

손실 특성의 메타 물질이 포함된 다층 구조 Slab의 특성 분석

Analysis of Multilayer Slab with Lossy Metamaterials

이경원 · 홍익표* · 정영철** · 육종관

Kyung-Won Lee · Ic-Pyo Hong* · Yeong-Chul Chung** · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 손실 특성을 갖는 메타 물질로 구성된 다층 구조 slab의 특성을 해석하였다. 기존 메타 물질을 가진 다층 구조 해석은 recursive 방법을 이용했으며, 계산의 복잡성으로 인한 무손실을 가정할 수밖에 없었지만, 본 논문에서는 손실 메타 물질을 갖는 다층 구조를 해석하기 위해 해석 방법이 간단하고, 임의의 다층 구조를 갖는 물질에 대한 전파 특성을 쉽게 얻을 수 있는 ABCD 행렬을 이용하였다. 적용한 ABCD 행렬 방법의 유효함을 검증하기 위해서 유전체-유전체로 구성된 구조와 메타-유전체 물질로 구성된 다층 구조에 적용하여 기존의 recursive 방법과 비교하였다. 본 논문에서 해석한 손실 메타 물질을 갖는 다층 구조는 유전체 다층 구조보다 리플이 없고 광대역 전송 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있으며, 안테나의 레이돔이나 전파를 차폐할 수 있는 차폐 물질 등에 다양하게 적용될 수 있다.

Abstract

In this paper, we analyzed the multilayer structure with lossy metamaterials using ABCD Matrix method to get the transmission characteristics. Compared to the recursive method which cannot be used to analyze the lossy characteristics of multilayer structure because of its complexity, we used the ABCD matrix method is easy to apply because of its matrix chain concepts for arbitrary number of multilayer structure and lossy material. To verify the results of this paper, we used both for multilayer dielectric and metamaterial, respectively, and obtained the same results. Multilayer structure with lossy metamaterial showed minimized ripple and broadband transmission compared to dielectric multilayered structure. This can be used in various applications as antenna radome and shielding material, etc.

Key words : Multi-layer Structure, Metamaterials, ABCD Matrix, Recursive Method

I. 서 론

정보화 사회로의 급속한 발전 추세에 따라 무선 통신, 이동 통신에 적용될 수 있는 안테나 및 마이크로파 회로의 응용 범위는 바이오 기술과 나노 기술 등 정보 기술과 융합 분야 등으로 다양해지고 있으며, 따라서 그 중요성 또한 증가하고 있다. 학제간 융합을 비롯한 다양한 학문 분야에서 이러한 회로의

설계 기술에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 메타 물질과 같은 전자기 신소재를 이용한 마이크로파 응용 회로에 관한 연구의 필요성은 점차 증가하고 있다.

메타 물질은 1968년 Veselago^[1]에 의해 처음 제안된 유전율과 투자율이 모두 음의 값을 갖는 자연에서 일반적으로 발견할 수 없는 특수한 전자기 성질을 보여주기 위해 설계된 인공적인 구조를 가진 물

연세대학교 전기전자공학과 (Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University)

*공주대학교 정보통신공학부 (Dept. of Information and Communication Engineering, Kongju University)

**국방기술품질원 (Defense Agency for Technology and Quality)

· 논문 번호 : 20080903-115

· 수정완료일자 : 2008년 11월 5일

질이다. 메타 물질은 NIM(Negative Index Material), DNG(Double Negative), LHM(Left Handed Material), BW(Backward Wave) 매질, EBG(Electromagnetic Band Gap) 구조, 또는 Hi-impedance(hi-z) 평면 구조 등으로 불려진다. 1996년 Pendry^[2]에 의해 금속성 막대로 이루어진 주기적 격자 구조의 유효 유전율이 특정 주파수 대역에서 음의 값을 갖는다는 사실과 슬롯을 가진 원형 공진기 구조의 유효 투자율이 특정 주파수 대역에서 음의 값이 된다는 사실이 밝혀지면서 메타 물질에 관한 연구가 각광을 받기 시작하였다^[3]. 2001년 Shelby^[4]는 메타 물질을 이용하여 DNG 물질을 구현하고 이를 통해 얻은 실험적 결과가 이론적으로 예상되었던 결과와 일치한다는 것을 보여주었다. 최근에는 메타 물질의 실험적 구현뿐만 아니라 이론적 해석 및 수치 해석법을 이용한 분석, 마이크로파 응용 회로도 활발히 연구되고 있다^[5].

메타 물질 slab과 관련하여 2000년 Pendry^[6]는 메타 물질 slab이 Perfect lens에 적용될 수 있다는 것을 수식으로 유도하였고, Ramakrishna^[7]는 메타 물질 slab과 유전체 slab을 결합하여 Evanescent mode를 증폭할 수 있다는 것을 보였다. 또한, Zhang^[8]은 메타 물질 slab에서의 전자기파의 전파에 대해 연구하였으며, Kong^[9]은 다층 구조를 갖는 메타 물질에서 전자기파의 일반적인 해를 유도하였다. 2003년 H. Cory와 C. Zach^[10]는 recursive 방법을 이용하여 유전체로 구성된 다층 구조와 메타-유전체로 구성된 다층 구조에 대해 해석하였으며, 메타 물질을 이용한 antireflection coating과 high-reflection coating에 대해 연구하였다. 기존 연구 결과들 대부분은 다층 구조 해석을 위해 recursive method를 사용하였는데, 이는 물질의 손실 특성을 고려하기에 계산의 복잡성을 갖는다는 단점이 있다. 초기에 메타 물질 연구는 무손실을 가정으로 이루어졌지만^[6], 2002년 Garcia^[11]는 실제 메타 물질은 메타 물질의 주파수 분산 특성 때문에 손실 특성을 가져야 함을 보여주었고, 이후 손실 특성을 갖는 메타 물질 slab의 전달 함수^[12] 등에 관련한 연구가 이루어지고 있다.

