

---

# 고차모드 시간영역 유한차분법을 이용한 원통형 메타물질 Slab 의 해석

홍익표\*

Analysis of the Cylindrical Metamaterial Slab Using the Higher Order-mode Finite  
Difference Time Domain Method

Ic-Pyo Hong\*

---

이 논문은 2008년도 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음

---

## 요 약

본 논문에서는 고차모드 시간영역 유한차분법(FDTD)을 이용하여 원통형 메타물질 Slab의 주파수 영역 특성을 정확하게 구하는 방법을 연구하였다. 메타물질의 해석방법에는 분산매질 FDTD 방정식이 가장 광범위하게 사용되는데 주파수 분산특성을 갖는 유전율과 투자율 모델을 가정하기 때문에, 주파수 응답특성을 구하기 위해서는 주파수 영역에서 차분방정식을 전개해야 한다. 본 논문에서는 고차모드 FDTD 방법을 유도하여 기존의 분산매질 FDTD 방법과 비교하여 유전체물질에서는 동일한 결과를 얻을 수 있지만 메타물질 해석에서는 오차가 발생을 한다는 것을 확인하였다. 원통형 메타물질 Slab을 해석하기 위해서 고차모드 FDTD 방법을 이용하면 계산오차를 줄일 수 있고 정확한 주파수 특성을 얻을 수 있다. 본 논문에서 제안한 방법을 사용하면 메타물질을 이용한 다양한 회로구조에 대하여 정확한 주파수 특성을 얻을 수 있다.

## ABSTRACT

In this paper, the higher order FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method is used to obtain the frequency response characteristics of the cylindrical metamaterial slab. FDTD method is one of strongest electromagnetic numerical method which is widely used to analyze the metamaterial structure because of its simplicity and the dispersive FDTD equation which has the dispersive effective dielectric constant and permeability are derived to analyze the metamaterials. This derived dispersive FDTD equation has no errors in analyzing the dielectric materials but there are some time and frequency errors in case of analyzing the metamaterials. We used the higher order FDTD method to obtain the accurate frequency response of the metamaterials. Comparisons between the dispersive FDTD method and the higher order FDTD method are performed in this paper also. From the results, we concluded that more accurate frequency response for various metamaterials applications can be obtained using the proposed method in this paper.

## 키워드

고차모드 시간영역 유한차분법, 원통형 메타물질, 주파수 응답

## Key word

Higher Order-mode Finite Difference Time Domain method, Cylindrical Metamaterial, Frequency Response

---

\* 공주대학교 정보통신공학부 (교신저자)

접수일자 : 2009. 07. 28

심사완료일자 : 2009. 08. 20

## I. 서 론

정보화 사회로의 급속한 발전 추세에 따라 무선 통신, 이동 통신에 적용될 수 있는 안테나 및 마이크로파 회로의 응용범위는 바이오테크놀로지와 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 소재를 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 전자기장장의 전파를 직접적으로 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 혹은 Drude 모델을 이용하여 주파수 영역 유전율과 투자율을 포함하는 FDTD 방정식을 전개할 수 있다[7]. 본 논문에서는 그림 1과 같은 원통형 메타물질 Slab 에서의 전파특성을 계산하기 위하여 ADE 방법과 Drude 모델을 각각 사용하고 주파수특성 파라미터를 얻기 위해서 대역폭이 제한된 입력신호로서 m-n-m cycle sine 펄스를 사용하였다. 흡수경계조건으로는 1996년 Gedney[10]에 의해 제안된 UPML(Uniaxial Perfectly Matched Layer) 경계조건을 사용하였다.

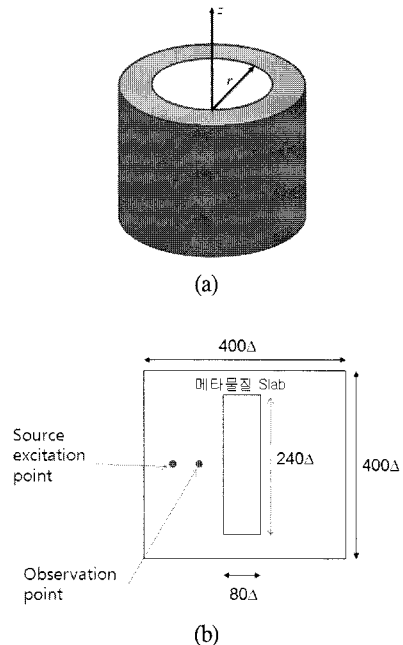


그림 1. 원통형 메타물질 Slab  
 (a) 원통형 메타물질 Slab  
 (b) 2D 계산을 위한 원통형 메타물질 Slab  
 Figure 1. Simulation Structure of the Cylindrical Metamaterial Slab  
 (a) Cylindrical Metamaterial Slab  
 (b) Cylindrical Metamaterial Slab for 2D Simulation

기존에 적용되었던 ADE 방법을 개선한 고차모드를 적용한 차분방정식을 사용하여 원통형 메타물질 Slab의 주파수 특성을 얻었으며, 기존의 ADE 방정식보다 정확한 주파수 특성을 갖는다는 것을 확인하였다.

