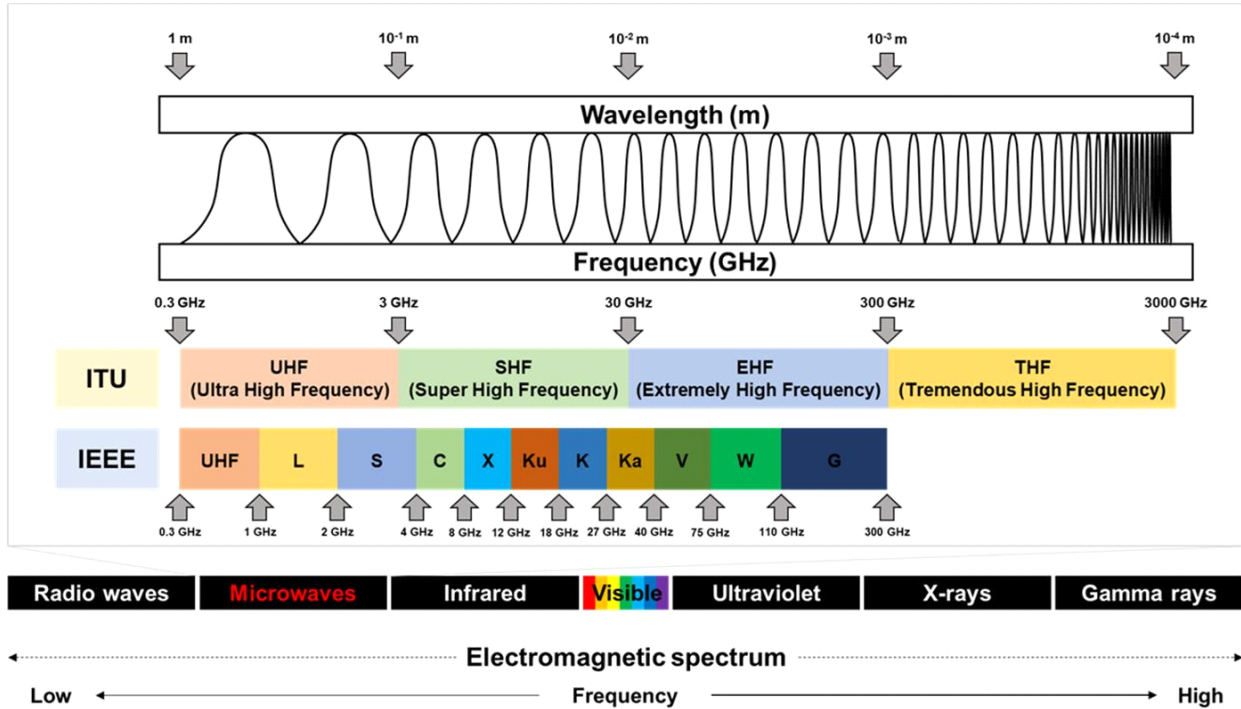


그림 1. 주파수 대역에 따른 극초단파 분류.<sup>5-7</sup>

대역에 따라 여러 구간으로 구분되며, 이에 대한 표준 대역은 전기전자공학자협회(IEEE), 국제전기통신연합(ITU), 유럽연합(EU), 북대서양 조약 기구(NATO) 등 여러 기관에서 제정하고 있다. 다만, 각 기관에서 설정한 기준은 상이하며, 용도에 따라 선택적으로 사용된다. 현재 연구와 산업에서 주로 활용되는 분류 체계는 ITU와 IEEE에서 제정한 기준이며, 이는 그림 1에 제시되어 있다.<sup>5,6</sup>

## 2.2 전자기 간섭 차폐 메커니즘

전자기 간섭 차폐 메커니즘은 크게 반사(reflection), 흡수(absorption), 다중 반사(multiple reflection)로 구분될 수 있다(그림 2). 본 절에서는 차폐 메커니즘의 개념에 대해

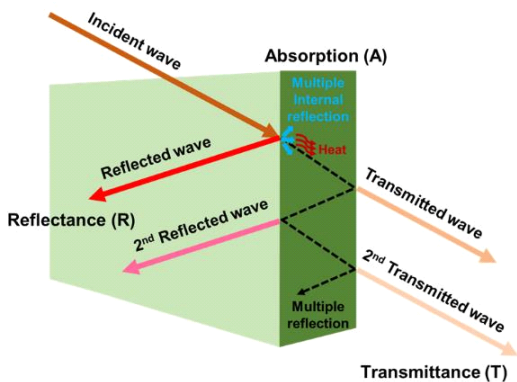


그림 2. 전자파 차폐 메커니즘을 나타낸 개략도.<sup>8,9</sup>

논의하고자 한다.