본 논문에서는 손실 특성을 갖는 메타 물질을 갖는 다층 구조를 해석하기 위해 적용이 간단한 ABCD 행렬 방법을 사용하였으며, 비손실 메타 물질을 갖는 다층 구조를 recursive 해석 방법으로 얻은 결

과와 비교 검토하였다.

II. ABCD 행렬을 이용한 다층 구조 해석

그림 1과 같은 다층 구조에 대해 recursive 방법을 이용하여 얻을 수 있는 반사 계수와 투과 계수는 다음 식 (1)과 같다^[6].

$$R_i = \frac{r_{i+1,i} + R_{i-1}e^{+j2\varphi_i}}{1 + r_{i+1,i}R_{i-1}e^{+j2\varphi_i}} \quad (1a)$$

$$T_i = \frac{t_{i+1,i}T_{i-1}e^{+j\varphi_i}}{1 + r_{i+1,i}R_{i-1}e^{+j2\varphi_i}} \quad (1b)$$

여기서 $r_{i+1,i}$ 와 $t_{i+1,i}$ 는 각각의 i 번째 slab과 $i+1$ 번째 slab의 경계 면에서의 반사 계수와 투과 계수이며, R_{i-1} 와 T_{i-1} 는 다층 구조의 전체의 반사 계수와 투과 계수이다. 식 (1)은 메타 물질까지 포함하는 일반적인 반사 계수 및 투과 계수 식으로, 여기서 지수 함수의 위상 φ_i 는 전파 상수와 슬랩(slab)의 길이의 곱인 i 번째 슬랩(slab)의 위상이며, +는 메타 물질에 대한 것이며, -는 유전 물질에 해당된다. Recursive 방법을 기초로 하는 식 (1)은 slab의 개수가 증가하

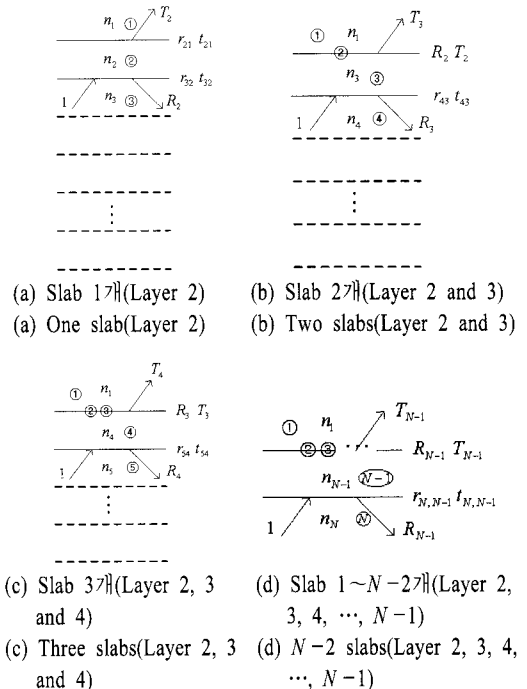


그림 1. 다층 구조의 전체 반사 계수와 투과 계수
Fig. 1. Overall reflection and transmission coefficients.

는 다층 구조에 대해서는 위에서부터 한 층씩 내려 오면서 계산하는 ray-tracing 방법을 기본으로 하기 때문에 직관적으로 식을 전개하고 계산할 수 없다는 단점을 갖는다. 반면 본 논문에서 사용한 ABCD 행렬은 전파 행렬(propagation matrix)과 매칭 행렬(matching matrix)로 나뉘지며, slab이 늘어나면 해당하는 행렬만 추가하기만 하면 되는 장점이 있다^{[8],[9]}.

2-1 전파 행렬(Propagation Matrix)

E-field가 z 방향으로 무손실(isotropic and homogeneous) 유전 물질에서 진행할 때 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 식 (2)의 첫 번째 항은 전방(forward)으로 향하는 field이며, 두 번째 항은 후방(backward)으로 향하는 field이다.

$$E(z) = E_{0+}e^{-jkz} + E_{0-}e^{jkz} = E_+(z) + E_-(z) \quad (2)$$

그림 2은 l의 길이를 가지는 유전 물질에서의 E-field의 양을 나타내는 그림이다. 이 그림을 이용하여 전파 행렬(propagation matrix)를 구할 수 있으며, 식 (2)를 바탕으로 그림 2의 관계를 식 (3)과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 식 (3)은 전방(forward)으로 향하는 field의 관계이다. 후방(backward)으로 향하는 field, E_{1-} 과 E_{2-} 의 관계 역시 식 (3)과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 전후방 관계식을 정리하면 식 (4)와 같은 전파 행렬(propagation matrix)를 구할 수 있다.

$$E_{2+} = E_{0+}e^{-jkz_2}$$

$$E_{1+} = E_{0+}e^{-jkz_1} = E_{0+}e^{-jk(z_2-l)} = e^{jkl}E_{2+} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} E_{1+} \\ E_{1-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{jkl} & 0 \\ 0 & e^{-jkl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{2+} \\ E_{2-} \end{bmatrix} \quad (4)$$

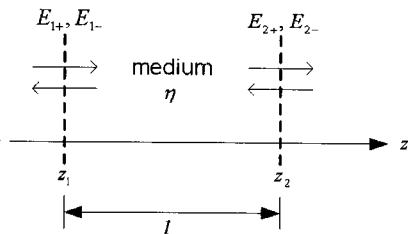


그림 2. 두 지점 사이에서 전파되는 field량
Fig. 2. Field quantities propagated between two positions in space.