## II. 원통형 메타물질 Slab 해석을 위한 시간영역 유한차분법

### (1) 메타물질 해석을 위한 고차모드 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.

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

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

여기서  $\omega_{pe}$ 는 전기 플라즈마 주파수(electronic plasma frequency)이고,  $\omega_{pm}$ 은 자기플라즈마 주파수(magnetic plasma frequency),  $\nu_e$ 는 전기충돌 주파수(electronic collision frequency),  $\nu_m$ 은 자기충돌 주파수(magnetic collision frequency)이다.

본 논문에서는 그림 1 과 같은 원통형 구조의 메타물질 Slab 을 해석하기 위해 회전축을 중심으로 대칭하는 성질을 이용하여 2차원 원통형 FDTD 방법을 적용

하였다. TM-z 모드의 2D-FDTD 에 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.

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

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

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

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

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

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

식(2)-(7)로부터 주파수 영역에서 정의된 맥스웰 방정식인 식(2), (3) 을 페이저(Phasor)를 이용하여 시간영역으로 변환하면 식 (8)과 같은 기존의 FDTD 방정식과 같은 형태의 시간영역 차분방정식을 얻을 수 있다. 식(8)은  $D_z, E_z$  와 관련된 차분방정식을 나타내었으며, 다른 성분들도 같은 방법으로 유도할 수 있다[12].

$$D_z^{n+1}(i+1/2, j+1/2) = D_z^n(i+1/2, j+1/2) + \Delta t \left[ \frac{H_y^{n+1/2}(i+1, j+1/2) - H_y^{n+1/2}(i, j+1/2)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i+1/2, j+1) - H_x^{n+1/2}(i+1/2, j)}{\Delta y} \right] \\ E_z^{n+1}(i+1/2, j+1/2) = \frac{1}{\epsilon_0(2+\nu_e\Delta t)} \times \left[ \begin{aligned} &(2+\nu_e\Delta t)D_z^{n+1}(i+1/2, j+1/2) \\ &- 4D_z^n(i+1/2, j+1/2) \\ &+ (2-\nu_e\Delta t)D_z^{n-1}(i+1/2, j+1/2) \\ &- 2\epsilon_0(\omega_{pe}^2\Delta t^2 - 2)E_z^n(i+1/2, j+1/2) \\ &- \epsilon_0(2-\nu_e\Delta t)E_z^{n-1}(i+1/2, j+1/2) \end{aligned} \right] \quad (8)$$

여기에서 시공간 관련한 차분 인자는 다음과 같이 사용하였다.

$$\begin{aligned} \delta_t F^n &= F^{n+1/2} - F^{n-1/2} \\ \delta_t^2 F^n &= F^{n+1/2} - 2F^n + F^{n-1/2} \end{aligned} \quad (9)$$

이 경우  $F$ 는 차분하고자 하는 전계 또는 자계를 나타내며,  $n$  은 시간 또는 공간 이격값,  $\delta$  는 시간미분과 관련한 연산자를 나타낸다. 공간과 관련한 미분 연산자는 아래 식(10)과 같이 주어진다.

$$\mu_t F^n = \frac{1}{2} (F^{n+1/2} + F^{n-1/2}) \quad (10)$$

보통 분산특성을 갖는 유전체의 경우에는 위 식(9), (10)만 적용한 식(8)의 분산매질 FDTD 방정식만을 사용해도 그 결과가 문제가 되지 않는다. 즉, 식(10)에서 고려하지 않은 이차의 공간미분에 대해서 차분방정식을 사용하지 않아도 관계가 없지만 메타물질의 경우에는 식(11)과 같은 이차의 공간미분과 관련된 차분방정식을 포함시킬 필요가 있다.

$$\mu_t^2 F^n = \frac{1}{4} (F^{n+1} + 2F^n + F^{n-1}) \quad (11)$$

식 (9)에서  $D_z$  와 관련한 차분 방정식은 변화가 없지만 식(11)를 적용하게 되면  $E_z$  와 관련한 고차모드를 고려한 차분 방정식은 식 (12)와 같이 주어지게 된다.

