

모드정합법을 이용한 평면형 전자파 흡수체 해석

Analysis of the Planar Electromagnetic Wave Absorber Using the Mode Matching Technique

허 준 · 박 종 언* · 추 호 성

Jun Hur · Jong-Eon Park* · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 모드정합법을 이용하여 평면형 전자파 흡수체의 성능을 분석한다. 제안된 전자파 흡수체는 완전도체와 자성체가 주기구조를 이루고 있으며, 평행 편파 입사파가 인가되는 조건에서 평판의 두께에 따른 투과 및 반사 전력을 계산한다. 제안된 전자파 흡수체의 경우, 특정 구조에서 자성체가 아닌 진공으로 구성된 주기적인 평판 슬릿 또는 자성체 단독으로만 존재하는 경우에 비해 높은 흡수율을 가지는 것을 확인하였다. 전체적인 흡수 및 투과 특성의 수치해석 결과는 상용 시뮬레이터와의 비교를 통해 검증하였다.

Abstract

In this paper, we analyze a planar electromagnetic absorber by using the mode matching technique(MMT). The proposed electromagnetic absorber has a periodic structure composed of a perfect conductor and ferrite, and the transmitted and reflected powers in response to the incident wave with parallel polarization are calculated according to the thickness of the plate. The proposed absorber shows a high absorption compared to the cases of periodic slits with vacuum or the ferrite plate itself. The solution to the reflected and transmitted powers by MMT is also verified with the results from a commercial simulator.

Key words: Mode Matching Technique, Planar Absorber, Transmittance, Reflectance, Absorption

I. 서 론

완전 도체(perfect electric conductor: PEC)로 구성된 개구를 통한 전자파 투과 현상에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다^{[1]~[3]}. 이 같은 투과 현상을 해석하기 위한 수치해석 기법으로는 모멘트법, 유한요소법 등과 같은 완력적

인 해석방법^[4]이 있지만, 모드정합법을 사용하게 되면 모드별 전파상수를 파악함으로써 전자파의 투과 원리를 이해하기 용이하므로 널리 사용되어 왔다^{[5]~[7]}. 하지만 모드정합법을 통해 완전 도체가 아닌 유전율과 투자율이 포함된 실제 물질로 이루어진 개구의 전자파 투과 현상을 관찰한 연구는 부족한 실정이다. 대부분이 주파수에

「이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2015R1A6A1A03031833, 메타물질 융합 핵심요소기술연구)과 2017년도 정부(이공분야 기초연구사업)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1D1A1B04031890).」

홍익대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*홍익대학교 메타물질전자소자연구센터(Metamaterial Electronic Device Research Center, Hongik University)

· Manuscript received December 10, 2018 ; Revised January 16, 2019 ; Accepted April 4, 2019. (ID No. 20181210-11S)

· Corresponding Author: Jong-Eon Park (e-mail: joungeon.park@gmail.com)

의한 금속 및 물질의 특성이 정확히 반영되어 있지 않으며, 금속과 물질의 주기구조가 아닌 단일 개구에 대한 전자파 투과특성만 고려되었다⁸⁾.

본 논문에서는 완전도체와 자성체가 주기구조를 이루는 평면형 전자파 흡수체에 대해 모드정합법을 활용하여 해석하였다. 평면형 구조에서의 흡수율을 극대화하기 위해 $0.1 \lambda_0$ 이하의 적절한 평판 두께와 자성체가 삽입되는 완전도체 개구 사이의 거리를 도출하였다. 또한 상용 소프트웨어를 활용하여 제안된 평면형 전자파 흡수체와 완전도체 슬릿의 주기구조 및 자성체 평판에 의한 투과 특성을 수치적으로 구한 결과와 함께 비교 검증하였다.

