

ADI-FDTD 해석에서의 EFIU와 HFIU 계산 방법 비교 연구

A Comparison between EFIU and HFIU Schemes in ADI-FDTD Simulations

주세훈 · 이경훈 · 황인호 · 김형동*

Sae-Hoon Ju · Kyung-Hoon Lee · In-Ho Hwang · Hyeong-Dong Kim*

요 약

본 논문에서는 관심 주파수의 파장에 비하여 매우 섬세한 구조의 해석에 있어서 기존의 FDTD보다 효율적인 해석이 가능한 ADI-FDTD의 차분방정식 계산 방법에 대하여 연구하였다. 반복 구간에서 계산되는 서로 다른 계산 방법을 유도하고 두 개의 상보적인 2차원 문제를 해석하여 경계 조건의 적용 관점에서 그 특성을 논하였다.

Abstract

In this paper, updating schemes for the alternating-direction implicit finite-difference time-domain method(ADI-FDTD) are studied, which method has the potential to considerably reduce the number of time iterations especially in case where the fine spatial lattice relative to the wavelength is used to resolve fine geometrical features. In numerical simulations for microwave structure using ADI-FDTD, time marching scheme comprises of two sub-iterations. Two different updating equation sets for ADI-FDTD simulations are presented. In order to discuss the characteristics of those schemes especially in view of applying boundary conditions, we solved two complementary 2-D problems.

Key words : ADI-FDTD, FDTD, Updating Scheme, Boundary Condition

I. 서 론

다양한 전자파 구조와 매질의 모델링이 용이하고, 프로그래밍의 단순함으로 인해 유한 차분 시간 영역 법(FDTD: Finite-Difference Time-Domain method)은 전자파 수치 해석 분야의 대표적인 방법 중 하나로 사용되고 있다^[1]. FDTD를 이용한 해석에서 시간 간격의 크기는 수치적인 안정성을 보장받기 위하여 CFL 안정 조건(Courant-Friedrich-Levy constraint)에 의하여 제한을 받는다. 이러한 조건 때문에 관심 주파수의 파장에 비하여 매우 섬세한 구조를 모델링 하는 경우, FDTD는 매우 작은 시간 간격을 사용하

야 하므로 많은 계산 시간이 소요되는 단점을 가지게 된다.

최근 FDTD의 단점인 시간 간격의 크기를 제한하는 CFL 안정 조건을 제거하기 위하여 ADI 시간 진행법(Alternating-Direction Implicit time-marching scheme)을 기존의 FDTD에 도입함으로써 시간 간격에 상관없이 무조건 안정한 특성을 갖는 ADI-FDTD가 개발되었다^{[2],[3]}. ADI-FDTD는 특히 FDTD의 적용으로 많은 계산 시간이 소요되는 파장에 비해 매우 섬세한 구조체나 특정 방향으로 매우 작은 격자를 사용하는 전자파 문제의 해석에 있어 기존 FDTD에 비하여 계산의 정확도는 유지하면서 계산 시간을 상당

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-041-D00436).

한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소(Electronics and Telecommunications Research Institute)

*한양대학교 전자전기공학부(Department of Electrical and Computer, Engineering, Hanyang University)

· 논문 번호 : 20051019-116

· 수정완료일자 : 2006년 1월 17일

히 줄일 수 있는 방법임을 여러 논문에서 지적하고 있다^{[1]~[11]}. FDTD가 공간적으로 매우 작은 격자를 사용하게 되면 안정 조건에 의해서 시간 간격 또한 매우 작아지게 되므로 원하는 시간 응답을 얻어내기 위해 많은 반복 계산이 필요하게 되는 반면 ADI-FDTD는 시간 간격에 대한 제한이 없어 반복 계산을 줄일 수 있기 때문이다.

ADI-FDTD의 해석에서 모든 필드 성분은 두 번의 반복식에 의해 계산된다. 즉, 첫 번째 반복식은 $n\Delta t$ 에서 $(n+1/2)\Delta t$ 응답을 구하고, 두 번째 반복식은 $(n+1/2)\Delta t$ 에서 $(n+1)\Delta t$ 응답을 계산한다^{[1]~[11]}. 현재까지 발표되어진 여러 논문들에서는 각각의 반복 계산에서 고속 삼대각행렬 해법(fast tridiagonal matrix equation solver)을 이용하여 전계를 음해법으로(implicit manner) 풀고, 자계는 음해법으로 구해진 전계를 이용하여 양해법으로(explicit manner) 계산하였다^{[1]~[11]}. 이러한 ADI-FDTD의 최종 계산식은 $O(n)$ 연산량을 가지고 있어 다른 음해법의 FDTD에 비해 효율적인 방법으로 알려져 있다.

본 논문에서는 기존의 ADI-FDTD 반복 계산 방법과는 달리 자계를 음해법으로 풀고 전계를 양해법으로 계산하는 식을 유도하고 EBG 구조의 TE 문제와 이와 상보적인 TM 문제의 해석을 통해 경계 조건의 적용 관점에서 계산 방법의 특성을 살펴보았다.

II. ADI-FDTD 차분방정식 계산 방법

선형(linear), 등방(isotropic), 무손실(lossless), 비분산(nondispersive) 매질의 맥스웰 미분 방정식을 3차원 직각 좌표계에서 Zheng이 제안한 방법^{[3],[7],[11]}에 의하여 ADI 시간 진행 방식을 적용하면 다음과 같이 미분방정식을 근사할 수 있다.

