THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2024 June; 35(6), 453～458.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.6.453
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

비스듬히 입사하는 평면파에 대한 평판형 손실 소재의 차폐 특성

Shielding Characteristics of Planar Lossy Materials for Obliquely Incident Plane Waves

남 규 현 · 박 현 호

Gyuhyeon Nam · Hyun Ho Park

요 약

본 논문에서는 비스듬히 입사하는 평면파에 대한 평판형 손실 소재의 차폐효과(shielding effectiveness, SE) 이론식을 유도하고, 유전 및 자성 흡수(손실) 소재들에 대한 차폐 특성을 분석하였다. 비스듬히 입사하는 평면파를 직각 편파와 평행 편파로 나누어 SE 이론식을 유도하였고, 다양한 입사각도에 대한 SE를 Schelkunoff의 분해법(decomposition)(반사, 흡수, 다중반사)을 이용하여 분석하였다. 또한 3차원 수치해석을 통해 그 결과의 경향성을 검증하였다.

Abstract

In this study, we derived a theoretical equation for the shielding effectiveness (SE) of planar lossy materials against obliquely incident plane waves and analyzed the shielding characteristics of dielectric and magnetic absorbing (lossy) materials. The SE equation was obtained by decomposing the obliquely incident plane wave into perpendicular and parallel polarizations, and the SEs for various incident angles were analyzed using Schelkunoff's decomposition method, which considers reflection, absorption, and multiple reflections. The trends observed in our analysis were validated through 3D numerical simulations.

Key words: Planar Lossy Materials, Obliquely Incidence, Shielding Effectiveness, Schelkunoff's Decomposition, Brewster Angle

Ⅰ. 서 론

평판형 소재의 원역장 전자파 차폐효과(SE)는 일반적으로 수직 입사 조건에서 많이 해석되고 측정도 이루어진다[1]~[3]. 2차원 평면상에 두 매질의 경계면이 형성되어 있는 경우, 그 경계면에 비스듬히 입사하는 평면파에 의한 반사와 투과 현상은 전기장이 평면(구조 단면)에 직각을 이루는 직각(perpendicular) 편파와 전기장이 평면상에 놓여 있는 평행(parallel) 편파로 나누어 해석한다[4]. 서로 다른 두 매질의 경계면에서 일어나는 반사 특성이 입사 편파에 따라 다르기 때문이다. 한편, 매질의 손실을 고려할 경우에는 매질 내로 입사된 전자파의 굴절각이 복소수가 되며, 이는 매질 내 전자파의 흡수 특성과 연관된다. 비스듬히 입사하는 평면파에 대해 소재의 차폐 특성을 해석할 때 3차원 수치해석 툴을 사용하는 경우, 유한한 해석 공간에서 소재에 의한 반사와 투과를 정확하게 해

「이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020-0-00839, 초연결 E-Vehicle 전력 및 신호 EMC 고도화 기술 개발).」

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

· Manuscript received April 24, 2024 ; Revised May 3, 2024 ; Accepted May 17, 2024. (ID No. 20240424-043)

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

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

석하려면 경계면에 흡수경계조건을 적용해야 하지만, 소재가 해석 경계면과 만나게 되면 이를 사용하는데 어려움이 발생하고, 이로 인해 정확한 결과를 얻기 힘들다[5]. 결론적으로 지금까지 비스듬히 입사하는 평면파에 대해 무한한 크기의 유한한 두께를 가지는 평판형 손실 소재의 차폐 특성을 분석한 사례는 많지 않았다[6].

본 논문에서는 직각 및 평행 편파를 갖는 비스듬히 입사하는 평편파에 대해 두께를 가지는 평판형 소재의 SE 이론식을 유도하고, 유전 및 자성 흡수 소재의 차폐 특성을 분석하였다. 입사 각도와 소재의 두께에 따른 각 소재의 차폐 특성을 Schelkunoff가 정의한 반사, 흡수, 그리고 다중반사손실의 영향으로 나누어 분석하였다.