### 2.2.1 반사

반사는 전자파가 차폐재 표면에서 반사되는 현상으로, 주로 전기전도도가 높은 소재에서 발생한다. 소재의 전도성이 높을수록 공기와 임피던스 불일치가 심해지며, 이에 따라 입사된 전자파가 차폐재 표면에 도달하면 차폐재 내부의 전하 운반체(charge carriers, 예: 자유전자 또는 정공)의 진동을 유도하게 된다. 이 진동은 차폐재 표면에 전자기장을 형성하여 전자파를 반사시키는 역할을 한다.

반사는 일반적으로 가장 먼저 작용하는 1차 차폐 메커니즘이며, 차폐재의 도전성이 클수록 반사되는 전자파의 비율이 높아져 차폐재 내부로 침투하는 전자파의 양은 적어진다. 그러나 반사된 전자파는 단지 진행 방향이 바뀐 것일 뿐, 에너지가 소멸된 것은 아니다. 따라서 이러한 반사파는 주변 전자기기에 간섭을 일으킬 수 있으며, 경우에 따라 인체에 유해한 영향을 미칠 우려도 존재한다.<sup>1,2</sup>

### 2.2.2 흡수

흡수는 차폐재 표면에서 반사되지 않고 침투한 전자파가 소재 내부에서 각종 손실(loss)을 통해 열 에너지로 변환되는 2차 차폐 메커니즘이다. 손실은 크게 유전 손실(dielectric loss)과 자성 손실(magnetic loss)로 구분된다.<sup>1,2</sup>

유전 손실은 전기 쌍극자 또는 전하 운반체의 움직임에

의해 전자파 에너지가 소실되는 현상을 의미하며, 일반적으로 분극(polarization) 손실과 전도(conduction) 손실로 구분된다. 우선 분극 손실은 외부 전기장에 의해 물질 내부의 전하 분포가 변하면서 발생한다. 이때 분극 현상은 세 가지 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 전자 분극(electronic polarization)이다. 전자 분극은 외부 전기장에 의해 전자 구름이 원자핵 주변에서 이동하면서 일시적인 쌍극자가 형성되는 원자 수준의 분극이다. 반응 속도가 매우 빠르기 때문에 고주파에서도 유지되며, 분극의 세기는 외부 전기장의 세기와 비례한다. 두 번째는 영구 쌍극자를 가진 분자들이 전기장의 방향에 따라 정렬되면서 발생하는 배향 분극(orientation polarization)이다. 질소나 산소와 같은 극성 작용기를 포함하는 분자에서 주로 나타난다. 마지막으로, 유전율과 전도도가 서로 다른 두 물질의 계면에서 외부 전기장에 의해 전하가 축적되면서 발생하는 계면 분극(interfacial polarization)이다. 이 분극은 반응속도가 느려서 주파수가 높아질수록 가장 먼저 사라지는 특성을 가진다. 한편, 전도 손실은 고전도성 소재에서 나타나는 손실 메커니즘으로, 외부 전기장에 의해 자유 전자들이 차폐재 내부를 따라 이동하면서 국부적인 전류 경로를 형성한다. 이 과정에서 저항에 의해 전자파 에너지가 열 에너지로 변환되며 감쇠가 발생한다.<sup>1</sup>