· 첫 번째 반복식(1st sub-iteration stage equation):

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{E}}^{n+1/2} = & \vec{\mathbf{E}}^n + C_b \left([\mathbf{A}] \vec{\mathbf{H}}^{n+1/2} - [\mathbf{B}] \vec{\mathbf{H}}^n \right) \\ & - C_b \vec{\mathbf{J}}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{H}}^{n+1/2} = & \vec{\mathbf{H}}^n + D_b \left([\mathbf{B}] \vec{\mathbf{E}}^{n+1/2} - [\mathbf{A}] \vec{\mathbf{E}}^n \right) \\ & - D_b \vec{\mathbf{M}}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (1b)$$

· 두 번째 반복식(2nd sub-iteration stage equation):

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{E}}^{n+1} = & \vec{\mathbf{E}}^{n+1/2} + C_b \left([\mathbf{A}] \vec{\mathbf{H}}^{n+1/2} - [\mathbf{B}] \vec{\mathbf{H}}^{n+1} \right) \\ & - C_b \vec{\mathbf{J}}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{H}}^{n+1} = & \vec{\mathbf{H}}^{n+1/2} + D_b \left([\mathbf{B}] \vec{\mathbf{E}}^{n+1/2} - [\mathbf{A}] \vec{\mathbf{E}}^{n+1} \right) \\ & - D_b \vec{\mathbf{M}}^{n+1/2} \end{aligned} \quad (2b)$$

$$[\mathbf{A}] = [\mathbf{B}]^T = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \partial/\partial y \\ \partial/\partial z & 0 & 0 \\ 0 & \partial/\partial x & 0 \end{pmatrix},$$

$$C_b = \frac{\Delta t}{2\varepsilon}, \quad D_b = \frac{\Delta t}{2\mu}.$$

윗 식에서 ε 과 μ 는 각각 유전율(permittivity)과 투자율(permeability)을 나타내며, 위 첨자는 이산 시간 영역(discrete time domain)에서의 위치로 n 은 $t = n\Delta t$ 의 시간 위치를 나타낸다. $\vec{\mathbf{E}}$, $\vec{\mathbf{H}}$, $\vec{\mathbf{J}}$, $\vec{\mathbf{M}}$ 은 각각 전계(electric field), 자계(magnetic field), 전기 전류 밀도(electric current density), 자기 전류 밀도(magnetic current density)의 복합 벡터를 나타낸다. 직각 좌표계에서는 각각의 복합 벡터 요소값은 좌표계 방향에 따른 성분값을 갖는다. $[\mathbf{A}]$ 는 행렬 형태로 표시된 공간에 대한 미분 연산자이며 $[\mathbf{B}]$ 와는 $[\mathbf{A}] = [\mathbf{B}]^T$ 의 관계에 있다. ADI-FDTD는 공간에 대해서는 FDTD와 같이 엇갈려 놓인 전계와 자계값을 사용하지만 시간에 대해서는 식 (1)과 (2)에서 알 수 있듯이 동일한 위치값을 사용하게 된다. 식 (1)과 (2)에서 공간에 대해 중앙 차분 근사(central difference approximation)를 통하여 미분항을 근사하면 ADI-FDTD 차분 방정식을 구할 수 있다. 이렇게 구해진 차분 방정식은 각 방향의 전계 및 자계에 대하여 미지수가 양변에 놓이게 되어 음해법으로 풀어야 하지만 식을 정리하여 전계나 자계 하나만을 음해법을 이용하여 푸는 것이 효율적이다. 전계에 대한 식 (1a)와 (2a)를 변형하게 되면 전계에 대하여 음해법을 적용하는 최종 계산식을 얻게 되며, 자계에 대한 식 (1b)와 (2b)를 변형하면 자계에 대해서만 음해법을 적용하는 최종 계산식을 얻게 된다. 미지수항을 정리하여 얻는 최종 계산식은 삼대각 행렬식(tridiagonal matrix equation) 형태를 갖게 되어 각 방향으로 인접한 3개의 필드 성분을 동시에 풀게 된다. 이상과 같은 ADI-FDTD 최종 계산 방법을 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

2-1 전계에 대한 음해법 계산 방법(EFIU: E Field Implicit Updating Scheme)

식 (1a)와 (2a)를 변형하여 얻은 최종 계산식을 이용하여 전계를 음해법으로 방향을 바꾸어 계산한 후, 자계는 이전에 계산된 전계를 이용하여 양해법으로 계산한다. 이 계산 방법은 기존의 ADI-FDTD에서 사용되고 있는 방법으로 다음과 같이 유도된다.

