
2D-FDTD 방법을 이용한 메타물질 Slab의 주파수 영역 특성

홍 익 표*

Frequency Domain Characteristics of the Metamaterial Slab Using 2D-FDTD

Ic-Pyo Hong*

이 논문은 2007년도 정부재원(교육과학기술부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-521-D00343)

요 약

본 논문에서는 2차원 시간영역 유한차분법(2D-FDTD)을 이용하여 메타물질(Metamaterial) Slab의 주파수 영역 특성을 구하는 방법을 연구하였다. 일반적으로 메타물질의 해석방법에는 FDTD가 가장 광범위하게 사용되고 있는데 주파수 분산특성을 갖는 유전율과 투자율 모델을 가정하기 때문에, 정확한 주파수 응답특성을 구하기가 힘들다는 단점이 있다. 본 논문에서는 2차원 구조의 메타물질 Slab에 이미 광대역 특성을 갖는 가우시안 펄스와 제한된 대역폭 특성을 갖는 m - n - m 주기를 갖는 Sine 입력펄스를 각각 인가하여 주파수특성으로서 산란계수를 구하는 방법을 제안하고 비교하여 제한된 대역폭에 대한 주파수 특성 결과를 제시하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 사용하면 메타물질을 이용한 다양한 회로구조에 대하여 제한된 대역폭에 대한 주파수 특성을 얻을 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, the scattering parameters of the metamaterial slab are obtained using the 2D FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method. FDTD method is one of strongest electromagnetic numerical method which is widely used to analyze the metamaterial structure because of its simplicity. But it is very difficult to obtain frequency response of metamaterial itself because frequency dispersive model such as Lorentz, Drude model are used in FDTD. We used the well-known m - n - m cycle sine pulse to obtain the frequency response of the metamaterials. Comparisons between the wideband Gaussian input pulse and band-limited m - n - m cycle sine pulse are performed in this paper also. From the results, we concluded that the scattering parameters in frequency domain can be obtained using specific input pulse in FDTD even if the response has valid only for limited bandwidth.

키워드

시간영역 유한차분법, 메타물질, 주파수 영역

I. 서론

정보화 사회로의 급속한 발전 추세에 따라 무선 통신,

이동 통신에 적용될 수 있는 안테나 및 마이크로파 회로의 응용범위는 바이오기술과 나노기술 등 정보기술과 융합분야 등으로 다양해지고 있으며, 따라서 그 중요성

또한 증가하고 있다. 학제간 융합을 비롯한 다양한 학문 분야에서 이러한 회로의 설계기술에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 그 중 메타물질과 같은 전자기 신소재를 이용한 마이크로파 응용 회로에 관한 연구의 필요성은 점차 증가하고 있다.

메타물질은 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 물질이다. 메타물질로는 NIM(Negative Index Material), DNG(Double Negative), LHM(Left-Handed Material), BW(Backward Wave) 매질, EBG(Electromagnetic Band Gap) 구조, Hi-impedance (hi-z) 평면 구조 등이 존재한다. 1996년 Pendry[2]에 의해 금속성 막대로 이루어진 주기적 격자 구조의 유효유전율이 특정 주파수 대역에 음의 값을 갖는다는 사실과 슬롯을 가진 원형 공진기 구조의 유효 투자율이 특정 주파수 대역에서 음의 값이 된다는 사실이 밝혀지면서 메타물질로서 DNG 물질에 관한 연구가 각광을 받기 시작하였다[3]. 2001년 Shelby[4]는 메타물질을 이용하여 DNG 물질을 구현하고 이를 통해 얻은 실험적 결과가 이론적으로 예상되었던 결과와 일치한다는 것을 보여주었다. 최근에는 메타물질의 실험적 구현뿐만 아니라 이론적 해석 및 수치 해석법을 이용한 분석, 마이크로파 응용회로도 활발히 연구되고 있다[5]. 또한, 메타물질로서 LH 물질을 이용한 다양한 마이크로파 회로 소자들이 발표되고 있다[6].