II. 본 론

그림 1은 H_y -field를 바탕으로 평행 편파 입사파가 제안된 평면형 전자파 흡수체에 인가되는 모습을 나타낸다. 완전도체와 자성체($\epsilon_r=15.695-j0.3005$, $\mu_r=3.42-j0.4081$ @ 10 GHz)가 x 축 방향으로 $2(g+h)$ ($1.55 \lambda_0$)의 무한 주기구조를 이루며, 각각 $2h$ 와 $2g$ 의 너비를 가진다. 흡수체의 두께(d)를 $0.1 \lambda_0$ 이하로 제한하여 평면형 구조를 구현하고, 주기구조의 너비를 적절히 변화시키며 모드정합법을 사용하여 흡수율이 극대화되는 구조를 도출하였다. 모드

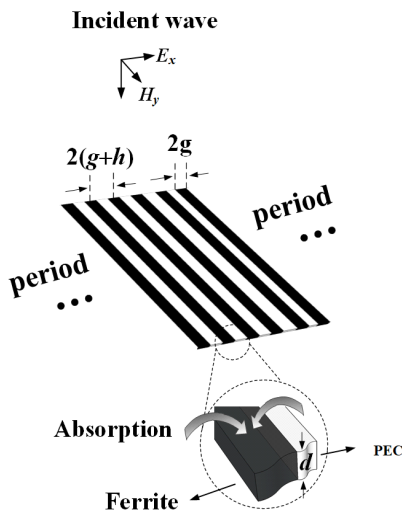


그림 1. 제안된 평면형 전자파 흡수체 형상
Fig. 1. Geometry of the proposed planar electromagnetic wave absorber.

정합법으로 주어진 구조를 풀이하기 위해 평행 평판 도파관에 의한 전자기장 분포를 관찰하였다. 평행 편파에 의한 입사파와 그림 1에서 y 축으로 무한한 구조를 가정하기 때문에 H_y -field를 식 (1a)와 같이 전개할 수 있다. 여기서 γ_{An}^{ETM} 과 k_{An}^{ETM} 은 각각 평행평판도파관의 고유치와 z 축 방향 전파 상수를 의미한다. 식 (1a)를 통해 맥스웰 방정식을 전개하게 되면, 식 (1b), (1c)와 같이 E -field를 구할 수 있다. $n=0$ 일 때, E_z 성분은 사라지므로 TEM 모드가 형성되며, 수직 입사파의 경우에는 TEM 모드만 고려하면 된다. 하지만 반사파 및 투과파의 경우에는 TEM 모드뿐만 아니라, 고차 모드들도 고려해야 전자파의 산란 특성을 정확히 이해할 수 있다. 수직 입사한다는 가정으로부터 식 (1a)에서와 같이 우모드에 의한 \cos 함수만 고려하고, \sin 함수에 의한 기함수 성분은 반영하지 않는다.

$$H_y = \cos(\gamma_{An}^{ETM} x) e^{-k_{An}^{ETM} z} \quad (1a)$$

$$E_x = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial z} = \frac{k_{An}^{ETM}}{j\omega\epsilon} \cos(\gamma_{An}^{ETM} x) e^{-k_{An}^{ETM} z} \quad (1b)$$

$$E_z = \frac{1}{j\omega\epsilon} \frac{\partial H_y}{\partial x} = -\frac{\gamma_{An}^{ETM}}{j\omega\epsilon} \sin(\gamma_{An}^{ETM} x) e^{-k_{An}^{ETM} z} \quad (1c)$$

$$\gamma_{An}^{ETM} = 2n\pi/(2d), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

모드정합법으로 해석할 경계면을 자유공간에서 주기구조로 투과하는 경계면 1과 주기구조에서 자유공간으로 투과하는 경계면 2로 나누어서 해석하였으며, 경계면의 형상을 그림 2에 나타내었다. 경계면 1에 대해서 입사파, 반사파, 그리고 투과파에 의한 수식을 전개한 후 전자기장의 경계 조건을 적용하여 산란파의 특성을 도출하고, 경계면 2는 경계면 1과 같은 풀이 방법으로 반사 및 투과 계수를 도출하여 구할 수 있다.