· EFIU 첫 번째 반복식:

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{C_b D_b}{(\Delta y)^2} \right] E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^{n+1/2} \\
 & - \frac{C_b D_b}{(\Delta y)^2} E_x \Big|_{i+1/2, j+1, k}^{n+1/2} - \frac{C_b D_b}{(\Delta y)^2} E_x \Big|_{i+1/2, j-1, k}^{n+1/2} \\
 & = E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^n + \frac{C_b}{\Delta y} H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^n - \frac{C_b}{\Delta y} H_z \Big|_{i+1/2, j-1/2, k}^n \\
 & - \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^n - H_y \Big|_{i+1/2, j, k-1/2}^n \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta y \Delta x} \left(E_y \Big|_{i+1, j+1/2, k}^n - E_y \Big|_{i-1, j+1/2, k}^n \right) \\
 & + \frac{C_b}{\Delta y \Delta x} \left(E_y \Big|_{i+1, j-1/2, k}^n - E_y \Big|_{i-1, j-1/2, k}^n \right) \quad (3a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{C_b D_b}{(\Delta z)^2} \right] E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^{n+1/2} \\
 & - \frac{C_b D_b}{(\Delta z)^2} E_y \Big|_{i, j+1/2, k+1}^{n+1/2} - \frac{C_b D_b}{(\Delta z)^2} E_y \Big|_{i, j+1/2, k-1}^{n+1/2} \\
 & = E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^n + \frac{C_b}{\Delta z} H_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^n - \frac{C_b}{\Delta z} H_x \Big|_{i, j+1/2, k-1/2}^n \\
 & - \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^n - H_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^n \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta z \Delta y} \left(E_z \Big|_{i, j+1, k+1/2}^n - E_z \Big|_{i, j-1, k+1/2}^n \right) \\
 & + \frac{C_b}{\Delta z \Delta y} \left(E_z \Big|_{i, j+1, k-1/2}^n - E_z \Big|_{i, j-1, k-1/2}^n \right) \quad (3b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{C_b D_b}{(\Delta x)^2} \right] E_z \Big|_{i, j, k+1/2}^{n+1/2} \\
 & - \frac{C_b D_b}{(\Delta x)^2} E_z \Big|_{i+1, j, k+1/2}^{n+1/2} - \frac{C_b D_b}{(\Delta x)^2} E_z \Big|_{i-1, j, k+1/2}^{n+1/2} \\
 & = E_z \Big|_{i, j, k+1/2}^n + \frac{C_b}{\Delta x} H_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^n - \frac{C_b}{\Delta x} H_y \Big|_{i-1/2, j, k+1/2}^n \\
 & - \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^n - H_x \Big|_{i, j-1/2, k+1/2}^n \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta x \Delta z} \left(E_x \Big|_{i+1/2, j, k+1}^n - E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^n \right) \\
 & + \frac{C_b}{\Delta x \Delta z} \left(E_x \Big|_{i-1/2, j, k+1}^n - E_x \Big|_{i-1/2, j, k}^n \right) \quad (3c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^{n+1/2} & = H_x \Big|_{i, j+1/2, k+1/2}^n \\
 & + \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_y \Big|_{i, j+1/2, k+1}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta y} \left(E_z \Big|_{i, j+1, k+1/2}^n - E_z \Big|_{i, j, k+1/2}^n \right) \quad (3d)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} & = H_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^n \\
 & + \frac{D_b}{\Delta x} \left(E_z \Big|_{i+1, j, k+1/2}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i, j, k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_x \Big|_{i+1/2, j, k+1}^n - E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^n \right) \quad (3e)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} & = H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^n \\
 & + \frac{D_b}{\Delta y} \left(E_x \Big|_{i+1/2, j+1, k}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta x} \left(E_y \Big|_{i+1, j+1/2, k}^n - E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^n \right) \quad (3f)
 \end{aligned}$$

· EFIU 두 번째 반복식:

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{C_b D_b}{(\Delta z)^2} \right] E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^{n+1} \\
 & - \frac{C_b D_b}{(\Delta z)^2} E_x \Big|_{i+1/2, j+1, k}^{n+1} - \frac{C_b D_b}{(\Delta z)^2} E_x \Big|_{i+1/2, j, k-1}^{n+1} \\
 & = E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^{n+1/2} - \frac{C_b}{\Delta z} H_y \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} + \frac{C_b}{\Delta z} H_y \Big|_{i+1/2, j, k-1/2}^{n+1/2} \\
 & + \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2, j-1/2, k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta z \Delta x} \left(E_z \Big|_{i+1, j, k+1/2}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i, j, k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & + \frac{C_b}{\Delta z \Delta x} \left(E_z \Big|_{i+1, j, k-1/2}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i, j, k-1/2}^{n+1/2} \right) \quad (4a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{C_b D_b}{(\Delta x)^2} \right] E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^{n+1} \\
 & - \frac{C_b D_b}{(\Delta x)^2} E_y \Big|_{i+1, j+1/2, k}^{n+1} - \frac{C_b D_b}{(\Delta x)^2} E_y \Big|_{i-1, j+1/2, k}^{n+1} \\
 & = E_y \Big|_{i, j+1/2, k}^{n+1/2} - \frac{C_b}{\Delta x} H_z \Big|_{i+1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} + \frac{C_b}{\Delta x} H_z \Big|_{i-1/2, j+1/2, k}^{n+1/2} \\
 & + \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_x \Big|_{i+1/2, j, k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i+1/2, j, k-1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta x \Delta y} \left(E_x \Big|_{i+1/2, j+1, k}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i+1/2, j, k}^{n+1/2} \right) \\
 & + \frac{C_b}{\Delta x \Delta y} \left(E_x \Big|_{i-1/2, j+1, k}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i-1/2, j, k}^{n+1/2} \right) \quad (4b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{C_b D_b}{(\Delta y)^2} \right] E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1} \\
 & - \frac{C_b D_b}{(\Delta y)^2} E_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^{n+1} - \frac{C_b D_b}{(\Delta y)^2} E_z \Big|_{i,j-1,k+1/2}^{n+1} \\
 & = E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} - \frac{C_b}{\Delta y} H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} + \frac{C_b}{\Delta y} H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & + \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta y} \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \right) \\
 & + \frac{C_b}{\Delta y} \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_y \Big|_{i,j-1/2,k+1}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i,j-1/2,k}^{n+1/2} \right) \quad (4c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} & = H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & + \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta y} \left(E_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^{n+1} - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1} \right) \quad (4d)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1} & = H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & + \frac{D_b}{\Delta x} \left(E_z \Big|_{i+1,j,k+1/2}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_x \Big|_{i+1/2,j,k+1}^{n+1} - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} \right) \quad (4e)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1} & = H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} \\
 & + \frac{D_b}{\Delta y} \left(E_x \Big|_{i+1/2,j+1,k}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta x} \left(E_y \Big|_{i+1,j+1/2,k}^{n+1} - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1} \right) \quad (4f)
 \end{aligned}$$