메타물질을 해석하기 위한 전자기 수치해석 방법으로는 시간영역 유한차분법(Finite-Difference Time-Domain : FDTD)이 가장 널리 사용되고 있다. FDTD 방법은 구현이 간단하고 맥스웰방정식으로부터 직접적으로 계산을 하기 때문에 전기자기장의 전파를 직관적으로 이해할 수 있으며, 또한 시간영역에서의 데이터로부터 광대역의 주파수 영역의 특성을 구하는 것이 가능하다는 장점을 갖는다[7]. 그러나 메타물질의 경우에는 음의 유전율과 투자율을 갖기 때문에 더 이상 일반적인 FDTD 방법으로 전개할 수 없으며[8], 메타물질에서의 전파 특성을 정확하게 계산하기 위하여 ADE(Auxiliary differential equation) 방법, RC(Recursive convolution) 방법 또는 Z 변환 방법 등이 사용된다[9]. 또한, FDTD 방정식에서 주파수 분산특성을 갖는 메타물질의 음의 유전율과 투자율을 모델링하기 위해서는 Lorentz, Debye

은 Drude 모델을 이용하여 주파수 영역 유전율과 투자율을 포함하는 FDTD 방정식을 전개할 수 있다[7]. 본 논문에서는 메타물질 Slab 에서의 전파특성을 계산하기 위하여 ADE 방법과 Drude 모델을 각각 사용하고 흡수경계조건으로는 1996년 Gedney[10]에 의해 제안된 UPML(Uniaxial Perfectly Matched Layer) 경계조건을 사용하였다. 대부분의 메타물질과 관련된 FDTD 수치해석방법에 관련된 논문은 주로 시간영역에서의 전파특성만 다루고 있으며, 메타물질 자체에 대한 S-parameter 와 같은 주파수 영역특성에 대한 결과를 다루고 있지 않다. 이는 주파수 분산특성을 갖는 유전율과 투자율 모델을 사용하면서 주파수영역에서 얻는 광대역 데이터가 유효하지 않으며, 입력신호로 일반적으로 사용하는 가우시안 펄스가 효과적이지 않기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 주파수 영역에서 메타물질의 S-parameter 와 같은 주파수 특성 파라미터를 얻기 위해서 대역폭이 제한된 입력 신호로서 m-n-m cycle sine 펄스를 사용하였다.

II. 메타물질 Slab

(1) 메타물질 해석을 위한 2D-FDTD

본 논문에서는 메타물질을 해석하기 위해 전자기 수치해석 방법으로 가장 널리 사용되는 FDTD 방법을 사용하였다. 메타물질을 FDTD 방법을 사용해 해석하기 위해서 몇 가지 문제점을 극복해야 한다. 일반적인 FDTD 방법의 경우에는 두 유전체의 경계면에 위치하는 노드의 경우 양쪽 유전율의 평균값을 보통 사용하게 되는데, RHM(Right-Handed Material) 과 LHM의 경우 경계면에서 유전율값이 영이 되기 때문에 FDTD 방정식이 수렴하지 않게 된다[9][11]. 이러한 문제점을 극복하고, 물리적인 가역성을 만족하기 위해 LHM 과 같은 메타물질은 서론에서 기술한 바와 같이 주파수 분산특성을 갖는 Lorentz, Debye 혹은 Drude 모델을 이용하여 주파수 영역 유전율과 투자율을 사용하여 FDTD 방정식을 전개할 수 있다[7][12]. 본 논문에서는 식(1) 과 같은 Drude 모델을 사용하였다.

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_{pc}^2}{\omega(\omega - i\nu_c)} \right] \quad (1)$$

$$\mu(\omega) = \mu_0 \left[1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega(\omega - i\nu_m)} \right]$$

여기서 ω_{pc} 는 전기 플라즈마 주파수(electronic plasma frequency)이고, ω_{pm} 은 자기플라즈마 주파수(magnetic plasma frequency), ν_c 는 전기충돌 주파수(electronic collision frequency), ν_m 은 자기충돌 주파수(magnetic collision frequency)이다. 그림 1에 주파수에 따른 유전율 특성을 Drude 모델을 사용하여 나타내었다. 식(1)에서 $\omega_{pc} = 30\text{GHz}$, $\nu_c = 0$ 으로 설정하면, $\epsilon(\omega)$ 는 $\omega_{pc} = \omega$ 인 경우 -1 의 값을 갖게 되어 메타물질의 특성을 가지게 되며 다른 주파수 대역에서는 서로 다른 값의 유전율을 갖는다.

