

직사각형 도파관을 이용한 평판형 소재의 차폐효과 계산

Shielding Effectiveness Calculation of Planar Materials Using Rectangular Waveguides

박 현 호¹ · 권 종 화^{2*} · 형 창 희^{3*}

Hyun Ho Park¹ · Jong Hwa Kwon^{2*} · Chang Hee Hyoung^{3*}

요 약

본 논문에서는 평판형 소재의 평면파 수직입사 조건에서 유도된 차폐효과(SE, shielding effectiveness) 이론식에 TE10 모드의 파동임피던스와 전파상수를 대입하여 직사각형 도파관을 이용한 평판형 소재의 SE를 이론적으로 해석하였다. 유도된 수식을 이용하여 도전성, 유전 및 자성 흡수 소재들에 대해 직사각형 도파관을 이용한 TE10 모드 입사조건에서의 SE와 TEM 모드인 평면파가 입사할 때의 SE를 비교하였고, 그 차이를 분석하였다. 또한 3차원 수치해석을 통해 그 결과의 정확성을 확인하였다.

Abstract

This study theoretically analyzes the shielding effectiveness (SE) of planar materials when using a rectangular waveguide by simply substituting the wave impedance and propagation constant of the TE10 mode into the theoretical SE equation of a planar material under a normal incident plane wave. Using the derived equation, the SE for the TE10 mode incident using a rectangular waveguide and the SE for the plane wave of the TEM mode were compared for conductive, dielectric, and magnetic materials, with their differences addressed. In addition, the accuracy of the analytical results was validated using 3D numerical simulation results.

Key words: Planar Materials, Rectangular Waveguide, Shielding Effectiveness

I. 서 론

평판형 소재의 전자파 차폐효과(SE)를 측정할 때 ASTM D4935 또는 ES7 지그(jig)를 널리 사용한다^[1]. 이들은 모두 동축선로 구조를 사용하여 수직 입사하는 평면파(TEM모드)에 의한 소재의 차폐특성을 측정하는 방법들이다. ASTM D4935 표준 방법의 경우 1.5 GHz까지 SE

를 측정할 수 있다. 하지만 수 GHz 이상의 주파수 대역에서 SE를 측정하기 위해서는 동축선로의 크기가 작아져야 하는데, 작은 시료의 장착 오차로 인해 측정에 어려움이 발생한다. 그 대안으로 사용되는 것이 직사각형 도파관을 이용한 SE 측정 방법이다. 직사각형 도파관은 가장 낮은 모드인 TE10 모드가 입사하는 조건에서 소재의 SE를 측정하는 방법이다. 그러나 아직까지 동축선로를 이용한

「이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020-0-00917 저비용 EMP 경량 방호 소재·부품·장치 및 시설 취약성 평가 핵심기술 개발)」

수원대학교 전기전자공학부(School of Electric & Electronic Engineering, The University of Suwon)

*한국전자통신연구원 전파연구본부(Radio Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute)

1: 교수(<https://orcid.org/0000-0001-8518-1151>), 2: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-2132-7403>), 3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-9012-2217>)

· Manuscript received April 1, 2024 ; Revised April 9, 2024 ; Accepted April 18, 2024. (ID No. 20240401-032)

· Corresponding Author: Hyun Ho Park (e-mail: hhpark@suwon.ac.kr)

TEM 모드에서의 SE 특성과 도파관을 이용한 TE10 모드에서 SE 특성이 어떤 관계를 가지는지를 구체적으로 설명하고 있는 연구 사례는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 평판형 소재의 평면파(TEM 모드) 수직 입사 조건에서 얻은 SE 이론식에 TE10 모드의 파동임피던스와 전파상수를 간단히 대입하여 직사각형 도파관을 이용했을 때의 평판형 소재의 SE를 이론적으로 해석하였다. 이러한 방법은 도파관을 이용하여 측정된 SE를 통해 소재의 전도율을 추출하는 연구에서 사용된바 있다^[2]. 하지만 평면파 SE와 TE10 모드 입사조건에서의 SE의 차이를 분석하지는 않았다. 본 연구에서는 도전성, 유전 및 자성 흡수 소재들에 대해 직사각형 도파관을 이용한 SE와 평면파 SE를 비교하였고, 그 차이를 분석하였다. 또한 3차원 수치해석을 통해 그 결과의 정확성을 검증하였다.

