

論文2003-40TC-5-2

## 2-D ADI-FDTD의 수치적 분산특성에 관한 연구 (Numerical Dispersion Relation for the 2-D ADI-FDTD Method)

周世勳\*, 金炯東\*\*

(Sae-Hoon Ju and Hyeong-Dong Kim)

### 요약

본 논문에서는 관심주파수의 파장에 비하여 매우 섬세한 구조의 해석에 있어서 기존의 FDTD보다 효율적인 해석이 가능한 ADI-FDTD의 분산오차에 대하여 연구하였다. 2-D ADI-FDTD에 적합한 분산식을 제안하였으며 기존의 분산식들과 비교하였다. 수치적인 해석을 통하여 제안된 2-D ADI-FDTD 분산식이 수치결과와 일치함을 확인하였다.

### Abstract

This paper presents a numerical dispersion relation for the two-dimensional finite-difference time-domain method based on the alternating-direction implicit time-marching scheme(2-D ADI-FDTD), 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. The proposed analytical relation for 2-D ADI-FDTD is compared with those relations in the previous works. Through numerical tests, the dispersion equation of this work was shown as correct one for 2-D ADI-FDTD.

**Keywords :** 2-D ADI FDTD, Dispersion relation, FDTD

### I. 서론

최근 유한차분 시간영역법(FDTD : Finite-Difference Time-Domain method)의 단점의 하나인 시간간격의 크기를 제한 하는 CFL 안정조건(Courant-Friedrich-Levy stability constraint)을 제거하기 위하여 ADI 시간진행

법(Alternating Direction Implicit time-marching scheme)을 기존의 FDTD에 도입함으로써 시간간격에 상관없이 무조건 안정 특성의 ADI-FDTD가 개발되었다<sup>[1,2]</sup>. ADI-FDTD는 특히 관심주파수의 파장에 비하여 해석하고자 하는 구조체가 매우 섬세한 부분을 포함하고 있는 경우에 기존의 FDTD에 비하여 계산의 정확도는 유지하면서 계산시간을 상당히 줄일 수 있는 방법임을 여러 논문에서 지적하고 있다<sup>[1,3]</sup>. FDTD가 공간적으로 매우 작은 격자를 사용하게 되면 안정조건에 의해서 시간간격 또한 매우 작게 되어 원하는 시간 응답을 얻어내기 위해서는 많은 반복이 필요하게 되는 반면 ADI-FDTD는 시간간격에 있어서 제한이 없어 반복계

\* 正會員, 漢陽大學校 電子電氣工學部

(Department of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea.)

\*\* 正會員, 漢陽大學校 電子電氣工學部

(Correspondence to Hyeongdong Kim, Department of Electrical and Computer Engineering.)

接受日字:2003年1月15日, 수정완료일:2003年4月23日

산을 줄일 수 있기 때문이다. 하지만 ADI-FDTD는 수치적 분산(numerical dispersion) 특성이 시간간격을 크게 할수록 급격하게 나빠지므로 수치적 분산 특성이 이상적인 분산 특성과 많이 틀려져서 오차가 시간간격을 키울수록 급격하게 커진다. 이러한 이유로 ADI-FDTD는 시간간격의 제한은 없지만 시간간격을 늘이면 급격하게 나빠지는 수치적 분산특성 때문에 해석의 정확도에 의해 제한을 받게 되며, 수치적 분산특성을 예측하기 위해서 그 분산식을 구하는 것이 ADI-FDTD를 이용하는 경우에 매우 중요한 문제이다.