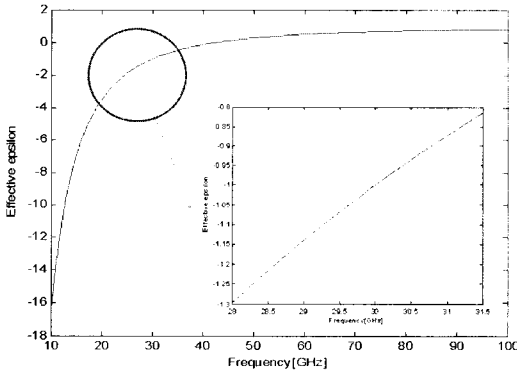


그림 1. 주파수에 따른 유전율 : Drude 모델
Figure 1. Frequency dispersive permittivity : Drude model

본 논문에서는 그림 2와 같은 이차원 구조의 메타물질 Slab을 해석하기 위해 TM-z 모드의 2D-FDTD에 대해서만 고려를 했기 때문에 주파수 영역의 맥스웰 방정식 $\hat{D} = \hat{\epsilon}\hat{E}$ 과 $\hat{B} = \hat{\mu}\hat{H}$ 의 관계로부터 식(2)-(7)와 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial D_z}{\partial t} = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \quad (2)$$

$$D_z = \epsilon_0 \left[1 - \frac{\omega_{pc}^2}{\omega(\omega - i\nu_c)} \right] E_z \quad (3)$$

$$\frac{\partial B_x}{\partial t} = -\frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (4)$$

$$B_x = \mu_0 \left[1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega(\omega - i\nu_m)} \right] H_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial B_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (6)$$

$$B_y = \mu_0 \left[1 - \frac{\omega_{pm}^2}{\omega(\omega - i\nu_m)} \right] H_y \quad (7)$$

식(2)-(7)로부터 주파수 영역에서 정의된 맥스웰 방정식인 식(4), (6), (8)을 페이저(Phasor)를 이용하여 시간영역으로 변환하면 기존의 FDTD 방정식과 같은 형태의 시간영역 차분방정식을 얻을 수 있다.

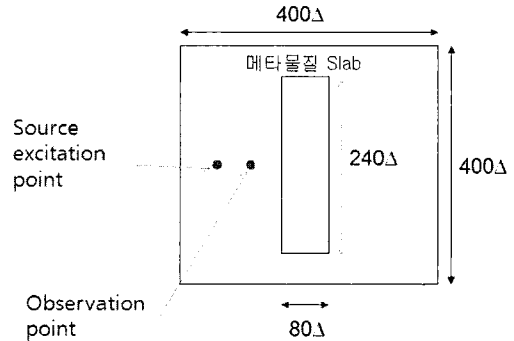


그림 2. 메타물질 Slab
Figure 2. Simulation Structure of the Metamaterial slab

(2) 메타물질 해석을 위한 흡수경계조건 : UPML

FDTD 알고리즘을 컴퓨터에서 구현하기 위해서는 계산영역이 유한하기 때문에 이로부터 발생하는 유한 경계면에서 진행되는 전파의 처리조건이 매우 중요하고, 현재까지 이를 위한 다양한 형태의 흡수경계조건이 제안되어 왔다. 가장 널리 사용되는 흡수경계조건으로 1994년 Berenger에 의해 가상적인 흡수물질을 계산영역 주변에 위치시켜 강제로 전자파를 흡수시키는 PML (Perfectly matched layer) 경계조건[13]이 제안되면서 FDTD에는 대부분 PML 경계조건이 일반적으로 사용되게 되었다. 그러나 Berenger에 의해 제안된 PML 경계조건은 그 성능이 이전의 흡수경계조건에 비해 훨씬 우수하지만 PML을 위한 영역에서의 필드를 각각 직교성분으로 나누어 진개를 하면서 메모리의 비효율성, 맥스웰

방정식과의 비연계성을 가진 수학적 모델 등의 단점을 가진다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 1996년 Gedney 에 의해 UPML 경계조건이 제안되었다[10]. UPML 은 Berenger 의 PML 과는 다르게 흡수경계영역에서 필드를 분리하지 않고 계산영역의 필드를 그대로 사용하기 때문에 메모리 효율적이며 개념적으로 맥스웰 방정식에서 유도되기 때문에 훨씬 사용이 용이하다. 따라서, 본 논문에서는 메타물질 Slab 특성을 해석하기 위하여 흡수경계조건으로 2D-FDTD 에 UPML 경계조건을 적용하였다. UPML 경계조건에서는 전체 계산영역을 균일한 주 계산영역 매질과 PML 이 적용되기 위한 Uniaxial anisotropic 매질로 나누어 계산하며, Uniaxial 매질을 적용하게 되면 Berenger PML에서 발생하는 비물리적인 필드의 분리가 없어지면서 비슷한 성능을 가진 흡수경계조건을 구현할 수 있다는 장점이 있다.