자성 손실은 외부 자기장 하에서 소재를 구성하는 원자들의 d 오비탈 내 전자의 거동과 관련하여 발생된다. 자성 손실에는 크게 두 가지 유형이 존재한다. 첫 번째는 에디 전류 손실(eddy current loss)이다. 외부 자기장이 자성 소재에 인가될 때 소재 내부에 유도되는 순환 전류, 즉 에디 전류에 의해 발생한다. 이 전류는 입사 자기장과 반대 방향의 자기장을 형성하며, 이 과정에서 열이 발생하여 전자파 에너지가 감쇠된다. 에디 전류 손실은 주로 S 대역(2~4 GHz)에서 Ku 대역(12.4~18 GHz) 사이에서 주로 발생된다.<sup>1,2</sup> 두 번째는 히스테리시스 손실(hysteresis loss)이다. 진동하는 자기장에 자성 소재가 노출되었을 때, 자성 소재 내부의 자기 모멘트(magnetic moment)가 재정렬을 하게 된다. 이 재배열 과정에서 전자파의 에너지가 열 에너지로 전환되어 감쇠가 일어난다.<sup>1</sup>

일반적으로 차폐재의 두께가 증가하면 전자파가 차폐재 내부의 유전체 또는 자성체와 상호작용할 수 있는 기회가 많아지기 때문에 전자파 흡수율 또한 증가하는 경향이 있다.

### 2.2.3 다중 반사

다중 반사는 차폐재 두께가 표피 깊이(skin depth)보다 얇을 경우 발생하는 메커니즘이다. 표피 깊이란, 전자파가 도전성 소재 내부로 침투했을 때 에너지가 초기의  $1/e$ (약 37%) 수준으로 감쇠되는 깊이를 말한다. 다중 반사는 입사된 전자파가 차폐재 표면을 통과한 후 내부에서 여러 차례 반사를 일으키는 현상이다. 이 과정에서 일부 전자파는 다시 표면으로

반사되거나 차폐재를 그대로 투과하게 되며, 결과적으로 전자파의 투과량을 증가시켜 전자기 간섭 차폐 효율을 저하시킬 수 있다.<sup>1</sup>

간혹, 다중 반사는 다중 내부 산란/반사(multiple internal scattering/reflection)와 혼동되기도 한다. 그러나 두 현상은 메커니즘과 효과 면에서 본질적으로 다르다. 다중 내부 산란은 차폐재 내부의 미세 구조나 계면 설계에 의해 침투한 전자파의 경로가 길어지면서, 전자파가 여러 계면에서 반복적으로 반사되고 산란되는 현상이다. 예를 들어, 도전성 충전재가 정렬된 복합재는 내부 계면의 수를 증가시켜, 각 계면에서 공기와의 임피던스 불일치로 인해 전자파가 연속적으로 반사된다. 이 과정에서 전자파는 전기 및 자기 쌍극자와의 상호작용 기회가 많아지며, 유전 및 자성 손실 메커니즘을 통해 열 에너지로 변환되어 효과적으로 흡수된다.<sup>1-3</sup>

결론적으로, 다중 반사는 전자파의 투과를 증가시켜 차폐 효율을 저하시키는 반면, 다중 내부 산란은 전자파의 경로를 길게 하여 흡수를 증가시키고 투과를 감소시키는 역할을 한다.

## 2.3 전자기 간섭 차폐 효율 분석 장비

현재 전자기 간섭 차폐 효율을 분석하기 위해 일반적으로 회로 분석기(network analyzer)가 사용된다. 회로 분석기는 측정 방식에 따라 스칼라 회로 분석기(scalar network analyzer)와 벡터 회로 분석기(vector network analyzer)로 구분된다. 본 절에서는 각 회로 분석기의 주요 특징에 대해 간략히 살펴보고자 한다.

### 2.3.1 스칼라 회로 분석기

스칼라 회로 분석기는 전기적 신호의 강도를 기반으로 전자파 차폐 효율을 측정하는 장비이다. 그러나 유전율, 투자율과 같은 복소수 기반의 전자기 파라미터는 측정할 수 없다는 한계가 있다.<sup>1</sup>

### 2.3.2 벡터 회로 분석기

벡터 회로 분석기는 현재 전자파 차폐 효율 분석에 있어 가장 널리 사용되는 장비이다. 스칼라 회로 분석기와 달리 유전율과 투자율 측정이 가능하다는 부분과, 교정 방법이 간단하다는 장점이 존재한다. 또한, 광범위한 주파수 대역에 걸쳐 측정이 가능하다.<sup>1</sup>

## 2.4 전자기 간섭 차폐 효율 측정 방법

본 절에서는 전자기 간섭 차폐 효율을 측정하는 방법(그림 3)과 각 방법의 특징에 대해 논의하고자 한다.