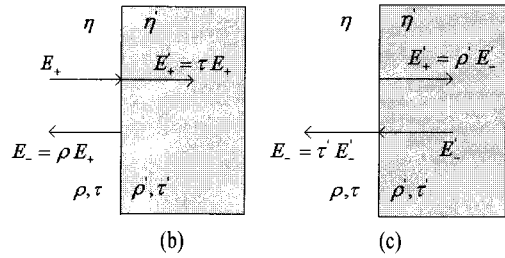
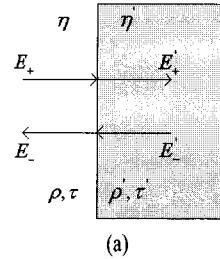


그림 3. 경계면에서의 E-field
Fig. 3. Fields across an interface.

2-2 매칭 행렬(Matching Matrix)

그림 3은 특성 임피던스가 각각 η, η' 인 서로 다른 매질의 경계면에서 전후방(forward-backward) field의 관계를 나타낸 그림이다.

두 매질의 경계면에서 경계 조건을 적용하면 전후방(forward-backward) field는 식 (5)를 만족한다. 식 (5)를 바탕으로 그림 3(b)와 그림 3(c)를 정리하면 식 (6)과 같은 매칭 행렬(matching matrix)를 구할 수 있다.

$$E = E'$$

$$E_+ + E_- = E'_+ + E'_- \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} E_+ \\ E_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_+ \\ E'_- \end{bmatrix} \quad (6)$$

2-3 다층 구조 해석

위에서 언급한 전파 행렬(propagation matrix)과 매칭 행렬(matching matrix)을 조합하면 다층 구조의 슬랩(slab)을 해석할 수 있다.

그림 4은 유전체로 구성된 다층 구조를 나타내며, 식 (7)과 같이 정리할 수 있다. 즉, 슬랩(slab)이 하나씩 추가될 때마다 전파 행렬(propagation matrix) 및 매칭 행렬(matching matrix)을 추가하면 된다. 식 (7)

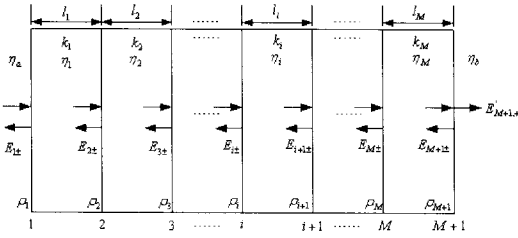


그림 4. 다층 유전체 구조
Fig. 4. Multilayer dielectric slab structure.

의 행렬식을 정리하면 식 (8)과 같은 ABCD Matrix로 정리할 수 있다. 경사 입사에 경우, 각 슬랩(slab)의 반사 계수(ρ_i), 투과 계수(τ_i), 전파 상수(k_i)에 입사 각에 대한 정보를 적용시키면 s -편파와 p -편파에 대한 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_{i+} \\ E_{i-} \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau_i} \begin{bmatrix} 1 & \rho_i \\ \rho_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{jk_i l_i} & 0 \\ 0 & e^{-jk_i l_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{M+1,+} \\ E'_{M+1,-} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} E_{i+} \\ E_{i-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{M+1,+} \\ E'_{M+1,-} \end{bmatrix} \quad (8)$$

III. 메타 물질을 포함한 다층 구조 해석

본 논문에서는 메타 물질을 포함한 다층 구조를 해석하기 위해 다층 구조의 기본 cell 구조로서 유전체-유전체가 결합된 그림 5와 같이 2층으로 이루어진 slab을 해석하였다. 그림 5의 구조에 대해 ABCD 행렬을 얻기 위해 전파 행렬과 매칭 행렬을 이용하면 식 (9a)와 같은 식을 얻을 수 있으며, 식 (9b)와 같이 ABCD 행렬로 정리할 수 있다. 여기서 ρ 와 τ 는 각 경계 면에서의 반사 계수와 투과 계수이며, k 는

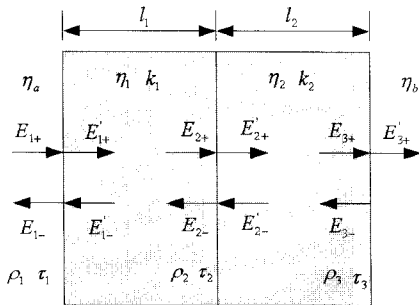


그림 5. 2개의 층으로 이루어진 유전체 구조
Fig. 5. Two dielectric slabs.