$$E_z^{n+1}(i+1/2, j+1/2) = \frac{1}{(4+2\Delta t\nu_e + \Delta t^2\omega_{pe}^2)} \times \left[ \begin{aligned} & \frac{(4+2\Delta t\nu_e)}{\epsilon_0} D_z^{n+1}(i+1/2, j+1/2) \\ & - \frac{8}{\epsilon_0} D_z^n(i+1/2, j+1/2) \\ & + \frac{(4-2\Delta t\nu_e)}{\epsilon_0} D_z^{n-1}(i+1/2, j+1/2) \\ & - (4-2\Delta t\nu_e + \Delta t^2\omega_{pe}^2) E_z^n(i+1/2, j+1/2) \\ & - (8-\Delta t^2\omega_{pe}^2) E_z^{n-1}(i+1/2, j+1/2) \end{aligned} \right] \quad (12)$$

본 논문에서는 식 (8)의 일반적으로 사용되는 분산방정식을 식 (12)와 같이 고차모드를 고려하여 유도하고 특성을 비교하였다.

### (2) 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,  $\Delta t$  는 시간간격 그리고  $\beta$  는 가우시안 펄스의 폭을 정의하는 파라미터를 의미한다. 이미 알려진 대로 가우시안 펄스는 주파수 영역에서도 광대역 특성을 갖는다. 그러나, 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 cycle sine 펄스를 사용하였다[13].

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

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.

$$G_{on}(t) = 10x_{on}^3 - 15x_{on}^4 + 6x_{on}^5 \quad (15)$$

$$G_{off}(t) = 1.0 - [10x_{off}^3 - 15x_{off}^4 + 6x_{off}^5]$$

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

$$x_{on} = 1.0 - (mT_p - t) / mT_p$$

$$x_{off} = [t - (m + n)T_p] / mT_p \quad (16)$$

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 off 가 되는 펄스로  $f_0$  를 중심으로 제한된 대역폭을 갖는다.

### III. 주파수 응답특성

본 논문에서는 앞 절에서 설명한 바와 같이 흡수경계 조건으로 UPML 을 적용하고 입력펄스로는 플라즈마 주파수  $f_0 = 30GHz$  를 갖는  $m$ - $n$ - $m$  cycle sine 펄스를 사용한 원통형 2D-FDTD 방법을 사용하여 그림 1 과 같은 원통형 메타물질 Slab을 시뮬레이션하였다. 주파수 특성을 관찰하기 위한 메타물질 Slab 의 그림 1과 같은 구조에서 전체 계산영역은  $400 \times 400$  이며, 공간격자  $\Delta x = \Delta y = 0.25mm$  이고, 시간간격  $\Delta t$  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.

우선 그림 2 에 본 논문에서 유도한 식(12)의 고차모드 FDTD 방정식의 유효함을 입증하기 위하여 그림 1에서 Slab 이  $\epsilon_r = 2, \mu_r = 2$  인 유전체인 경우 입사파가 Slab을 통과하여 진행된 후 인  $\Delta t = 1400 - 1500$  인 경우 출력파형  $E_z$  를 관찰하였다.

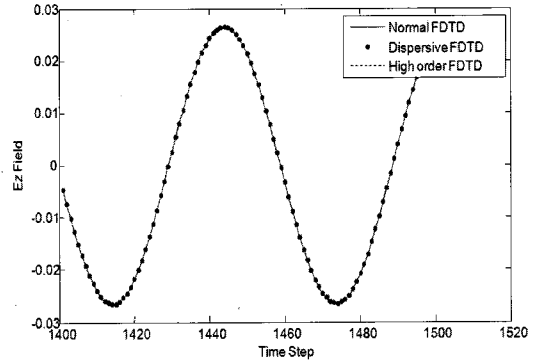


그림 2. 유전체 Slab 의 출력파형  
Figure 2. Output waveform of Dielectric Slab

일반적으로 유도된 FDTD 방정식과, 식 (8)과 같이 ADE 방법으로 전개한 분산매질 FDTD 방정식, 고차모드를 고려한 식 (12)의 FDTD 방정식을 이용하여 얻은 파형이 모두 동일하다는 결과를 확인할 수 있다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 유전체 인 경우에는 고차모드를 고려하지 않아도 동일한 파형결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 그림 3 에는 유전율과 투자율을 각각 -1 로 가정한 메타물질 Slab 인 경우 식(8)과 식(12)를 비교하여 나타내었다. 유전체 Slab 인 경우에는 식(8)과 식(12)가 동일한 결과를 보여주었지만 메타물질 Slab 인 경우는 그림 3 과 같이 에러가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 4 에 식(12)와 비교하여 전체 Simulation에서 발생하는 식 (8)의 오차를 나타내었다. 시간이 증가할수록 오차의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다.