Ⅱ. 비스듬히 입사하는 평면파에 대한 평판형 소재의 차폐효과 계산

수직으로 입사하는 평면파에 의한 소재의 투과율(T)은 소재의 경계면에서 경계조건을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다[3].

$$T=\left|\overrightarrow{E_t}/\overrightarrow{E_i}\right|^2=\left|(1-\rho^2)e^{-\gamma t}/(1-\rho^2e^{-2\gamma t})\right|^2 \quad (1)$$

여기서 $\rho=(\eta-\eta_0)/(\eta+\eta_0)$는 반사계수, $\eta_0=\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, $\eta=\sqrt{j\omega\mu/(\sigma+j\omega\epsilon)}$, $\beta_0=\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, $\gamma=\sqrt{j\omega\mu(\sigma+j\omega\epsilon)}$이며, $\omega=2\pi f$로 입사 평면파의 각주파수이다.

비스듬히 입사하는 평면파에 대한 소재의 투과율은 그림 1에서 보듯이 직각 및 평행 편파로 나누어 해석한다. 수직 입사의 경우와 동일한 방법으로 경계조건을 적용하면 다음과 같은 투과율을 얻을 수 있다.

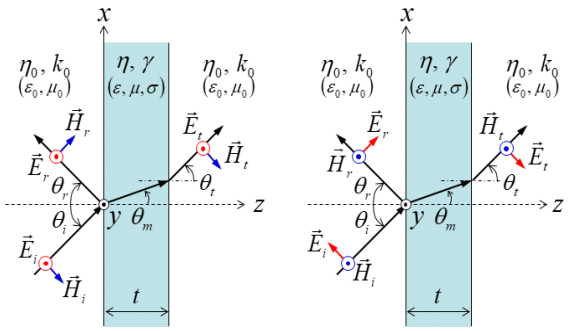
$$T=\left|(1-\rho_o^2)e^{-\gamma t\cos\theta_m}/(1-\rho_o^2e^{-2\gamma t\cos\theta_m})\right|^2. \quad (2)$$

여기서 ρ_o는 소재 입사면에서 비스듬히 입사하는 평편파의 반사계수로 표 1과 같이 직각 및 평행 편파에 대해 입사각(θ_i)과 소재 내에서의 굴절각(θ_m)의 함수로 나타난다.

결과적으로 비스듬히 입사하는 평면파에 대한 소재의 SE는 다음과 같이 정의된다.

$$SE=10\log_{10}(1/T)=SE_R+SE_A+SE_M. \quad (3)$$

여기서 $SE_R=-20\log_{10}\left|1-\rho_0^2\right|$, $SE_A=20\log_{10}\left|e^{\gamma t\cos\theta_m}\right|$,



(a) 직각 편파 (b) 평행 편파

(a) Perpendicular polarization (b) Parallel polarization

그림 1. 평판형 소재에 비스듬히 입사하는 평면파의 반사와 투과

Fig. 1. Reflection and transmission of plane waves obliquely incident on a planar material.

표 1. 비스듬히 입사하는 평면파의 반사계수[4]

Table 1. Reflection coefficients of obliquely incident waves[4].

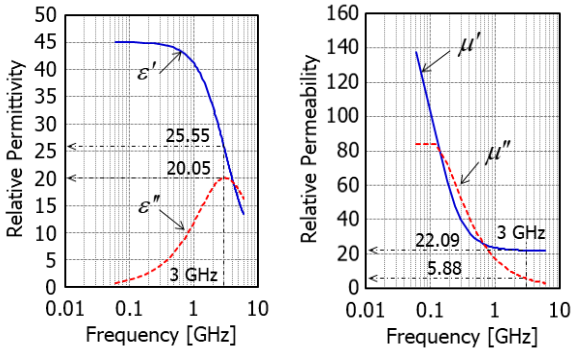
Polarizations	Reflection coefficient (ρ_o)
Perpendicular	$\dfrac{\eta\cos\theta_i-\eta_0\cos\theta_m}{\eta\cos\theta_i+\eta_0\cos\theta_m}$
Parallel	$\dfrac{\eta\cos\theta_m-\eta_0\cos\theta_i}{\eta\cos\theta_m+\eta_0\cos\theta_i}$

$SE_M=20\log_{10}\left|1-\rho^2e^{-2\gamma t\cos\theta_m}\right|$이며, 이는 Schelkunoff가 정의한 반사손실(SE_R), 흡수손실(SE_A), 그리고 다중반사손실(SE_M)에 해당된다[7].