각 slab의 파수(wavenumber)이다.

$$\begin{bmatrix} E_{1+} \\ E_{1-} \end{bmatrix} = \frac{1}{\tau_1} \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 \\ \rho_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{jk_1 l_1} & 0 \\ 0 & e^{-jk_1 l_1} \end{bmatrix} \frac{1}{\tau_2} \begin{bmatrix} 1 & \rho_2 \\ \rho_2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{jk_2 l_2} & 0 \\ 0 & e^{-jk_2 l_2} \end{bmatrix} \frac{1}{\tau_3} \begin{bmatrix} 1 & \rho_3 \\ \rho_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{3+} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9a)$$

$$\begin{bmatrix} E_{1+} \\ E_{1-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_{3+} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9b)$$

만약, 메타 물질이 손실을 가질 경우, 유전율(ϵ)과 투자율(μ)은 복소수로 계산되기 때문에 i 번째 슬랩(slab)의 투과 계수(ρ), 반사 계수(τ), 전파 상수(γ)는 식 (10)과 같이 각각 정리된다.

$$\rho_i = \frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\eta_{i+1} + \eta_i} \quad (10a)$$

$$\tau_i = \frac{2\eta_{i+1}}{\eta_{i+1} + \eta_i} \quad (10b)$$

$$\gamma = jk_i = j\omega \sqrt{(-\epsilon' - j\epsilon'')} \sqrt{(-\mu' - j\mu'')} \quad (10c)$$

$$\text{여기서 } \eta_i = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{\sqrt{(-\mu' - j\mu'')}}{\sqrt{(-\epsilon' - j\epsilon'')}} = |\eta_i| \angle \theta$$

또한, 다층 구조의 경사 입사에 대한 i 번째 슬랩(slab)의 투과 계수(ρ), 반사 계수(τ)의 TE, TM 다음과 같은 식 (11)으로 정의된다.

$$\rho_{i,TE} = \frac{\eta_{i+1,TE} - \eta_{i,TE}}{\eta_{i+1,TE} + \eta_{i,TE}}, \quad \tau_{i,TE} = 1 + \rho_{i,TE} \quad (11a)$$

$$\rho_{i,TM} = \frac{\eta_{i+1,TM} - \eta_{i,TM}}{\eta_{i+1,TM} + \eta_{i,TM}}, \quad \tau_{i,TM} = 1 + \rho_{i,TM} \quad (11b)$$

$$\text{여기서, } \eta_{TE} = \frac{\eta}{\cos \theta}, \quad \eta_{TM} = \eta \cos \theta$$

ABCD 행렬인 식 (9b)를 이용하면 그림 5의 slab 구조의 반사 계수와 투과 계수를 쉽게 구할 수 있다. ABCD 행렬에서 반사 계수 Γ 는 식 (12)와 같이 C/A 가 되며, 투과 계수 T 는 $1/A$ 가 된다.

또한, 다층 구조의 경사 입사에 대해서도 위에서 언급한 식 (11)을 적용하면 식 (9)와 같은 경사 입사에 대한 ABCD 행렬식을 구할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{E_{1-}}{E_{1+}} = \frac{C}{A}$$

$$= \frac{\rho_1 + \rho_2 e^{-2jk_1 l_1} + \rho_1 \rho_2 \rho_3 e^{-2jk_2 l_2} + \rho_3 e^{-2jk_1 l_1} e^{-2jk_2 l_2}}{1 + \rho_1 \rho_2 e^{-2jk_1 l_1} + \rho_2 \rho_3 e^{-2jk_2 l_2} + \rho_1 \rho_3 e^{-2jk_1 l_1} e^{-2jk_2 l_2}} \quad (12a)$$

$$T = \frac{E'_{3+}}{E_{1+}} = \frac{1}{A}$$

$$= \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_3 e^{-jk_1 l_1} e^{-jk_2 l_2}}{1 + \rho_1 \rho_2 e^{-2jk_1 l_1} + \rho_2 \rho_3 e^{-2jk_2 l_2} + \rho_1 \rho_3 e^{-2jk_1 l_1} e^{-2jk_2 l_2}} \quad (12b)$$

그림 6은 유전체-메타 물질로 구성된 단위 2층 구조를 나타내었다. 유전체-메타 물질로 구성된 다층 구조와 그림 2와 같이 유전체로만 구성된 다층 구조의 차이점은 전파 행렬의 지수 함수 위상이 +에서 -, -에서 +로 바뀌는 것이다. 즉, 식 (12)에서 두 번째 slab의 $e^{-2jk_2 l_2}$ 는 $e^{+2jk_2 l_2}$ 로 바뀌게 된다.

만약, 그림 6에서 각 slab의 전기적 길이가 같다면 식 (12)는 식 (13)과 같이 간단하게 표현되어 손실 특성을 갖는 메타 물질도 간단하게 계산할 수 있다.

$$\Gamma = \frac{\rho_1 + \rho_2 e^{-2jk_1 l_1} + \rho_1 \rho_2 \rho_3 e^{-2jk_2 l_2} + \rho_3}{1 + \rho_1 \rho_2 e^{-2jk_1 l_1} + \rho_2 \rho_3 e^{-2jk_2 l_2} + \rho_1 \rho_3} \quad (13a)$$

$$T = \frac{\tau_1 \tau_2 \tau_3}{1 + \rho_1 \rho_2 e^{-2jk_1 l_1} + \rho_2 \rho_3 e^{-2jk_2 l_2} + \rho_1 \rho_3} \quad (13b)$$

IV. Simulation

본 논문에서는 ABCD 행렬을 이용한 다층 구조 해석을 검증하기 위해서 recursive 방법을 이용한 잘

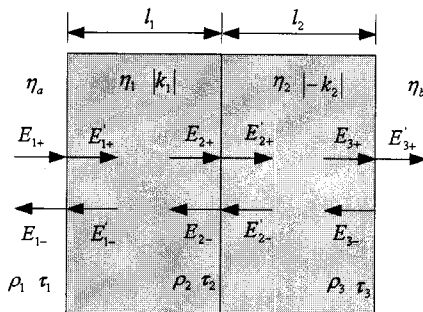


그림 6. 유전체와 메타 물질로 구성된 2층 구조
Fig. 6. Two layer of dielectric-meta material.