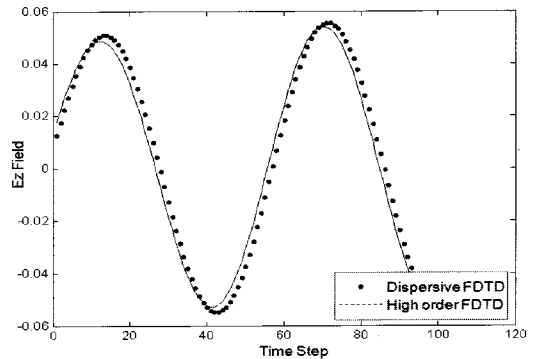


그림 3. 메타물질 Slab의 출력파형비교  
Figure 3. Comparisons of Output waveform of Metamaterial Slab

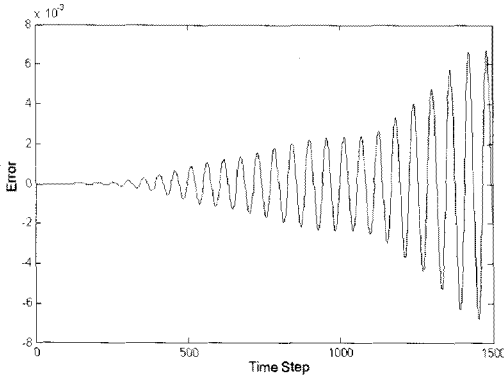


그림 4. 메타물질 Slab에서 발생하는 오차  
Figure 4. Errors occurred in Metamaterial Slab

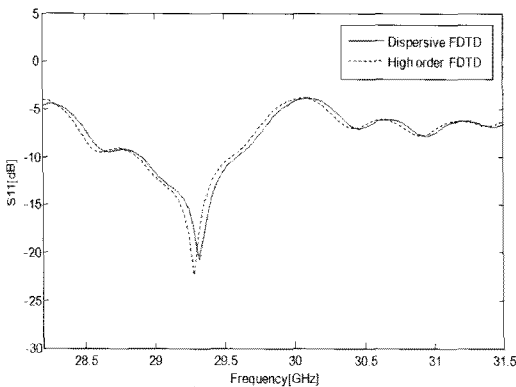


그림 5. 주파수 응답특성 비교  
Figure 5. Comparisons of Frequency Response

따라서 고차모드를 고려하지 않는 경우 오차가 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 그림 5 에는 식(8)과 식(12)의 경우에 대해 주파수 응답특성 결과를 나타내었다. 고차모드를 고려한 경우와 비교하여 그렇지 않은 경우에 50MHz 정도의 중심주파수 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 메타물질 Slab의 특성을 정확하게 해석하기 위해서는 고차모드를 고려한 FDTD 방정식을 사용해야 한다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 고차모드 시간영역 유한차분법(FDTD)을 이용하여 원통형 메타물질 Slab 의 주파수 영역 특성을 구하는 방법을 연구하였다. 일반적으로 메타물질의 해석방법에는 FDTD 가 가장 광범위하게 사용되고 있는데 주파수 분산특성을 갖는 유전체과 투자율 모델을 가정하기 때문에, 주파수 응답특성을 구하기 위해서는 주파수 영역에서 차분방정식을 전개해야 한다. 기존의 고차모드를 고려하지 않은 분산매질 FDTD 방정식의 경우에는 유전체물질인 경우를 가정하였을 때는 오차가 발생하지 않지만, 메타물질인 경우에는 오차가 발생하게 된다. 본 논문에서는 원통형 메타물질 Slab을 해석하기 위하여 고차모드 FDTD 방법을 적용하여, 이전의 분산매질 FDTD 방법과 비교하였으며 고차모드 FDTD 방법을 이용하면 계산오차를 줄일 수 있고 정확한 주파수 특성을 얻을 수 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 사용하면 메타물질을 이용한 다양한 회로구조에 대하여 정확한 주파수 특성을 얻을 수 있다. 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 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, 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] 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

홍익표(Ic-Pyo Hong)



2000년 2월 : 연세대학교 전기컴퓨터  
공학과(공학박사)

2000년 3월~2003년 2월 : 삼성전자  
정보통신총괄 책임연구원

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

2003년 3월~현재 : 공주대학교 정보통신공학부 부교수  
※ 관심분야 : 전자기 수치해석