2-D ADI-FDTD의 수치적 분산과 무조건 안정성의 수치적 특성에 관한 최근의 논문<sup>[6,7]</sup> 중 T. Namiki와 K. Ito는<sup>[6]</sup> 수치 분산식을 구하고 수치해석을 통하여 TE (Transverse Electric wave)와 TM(Transverse Magnetic wave)의 경우에 대해서 기존의 FDTD와 시간간격에 따른 2-D ADI-FDTD의 수치적 위상 속도를 구하여 비교하였다. 하지만, 이 논문에서는 제안된 2-D ADI-FDTD의 분산식과 수치해석 결과를 비교하지 않았다. 최근에 A. P. Zhao는 [7]에서 Namiki의 논문에서의 오류를 지적하였으며 다른 형태의 2-D ADI-FDTD에 적합한 수치 분산식을 구하였다. 또한 Zhao는 필드의 계산 순서(updating procedure)에 따라서 2-D ADI-FDTD를 두 개의 종류로 구분하여 그에 대한 수치 분산식을 각각 구하였으며 2-D ADI-FDTD에서 구해진 분산식에 기초하여 시간간격을 적절히 구하는 방법을 제시하였으나, 제안한 수치 분산식을 수치적 실험을 통하여 검증하지 않았다.

본 논문에서는 기존의 분산식의 유도와 같은 방식<sup>[8,9]</sup>으로 접근하여 2-D ADI-FDTD에 적합한 새로운 분산식을 제안하였다. 제안된 2-D ADI-FDTD의 분산식과 이전의 참고논문 [7]에서 제안되었던 분산식과 비교하였으며, 수치해석을 통하여 본 논문에서 제안한 수치 분산식이 올바른 것임을 확인하였다.

## II. 2D ADI-FDTD의 수치 분산식

Zhao가 분류한 것과 같이 2-D ADI-FDTD에서 계산 순서에 따라 다음과 같이 두 가지의 경우로 나눌 수 있다<sup>[7]</sup>.

### 1. 선택사항 I

선형(linear), 등방(isotropic), 무손실(lossless), 비분산(nondispersive) 매질의 TM에 해당하는 이차원 맥스웰 미분방정식에 Namiki의 ADI-FDTD 시간 진행 방식을 적용하여 다음과 미분방정식을 근사할 수 있다<sup>[1]</sup>. (이러한 형태의 2-D ADI-FDTD를 Zhao는 x-방향성 2-D ADI-FDTD라 하였다<sup>[7]</sup>.)

• 첫번째 반복식:

$$\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \Big|^{n+1/4} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Big|^n - \frac{\partial H_x}{\partial y} \Big|^{n+1/2} \quad (1.a)$$

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \Big|^{n+1/4} = \frac{\partial E_z}{\partial y} \Big|^{n+1/2} \quad (1.b)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \Big|^{n+1/4} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Big|^n \quad (1.c)$$

• 두번째 반복식:

$$\epsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} \Big|^{n+3/4} = \frac{\partial H_y}{\partial x} \Big|^{n+1} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \Big|^{n+1/2} \quad (2.a)$$

$$\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} \Big|^{n+3/4} = \frac{\partial E_z}{\partial y} \Big|^{n+1/2} \quad (2.b)$$

$$\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \Big|^{n+3/4} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \Big|^{n+1} \quad (2.c)$$

여기서  $\epsilon$ 와  $\mu$ 는 각각 유전율(permittivity)과 투자율(permeability)이다. 식 (1)과 식 (2)의 위첨자는 이산 시간 영역에서의 근사위치를 나타낸다. 즉 위첨자  $n$ 은  $t = n\Delta t$ 의 시간위치를 나타낸다. 식 (1)과 식 (2)에 중앙 차분근사(central difference approximation)를 통하여 미분을 근사하면 2-D ADI-FDTD 차분방정식을 구하게 된다. 이렇게 구해진 차분방정식은 미지수가 양변에 놓이게 되어 음해법으로(implicit manner) 풀어야하며, 미지수항을 정리하여 얻는 최종 계산식은 삼대각행렬(tri-diagonal matrix) 형태를 갖게되어 각 방향으로 인접한 3개의 필드 성분을 동시에 풀게 된다. 최종 차분방정식을 다음의 식 (3)과 식 (4)에 나타내었다.