II. 직사각형 도파관을 이용한 차폐효과 계산

그림 1에서는 수직입사 평면파에 대한 평판형 소재의 SE 원리와 ASTM E57 동축선로 지그를 이용한 측정 방법을 도시하였다. 그림 1(a)에서 보듯이 소재의 SE는 η_0 와 η 의 차이에 의한 반사손실과 소재 내 복소 전파상수인 γ 에 의한 흡수손실에 의해서 결정된다. 그림 1(a)에서 보듯이 소재의 경계면에서 경계조건을 적용하면 투과율

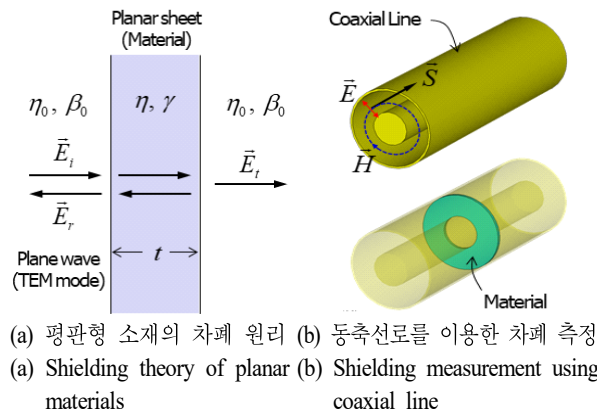


그림 1. 수직입사하는 평면파에 대한 평판형 소재의 차폐효과 원리와 측정 방법

Fig. 1. Principle and measurement method of shielding effectiveness of planar materials for normal incident plane wave.

(T)과 SE를 다음과 같이 얻을 수 있다^[3].

$$T = \left| \frac{\vec{E}_t}{\vec{E}_i} \right|^2 = \left| \frac{(1-\rho^2)e^{-\gamma t}}{1-\rho^2e^{-2\gamma t}} \right|^2, \quad (1)$$

$$SE = 10 \log_{10}(1/T). \quad (2)$$

여기서 $\rho = (\eta - \eta_0) / (\eta + \eta_0)$ 는 소재 입사면에서의 반사계수이고, $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, $\eta = \sqrt{j\omega\mu/(\sigma + j\omega\epsilon)}$, $\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$ 이다. ϵ_0 과 μ_0 는 각각 공기의 유전율과 투자율이며, σ 는 소재의 전도도, ϵ 과 μ 는 각각 소재의 유전율과 투자율로 본 논문에서 사용된 소재의 비유전율과 투자율이 참고문헌 [3]에 나타나 있다. 식 (1) 및 식 (2)를 통해 수직입사 평면파에 대한 소재의 SE를 계산할 수 있다.

그림 2에서는 내부 크기가 $a \times b$ 인 직사각형 도파관 내 TE10 모드에 대한 SE 측정 방법을 보여준다. 이때 도파관 내 공기와 소재에서의 파동임피던스와 전파상수는 $\eta_0 = \omega\mu_0/\sqrt{k_0^2 - k_c^2}$, $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, $k_c = \pi/a$, $\eta = j\omega\mu/\gamma$, $\gamma = \sqrt{k_c^2 - k^2 + j\omega\mu\sigma}$, $k = k_0\sqrt{\mu_r\epsilon_r}$ 이다. 이들을 반사계수 ρ 와 식 (1) 및 식 (2)에 대입하면 직사각형 도파관의 TE10 모드에 대한 소재의 SE가 계산된다. 이것은 연속적인 직사각형 도파관 내에 측정하고자 하는 평판형 소재가 삽입된 구조의 이론적인 계산 방법임을 주지해야 한다. 그러나 그림 2(b)에서 보듯이 실제 SE 측정 시에는 플

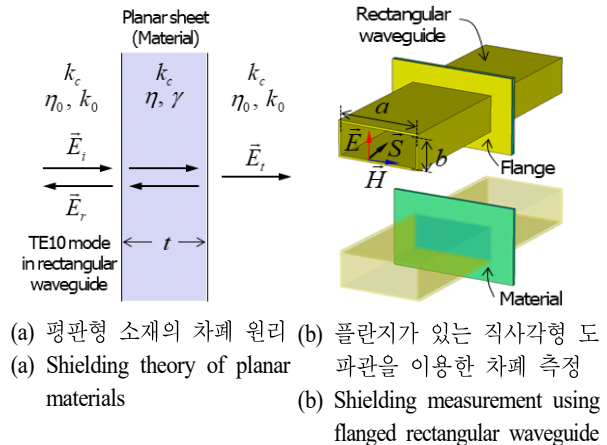


그림 2. 직사각형 도파관 내 TE10 모드에 대한 평판형 소재의 차폐효과 원리와 측정 방법

Fig. 2. Principle and measurement method of shielding effectiveness of planar materials for TE10 mode in rectangular waveguide.