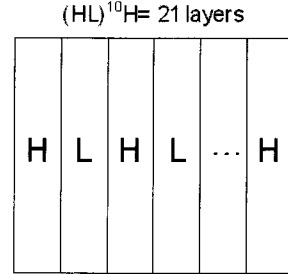


그림 7. 유전체 거울 구조(HL)¹⁰H
Fig. 7. Dielectric mirror structure(HL)¹⁰H.

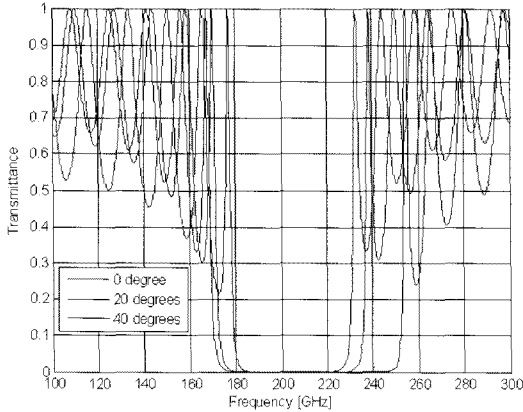
알려진 식 (1)과 비교하였다. 검증을 위해 사용한 다층 구조는 다층 구조 메타 물질 구조를 최초로 해석한 참고문헌 [10]에서 사용한(HL)¹⁰H인 유전체 거울 구조(dielectric mirror)이다.

(HL)¹⁰H 구조는 그림 7과 같은 유전체 거울 구조이며 (HL)¹⁰H는 (HL)이 10개 H가 1개로 전부 21층으로 구성된다. 유전체-유전체로 이루어진 (HL)¹⁰H 구조는 H층의 굴절 지수가 L층의 굴절 지수보다 큰 것을 의미하며, 메타 물질-유전체 구조의 경우 H는 유전체, L은 메타 물질을 의미한다.

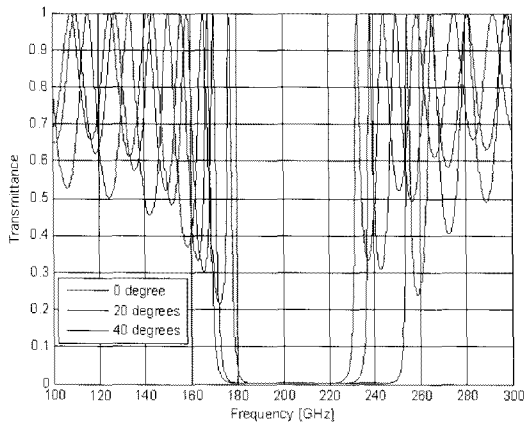
여기서 유전체 H의 굴절 지수는 2.25이고 L은 1.45이며, 중심 주파수는 200 GHz이고, 두께는 $n_H l_H = n_L l_L = \lambda_0 / 4$ 로 가정하였다. 주파수의 범위는 100 GHz에서 300 GHz로 계산하였으며, 여러 각도(0°, 20°, 40°)에서 투과량을 계산하였다. 그림 8(a)와 (b)에 각각 recursive 방법과 ABCD Matrix 방법을 이용한 다층 구조에 대한 결과를 나타내었다. 각도가 커질수록 200 GHz를 중심으로 오른쪽 방향으로 이동함을 알 수 있으며, 두 방법을 이용하여 동일한 결과값을 얻어, 본 논문에서 사용한 ABCD 행렬 방법이 유효함을 입증하였다.

그림 9는 그림 8과 동일한 조건에서 L이 메타 물질을 가질 경우 주파수에 따른 전송 특성을 나타내었다. 즉, H 물질의 굴절 지수는 2.25이며, L 물질의 굴절 지수는 -1.45로 하였다. 그림 9 결과 역시 두 방법을 이용한 결과가 동일함을 알 수 있다.

즉, recursive 방법과 ABCD 행렬은 다층 구조 해석에 대한 시작 방법만 다를 뿐 똑같은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있으며, 계산을 통해 recursive 방법을 이용한 2층 구조 해석에 대한 반사 계수와 투과 계수가 ABCD 행렬을 이용한 식 (10)과 동일함을 알



(a) Recursive 방법
(a) Recursive method



(b) ABCD 행렬 방법
(b) ABCD matrix method

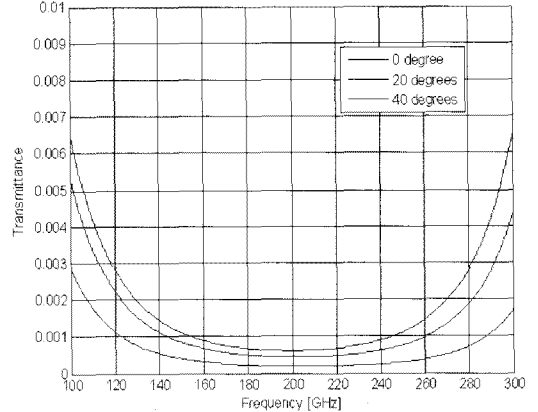
그림 8. Recursive 방법과 ABCD matrix를 이용한 $(HL)^{10}H$ 다층 구조 해석(유전체-유전체 구조: TE)

Fig. 8. $(HL)^{10}H$ multilayer analysis using recursive method and ABCD matrix method(dielectric-dielectric structure: TE).