• 첫번째 반복식:

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + \frac{(\Delta t)^2}{2\epsilon\mu(\Delta y)^2} \right] E_z|_{i,j}^{n+1/2} - \frac{(\Delta t)^2}{4\epsilon\mu(\Delta y)^2} E_z|_{i,j+1}^{n+1/2} - \frac{(\Delta t)^2}{4\epsilon\mu(\Delta y)^2} E_z|_{i,j-1}^{n+1/2} \\ & = E_z|_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta y} H_x|_{i,j+1/2}^n + \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta y} H_x|_{i,j-1/2}^n \\ & \quad + \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta x} (H_y|_{i+1/2,j}^n - H_y|_{i-1/2,j}^n) \end{aligned} \quad (3.a)$$

$$H_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2} = H_x|_{i,j+1/2}^n - \frac{\Delta t}{2\mu\Delta y} (E_z|_{i,j+1}^{n+1/2} - E_z|_{i,j}^{n+1/2}) \quad (3.b)$$

$$H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} = H_y|_{i+1/2,j}^n + \frac{\Delta t}{2\mu\Delta x} (E_z|_{i+1,j}^{n+1/2} - E_z|_{i,j}^{n+1/2}) \quad (3.c)$$

• 두번째 반복식:

$$\begin{aligned} & \left[ 1 + \frac{(\Delta t)^2}{2\epsilon\mu(\Delta x)^2} \right] E_z|_{i,j}^{n+1} - \frac{(\Delta t)^2}{4\epsilon\mu(\Delta x)^2} E_z|_{i+1,j}^{n+1} - \frac{(\Delta t)^2}{4\epsilon\mu(\Delta x)^2} E_z|_{i-1,j}^{n+1} \\ & = E_z|_{i,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta x} H_x|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta x} H_x|_{i-1/2,j}^{n+1/2} \\ & \quad - \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta y} (H_y|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - H_y|_{i,j-1/2}^{n+1/2}) \end{aligned} \quad (4.a)$$

$$H_x|_{i,j+1/2}^{n+1} = H_x|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2\mu\Delta y} (E_z|_{i,j+1}^{n+1/2} - E_z|_{i,j}^{n+1/2}) \quad (4.b)$$

$$H_y|_{i+1/2,j}^{n+1} = H_y|_{i+1/2,j}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2\mu\Delta x} (E_z|_{i+1,j}^{n+1/2} - E_z|_{i,j}^{n+1/2}) \quad (4.c)$$

위 식 (3)과 식 (4)는 다음과 같은 순서로 계산된다:

1) 첫번째 반복에서는  $E_z^{n+1/2}$  는  $y$  방향을 따라 음해법으로 계산되고,  $H_x^{n+1/2}$  와  $H_y^{n+1/2}$  은 음해법으로 구해진  $E_z^{n+1/2}$  를 이용하여 양해법으로 계산된다. 2) 두번째 반복에서는  $E_z^{n+1}$  는  $x$  방향을 따라 음해법으로 계산되고,  $H_x^{n+1}$  와  $H_y^{n+1}$  는 음해법으로 구해진  $E_z^{n+1}$  를 이용하여 양해법으로 계산된다. 이러한 과정을 TE에도 마찬가지로 적용할 수 있으며 최종과정은 1) 첫번째 반복에서  $E_x^{n+1/2}$  는 양해법으로  $E_y^{n+1/2}$  는 방향을 따라 음해법으로 계산한 후 이 값들을 이용하여  $H_z^{n+1/2}$  을 양해법으로 구한다. 2) 두번째 반복에서는  $E_x^{n+1}$  를  $y$  방향을 따라 음해법으로  $E_y^{n+1}$  를 양해법으로 계산한 후, 계산된 값을 이용하여  $H_z^{n+1}$  를 양해법으로 계산한다. (Zhao는 [7]에서 TE의 식을 정리하였으며 첫번째 반복에서  $x$  방향으로 음해법으로 적용하기 때문에 -방향성 2-D ADI-FDTD 라 하였다.)