Ⅲ. 분석 결과 및 검증

본 절에서 식 (2) 및 식 (3)을 이용하여 유전 및 자성 흡수 소재에 대한 SE를 분석하였다. 유전 소재는 Laird사의 Eccosorb LS26 모델을 사용하였고[8], CST MWS (Microwave Studio)[6]에서 주파수에 따른 복소 유전율을 제공한다. 자성 소재는 GSS사의 FSA300 모델을 사용하였고[9], 측정을 통해 복소 투자율을 추출하였다. 그림 2에서는 분석에 사용된 두 흡수 소재의 비유전율과 비투자율을 도시하였다.

그림 3에서는 45°로 입사하는 평면파에 의한 3 mm 두께의 유전 및 자성 흡수 소재들의 SE를 6 GHz까지 비교하였다. 유전 흡수 소재의 경우, 직각 편파가 평행 편파에



(a) 유전 소재의 비유전율 (b) 자성 소재의 비투자율
(a) Relative permittivity of dielectric material (LS26) (b) Relative permeability of dielectric material (FSA300)

그림 2. 유전 및 자성 손실 소재의 물성
Fig. 2. Material properties of dielectric and magnetic lossy materials.

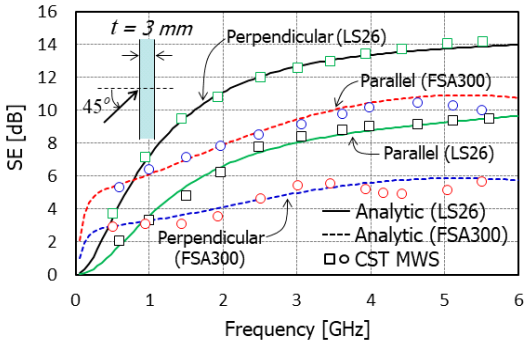


그림 3. 45°로 입사하는 평면파에 의한 유전 및 자성 흡수 소재들의 차폐효과 비교
Fig. 3. Comparison of SEs of dielectric and magnetic absorbing materials by plane wave incident at 45°.

비해 최대 4 dB 정도 높은 SE를 보인다. 반면, 자성 흡수 소재는 평행 편파가 직각 편파에 비해 더 높은 SE를 보인다. 유전 흡수 소재가 자성 흡수 소재에 비해 SE가 높으나, 1 GHz 이하의 낮은 주파수 대역에서는 자성 흡수 소재의 SE가 더 높게 나타난다. 이는 그림 2에서도 보듯이 저주파수 대역에서 자성 소재의 투자율이 유전 소재의 유전율보다 높기 때문이다. 한편, 해석적인 해의 정확도를 검증하기 위해서 CST MWS를 이용하여 유전 및 자성 소재의 SE를 계산하여 비교하였고, 직각 편파와 평행 편파에서 모두 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 4에서는 입사 각도에 따른 3 mm 두께의 유전 및

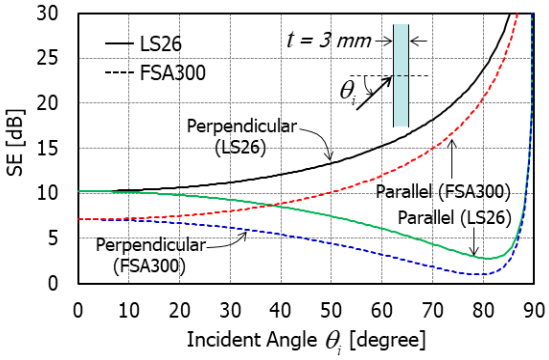
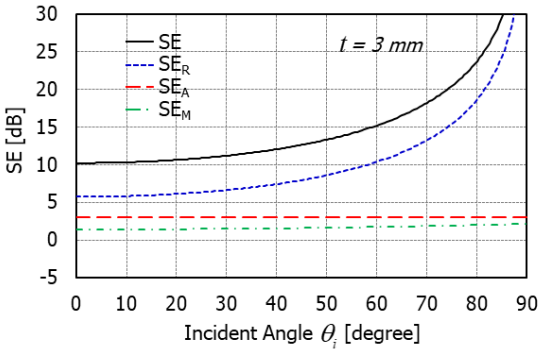