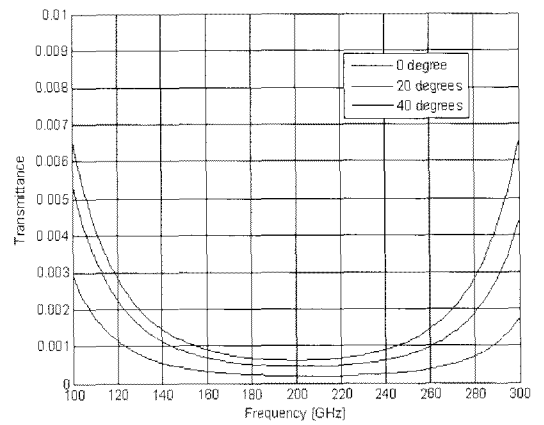
수 있다.

그림 9의 결과로부터 그림 8의 결과에 비해 전송 특성에서 나타나는 리플이 없고 광대역 전송 특성을 가지며 입사 각도에 대해서 전송 특성이 큰 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 검증된 ABCD 행렬 방법을 이용하여 메타 물질-유전체 구조의 일반적인 전달 특성을 확인하기 위해 유전체 거울 구조의 단위 구조(HL) 및(LH)의 개수를 10개에서 30개로 확장하였고, 주파



(a) Recursive 방법
(a) Recursive method

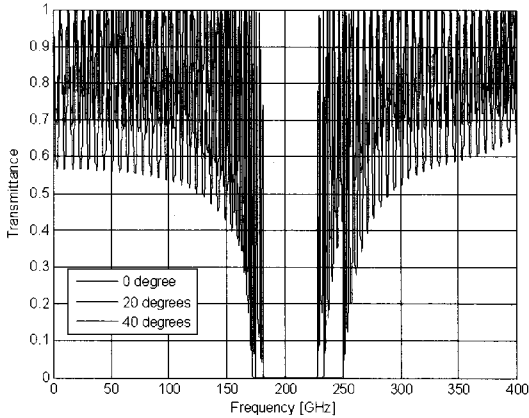


(b) ABCD matrix 방법
(b) ABCD matrix method

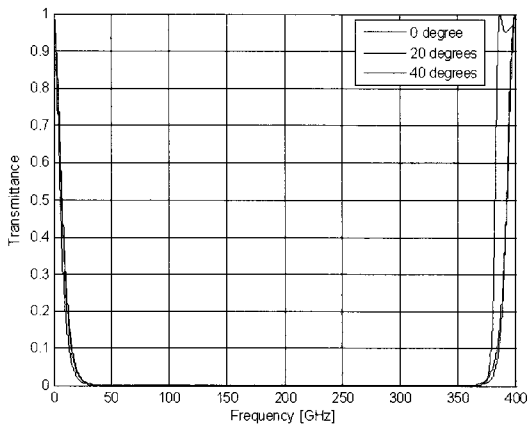
그림 9. Recursive 방법과 ABCD matrix를 이용한 $(LH)^{10}$ 다층 구조 해석(메타 물질-유전체: TE)

Fig. 9. $(LH)^{10}$ multilayer analysis using recursive method and ABCD matrix method(meta-dielectric structure: TE).

수 범위를 0에서 400 GHz까지 확장하여 그림 10과 같이 결과를 얻었다. 앞의 그림 8 및 그림 9와 비교할 때 slab의 개수가 늘어날수록 전송 특성의 cutoff 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었으며, 유전체-유전체 구조의 경우인 그림 10(a)의 경우, 전송 특성에서 나타나는 리플 특성이 열화되고 전송 통과 대역 특성이 제한됨을 알 수 있다. 하지만 메타 물질-유전체로 구성된 다층 구조인 그림 10(b)는 (a)와는 달리 리플이 거의 없고 광대역 전송 특성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그림 11(a)와 (b)에 유전체-유



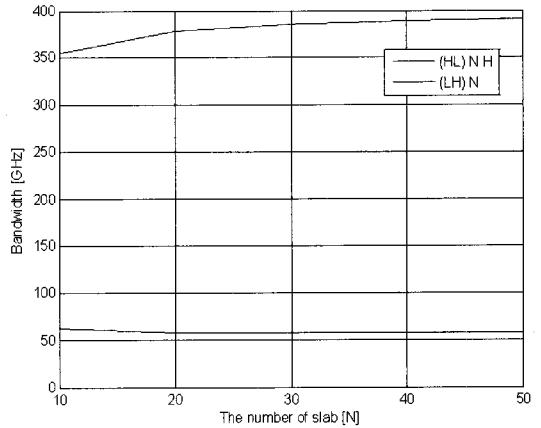
(a) $(HL)^{30}H$ (유전체-유전체 구조)
 (a) $(HL)^{30}H$ (dielectric-dielectric structure)