## 2. 선택사항 II

Zheng의 ADI-FDTD 방식<sup>[2]</sup>을 TM에 해당하는 이차원 맥스웰 미분방정식에 적용하는 것으로 이러한 2-D ADI-FDTD를 Zhao는  $y$ -방향성 2D ADI-FDTD라 하였다<sup>[7]</sup>. 이 방식은 선택사항 I의 경우와 매우 유사하며 음해법의 방향 순서가 뒤바뀐 것으로 이해할 수 있다. 즉, TM의 경우 1) 첫번째 반복에서  $E_z^{n+1/2}$  를  $x$  방향을 따라 음해법을 적용한 후 이 값을 이용하여  $H_x^{n+1/2}$  와  $H_y^{n+1/2}$  를 양해법으로 계산하고, 2) 두번째 반복에서는  $E_z^{n+1}$  를  $y$  방향을 따라 음해법을 적용한 후 이 값을 이용하여  $H_x^{n+1}$  와  $H_y^{n+1}$  를 양해법으로 구한다. TE의 경우 1)  $E_x^{n+1/2}$  을 구하기 위해  $y$  방향으로 음해법을 적용하고  $E_y^{n+1/2}$  는 양해법을 적용한 후 얻어진 값을 이용하여  $H_z^{n+1/2}$  는 양해법으로 계산한다. 2) 두번째 반복에서  $E_x^{n+1}$  는 양해법으로  $E_y^{n+1}$  는  $x$  방향으로 음해법을 적용한 후  $H_z^{n+1}$  는 양해법으로 계산하게 된다.

2-D ADI-FDTD에 적합한 수치 분산식을 구하기 위하여 참고문헌 [2]에 기술된 푸리에 방식(Fourier method)을 적용하여  $n$ 과  $n+1$ 시간 사이의 필드들간의 관계를 파수영역에서 구할 수 있으며 이것은 다음과 같이 행렬형태로 표시할 수 있다.

$$X^{n+1} = \Lambda X^n \quad (5)$$

여기서 합성 벡터  $X$ 는 세개의 파수영역 필드값을 나타낸다. 즉 TM의 경우  $X^{n+1} = [E_z^{n+1} \ H_x^{n+1} \ H_y^{n+1}]^T$  이고  $X^n = [E_z^n \ H_x^n \ H_y^n]^T$  이며, 행렬  $\Lambda$ 는 다음과 같다.

$$\Lambda_{TM, \text{optimal I}} = \begin{bmatrix} \frac{\mu^2 \epsilon^2 - \mu\epsilon W_x^2 - \mu\epsilon W_y^2 - W_x^2 W_y^2}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{2j\mu^2 \epsilon W_y}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{-2j\mu^2 \epsilon W_x}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} \\ \frac{2j\epsilon W_x}{\mu\epsilon + W_x^2} & \frac{\mu\epsilon - W_x^2}{2\mu\epsilon W_x} & \frac{\mu\epsilon + W_x^2}{2W_x W_y} \\ \frac{-2j\mu\epsilon^2 W_x}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{2\mu\epsilon W_x W_y}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{\mu^2 \epsilon^2 - \mu\epsilon W_x^2 + \mu\epsilon W_y^2 + W_x^2 W_y^2}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_{TM, \text{optimal II}} = \begin{bmatrix} \frac{\mu^2 \epsilon^2 - \mu\epsilon W_x^2 - \mu\epsilon W_y^2 - W_x^2 W_y^2}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{2j\mu^2 \epsilon W_x}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{-2j\mu^2 \epsilon W_y}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} \\ \frac{2j\mu\epsilon^2 W_y}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{\mu^2 \epsilon^2 + \mu\epsilon W_x^2 - \mu\epsilon W_y^2 + W_x^2 W_y^2}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} & \frac{2\mu\epsilon W_x W_y}{(\mu\epsilon + W_x^2)(\mu\epsilon + W_y^2)} \\ \frac{-2j\epsilon W_x}{\mu\epsilon + W_x^2} & \frac{2W_x W_y}{\mu\epsilon + W_x^2} & \frac{\mu\epsilon - W_x^2}{\mu\epsilon + W_x^2} \end{bmatrix}$$