### 2.4.1 자유 공간(Free space)법

자유 공간법(그림 3a)은 평판형 차폐재로부터 일정 거리만큼

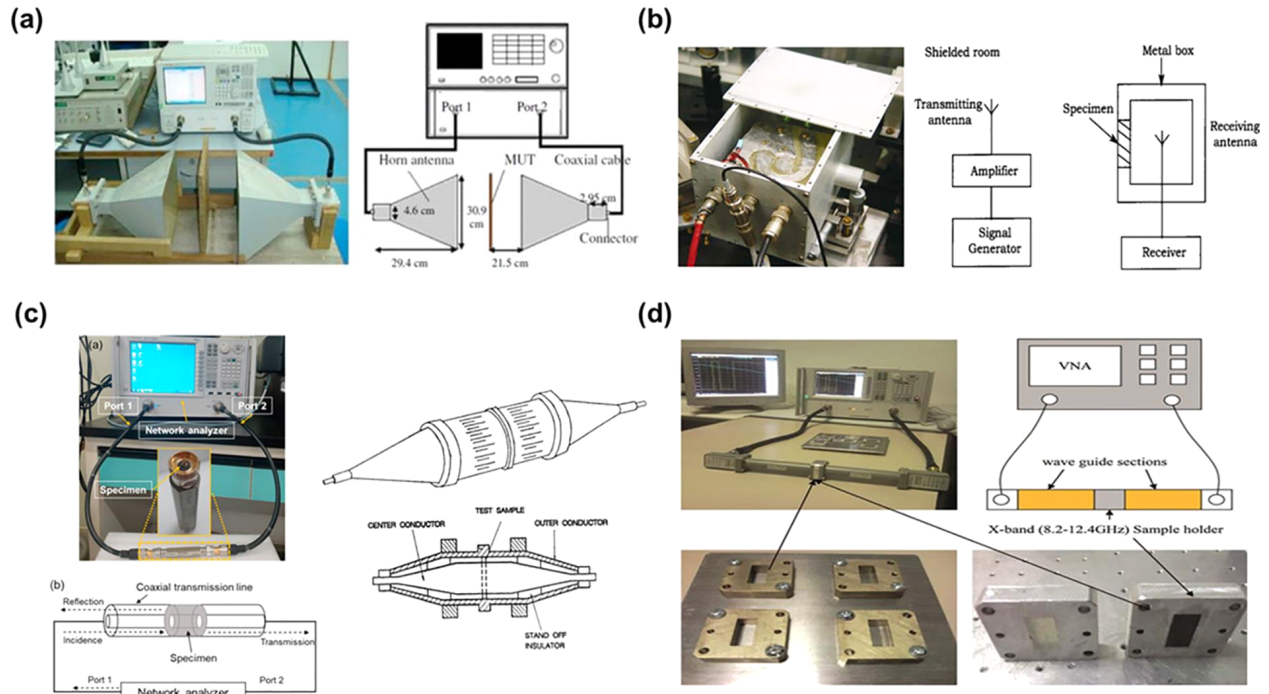


그림 3. 각 전자기 간섭 차폐 효율 분석법에 따른 장비와 모식도. (a) 자유 공간법.<sup>11</sup> (b) 차폐 상자법.<sup>10,12</sup> (c) 동축관 전송선법.<sup>10,14</sup> (d) 도파관법.<sup>15</sup>

떨어진 위치에 송신 및 수신 안테나를 배치하여,  $S$  매개변수를 측정하는 방식이다. 각 안테나는 RF(radio frequency) 케이블을 통해 벡터 회로 분석기에 연결된다. 이 방법은 주로 완제품의 차폐재가 실제 사용 환경에서 어느 정도의 차폐 성능을 나타내는지를 평가하는 데 주로 활용된다.<sup>2,10</sup> 다양한 종류의 시편을 측정할 수 있으며, 광범위한 대역에 걸쳐 측정이 가능한 장점이 있다. 그러나 가로 세로 길이가 각각 10 cm 이상인 시편을 요구하므로, 시편 준비가 까다롭다는 단점도 존재한다.