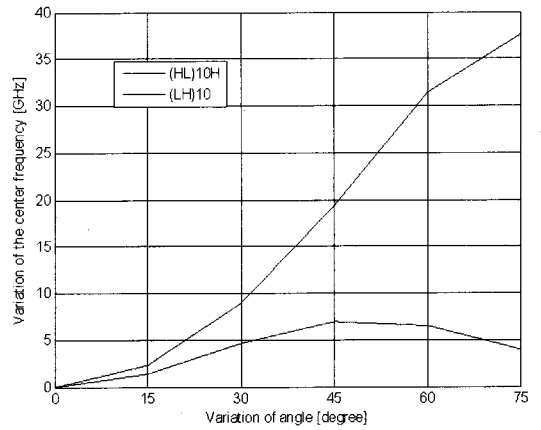
(b) $(LH)^{30}$ (메타 물질-유전체 구조)
 (b) $(LH)^{30}$ (meta-dielectric structure)

그림 10. ABCD matrix 방법을 이용한 다층 구조 해석(TE)
 Fig. 10. Multilayer analysis using ABCD matrix method(TE).

전체 및 메타 물질-유전체 기본 구조의 다층 개수에 따른 전송 특성의 대역폭과 동일한 다층 구조에 대해 전파의 입사 각도에 따른 중심 주파수의 이동 특성을 각각 비교하여 나타내었다. 전송 특성의 대역폭은 통과 전력의 1/2인 3 dB를 기준으로 하였다. 그림 11(a)로부터 다층의 갯수가 증가함에 따라서 유전체-유전체 단위 구조를 갖는 다층 구조에 비해 메타 물질-유전체의 단위 구조를 갖는 다층 구조가 광대역을 구현할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 앞서 기술한 바와 같이 다층의 갯수가 증가하더라도 cutoff 특성은 개선되지만, 대역폭 자체는 크게 증가



(a)



(b)

그림 11. (a) 다층 개수에 따른 전송 대역폭의 변화, (b) 입사각에 따른 중심 주파수 이동
 Fig. 11. (a) Transmission bandwidth as the number of layer, (b) Center frequency shift as the incident angle.

하지 않는다. 또한, 그림 7(b)로부터 동일한 다층 구조에서도 유전체-유전체 단위 구조보다 유전체-메타 물질의 단위 구조를 갖는 다층 구조가 입사각에 따른 영향을 덜 받는다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 이용하면 원하는 주파수 대역과 cutoff 특성을 갖는 최적의 유전체-메타 물질로 구성된 다층 구조를 설계할 수 있는 설계 파라미터를 추출할 수 있다.

앞서 언급한 바와 같이 초기 메타 물질 slab 연구는 비손실을 가정으로 이루어졌으며, 메타 물질을 가진 다층 구조도 비손실을 가정으로 전달 특성이 연구되었다. 그러나 실제로 구현되는 메타 물질도

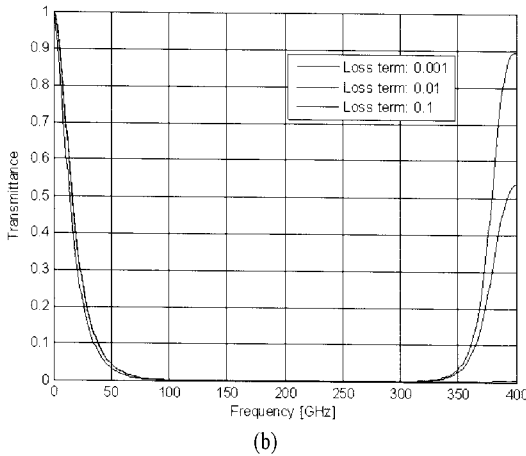
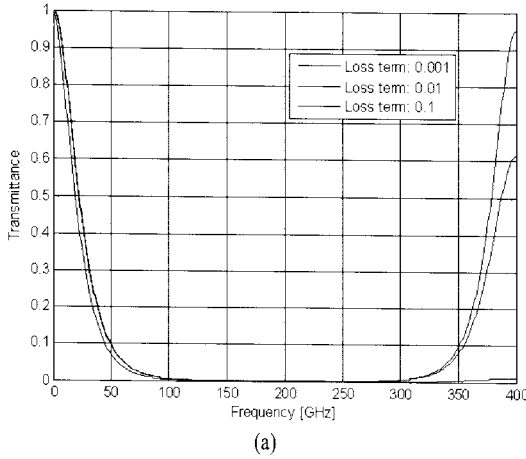


그림 12. (a) $(LH)^{10}$ 에 0도 입사할 때의 메타 물질 손실 변화, (b) 45도 입사에서의 메타 물질 손실 변화

Fig. 12. In case that wave incidents upon $(LH)^{10}$ and meta-material(L) has variation of loss term, (a) Normal incidence (b) Oblique incidence(45 degrees).

손실을 가지게 되며, 또한 물리적으로 메타 물질의 주파수 분산 특성 때문에 손실 특성을 가져야 하기 때문에 본 논문에서는 또한 메타 물질-유전체 구조에서 메타 물질이 손실을 가질 때의 $(LH)^{10}$ 를 해석하였다. 손실항인 ϵ'' 와 μ'' 는 각각 0.001에서 0.1까지 10배씩 증가하도록 하였고, 입사 각도는 수직 입사와 45도 입사로 고려하였다. 그림 12(a)는 수직 입사할 경우 각 손실 변화에 대한 전송 특성을 나타내었다.