FDTD 계산 영역에서, Maxwell 의 일반적인 방정식은 식(8) 과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot [\epsilon] \vec{E} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot [\mu] \vec{H} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -j\omega [\mu] \vec{H} - [\sigma_M] \vec{H} \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= j\omega [\epsilon] \vec{E} + [\sigma_E] \vec{E} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, σ_M, σ_E 는 anisotropic 매질의 도전율을 나타낸다. 매질상수로서 $[\epsilon], [\mu]$ 는 각각 다음과 같은 복소 텐서값의 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} [\epsilon] &= \epsilon_0 \begin{pmatrix} \epsilon_x + \frac{\sigma_E^x}{j\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y + \frac{\sigma_E^y}{j\omega} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z + \frac{\sigma_E^z}{j\omega} \end{pmatrix} \\ [\mu] &= \mu_0 \begin{pmatrix} \mu_x + \frac{\sigma_M^x}{j\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y + \frac{\sigma_M^y}{j\omega} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z + \frac{\sigma_M^z}{j\omega} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 두 매질사이 정합이 되기 위한 조건은

$$\frac{[\epsilon]}{\epsilon_0} = \frac{[\mu]}{\mu_0} \quad (10)$$

로 주어진다. 식 (9)와 식 (10)을 보다 일반적인 두 매질 ϵ_1, μ_1 과 $[\epsilon_2], [\mu_2]$ 의 관계로 다시 쓰면,

$$[\epsilon_2] = \epsilon_1 \vec{s}, \quad [\mu_2] = \mu_1 \vec{s}, \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} s_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{pmatrix} \quad (11)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 s_x 는 식 (9) 로부터 Berenger 의 PML 과 비교하여, $1 + \sigma_x / j\omega \epsilon_1$ 로 정의된다. 따라서, 매질에서 2D 직교좌표계 TM-z 모드에 대해서 식 (8)를 식 (11)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j\omega \epsilon_0 s_x s_y E_z \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} &= -j\omega \mu_0 \frac{s_y}{s_x} H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega \mu_0 \frac{s_x}{s_y} H_y \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12) 로부터 FDTD 를 위한 차분 방정식을 유도할 수 있다.

(3) 주파수 특성을 얻기 위한 입력펄스

일반적으로 FDTD 방법에서는 주파수 특성을 얻기 위하여 입력신호로 식(13)과 같은 광대역특성을 갖는 가우시안(Gaussian) 펄스를 사용하게 된다[7].

$$G(n\Delta t) = e^{-(n\Delta t - n_0\Delta t)^2 / (\beta\Delta t)^2} \quad (13)$$

여기서 n 은 전체 시뮬레이션 시간, n_0 는 펄스의 중심 위치값, Δt 는 시간간격 그리고 β 는 가우시안 펄스의 폭을 정의하는 파라미터를 의미한다. 그림 3 에 일반적으로 FDTD 방법에서 사용되는 가우시안 펄스의 시간영역파형과 주파수영역 파형을 각각 나타내었다. 이미 알려진 대로 가우시안 펄스는 주파수 영역에서도 광대역 특성을 갖는다.

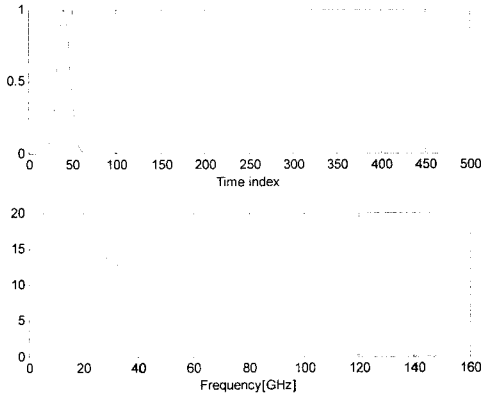


그림 3. Simulation에서 사용한 가우시안 펄스의 시간영역 파형과 주파수영역 파형
Figure 3. Time domain and frequency domain plots of Gaussian input pulse