2-2 자계에 대한 음해법 계산 방법(HFIU: H Field Implicit Updating Scheme)

식 (1b)와 (2b)를 변형하여 얻은 최종 계산식을 이용하여 자계를 음해법으로 방향을 바꾸어 계산한 후, 전계는 이전에 계산된 자계를 이용하여 양해법으로 계산하며 다음과 같이 유도된다.

· HFIU 첫 번째 반복식:

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta z)^2} \right] H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta z)^2} H_x \Big|_{i,j+1/2,k+3/2}^{n+1/2} - \frac{D_b C_b}{(\Delta z)^2} H_x \Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} \\
 & = H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n + \frac{D_b}{\Delta z} E_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^n - \frac{D_b}{\Delta z} E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{D_b}{\Delta y} \left(E_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^n - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta z} \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k+1}^n - H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k+1}^n \right) \\
 & + \frac{D_b}{\Delta z} \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^n - H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^n \right) \quad (5a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta x)^2} \right] H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta x)^2} H_y \Big|_{i+3/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - \frac{D_b C_b}{(\Delta x)^2} H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & = H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^n + \frac{D_b}{\Delta x} E_z \Big|_{i+1,j,k+1/2}^n - \frac{D_b}{\Delta x} E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n \\
 & - \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_x \Big|_{i+1/2,j,k+1}^n - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta x} \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_x \Big|_{i+1,j+1/2,k+1/2}^n - H_x \Big|_{i+1,j-1/2,k+1/2}^n \right) \\
 & + \frac{D_b}{\Delta x} \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^n \right) \quad (5b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} \right] H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_z \Big|_{i+1/2,j+3/2,k}^{n+1/2} - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} \\
 & = H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^n + \frac{D_b}{\Delta y} E_x \Big|_{i+1/2,j+1,k}^n \\
 & - \frac{D_b}{\Delta y} C_a \Big|_{i+1/2,j,k} E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n \\
 & - \frac{D_b}{\Delta x} \left(E_y \Big|_{i+1,j+1/2,k}^n - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n \right) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta y} \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j+1,k+1/2}^n - H_y \Big|_{i+1/2,j+1,k-1/2}^n \right) \\
 & + \frac{D_b}{\Delta y} \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^n - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^n \right) \quad (5c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} & = E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^n \\
 & + \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^n - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^n \right) \quad (5d)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} & = E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^n \\
 & + \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^n - H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^n \right) \quad (5e)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} & = E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^n \\
 & + \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^n - H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^n \right) \quad (5f)
 \end{aligned}$$

· HFIU 두 번째 반복식:

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} \right] H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_x \Big|_{i,j+3/2,k+1/2}^{n+1} - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1} \\
 & = H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - \frac{D_b}{\Delta y} E_z \Big|_{i,j+1,k+1/2}^{n+1/2} + \frac{D_b}{\Delta y} E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & + \frac{D_b}{\Delta z} \left(E_y \Big|_{i,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b C_b}{\Delta y \Delta x} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j+1,k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & + \frac{D_b C_b}{\Delta y \Delta x} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \right) \quad (6a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta z)^2} \right] H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta z)^2} H_y \Big|_{i+1/2,j,k+3/2}^{n+1} - \frac{D_b C_b}{(\Delta z)^2} H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1} \\
 & = H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - \frac{D_b}{\Delta z} E_x \Big|_{i+1/2,j,k+1}^{n+1/2} + \frac{D_b}{\Delta z} E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \\
 & + \frac{D_b}{\Delta x} \left(E_z \Big|_{i+1,j,k+1/2}^{n+1/2} - E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b C_b}{\Delta z \Delta y} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k+1}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k+1}^{n+1/2} \right) \\
 & + \frac{D_b C_b}{\Delta z \Delta y} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} \right) \quad (6b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta x)^2} \right] H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta x)^2} H_z \Big|_{i+3/2,j+1/2,k}^{n+1} - \frac{D_b C_b}{(\Delta x)^2} H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1} \\
 & = H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - \frac{D_b}{\Delta x} E_y \Big|_{i+1,j+1/2,k}^{n+1/2} + \frac{D_b}{\Delta x} E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \\
 & + \frac{D_b}{\Delta y} \left(E_x \Big|_{i+1/2,j+1,k}^{n+1/2} - E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{D_b C_b}{\Delta x \Delta z} \left(H_x \Big|_{i+1,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i+1,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & + \frac{D_b C_b}{\Delta x \Delta z} \left(H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} \right) \quad (6c)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1} & = E_x \Big|_{i+1/2,j,k}^{n+1/2} \\
 & + \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1/2} - H_z \Big|_{i+1/2,j-1/2,k}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1} - H_y \Big|_{i+1/2,j,k-1/2}^{n+1} \right) \quad (6d)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1} & = E_y \Big|_{i,j+1/2,k}^{n+1/2} \\
 & + \frac{C_b}{\Delta z} \left(H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - H_x \Big|_{i,j+1/2,k-1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_z \Big|_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1} - H_z \Big|_{i-1/2,j+1/2,k}^{n+1} \right) \quad (6e)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1} & = E_z \Big|_{i,j,k+1/2}^{n+1/2} \\
 & + \frac{C_b}{\Delta x} \left(H_y \Big|_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} - H_y \Big|_{i-1/2,j,k+1/2}^{n+1/2} \right) \\
 & - \frac{C_b}{\Delta y} \left(H_x \Big|_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} - H_x \Big|_{i,j-1/2,k+1/2}^{n+1} \right) \quad (6f)
 \end{aligned}$$