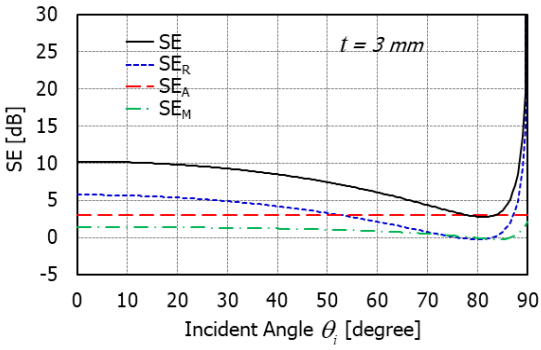
그림 4. 유전 및 자성 흡수 소재들의 입사 편파에 따른 3 GHz에서의 차폐효과 비교
Fig. 4. Comparison of SEs at 3 GHz of dielectric and magnetic absorbing materials by incident polarization.

자성 흡수 소재들의 SE를 3 GHz에서 비교하였다. 이는 그림 2에서 3 GHz에서의 비유전율과 비투자율 값을 이용하여 계산한 것이다. 유전 흡수 소재의 경우에 입사 각도가 증가함(더 비스듬히 입사함)에 따라 직각 편파의 SE는 증가하고, 평행 편파의 SE는 감소하다가 80° 이상의 입사 각도에서 급격히 증가한다. 반면, 자성 흡수 소재의 경우에 입사 각도가 증가(더 비스듬히 입사)함에 따라 평행 편파의 SE는 증가하고, 직각 편파의 SE는 감소한다. 이는 두 소재의 반사계수가 편파에 따라 서로 상반된 값을 가지기 때문인데, 편파와 입사각에 따라 크게 변하는 공기의 임피던스와 그렇지 않은 소재의 임피던스 차이 때문이다.

그림 5에서 그림 8까지는 유전 및 자성 흡수 소재들의 비스듬히 입사하는 두 편파에 의한 SE를 Schelkunoff가 정의한 반사손실(SE_R), 흡수손실(SE_A), 그리고 다중반사손실(SE_M) 성분으로 나누어 나타내었다. 소재의 두께에 따른 각 손실의 변화를 비교하기 위해서 3 mm와 30 mm 두 경우에 대해서 계산하였다. 그림 5는 3 mm 두께의 유전 흡수 소재의 3 GHz에서 SE를 보여준다. 직각 편파의 경우 반사손실이 흡수손실에 비해 크며, 따라서 SE는 주로 반사손실에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 흡수손실은 입사 각도에 상관없이 일정함을 알 수 있다. 평행 편파의 경우에도 입사 각도에 대한 SE의 변화는 주로 반사손실의 변화와 일치한다. 50° 이상의 입사 각도에서는 반사손실이 일정한 크기의 흡수손실에 비해 더 작아진다. 다중

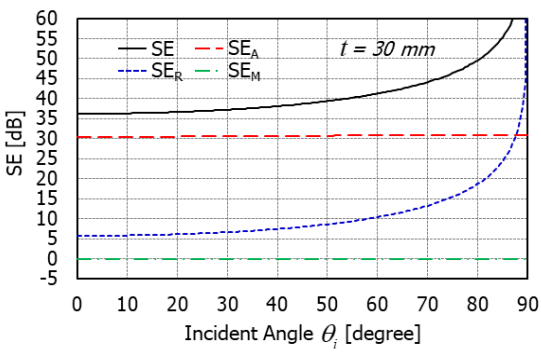


(a) 직각 편파에 의한 유전 손실 소재의 차폐효과
(a) SEs of dielectric materials by perpendicular polarization