$$(1 + \rho_k) a_k \vec{e}_{Fk} + \sum_{i=1, i \neq k}^{N_F} a_i \vec{e}_{Fi} = \sum_{j=1}^{N_M} b_j \vec{e}_{Mj} \quad (2a)$$

$$(1 - \rho_k) a_k \vec{h}_{Fk} - \sum_{i=1, i \neq k}^{N_F} a_i \vec{h}_{Fi} = \sum_{j=1}^{N_M} b_j \vec{h}_{Mj} \quad (2b)$$

경계면 1에 대하여 전기장 \vec{e} 와 자기장 \vec{h} 는 식 (2)와

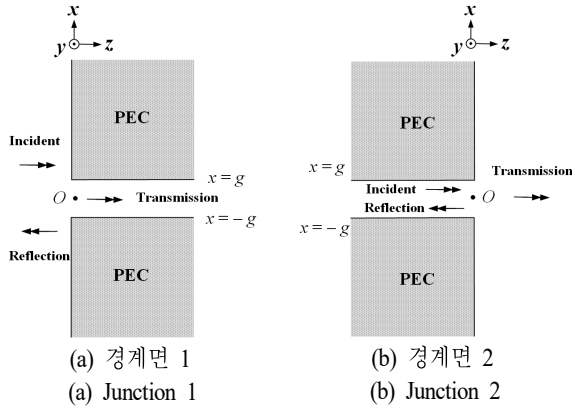
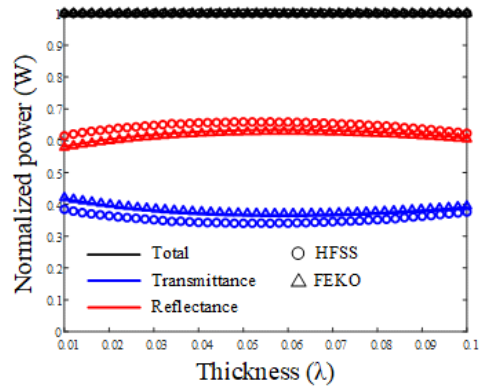


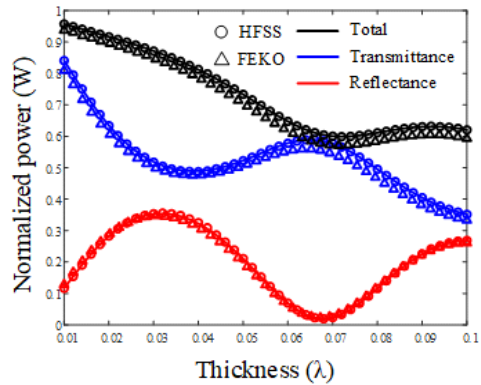
그림 2. 모드정합법 해석 경계면
Fig. 2. Interface of the mode matching technique.

같이 전개된다. 아래첨자 F 와 M 은 각각 자유 공간과 완전도체 및 자성체가 포함된 개구 영역을 의미한다. 2번째 아래첨자 k, i , 그리고 j 는 각각 입사파의 k 번째, 반사파의 i 번째, 그리고 투과파의 j 번째 모드를 의미한다. k 번째 입사 계수의 크기는 a_k 이며, 편의상 1로 두고, k 번째 모드의 반사 계수는 ρ_k 로 정의하였다. 또한 k 번째 모드를 제외한 나머지 모드의 반사 계수는 a_i , 투과파에 의한 투과 계수는 b_j 이다. 다항식의 합에서 N_F 와 N_M 은 각각 자유 공간과 완전도체 및 자성체가 포함된 주기 영역의 모드 개수를 뜻한다. 이와 같이 정의된 표현법으로부터 식 (2a)의 좌변은 k 번째 입사 전기장 및 N_F 개의 반사파를 나타내며, 그 우변은 N_M 개의 투과파를 의미한다. 같은 방법으로 자기장에 대해서도 식 (2b)와 같이 전개 가능하다. N_F 개의 반사 계수와 N_M 개의 투과 계수가 구해야 하는 미지수일 때, 식 (2a)와 (2b)로부터 직교성을 통해 $(N_F + N_M)$ 개의 식을 구할 수 있으므로 선형 대수의 풀이법을 이용해 반사 및 투과 계수를 구하였다.