2-3 전계 및 자계에 대한 음해법 계산 방법

식 (1)과 (2)를 변형하여 얻은 최종 계산식을 이용하여 자계와 전계를 음해법으로 방향을 바꾸어 계산한다. 자계와 전계의 계산에 있어서 계산 순서는 모두 이전 전계와 자계값을 이용하므로 상관성이 없다. 첫 번째 반복식은 (3a)~(3c), (5a)~(5c)이고 두 번째 반복식은 (4a)~(4c), (6a)~(6c)로 구성된다.

ADI-FDTD가 하나의 시간 간격 응답을 구하기 위하여 두 번의 계산을 수행하므로 위의 세 가지 방법 외에 이 방법들을 조합하여 반복 계산에 적용할 수 있으나, 본 논문에서는 동일한 계산 방법을 반복하여 적용한 것을 고려하였다. 위에서 언급한 세 가지 ADI-FDTD 계산 방법 중 다)의 방법은 모든 필드값의 계산에 음해법을 이용하기 때문에 다른 두 가지 방법에 비하여 계산량이 많이 소요된다. 그러므로, 실제 문제의 해석에는 다)에 비해 보다 효율적인 가)의 EFIU와 나)의 HFIU를 적용하는 것이 유리하다. 이 두 가지 계산 방법의 수치적 분산 특성은 참고문헌 [4]에 기술된 푸리에 방법(Fourier method)을 적용하여 $n\Delta t$ 와 $(n+1)\Delta t$ 시간 사이의 필드들 간의 관계를 파수 영역에서 구하여 계산할 수 있다. 본 논문에 보이지는 않았지만, 두 계산 방법 모두 동일한 수치 분산식(numerical dispersion equation)을 갖게 되며, 참고문헌 [8], [10]의 방법으로 2차원 TM 문제에서 자유 공간으로 방사하는 선 전류원 구조를 해석함으로써 수치적으로도 동일함을 확인할 수 있었다. EFIU와 HFIU는 계산량은 거의 같으면서 경계 조건을 적용할 때 차이가 나는데 이것은 식의 계산에 있어 동시에 주변값을 고려해야 하는 ADI-FDTD의 특성에 그 원인이 있다. 다음 절에서 두 방법에 따른 경계 조건의 복잡성의 차이와 기존의 ADI-FDTD 해석에서 사용한 경계조건 처리 방식을 HFIU 계산 방법에 적용하면 계산 결과에 오차가 발생하게 되는 것을 확인할 것이다.

III. 수치해석을 통한 검증

ADI-FDTD의 두 계산 방법인 EFIU와 HFIU의 특성을 경계조건 적용 관점에서 설명하기 위하여 그림 1과 같이 2차원 TE 문제의 EBG(Electromagnetic Band-Gap) 구조와 이 구조의 상보적인 2차원 TM 문제를 해석하였다. 첫 번째 예제는 Wang의^[7] 논문에서 해석된 EBG로 그 크기를 다시 조정하여 TE 문제 해석에 적용하였다. 해석하고자 하는 EBG 구조는 0.5 cm 폭의 균일한 도파관 구조에 대칭적인 핀이 주기적으로 놓여진 구조이다. 각각의 핀 구조와 핀이 형성한 공동의 높이와 길이는 4 mm와 2 mm이다. 전체 도파관 구조의 폭과 길이는 각각 1.2 cm와 30 cm이며, 양쪽의 끝단에는 1차원 Mur의 흡수 경계 조건(ABC: Absorbing Boundary Condition)을 적용하였다. 도파관의 경계면은 완전 전기 도체(PEC: Perfect Electric Conductor)로 모델링 하였으며 최고 관심 주파수 1 GHz에 대하여 공간 격자 샘플링 밀도는 $N = \lambda_0 / \Delta = 300$ 으로 선택하였다. 여기서 λ_0 는 최고 관심 주파수에 대한 파장을 나타낸다. ADI-FDTD 시뮬레이션에서는 CFL 조건에 의한 최대 시간 간격 $\Delta t_{CFL} = 2.357 \text{ psec}$ 보다 큰 시간 간격인 $CFLN = \Delta t / \Delta t_{CFL} = 8.7, 15, 30$ 을 사용하였다. 특히 $CFLN = 8.7$ 은 일반적인 샘플링 밀도 $N = 20$ 인 FDTD가 갖는 0.28 % 수치 분산 오차와 ADI-FDTD가 동일한 수치 분산 오차를 갖도록 참고 문헌 [8]과 [9]에 기술되어진 방법처럼 미리 계산하여 선택한 값이다. 미분형 가우시안 소스인 $f(t) =$