그림 1과 같이 Drude 모델을 이용하여 유전율특성을 구해보면 플라즈마 주파수 주변에서만 원하는 음의 유전율을 갖게 되며 다른 주파수에 대해서는 서로 다른 값의 양 또는 음의 유전율을 가지게 되어 가우시안 펄스를 사용하여 얻은 주파수 영역의 결과가 모두 의미가 있지 않게 된다. 따라서, 메타물질 Slab의 주파수 특성을 얻기 위해서는 가우시안 펄스로부터 얻은 주파수 특성 결과로부터 의미가 있는 대역의 주파수 특성만 분리를 할 필요가 있다. 본 논문에서는 특정 주파수대역의 특성을 얻기 위해 식(14)와 같은 제한된 대역폭을 갖는 m-n-m cycle sine 펄스를 사용하였다[14].

$$F(n\Delta t) = \begin{cases} G_{on}(n\Delta t)\sin(\omega_0 n\Delta t) & \text{for } 0 \leq n\Delta t < mT_p \\ \sin(\omega_0 n\Delta t) & \text{for } mT_p \leq n\Delta t \leq (m+n)T_p \\ G_{off}(n\Delta t)\sin(\omega_0 n\Delta t) & \text{for } (m+n)T_p < n\Delta t \leq (m+n+m)T_p \\ 0 & \text{for } t > (m+n+m)T_p \end{cases} \quad (14)$$

여기서 $T_p = 2\pi/\omega_0 = 1/f_0$ 로 한 주기를 의미하며, $G_{on}(t)$ 와 $G_{off}(t)$ 는 식(15)로 주어지며 모두 three-derivative smooth window 함수를 의미한다.

$$\begin{aligned} G_{on}(t) &= 10x_{on}^3 - 15x_{on}^4 + 6x_{on}^5 \\ G_{off}(t) &= 1.0 - [10x_{off}^3 - 15x_{off}^4 + 6x_{off}^5] \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 x_{on} 과 x_{off} 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} x_{on} &= 1.0 - (mT_p - t)/mT_p \\ x_{off} &= [t - (m+n)T_p]/mT_p \end{aligned} \quad (16)$$

이와 같은 m-n-m cycle sine 펄스는 m 주기 동안 on 되고, n 주기 동안 일정한 주파수 f_0 를 유지하다가 다시 m 주기 동안 off가 되는 펄스로 f_0 를 중심으로 제한된 대역폭을 갖는다. 그림 4에 본 논문에서 사용한 m-n-m cycle sine 펄스의 시간영역 파형과 주파수 영역 파형을 나타내었다. $f_0 = 30\text{GHz}$ 인 경우 그림 4로부터 제한된 대역폭을 갖는 것을 확인할 수 있다.

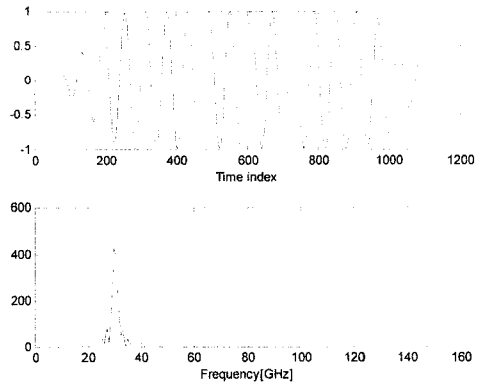


그림 4. Simulation에서 사용한 m-n-m cycle sine 펄스의 시간영역 파형과 주파수영역 파형
Figure 4. Time domain and frequency domain plots of m-n-m cycle sine input pulse

III. 주파수 응답특성

본 논문에서는 앞 절에서 설명한 바와 같이 흡수경계 조건으로 UPML을 적용하고 입력펄스로는 플라즈마 주파수 $f_0 = 30\text{GHz}$ 를 갖는 m-n-m cycle sine 펄스를 사용한 2D FDTD 방법을 사용하여 그림 2와 같은 메타물질 Slab을 시뮬레이션하였다. 주파수 특성을 관찰하기 위한 메타물질 Slab의 그림 2와 같은 구조에서 전체 계산 영역은 400×400 이며, 공간격자 $\Delta x = \Delta y = 0.25m$

이고, 시간간격 Δt 는 안정조건을 만족하도록 $\Delta t = 0.95\Delta x / (\sqrt{2}c)$ 로 설정하였다. 메타물질 Slab 의 유전율과 투자율은 f_0 에서 각각 -1 의 값을 갖는다.