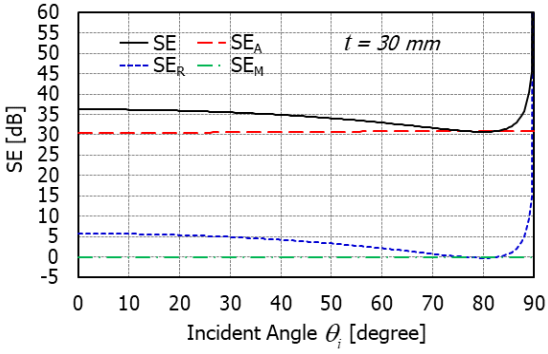


(b) 평행 편파에 의한 유전손실 소재의 차폐효과
(b) SEs of dielectric materials by parallel polarization

그림 5. 두께가 3 mm인 유전 손실 소재의 차폐효과 비교
Fig. 5. Comparison of SEs of dielectric material (LS26) with 3 mm thickness (f=3 GHz).



(a) 직각 편파에 의한 유전 손실 소재의 차폐효과
(a) SEs of dielectric materials by perpendicular polarization



(b) 평행 편파에 의한 유전손실 소재의 차폐효과
(b) SEs of dielectric materials by parallel polarization

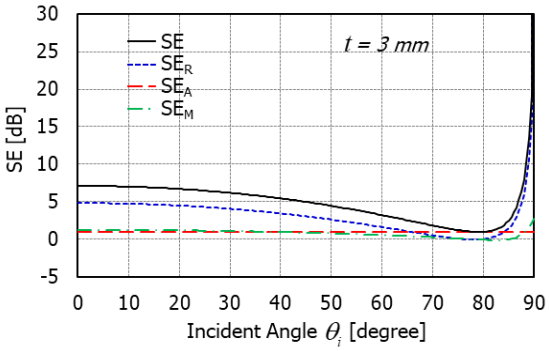
그림 6. 두께가 30 mm인 유전 손실 소재의 차폐효과 비교
Fig. 6. Comparison of SEs of dielectric material (LS26) with 30 mm thickness (f=3 GHz).

반사손실은 반사와 흡수손실에 비해 작음을 알 수 있다.

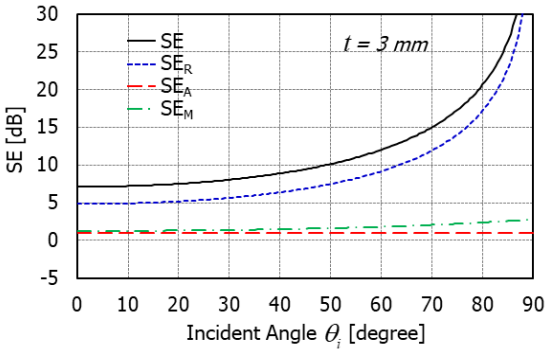
그림 6에서는 30 mm 두께의 유전 흡수 소재의 3 GHz에서 SE를 보여준다. 그림 5와 비교하였을 때 가장 큰 차이점은 입사 편파와 상관없이 소재의 두께가 10배 증감함에 따라 소재 내의 흡수손실이 약 3 dB에서 30 dB로 10배 증가하였다는 것이다. 이는 흡수손실(SE_A)의 정의에서 보듯이 흡수손실(SE_A)은 두께에 비례하기 때문이다. 또한 반사손실은 두께와 무관함을 알 수 있다. 흡수손실의 증가로 인해 다중반사손실은 더 작아졌다. 결과적으로 30 mm 두께의 유전 흡수 소재의 경우에 SE가 직각 편파일 때는 35 dB 이상으로, 평행 편파일 때는 30~36 dB 정도로 증가하였다.