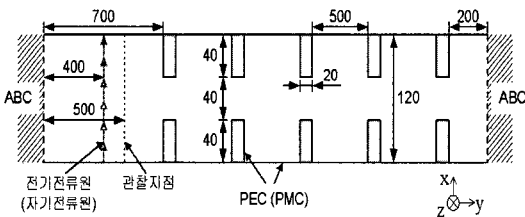


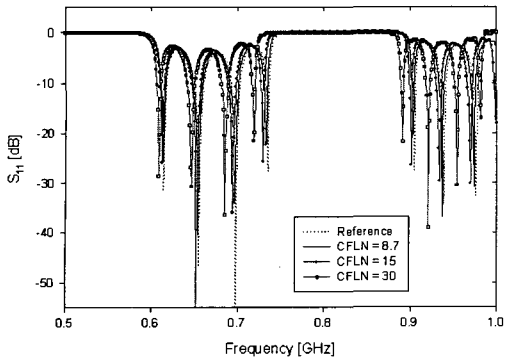
그림 1. TE 문제로 모델링된 5개의 개구를 갖는 EBG^[7] 구조(괄호 안의 내용은 상보적인 TM 문제의 모델링 시에 적용된 경계 조건임)

Fig. 1. An EBG waveguide with five irises^[7] is modeled in TE wave. Its complementary TM structure is also modeled with boundary conditions in the parenthesis.

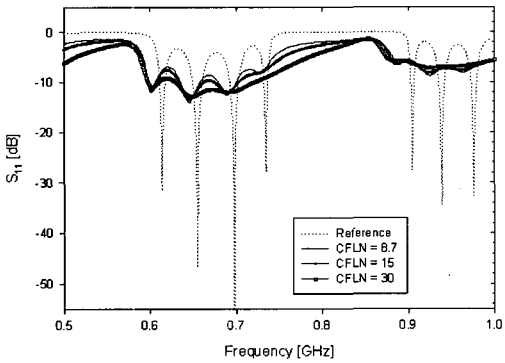
$-(t - t_0)e^{-(t - t_0)^2/T^2}$ 을 $t_0 = 140 \Delta t_{CFL}$ 과 $T = 130 \Delta t_{CFL}$ 의 값으로 선택하여 도파관을 가로질러 여기서 켜고, 전체 시간 반복은 $CFLN = 1$ 을 기준으로 50,000을 설정하였다.

그림 2에 EFIU와 HFIU 계산 방법을 적용한 ADI-FDTD 해석 결과를 나타내었다. 기준 데이터는 $CFLN = 1$ 인 ADI-FDTD 해석한 결과로 구하였다. EFIU 방법의 ADI-FDTD 해석에서는 소스 조건과 도체면 접선 방향의 전계에 대하여 전계의 계산 시에 음해법으로 처리하였다. 이 방법의 경우 도체면에 수직인 자계에 대해서는 이전에 도체를 모델링하여 계산된 전계를 이용하여 양해법으로 자계를 계산하기 때문에 특별한 처리를 해주지 않아도 된다. 그러나, HFIU 계산 방법을 이용한 ADI-FDTD 해석의 경우에는 도체면에 수직인 자계 성분들에 대해 반드시 경계조건을 적용해 주어야 한다. 이것은 자계와 전계의 계산 순서가 뒤바뀌어 자계에도 도체 경계조건을 모델링해 주어야 하기 때문이다. 또한, 최종적으로 구하는 산란 계수(scattering parameter)가 정규화를 통해 얻어지므로 결과에 대해 큰 영향은 미치지 않지만 소스 항의 모델링에서도 전계를 계산할 때 적용되는 J_x 위치 주변의 자계에 대해서도 소스를 모델링을 해주어야 한다. HFIU를 이용한 계산에서 도체면에 수직인 자계에 경계 조건을 처리하지 않고 전계에 대해서만 경계 조건을 적용한 경우에는 경계 조건에 대한 오차를 포함한 결과를 얻게 되며, 이러한 오차는 Garcia가 참고문헌 [10]에서 지적한 바와 같이 시간 간격을 늘일수록 급격하게 커지는 것을 관찰할 수 있다.