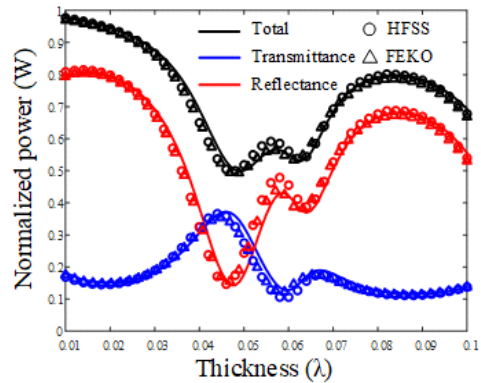
모드정합법의 반사 및 투과 계수를 통해 제안된 평면형 흡수체를 포함한 다양한 주기구조의 전력을 계산하였으며, 모드정합법과 HFSS 및 FEKO EM 시뮬레이터 결과를 그림 3에 나타내었다. $2(g+h)$ 의 주기는 $1.55 \lambda_0$ 이고, $2g$ 와 $2h$ 는 각각 $0.9 \lambda_0, 0.65 \lambda_0$ 일 때, 두께(d)에 따른 투과 전력, 반사전력과 두 전력의 합인 전체 전력을 분석하였으며, 흡수율은 1에서 전체전력을 제외한 값이 된다. 따라서 검은색 실선으로 나타낸 전체전력이 가장 작은 곳에



(a) 완전도체 주기구조
(a) PEC periodic structure



(b) 자성체
(b) Ferrite



(c) 완전도체 + 자성체 주기구조
(c) PEC + Ferrite periodic structure

그림 3. 모드정합법과 시뮬레이터를 이용한 전력 계산 결과
Fig. 3. The result of the calculated power by using the mode matching technique and commercial simulators.

서 최대의 흡수율이 도출되는 것을 의미한다. 그림 3(a)에 나타낸 완전도체 주기구조의 경우, 그림 1에서 자성체 놓인 위치에 공기로 대체하여 계산하였으며, 흡수 특성이 없으므로 반사 및 투과에 의한 전체 전력은 1로 일정하고, 흡수율은 0인 것을 알 수 있다. 자성체만으로 구성된 평판의 경우인 그림 3(b)는 두께가 $0.07 \lambda_0$ 에서 약 0.6의 전체전력으로 0.4의 최대 흡수율을 가진다. 그림 3(c)에서 그림 1에서 제안된 흡수체 평판의 반사 및 투과 전력 특성을 나타내었으며, 자성체만 존재하는 경우에 비해 얇은 두께인 $0.045 \lambda_0$ 에서 10 % 높은 0.5의 흡수율이 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 3(a)~그림 3(c)까지 모든 해석 구조에서 실선으로 나타낸 모드정합법 수치 결과와 원과 세모로 나타낸 HFSS 및 FEKO EM 시뮬레이터의 결과가 매우 유사한 것을 통해 모드정합법에 의한 수치값의 신뢰성을 확인할 수 있다.

$$\text{흡수능} = 10 \times \log(\text{흡수전력}/\text{입사전력}) \text{ [dB]} \quad (3)$$

구조에 따른 흡수능을 분석하기 위해 식 (3)과 같이 흡수능을 정의하였으며, 그림 4에 두께에 따른 자성체 평판과 제안된 흡수체 평판의 흡수능을 나타내었다. 그림 4에 포함되지 않은 완전도체 주기구조의 경우, 손실을 가지고 있는 물질이 없으므로 흡수능은 $-\infty$ 이다. 점선으로 나타낸 자성체 평판은 $0.072 \lambda_0$ 의 두께에서 -3.96 dB 의 최대 흡수능을 가지고, 제안된 흡수체 평판의 경우, 두께가 $0.049 \lambda_0$ 일 때 -2.99 dB 로 자성체 구조에 비해 낮은 두