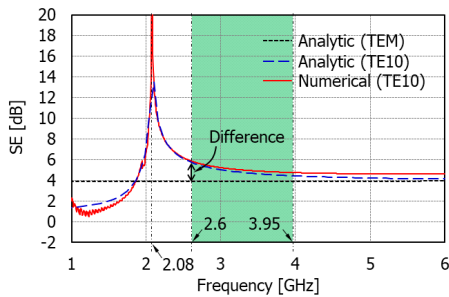
란지(flange)를 갖는 두 직사각형 도파관 사이에 소재를 삽입하여 측정하게 된다. 그래서 3차원 수치해석을 통해 플란지 도파관 구조를 이용한 소재의 SE를 함께 분석하고, 해석적인 계산 결과와 비교 검증하였다.

III. 해석 결과 및 검증

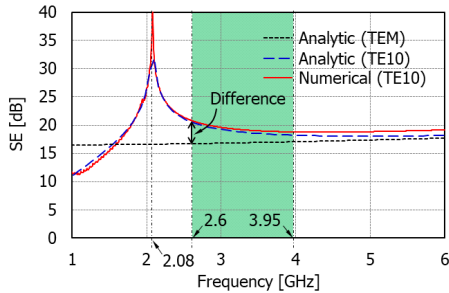
그림 3에서는 전도도가 크지 않은 2종의 도전성 소재에 대해 평면파(TEM 모드)와 직사각형 도파관(TE10 모드)을 이용하여 계산한 SE를 비교하였다. 계산에서 사용한 도파관은 S-band용 WR284로 내부 단면의 크기가 72.14 mm×34.04 mm이며, TE10 모드가 발생하기 시작하는 차단(cutoff) 주파수(f_c)는 2.08 GHz이며, 그 다음으로 발생하는 TE20 모드의 차단 주파수는 4.16 GHz이다. 그래서 TE10 모드만 존재하는 동작 주파수의 범위는 2.6 GHz ($1.25 \times f_c$)에서 3.95 GHz ($1.9 \times f_c$)이다^[4]. 분석에 사용된 소재의 두께는 3 mm이다. 해석적인(analytic) 계산 결과의 정확도를 검증하기 위해서 CST Microwave Studio(MWS)^[5]

를 이용하여 수치해석(numerical) 결과를 얻어 비교하였다. 그림 3에서 보면 도전성 소재의 평면파와 SE에 비해 TE10 모드에 의한 SE가 더 높음을 알 수 있다. 2.6 GHz에서 $\sigma=1$ S/m와 $\sigma=10$ S/m인 도전성 소재는 평면파(원역장) SE 값에 비해 각각 약 45 %와 22 %의 차이를 보인다. 주파수가 증가하면 오차가 감소하고 평면파 SE 값에 수렴한다. 하지만 동작 주파수 범위에서는 도파관에 의한 TE10 모드의 SE가 평면파인 TEM 모드의 SE보다 높다는 것을 알 수 있다.

그림 4에서는 2종의 유전 흡수 소재들에 대해 평면파와 직사각형 도파관을 이용하여 계산한 SE를 비교하였다. 유전 흡수 소재로는 Laird사의 Eccosorb LS22와 LS26 모델을 사용하였는데^[6], 이들의 복소 유전율은 CST MWS에서 제공한 값을 이용하였다. 유전 흡수 소재의 경우 도전성 소재와 유사하게 TE10 모드의 차단 주파수에서 아주 큰 SE를 갖다가 주파수가 증가할수록 점점 감소하여 평면파의 SE 값으로 수렴한다. 이는 차단 주파수에서 도파관 내 공기의 임피던스(η_0)가 급격히 변화하고 유전 흡

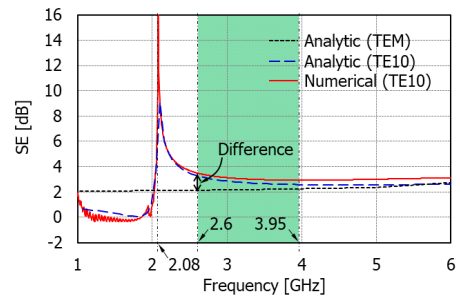


(a) $\sigma = 1$ S/m인 도전성 소재의 차폐효과
(a) SE of conductive material with $\sigma = 1$ S/m

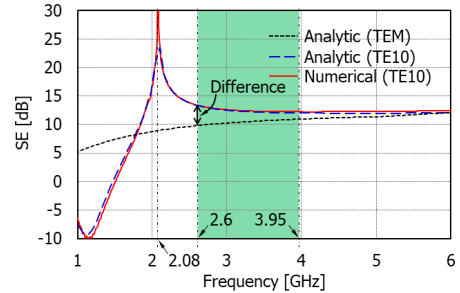


(b) $\sigma = 10$ S/m인 도전성 소재의 차폐효과
(b) SE of conductive material with $\sigma = 10$ S/m

그림 3. 도전성 소재들의 차폐효과 비교
Fig. 3. Comparison of SEs of conductive materials.