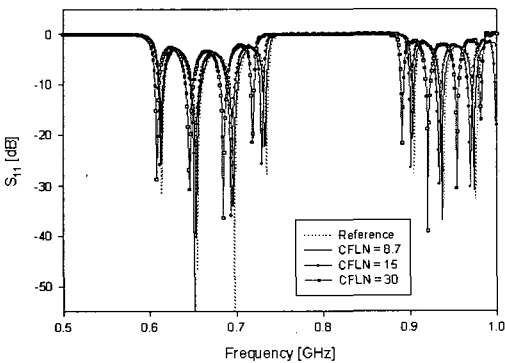
결국 HFIU 계산 방법의 ADI-FDTD 해석에서 전기적인 특성의 경계 조건을 적용할 때는 전계와 자계의 계산 과정 모두에 처리를 해주어야 올바른 해를 얻을 수 있다. 즉, 전계의 계산식에 적용되는 경계 조건은 공간 영역에서 국부적인 특성이 HFIU 계산 방법에서는 주변의 자계의 계산에도 처리를 해주어야 하기 때문에 EFIU 계산 방법이 유리하다. EBG 구조의 2차원 TE 문제에서 x 방향으로 놓인 전기 전류원(electric current source)이 HFIU 첫 번째 반복 계산에 적용되는 예를 들면 식 (7)과 같이 전계 및 자계 계산식의 소스항 주변에서 α 항과 같이 처리를 해주어야



(a) PEC상의 $E_{tan}=0$ 을 적용한 EFUI 계산 방법 ADI-FDTD 해석 결과
(a) ADI-FDTD with EFUI, $E_{tan}=0$ on PEC



(b) PEC상의 $E_{tan}=0$ 을 적용한 HFUI 계산 방법 ADI-FDTD 해석 결과
(b) ADI-FDTD with HFUI, $E_{tan}=0$ on PEC



(c) PEC상의 $H_{nor}=E_{tan}=0$ 을 적용한 HFUI 계산 방법 ADI-FDTD 해석 결과
(c) ADI-FDTD with HFUI, $H_{nor}=E_{tan}=0$ on PEC

그림 2. EFIE와 HFUI 계산 방법의 ADI-FDTD 해석으로 구한 산란 계수(S_{11}).

Fig. 2. Scattering parameters(S_{11}) are obtained by 2-D ADI-FDTD with EFUI and HFUI schemes.

한다. (7a)와 (7b)를 이용하여 자계를 음해법으로 계산한 이후 (7c)를 양해법으로 처리해 주면 된다. 반면, EFUI 계산 방법에서는 (7c)에만 모델링될 뿐 자계는 일반 영역과 동일하게 처리해 주게 된다. 식 (7)에서 i_s, j_s 는 공간에서의 소스의 위치를 나타내는 첨자이다.

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} \right] H_z |_{i_s+1/2, j_s+1/2}^{n+1/2} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_z |_{i_s+1/2, j_s+3/2}^{n+1/2} - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_z |_{i_s+1/2, j_s-1/2}^{n+1/2} \\
 & = H_z |_{i_s+1/2, j_s+1/2}^n + \frac{D_b}{\Delta y} (E_x |_{i_s+1/2, j_s+1}^n - E_x |_{i_s+1/2, j_s}^n) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta x} (E_y |_{i_s+1, j_s+1/2}^n - E_y |_{i_s, j_s+1/2}^n) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta y} \alpha |_{i_s+1/2, j_s}^{n+1/2} \tag{7a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left[1 + 2 \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} \right] H_z |_{i_s+1/2, j_s-1/2}^{n+1/2} \\
 & - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_z |_{i_s+1/2, j_s+1/2}^{n+1/2} - \frac{D_b C_b}{(\Delta y)^2} H_z |_{i_s+1/2, j_s-3/2}^{n+1/2} \\
 & = H_z |_{i_s+1/2, j_s-1/2}^n + \frac{D_b}{\Delta y} (E_x |_{i_s+1/2, j_s}^n - E_x |_{i_s+1/2, j_s-1}^n) \\
 & - \frac{D_b}{\Delta x} (E_y |_{i_s+1, j_s-1/2}^n - E_y |_{i_s, j_s-1/2}^n) \\
 & + \frac{D_b}{\Delta y} \alpha |_{i_s+1/2, j_s}^{n+1/2} \tag{7b}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_x |_{i_s+1/2, j_s}^{n+1/2} & = E_x |_{i_s+1/2, j_s}^n \\
 & + \frac{C_b}{\Delta y} (H_z |_{i_s+1/2, j_s+1/2}^{n+1/2} - H_z |_{i_s+1/2, j_s-1/2}^{n+1/2}) \\
 & + \alpha |_{i_s+1/2, j_s}^{n+1/2} \tag{7c}
 \end{aligned}$$

두 번째 예제는 2차원 TE 문제의 EBG 구조와 상보적인 TM 문제로 가상의 자기 전류원(magnetic current source)과 완전 자기 도체(PMC: Perfect Magnetic Conductor)의 경계조건을 갖는 예이다. 계산된 산란 계수는 EBG의 문제와 유사하므로 별도로 보이지 않았다. EFUI의 계산에서 PMC 조건은 도체면에 수직 전계 성분에도 음해법으로 처리해야 하며, 그렇지 않은 경우 먼저 해석한 EBG 구조와 마찬가지로 시간 간격을 늘일수록 급격히 오차가 커지는 계산 결과를 얻게 된다. 즉, EFUI 계산을 이용한 ADI-FDTD 해석에서는 자계에 모델링 되는 국부적인 경계 조건은 전계 및 주변 자계 계산 시 모두 처리를 해주어야 하는 반면, HFUI 계산 방법에서는 자계 계산식에만