#### 2.4.2 차폐 상자(Shielded box)법

차폐 상자(그림 3b)는 샘플 단자가 있는 한 면을 제외한 나머지 면이 밀폐된 구조의 상자이다. 상자 내부에는 수신 안테나, 외부에는 송신 안테나가 각각 배치된다. 송신 안테나에서 신호를 보내면 차폐재를 거친 신호가 상자 내부의 수신 안테나에 도달하고 신호 세기를 비율로 계산해 차폐 효율을 도출하게 된다. 이 방식은 광대한 대역에서 측정이 가능한 자유 공간법과 달리 500 MHz 이하의 주파수 대역에서만 측정이 가능하다.<sup>2,10</sup> 또한, 시편의 크기나 측정 환경에 따라 결과가 달라질 수 있어 재현성이 떨어지는 단점이 있다. 재현성을 확보하기 위해서는 정밀한 가공을 통해 시편의 크기와 형상을 동일하게 제작하는 것이 필요하다.<sup>2,10</sup>

#### 2.4.3 동축관 전송선(Coaxial transmission line)법

동축관 전송선법(그림 3c)은 가장 널리 알려진 전자기

간섭 차폐 효율 측정 방법 중 하나이다. 이 방법은 동축관 사이에 환형의 시편을 삽입한 후 측정하는 방식이다. 특히, 미국재료시험학회(ASTM)에서 공식적으로 규정한 표준 시험법(ASTM D4935)에 기반하고 있어, 다양한 재료의 차폐 성능을 정량적으로 평가할 수 있다.<sup>13</sup>

이 방법은 차폐 상자법과 달리 30 MHz에서 1.5 GHz에 이르는 비교적 넓은 주파수 대역에서 높은 재현성(reproducibility)을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 환형 시편의 정밀한 제작이 요구되며, 측정 시 동축관과의 완전한 접촉이 이루어져야만 정확한 결과를 얻을 수 있다는 점에서 시편 준비가 까다롭다는 단점이 있다.<sup>2,10</sup>

#### 2.4.4 도파관(Waveguide)법

도파관법(그림 3d)은 현재 많은 실험실 및 산업체에서 가장 널리 사용되는 방법이다. 이 방법은 직사각형 모양의 도파관을 사용하며, 송신된 전자기파가 도파관 내부에 삽입된 시편을 통과하여 수신기로 전달되는 원리를 기반으로 한다. 도파관법을 통해  $S$  매개변수 데이터를 얻을 수 있으며, 이에 대한 구체적인 계산 방법은 다음 장에서 다룰 예정이다. 이 방법은 광범위한 주파수 대역에서 측정이 가능하며, 측정 주파수에 따라 도파관의 형태와 시편 크기가 달라지는 특징을 가진다. 일반적으로 주파수가 높아질수록 시편의 크기는 작아진다. 측정이 주로 이루어지는 주파수 대역별 시편 규격은 표 1에 정리하였다.

표 1. 주파수 대역에 따른 시편의 규격.<sup>16</sup>

| Frequency band  | Sample size<br>(width × length, mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|---------------------------------------------------|
| X(8.2~12.4 GHz) | 22.86 × 10.16                                     |
| Ku(12.4~18 GHz) | 15.80 × 7.90                                      |
| K(18~26.5 GHz)  | 10.67 × 4.32                                      |
| Ka(26.5~40 GHz) | 7.11 × 3.56                                       |
| W(75~110 GHz)   | 2.54 × 1.27                                       |

## 2.5 전자기 간섭 차폐 효율 계산

현재 대부분의 전자기 간섭 차폐 효율은 도파관법을 사용해 측정된 S 매개변수를 기반으로 계산된다. S 매개변수는 실수부(real part)와 허수부(imaginary part)로 구성된 복소수 형태이며, 수신기에서의 입력 및 출력 전압의 비뿐만 아니라 신호 간의 위상 차이까지 포함하는 파라미터이다.