그림 5 에 메타물질 Slab에서 시간에 따른 파형의 전파특성을 나타내었다. 기존 연구결과에서 보여주는 것과 다르지 않은 파형의 전파특성을 볼 수 있으며[5], 시간의 경과에 따라 메타물질 Slab 통과 후 다시 초점이 만들어지는 특성을 확인할 수 있다.

일반적으로 FDTD 방법에서 해석하고자하는 구조에 대해 시간영역의 전체 전계(Total field) 값과 입력되는 전계값의 차이(Scattering field)로부터 주파수 영역에서의 S-parameter 와 같은 주파수 특성을 구할 수 있다.

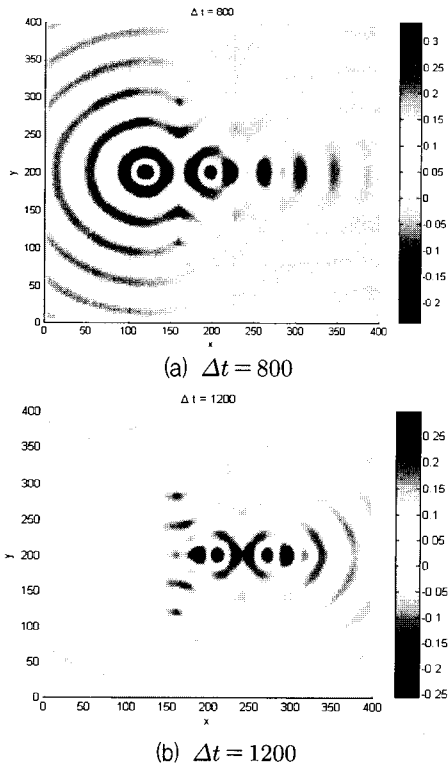


그림 5. m-n-m Sine 입력신호에 대한 시간에 따른 전파특성
Figure 5. Propagation characteristics of m-n-m Sine pulse in time domain

앞 절에서 기술한대로, 메타물질의 경우 Drude 모델 유전율과 투자율을 모델링한 경우 특정 주파수 대역

에서만 원하는 메타물질의 특성을 유지하기 때문에, 전체 대역에서 S-parameter 특성을 구할 수 없다. 그림 6 에 광대역의 가우시안 펄스를 입력으로 한 경우 S-parameter 특성을 나타내었다. 전체 주파수대역에서 S-parameter 데이터를 얻을 수 있지만 실제 $\epsilon(\omega) = -1$, $\mu(\omega) = -1$ 를 만족하는 영역은 그림 1 에 나타낸 것과 같이 f_0 즉 30GHz 주변에서만 만족하게 되어 나머지의 주파수 영역 결과는 정상적인 값을 갖는다고 볼 수 없다. 따라서, 유전율과 투자율 값이 가정한 메타물질 특성을 만족하는 주파수 대역에 대해서만 주파수특성을 고려해야 한다.

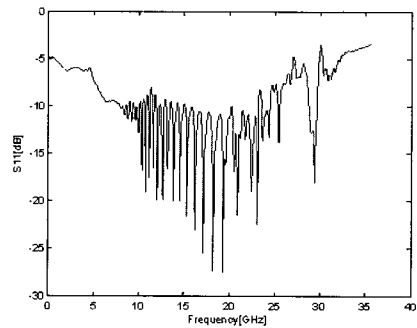


그림 6. 가우시안 입력펄스를 사용한 경우 주파수 영역특성
Figure 6. Frequency domain characteristics in case of using Gaussian pulse as input

그림 7 에 가우시안 펄스와 m-n-m cycle sine 펄스를 사용한 경우 얻을 수 있는 f_0 주변의 S-parameter 특성을 나타내었다.