그림 7 및 그림 8에서는 각각 3 mm 두께와 30 mm 두께를 갖는 자성 흡수 소재의 반사손실, 흡수손실, 다중반사손실의 변화를 보여준다. 앞서 설명하였듯이 자성 흡수 소재는 입사 각도가 증가함에 따라 평행 편파의 SE는 증가하는 반면, 직각 편파의 SE는 감소하다가 80° 이상의 입사 각도에서 급격히 증가한다. 그림 7에서 두께가 3 mm인 자성 흡수 소재의 SE는 주로 반사손실에 의해서 결정되며, 흡수손실은 1 dB 정도의 매우 낮은 값을 가진다. 다중반사손실의 경우 평행 편파에서는 입사 각도에 따라 약간씩 증가하며, 직각 편파에서는 줄어든다. 그림 7(a)에서 보듯이, 3 mm 두께의 자성 흡수 소재의 경우 78°의 각도를 가지는 평행 편파가 입사할 경우 반사손실이 매우 낮아 거의 전투과 특성을 가짐을 알 수 있다.

그림 8에서는 30 mm 자성 흡수 소재의 SE를 보여준다.

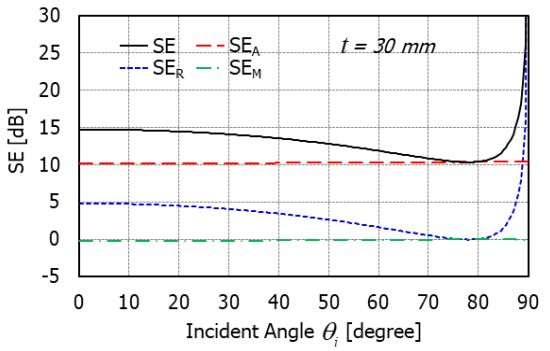


(a) 직각 편파에 의한 자성 손실 소재의 차폐효과
(a) SEs of magnetic materials by perpendicular polarization

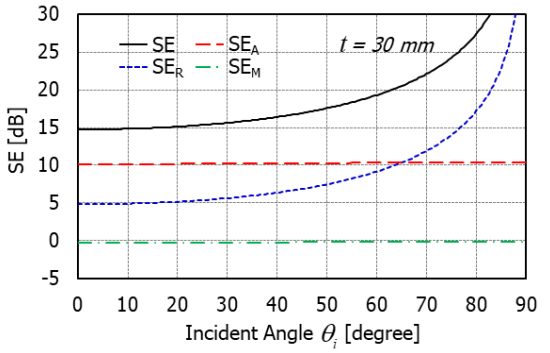


(b) 평행 편파에 의한 자성 손실 소재의 차폐효과
(b) SEs of magnetic materials by parallel polarization

그림 7. 두께가 3 mm인 자성 손실 소재의 차폐효과 비교
Fig. 7. Comparison of SEs of magnetic material (FSA300) with 3 mm thickness (f=3 GHz).



(a) 직각 편파에 의한 자성 손실 소재의 차폐효과
(a) SEs of magnetic materials by perpendicular polarization



(b) 평행 편파에 의한 자성 손실 소재의 차폐효과
(b) SEs of magnetic materials by parallel polarization

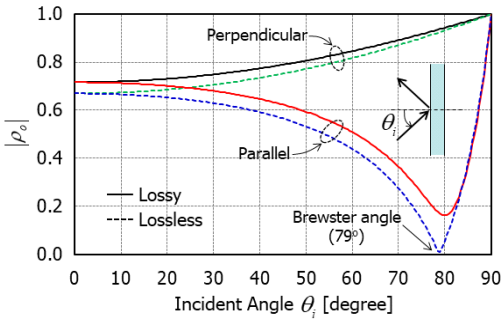
그림 8. 두께가 30 mm인 자성 손실 소재의 차폐효과 비교
Fig. 8. Comparison of SEs of magnetic material (FSA300) with 30 mm thickness (f=3 GHz).

유전 흡수 소재와 동일하게 두께가 10배 증가함에 따라 흡수손실도 10배 증가하여, 3 mm 두께의 소재에 비해 SE가 약 8 dB 증가하였다. 반사손실은 두께에 상관없이 동일하며, 다중반사손실은 흡수손실의 증가로 매우 작아졌다.