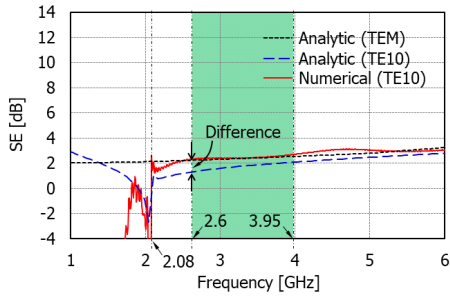


(a) 유전 흡수 소재 LS22의 차폐효과
(a) SE of dielectric absorbing material of LS22

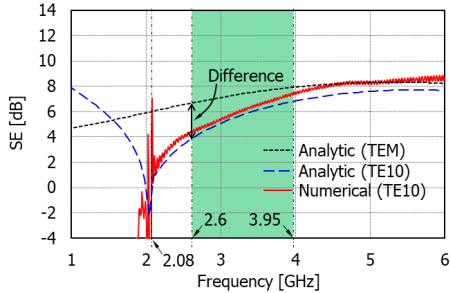


(b) 유전 흡수 소재 LS26의 차폐효과
(b) SE of dielectric absorbing material of LS26

그림 4. 유전 흡수 소재들의 차폐효과 비교
Fig. 4. Comparison of SEs of dielectric absorbing materials.



(a) 자성 흡수 소재 FS170의 차폐효과
(a) SE of magnetic absorbing material of FS170



(b) 자성 흡수 소재 FSA300의 차폐효과
(b) SE of magnetic absorbing material of FSA300

그림 5. 자성 흡수 소재들의 차폐효과 비교
Fig. 5. Comparison of SEs of magnetic absorbing materials.

수 소재의 임피던스(η)는 이보다 작기 때문이다. 결과적으로 TE10 모드만 존재하는 도파관의 동작 주파수 범위에서 평면파(원역장)의 SE보다 높은 값을 가지게 된다.

그림 5에서는 2종의 자성 흡수 소재들에 대해 평면파와 직사각형 도파관을 이용하여 계산한 SE를 비교하였다. 분석에 사용된 자성 흡수 소재는 DMEGC사의 FS170과 GSS사의 FSA300 모델을 사용하였으며^{[7],[8]}, 측정을 통해 복소 투자율을 추출하였다. 자성 흡수 소재의 경우에는 TE10 모드의 차단 주파수에서 아주 낮은 SE를 보이고, 주파수가 증가함에 따라 SE가 증가하여 평면파 SE값에 수렴한다. 이는 자성 흡수 소재의 임피던스(η)가 공기의 임피던스(η_0)보다 크기 때문이다. 결과적으로 직사각형 도파관을 이용하여 자성 흡수 소재의 SE를 측정할 경우에는 평면파(원역장) SE보다 낮은 값을 가짐을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 직사각형 도파관(TE10 모드)을 이용한

평판형 소재의 SE 특성을 이론적으로 해석하였다. 도전성, 유전 및 자성 흡수 소재의 SE를 계산하였고, 수직입사 평면파(TEM 모드)의 SE와 비교하였다. 수직입사 평면파의 SE에 비해 도전성 및 유전 흡수 소재의 경우 더 높은 값을, 자성 흡수 소재의 경우는 더 낮은 값을 가졌다. 이는 도파관을 이용한 소재의 SE 측정시 유의해야 할 부분이다. 또한 3차원 수치해석을 통해 플란지가 있는 직사각형 도파관을 이용한 소재의 SE를 계산하였고, 해석적인 계산 결과와 비교하여 그 정확성을 확인하였다.

References

- [1] H. H. Park, "Electromagnetic shielding analysis of planar materials using ASTM D4935 standard fixture," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 64, no. 5, pp 1767-1778, Oct. 2022.
- [2] M. Rudd, T. C. Baum, and K. Ghorbani, "Determining high-frequency conductivity based on shielding effectiveness measurement using rectangular waveguides," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 1, pp. 155-162, Jan. 2020.
- [3] H. H. Park, J. H. Kwon, and C. H. Hyung, "Analytic comparison of reflection-based and transmission-based absorptances for planar materials," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 3, pp. 245-248, Mar. 2024.
- [4] M. Steer, "Fundamentals of microwave and RF design," in *Transmission Lines*, 3rd ed. Raleigh, NC, North Carolina State University, 2019.
- [5] Dassault Systems, "CST Studio Suite," 2020. Available: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite>
- [6] Laird, "EccosorbTM LS," 2023. Available: <https://www.laird.com>
- [7] DMEGC, "Magnetic capital of the world," 2024. Available: <https://www.chinadmegc.com>
- [8] GSS, "Global sourcing supplier for you. We are always with you," 2022. Available: <https://www.gsskorea.com>