고주파 부분에서 1보다 작은 값을 가지며, 손실이 커질수록 거의 0으로 감을 알 수 있다. 그림 12(b)는

45도로 입사할 경우로 수직 입사보다 투과되는 양이 적음을 알 수 있으며, 수직 입사의 경우와 마찬가지로 손실이 증가할수록 투과되는 양이 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 다층 구조 메타 물질에 적당한 손실을 갖게 한다면 넓은 대역에서 투과량이 0에 가까운 결과를 얻을 수 있다. 이는 메타 물질의 손실값에 따라서 메타 물질을 포함하는 다층 구조가 주파수 cutoff 특성 및 전달 특성의 변화를 갖게 된다는 것을 나타내기 때문에, 실제로 메타 물질을 이용하여 다층 구조를 설계 시 고려가 필요하다는 것을 의미한다.

V. 결 론

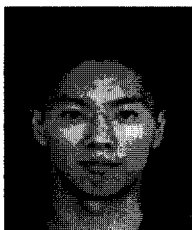
본 논문에서는 손실 메타 물질로 구성된 다층 구조 slab의 특성을 해석하였다. 기존 메타 물질을 가진 다층 구조 해석은 recursive 방법을 이용했기 때문에 계산의 복잡성으로 인한 무손실을 가정할 수 밖에 없었지만, 본 논문에서는 손실 메타 물질을 갖는 다층 구조를 해석하기 위해 해석 방법이 간단하고, 각 층에 대응하는 전파 행렬과 매칭 행렬의 추가로 임의의 다층 구조를 갖는 물질에 대한 전파 특성을 쉽게 얻을 수 있는 ABCD 행렬을 이용하였다. 본 논문에서는 손실 메타 물질 다층 구조 해석에 적용한 ABCD 행렬 방법의 유효함을 검증하기 위해서 유전체-유전체로 구성된 구조와 메타-유전체 물질로 구성된 기존에 해석된 다층 구조에 적용하여 recursive 방법과 비교하였으며, 동일한 해석 결과를 얻을 수 있음을 보였다. 본 논문에서 해석한 메타 물질을 갖는 다층 구조는 유전체 다층 구조보다 리플이 없고 광대역의 전송 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 실제로 메타 물질을 이용한 다층 구조를 구현하는 경우 손실이 있을 때 입사되는 각도와 손실의 정도에 따라서 전달 특성이 변화된다는 것을 확인할 수 있었으며, 손실 메타 물질을 다층 구조에 사용한다면 넓은 대역에서 투과량이 0에 가까운 전달 특성을 얻을 수 있었다.

본 논문의 결과를 이용하면 손실 메타 물질을 갖는 다층 구조를 안테나의 레이돔이나 전파를 차폐할 수 있는 차폐 물질 등에 다양하게 적용될 수 있는 응용 분야를 가질 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] V. G. Veselago, "Electrodynamics of substances with simultaneously negative electrical and magnetic permeabilities", *Soviet Physics Uspekbi*, vol. 10, no. 4, pp. 5-13, Jan.-Feb. 1968.
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures", *Physical Review Letters*, vol. 76, no. 25, pp. 4773-4776, Jun. 1996.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced linear media", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11. pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [4] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, "Experimental verifications of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [5] N. Engheta, R. W. Ziolkowski, *Metamaterials: Physics and Engineering Exploration*, IEEE, 2006.
- [6] J. B. Pendry, "Negative refraction makes a perfect lens", *Physical Review Letters*, vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [7] S. A. Ramakrishna, J. B. Pendry, D. Schurig, D. R. Smith, and S. Schultz, "The asymmetric lossy near-perfect lens", *Journal of Modern Opt.*, vol. 49, pp. 1747-1762, 2002.
- [8] Y. Zhang, T. M. Grzegorzczuk, and J. A. Kong, "Propagation of electromagnetic waves in a slab with negative permittivity and negative permeability", *Progress in Electromagnetic Research PIER*, vol. 35, pp. 271-286, 2001.
- [9] J. A. Kong, "Electromagnetic wave interaction with stratified negative isotropic media", *Progress in Electromagnetic Research PIER*, vol. 35, pp. 1-52, 2002.
- [10] H. Cory, C. Zach, "Wave propagation in metamaterial multi-layerd structures", *Microwave and Optical Letters*, vol. 40, no. 6, Mar. 2004.
- [11] N. Garcia, M. Nieto-Vesperinas, "Left-handed materials do not make perfect lens", *Physical Review Letters*, vol. 88, no. 20, pp. 207403-1~207403-4, May 2002.
- [12] L. Shen, S. He, "Studies of imaging characteristics for a slab of a lossy left-handed material", *Physics Letter A*, pp. 298-305, 2003.

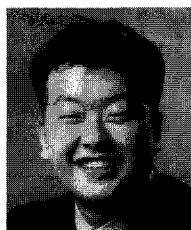
이 경 원



과 해석

2003년: 대전대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2005년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로

홍 익 표



정보통신총괄 책임연구원

1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
 2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원
 2006년 2월~2007년 2월: Texas A&M University, Visiting Scholar
 2003년 3월~현재: 공주대학교 정보통신공학부 조교수
 [주 관심분야] 전자기 수치 해석, 스펙트럼 관리, 이동 통신

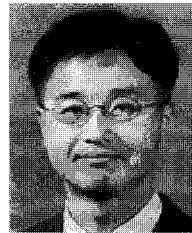
정 영 철



2001년: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
1993년 4월~현재: 국방기술품질원 선임연구원
2002년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] EMI/EMC, 마이크로

과 해석

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow

1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수
[주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막공진 구조