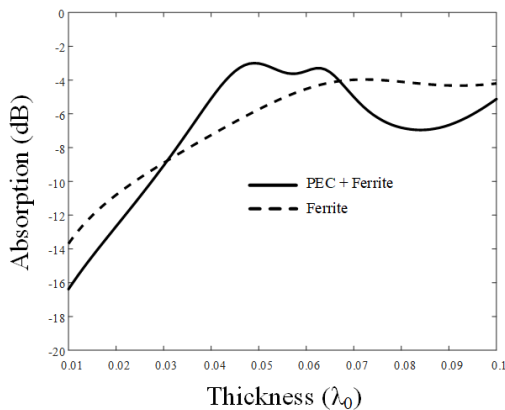


그림 4. 두께에 따른 흡수능 결과
Fig. 4. Absorption according to the thickness.

께에서 높은 흡수능을 가지는 것을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 모드정합법 수치해석을 이용하여 완전도체와 자성체가 주기구조를 이루는 평면형 전자파 흡수체를 해석하였다. 흡수체 주기구조의 경우, 완전 도체 주기구조 또는 자성체 구조에 비해 낮은 두께에서 높은 흡수능을 가지는 것을 확인하였으며, 상용 시뮬레이터(HFSS, FEKO)를 통해 모드정합법의 수치해석 결과를 검증하였다.

References

- [1] R. F. Harrington, D. T. Auckland, "Electromagnetic transmission through narrow slots in thick conducting screens," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 28, no. 5, pp. 616-622, Sep. 1980.
- [2] F. J. Garcia-Vidal, L. Martin-Moreno, T. W. Ebbesen, and L. Kuipers, "Light passing through subwavelength apertures," *Reviews of Modern Physics*, vol. 82, no. 1, pp. 729-787, 2010.
- [3] K. Keum, H. Piao, and J. Choi, "Design of a short/open-ended slot antenna with capacitive coupling feed strips for hepta-band mobile application," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 1, pp. 46-51, Jan. 2018.
- [4] C. Kim, Y. B. Park, "Prediction of electromagnetic wave propagation in space environments based on geometrical optics," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 3, pp. 165-167, Jul. 2017.
- [5] S. E. Kocabas, G. Veronis, D. A. B. Miller, and S. Fan, "Modal analysis and coupling in metal-insulator-metal waveguides," *Physical Review B*, vol. 79, no. 3, p. 035120, 2009.
- [6] S. Yoo, J. E. Park, and H. Choo, "Resonant transmission through periodic subwavelength real metal slits in the terahertz range," *IEICE Electronics Express*, vol. 15, no. 14, p. 20180612, 2018.
- [7] S. Yoo, J. E. Park, J. Lee, and H. Choo, "Transmission

characteristics of periodic Au slits at terahertz regimes," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 2, pp. 77-82, 2018.

[8] J. E. Park, F. L. Teixeira, and B. H. V. Borges, "Analysis

of deep-subwavelength Au and Ag slit transmittances at terahertz frequencies," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 33, no. 7, pp. 1355-1364, 2016.

허 준 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7953-9890>



2014년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
2016년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2016년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 배열안테나, 항공기안테나

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
2003년 6월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더안테나

박 종 언 [홍익대학교/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6357-2634>



2006년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)
2009년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학석사)
2013년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학박사)
2013년 9월~2015년 12월: 오하이오주립대 박사후 연구원

2016년 1월~현재: 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터 연구교수

[주 관심분야] 전자파 산란, 안테나 설계, EMI & EMC 해석, 개구 투과 현상 분석 등