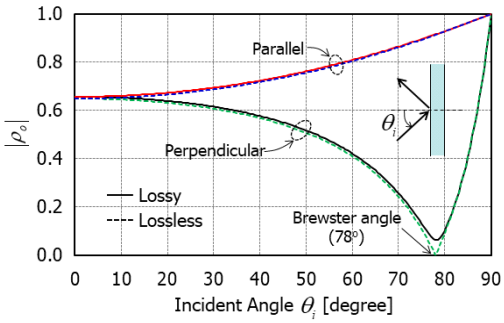
마지막으로 그림 9에서는 유전 및 자성 소재의 입사 각도에 대한 3 GHz에서의 반사계수를 보여준다. 특히 유전 및 자성 소재의 비유전율과 비투자율의 허수 성분을 0으로 놓은 무손실 유전 및 자성 소재의 반사계수도 비교하였다. 유전 무손실 소재의 경우 79°의 평행 편파에서 그리고 자성 무손실 소재의 경우에는 78°의 직각 편파에서 반사계수가 0이 되는 브루스터(Brewster) 각이 형성된다. 손실이 있는 유전 및 자성 소재에서는 브루스터 각이 존재하지 않지만 브루스터 각보다 약간 높은 입사 각도에서 가장 낮은 반사계수를 가짐을 알 수 있다. 이는 유전 손실 소재의 경우 그림 5(b) 및 그림 6(b)의 평행 편파 시 SE 결과에서, 그리고 자성 손실 소재의 경우 그림 7(a)와 그림 8(a)의 직각 편파 시 SE 결과에서, SE_R이 약 80°에서 거의 0 dB로 감소하는 것과 동일한 현상이다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 비스듬히 입사하는 평면파를 직각 편파와 평행 편파로 나누어 평판형 손실 소재의 SE 이론식을 유도하였고 유전 및 자성 흡수(손실) 소재들에 대한 차폐 특성을 분석하였다. 다양한 입사 각도와 소재의 두께에 따른 Schelkunoff의 반사, 흡수, 다중반사손실을 비교하였



(a) 유전 손실 및 무손실 소재의 반사계수
(a) Reflection coefficients of lossy and lossless dielectric materials

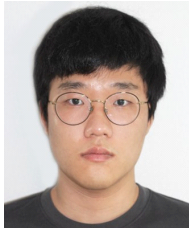


(b) 자성 손실 및 무손실 소재의 반사계수
(b) Reflection coefficients of lossy and lossless magnetic materials

그림 9. 입사 각도에 따른 손실 및 무손실 소재의 반사계수 비교
Fig. 9. Comparison of reflection coefficient of lossy and lossless materials by incident angle (f=3 GHz).

다. 또한 3차원 수치해석을 통해 그 결과의 경향성이 일치함을 확인하였다.

남 규 현 [수원대학교/학부생]
https://orcid.org/0009-0000-6028-4736



2019년 3월~현재: 수원대학교 전기전자공학부 학부생
[주 관심분야] 전자기이론, 반도체소자, EMI/EMC 등

References

[1] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd ed. New York, NY, John Wiley Interscience, 2006.
[2] *Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials*, ASTM Standard D4935, 2010.
[3] H. H. Park, J. H. Kwon, and C. H. Hyoung, "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] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
[5] Dassault systemes, "CST Microwave Studio(MWS)," 2020. Available: https://www.3ds.com
[6] P. V. Y. Jayasree, V. S. S. Baba, B. Prabhakar Rao, and L. Pappula, "Analysis of shielding effectiveness of single, double and laminated shields for oblique incidence of EM waves," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 22, pp. 187-202, Jun. 2010.
[7] S. A. Schelkunoff, *Electromagnetic Waves*, New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1943, pp. 303-312.
[8] Laird, "EccosorbTM LS." Available: https://www.laird.com
[9] GSS InnoCorporation, "FSA." Available: https://www.gsskorea.com

박 현 호 [수원대학교/교수]
https://orcid.org/0000-0001-8518-1151

1999년 8월: KAIST 전기및전자공학과 (공학박사)
2003년 3월: ETRI 선임연구원
2012년 8월: 삼성전자 수석연구원
2012년 9월~현재: 수원대학교 전기전자공학부 교수
[주 관심분야] EMI/EMC 설계, SI/PI 설계, 전자파 차폐기술, 초고속 디지털시스템 설계 등