본 절에서는 S 매개변수를 이용해 전력계수(power coefficient)를 계산하는 방법을 살펴본다. 이어서, 이를 바탕으로 전자파 차폐 효율을 산출하는 방법과, 다양한 수식을 이용한 차폐 효율 분석 방법에 대해 논의하고자 한다.

### 2.5.1 S 매개변수를 활용한 전력계수 계산

S 매개변수는 특정 포트(수신기)에서 입력된 신호가 각 포트에 전달될 때의 전압 비율을 나타내는 파라미터이다. 예를 들어, S<sub>11</sub>은 포트 1에서 입력된 신호가 차폐 소재에 의해 반사되어 다시 포트 1로 되돌아온 신호의 전압 비를 의미한다. 반면, S<sub>21</sub>은 포트 1에서 입력된 전자파가 차폐재를 통과하여 포트 2에 도달한 경우의 전압 비를 나타낸다. 즉, S<sub>11</sub>은 반사 계수(reflection coefficient), S<sub>21</sub>은 투과계수(transmission coefficient)에 해당하며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} S_{11}: & \text{포트1} \rightarrow \text{포트1} \\ S_{21}: & \text{포트1} \rightarrow \text{포트2} \end{aligned}$$

반사에 관한 S<sub>11</sub>, 투과에 관한 S<sub>21</sub> 매개변수는 다음 식에 의해 표현된다.

$$\begin{aligned} S_{11} &= \sqrt{(S_{11} \text{ 실수부})^2 + (S_{11} \text{ 허수부})^2} \\ S_{21} &= \sqrt{(S_{21} \text{ 실수부})^2 + (S_{21} \text{ 허수부})^2} \end{aligned}$$

계산된 S 매개변수를 활용하면 전자파의 반사, 흡수, 투과에 대한 전력계수를 도출할 수 있다. 반사에 대한 전력계수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$R = \frac{P_R}{P_I} = S_{11}^2 = S_{22}^2$$

반사에 대한 전력계수는 입력 신호의 세기(P<sub>I</sub>)에 대한 반사된 신호의 세기(P<sub>R</sub>)의 비로 정의된다. 일반적으로 차폐재 표면이 균일한 경우, S<sub>11</sub>과 S<sub>22</sub>의 제곱 값은 동일하게 된다.<sup>1</sup> 다음으로, 투과에 관한 전력계수는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$T = \frac{P_T}{P_I} = S_{21}^2 = S_{12}^2$$

투과에 대한 전력계수는 입력된 신호 세기(P<sub>I</sub>)에 대한 투과된 신호의 세기(P<sub>T</sub>)의 비로 정의된다. 마찬가지로, 차폐재 표면이 균일한 경우, S<sub>21</sub>과 S<sub>12</sub>의 제곱 값은 동일하게 된다. 반사와 투과 되지 않은 나머지 전자파는 차폐재 내부에서 흡수된 것으로 간주할 수 있다. 따라서, 흡수에 대한 전력계수는 단순히 반사 및 투과 계수를 1에서 뺀 값으로, 다음과 같이 표현된다.

$$A = 1 - R - T$$

### 2.5.2 전력계수를 이용한 차폐 효율 계산

각 전력계수는 반사와 흡수에 의한 차폐 효율을 계산할 때 사용할 수 있다. 일반적으로 차폐 효율은 로그 스케일로 표현되며, 단위는 데시벨(dB)을 사용한다. 반사에 의한 차폐 효율(SE<sub>R</sub>)은 다음과 같은 식으로 정의된다.<sup>1,2</sup>

$$SE_R = -10 \log(1 - R)$$

흡수에 의한 차폐 효율(SE<sub>A</sub>)은 다음과 같은 식을 사용해 표현된다.<sup>1,2</sup>

$$SE_A = -10 \log\left(\frac{T}{1 - R}\right)$$

총 차폐 효율은 반사와 흡수 그리고 다중반사에 의한 차폐 효율을 모두 더한 값으로, 다음과 같은 식으로 계산된다.<sup>1,2</sup>

$$SE_T = SE_R + SE_A + SE_M$$

다중반사에 의한 차폐 효율(SE<sub>M</sub>)은 차폐재 두께가 표피 깊이보다 얇은 경우에 한해 고려되는 특수한 항목이다. 그러나, 일반적으로 총 차폐 효율이 15 dB 이상인 경우, 다중 반사의 기여는 매우 작아져 무시할 수 있으며, 이때 총 차폐 효율은 다음과 같이 간단히 표현된다.<sup>1,17</sup>

$$SE_T = SE_R + SE_A = 10 \log\left(\frac{1}{T}\right)$$

만약 SE<sub>T</sub>값이 특정 주파수 대역에서 10 dB이라면, 전체

전자파의 90%를 차폐했다는 의미가 된다. 또한, 20 dB의  $SE_T$  값은 전체 전자파의 99%를 차폐했다는 의미가 된다.