경계조건을 적용해 주면 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 서로 다른 계산 방법인 EFIU와 HFIU를 이용한 ADI-FDTD 해석에 대해 고찰하였다. 두 계산 방법의 연산량은 비슷하나 적용하는 문제에 따라 경계 조건의 처리가 다를 수 있었고, 전계식에 모델링 되는 경계조건은 EFIU 계산 방법을 적용하는 것이 유리하고, 자계식에 모델링 되는 경계조건은 HFIU 계산 방법을 이용하는 것이 경계 조건 적용의 복잡성을 줄일 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 ADI-FDTD 계산에 적용되고 있는 EFIU 계산 방법은 HFIU 계산 방법에 비하여 자계식에 적용하는 자계 특성의 모델링 시에 각별한 주의가 필요함을 알 수 있었다. 경계 조건이 올바르게 모델링 되었을 때, 두 계산 방법을 이용한 ADI-FDTD의 해석은 동일한 결과를 나타내며, 문제의 복잡성에 따라 선택하는 것이 올바를 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] A. Taflove, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd Ed., Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [2] T. Namiki, "A new FDTD algorithm based on alternating direction implicit method", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 47, pp. 2003-2007, Oct. 1999.
- [3] F. Zheng, Z. Chen, and J. Zhang, "Toward the development of a three-dimensional unconditionally stable finite difference time-domain method", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, pp. 1550-1558, Sep. 2000.
- [4] F. Zheng, Z. Chen, "Numerical dispersion analysis of the unconditionally stable 3-D ADI-FDTD method", *IEEE Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, pp. 1006-1009, May 2001.
- [5] S. W. Staker, C. L. Holloway, A. U. Bhoobe, and M. Piket-May, "Alternating-direction implicit(ADI) formulation of the finite-difference time-domain(FDTD) method: algorithm and material dispersion implementation, ternating-direction implicit(ADI) formulation of the finite-difference time-domain(FDTD) method: algorithm and material dispersion implementation", *IEEE Microwave Theory and Tech.*, vol. 45, pp. 156-166, May 2003.
- [6] H. Rao, R. Scarmozzino, and R. M. Osgood, Jr., "An improved ADI-FDTD method and its application to photonic simulations", *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 14, pp. 477-479, Apr. 2002.
- [7] S. Wang, J. Chen, "Pre-iterative ADI-FDTD method for conductive medium", *IEEE Microwave Theory and Tech.*, vol. 53, pp. 1913-1918, Jun. 2005.
- [8] S. Ju, H. Kim, and H. Kim, "A study of the numerical dispersion relation for the 2-D ADI-FDTD method", *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.*, vol. 13, pp. 405-407, Sep. 2003.
- [9] A. P. Zhao, R. M. Makinen, T. Namiki, and K. Ito, "An accurate and logically correct way to verify the numerical dispersion relations of FDTD and ADI-FDTD methods", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 40, pp. 427-431, Mar. 2004.
- [10] G. Sun, C. W. Trueman, "A simple method to determine the time-step size to achieve a desired dispersion accuracy in ADI-FDTD", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 40, pp. 487-490, Mar. 2004.
- [11] S. G. Garcia, T.-W. Lee, and S. C. Hagness, "On the accuracy of the ADI-FDTD method", *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 1, pp. 31-34, 2002.

주 세 훈

1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 1999년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학석사)
 1999년 3월~2000년 2월: 서울대학교 수중음향특화연구센터 연구원
 2000년 3월~2003년 8월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학박사)
 2002년 9월~2003년 10월: 서울대학교 수중음향특화연구센터 연구원
 2003년 11월~현재: 한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소 연구원
 [주 관심분야] 마이크로파 공학, 전자파 수치해석, EMI/EMC 해석

황 인 호



1980년 2월: 한양대학교 전파 및 통신공학과 (공학사)
 1982년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)
 1986년 2월~2000년 1월: 국방과학연구소 선임연구원
 1992년 3월~1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 통신공학과 (공학박사)
 2000년 2월~현재: 한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소 책임연구원 팀장
 [주 관심분야] 정보보호, 이동통신, 통신신호처리, EMI/EMC

이 경 훈



1992년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 8월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년 8월: 고려대학교 전자공학과 (공학박사)
 1998년 12월~2000년 10월: 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
 2000년 11월~2001년 11월: (주)Tellion 팀장
 2001년 1월~현재: 한국전자통신연구원 부설 국가보안기술연구소 선임연구원
 [주 관심분야] DSP, 영상 신호 처리, 이동통신 신호 처리

김 형 동

1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1992년 5월: The University of Texas at Austin (Ph.D) 마이크로파공학 전공
 1989년 5월~1992년 5월: Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin: Research Assistant
 1992년 6월~1993년 1월: Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin: Postdoctoral Fellow
 1993년 3월~1996년 2월: 한양대학교 전파공학과 전임강사
 1996년 3월~2001년 2월: 한양대학교 전파공학과 조교수
 2001년 3월~2005년 2월: 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 부교수
 2005년 3월~현재: 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 교수
 [주 관심분야] 이동통신용 안테나, 마이크로파 회로, 초음파 공학, 전자파 수치해석, 웨이블릿 변환의 수치해석 응용, EMI/EMC 해석