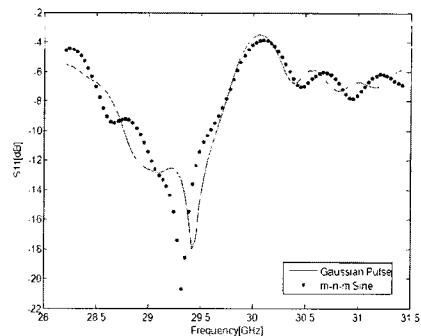


그림 7. 입력펄스에 따른 주파수 영역 특성비교
Figure 7. Comparisons of frequency domain characteristics for two input pulses

앞서 그림 4에서 얻은 m-n-m cycle sine 펄스의 주파수 영역 데이터로부터 이 펄스를 입력으로 사용한 경우에는 28GHz - 32GHz 범위에서 주파수 특성을 구할 수 있다는 것을 확인할 수 있으며, 가우시안 펄스로부터 얻은 같은 대역의 S-parameter 결과와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 메타물질 Slab에서의 전파특성으로서 주파수 영역 특성중 하나인 S-parameter 값을 계산하기 위하여 ADE 방법과 Drude 모델을 각각 사용하고 흡수 경계조건으로는 UPML 경계조건이 적용된 2D-FDTD 방법을 사용하였다. 대부분의 메타물질과 관련된 FDTD 수치해석방법에 관련된 논문은 주로 시간영역에서의 전파특성만 다루고 있는 반면 본 논문에서는 메타물질 자체에 대한 S-parameter 와 같은 주파수 영역특성에 대한 결과를 얻기 위하여 기존의 가우시안 입력펄스뿐만 아니라, 제한된 대역폭을 갖는 m-n-m cycle sine 펄스를 입력으로 사용하였다. 본 논문에서는 기존 가우시안 펄스를 사용하였을 경우 주파수 분산특성을 갖는 유전율과 투자율 모델을 사용하면서 주파수영역에서 얻는 광대역 데이터가 유효하지 않은 점을 개선하기 위해 m-n-m cycle sine 펄스의 주파수 영역특성과 Drude 모델의 주파수 영역특성을 비교하여 특정 대역에 대한 주파수 영역 특성을 얻을 수 있었다. 본 논문에서 제안한 과정을 이용하면 그동안 논의되지 않았던 메타물질 자체의 주파수 영역 특성을 얻을 수 있으며, 메타물질을 이용한 다양한 회로구조에 대하여 제한된 대역폭에 대한 주파수 특성을 얻을 수 있다.

참고문헌

- [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 Mesostuctures," *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, 6 April. 2001.
- [5] N. Engheta and R. W. Ziolkowski, *Metamaterials : Physics and Engineering Explorations*, IEEE, 2006.
- [6] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*, John Wiley & Sons, 2006.
- [7] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics : the Finite-Difference Time-Domain Method*, Boston, 3rd Ed., Artech House, 2005.
- [8] M. W. Feise, J. B. Schneider, and P. J. Bevelacqua, "Finite-difference and pseudospectral time-domain methods applied to backward- wave metamaterials," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 52, pp. 2955-2962, Nov. 2004.
- [9] Y. Zhao, P. Belov and Y. Hao, "Improvement of Numerical Accuracy in FDTD Modelling of Left-Handed Metamaterials," 2006 *IET Seminar on Metamaterials for Microwave and Millimeterwave Applications*, pp.153-157, Sept. 2006.
- [10] S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer absorbing media for the truncation of FDTD lattices," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 44, pp. 1630-1639, 1996.
- [11] A. A. Sukhorukov, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, "Wave scattering by metamaterial wedges and interfaces," *Int. J. Numer. Model.* Vol. 19, pp. 105-117. Mar. 2006.
- [12] Y. Hao, L. Lu, and C. G. Parini, "Time-domain modeling on wave propagation through single/multilayer left-handed meta-materials slabs," *ICAP 2003*, vol.2, pp.610-613, Apr. 2003
- [13] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Computational Physics*, Vol. 114, pp.185-200, 1994.

- [14] R. W. Ziolkowski and E. Heyman, "Wave propagation in media having negative permittivity and permeability," *Phys. Rev. E, Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Top.*, vol. 64, pp.056 625/1 - 056 625/15, Nov. 2001.

저자소개



홍 익 표(Ic-Pyo Hong)

1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과
(공학사)

1996년 2월 : 연세대학교 전자공학과
(공학석사)

2000년 2월 : 연세대학교 전기컴퓨터공학과(공학박사)

2000년 3월~2003년 2월 : 삼성전자 정보통신총괄 책임
연구원

2006년 2월~2007년 2월 : Texas A&M University, Visiting
Scholar

2003년 3월~현재 : 공주대학교 정보통신공학부 조교수

※관심분야 : 전자기 수치해석, 스펙트럼 관리, 이동통신