차폐재가 고전도성 소재일 경우, 차폐 효율은 Simon과 Fresnel이 제안한 식을 적용해 근사할 수 있다.<sup>2,17</sup> Simon이 제안한 식은 총 차폐 효율에 대한 식을 나타낸 것으로 다음과 같이 표현된다.

$$SE_T = 50 + 10 \log \frac{\sigma}{f} + 1.7t\sqrt{\sigma f}$$

여기서  $\sigma$ 는 차폐재의 전기 전도도,  $f$ 는 주파수,  $t$ 는 차폐재의 두께를 의미한다.

Fresnel이 제안한 식은 반사에 대한 차폐 효율을 근사할 때 사용할 수 있으며 다음과 같이 나타낸다.<sup>2,17</sup>

$$SE_R = 39.5 + 10 \log \frac{\sigma}{2\pi\mu f}$$

여기서  $\mu$ 는 소재의 투자율이다. 반사는 공기와 차폐재 표면 사이의 임피던스 불일치로 인해 발생하는 주요 차폐 메커니즘 중 하나이다. 이 임피던스 불일치는 차폐재의 전기 전도도가 높아질수록 커지며, 그 결과 입사된 전자파는 차폐재 표면에서 더욱 강하게 반사된다. 또한, Fresnel 방정식에서도 소재의 전기 전도도가 증가할수록 반사 계수가 커지고, 이에 따라 반사에 의한 차폐 효율이 향상된다고 설명되어 있다.

## 2.6 전자기 간섭 차폐 효율의 올바른 해석

간혹 일부 논문에서는 전자기 간섭 차폐 효율에 대한 잘못된 해석이 나타나고 있다. 예를 들어, 어떤 소재가  $SE_R$  10 dB,  $SE_A$  30 dB를 갖는다고 가정할 때, 총 차폐 효율  $SE_T = SE_R + SE_A = 40$  dB로 계산된다. 이때 반사에 의한 차폐 비율을 10 dB/40 dB인 0.25로, 흡수에 의한 차폐 비율은 30 dB/40 dB인 0.75로 단순 비례하여 해석하는 경우가 있는데, 이는 전적으로 잘못된 접근이다.

정확한 해석을 위해서는 전자기 간섭 차폐 메커니즘에 대한 선행 이해가 필수적이다. 앞서 설명한 바와 같이, 반사는 1차 차폐 메커니즘으로서, 입사된 전자파가 차폐재 표면에서 공기와 임피던스 불일치에 의해 먼저 반사된다.  $SE_R$  값이 10 dB인 경우, 이는 입사된 전자파의 약 90%가 반사에 의해 차폐되었음을 의미한다.

이어지는 흡수는 2차 차폐 메커니즘으로, 반사되지 않고 차폐재 내부로 침투한 나머지 10%의 전자파가 손실 메커니즘에 의해 소멸된다.  $SE_A$ 가 30 dB일 경우, 이 침투된 10% 중 약 99.9%가 흡수되며, 결국 전체 입사파의 약 0.01%만이 투과되는 것이다. 따라서,  $SE_R$ 과  $SE_A$  값을 단순히 총합 대비 비율로 해석하는 방식은 오류이며, 각 손실 메커니즘의 물리적 순서와

소력 계수에 기반한 정량적 이해가 선행되어야 한다.

정확한 차폐 효율 해석과 활용을 위해서는 이러한 메커니즘에 대한 올바른 개념적 이해가 무엇보다 중요하다.

## 3. 결론

전자부품 및 통신 기술의 발전으로 인해 전자기기의 소형화와 고성능화가 빠르게 진행되고 있는 가운데, 전자기 간섭(EMI) 차폐의 중요성은 더욱 부각되고 있다. 지금까지 다양한 차폐 소재에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 앞으로도 새로운 요구에 대응하기 위한 연구가 지속될 것으로 보인다.

최근에는 반사 중심의 차폐보다 흡수 성능을 강화한 차폐 소재의 설계에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 특히, 얇은 두께를 유지하면서도 우수한 흡수 차폐 효율을 구현할 수 있는 신규 소재 개발과 효율적인 구조 설계가 활발히 이루어지고 있는 추세이다.

이러한 흡수 중심의 차폐 소재를 효과적으로 설계하기 위해서는, 우선 전자기 간섭 차폐 메커니즘에 대한 정확한 이해가 선행되어야 한다. 또한, 다양한 손실 메커니즘(반사, 흡수, 다중 반사 등)에 대한 이론적 기반을 바탕으로, 소재 물성에 대한 이해와 구조 설계가 병행되어야만 실질적인 성능 향상을 이끌어낼 수 있다.

결론적으로, 전자기 간섭 차폐재는 고집적 전자기기에서의 기능 안정성을 확보하기 위한 핵심 소재이며, 차폐 메커니즘에 대한 정확한 이해는 우수한 차폐 성능을 구현하기 위한 설계의 필수적 기반이 될 것이다.

## 참고문헌

1. A. A. Isari, A. Ghaffarkhah, S. A. Hashemi, S. Wuttke, and M. Arjmand, *Adv. Mater.*, **36**, 2310683 (2024).
2. C. M. Koo, P. Sambyal, A. Iqbal, F. Shahzad, and J. Hong, *Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Shielding*, John Wiley & Sons (2021).
3. G. M. Mamatha, R. Pradipkumar Dixit, Hari Krishna, Girish Kumar S, *Hybrid Adv.*, **6**, 100200 (2024).
4. S. H. Ryu, Y. K. Han, S. J. Kwon, T. Kim, B. M. Jung, S.-B. Lee, and B. Park, *Chem. Eng. J.*, **428**, 131167 (2022).
5. ITU-R Radio Regulation Chap.1, Article 2, "Nomenclature of Frequency and Wavelength Bands" (2016).
6. "IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands," in *IEEE Std 521-2019 (Revision of IEEE Std 521-2002)* (2020).
7. F. Kamutzki, S. Schneider, J. Barowski, A. Gurlo, and D. A. H. Hanaor, *J. Eur. Ceramic Soc.*, **41**, 3879 (2021).
8. S. Zheng, Y. Wang, Y. Zhu, and C. Zheng, *Polym Compos.*, **45**, 43 (2024).

9. S. Zecchi, G. Cristoforo, M. Bartoli, A. Tagliaferro, D. Torsello, C. Rosso, M. Boccaccio, and F. Acerra, *Micromachines*, **15**, 187 (2024).
10. S. Geetha, K. K. Satheesh Kumar, C. R. K. Rao, M. Vijayan, and D. C. Trivedi, *J. Appl. Polym. Sci.*, **112**, 2073 (2009).
11. R. Sivakumar, S. N. Azemi, L. Y. Seng, K. Y. You, and P. J. Soh, *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, **56**, 55 (2024).
12. A. K. Sharma, K. K. Mishra, and M. Raghuramaiah, *Sadhana*, **32**, 235 (2007).
13. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials, ASTM D4935-18, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
14. D. Jang, H. N. Yoon, J. Seo, H. J. Cho, G. M. Kim, Y.-K. Kim, and B. Yang, *J. Mater. Res. Technol.*, **18**, 1256 (2022).
15. S. Thomas, R. Thomas, A. K. Zachariah, and R. K. Mishra, (Eds.), *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*, Elsevier, 2 (2017).
16. "Waveguide Sizes", EverythingRF, <https://www.everythingrf.com/tech-resources/waveguides-sizes>.
17. J. Hong, J. Kwon, D. Im, J. Ko, C. Y. Nam, H. G. Yang, S. H. Shin, S. M. Hong, S. S. Hwang, H. G. Yoon, and A. S. Lee, *Chem. Eng. J.*, **455**, 140528 (2023).