행렬 A에서  $W_x = (\Delta t / \Delta x) \cdot \sin(k_x \Delta x / 2)$ 이고  $W_y = (\Delta t / \Delta y) \cdot \sin(k_y \Delta y / 2)$ 이며,  $k_x$ 와  $k_y$ 는 공간영역의 변수  $x$ ,  $y$ 에 해당하는 파수여역의 값이다. 마찬가지로 방식으로 TE의 경우에 해당하는 행렬 또한 얻을 수 있으며, 최종적으로 얻어지는 선택사항 I-TM, -TE와 선택사항 II-TM, -TE의 행렬 A는 틀린 형태를 갖게 되지만 동일한 고유값(eigenvalue)을 가짐을 확인할 수 있었다. 4개의 경우 모두 크기가 1인 한쌍의 공액복소수 쌍(conjugate pair)과 1을 고유값으로 갖고, 이것으로 4개의 경우 모두 고유값의 크기가 1이되어 시간간격에 상관없이 2-D ADI-FDTD가 수치적으로 안정함을 알 수 있다. 2-D ADI-FDTD의 수치 분산식을 구하기 위하여 추가로 식 (5)에 단일 각주파수  $\omega$ 를 갖는 필드를(monochromatic wave)  $X^n = X e^{j\omega n \Delta t}$ 와 같이 가정하면 식 (5)는 다음과 같이 변형이 가능하다.

$$(e^{j\omega \Delta t} I - A)X = 0 \quad (6)$$

여기에서 I는 3×3 항등행렬(identity matrix)이다. 2-D ADI-FDTD의 수치 분산식은 행렬  $(e^{j\omega \Delta t} I - A)$ 의 행렬식(determinant)이 0이 되도록 함으로써 구할 수 있으며<sup>[8]</sup>, 다음의 식 (7)과 같이 선택사항 I-TM, -TE와 선택사항 II-TM, -TE의 4가지 경우가 모두 동일한 분산식으로 구해진다.

$$\sin^2\left(\frac{\omega \Delta t}{2}\right) = \frac{W_x^2 W_y^2 + \mu \epsilon W_x^2 + \mu \epsilon W_y^2}{W_x^2 W_y^2 + \mu \epsilon W_x^2 + \mu \epsilon W_y^2 + \mu^2 \epsilon^2}. \quad (7)$$

이러한 결과는 참고문헌 [7]에서 선택사항 I과 선택사항 II에 해당하는 두개의 서로 다른 2-D ADI-FDTD 수치 분산식을 얻은 것과 상반된다. 식 (7)은 참고문헌 [9]에서 유도한 3-D ADI-FDTD의 분산식에(참고문헌 [9]의 식 (3)) Z방향으로 필드의 변화가 없다는 가정하에  $\Delta Z$ 에 무한값을 취함으로써 얻을 수 있는 분산식이다.

### III. 수치해석을 통한 검증

식 (7)의 2-D ADI-FDTD 수치 분산식의 검증을 위하여 선택사항 I과 선택사항 II에 해당하는 이차원 TM 문제를 <그림 1>과 같이 선전류원(line current source)이 자유공간(free space)으로 방사하는 경우를 통하여 확인하였다. <그림 1>에서 전류원으로부터 떨어져있는

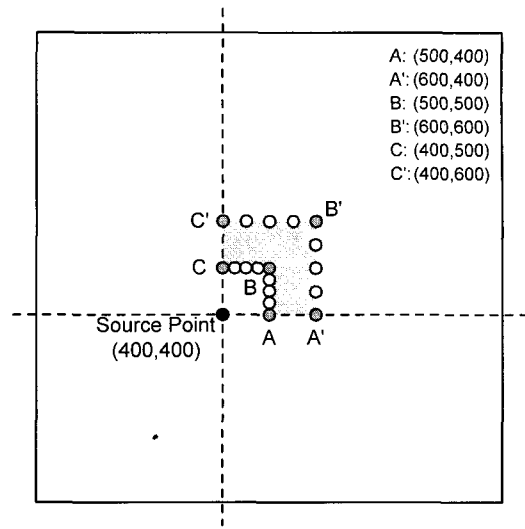


그림 1. 2-D TM의 경우에 해당하는 자유공간에서 방사하는 선 전류원 구조. 전류원과 떨어진 18개의 관찰 지점이 있으며, 괄호 안의 값은 관찰 지점의 위치를 나타낸다. 해석영역의 크기는  $10\lambda_0 \times 10\lambda_0$ 이다.

Fig. 1. A line current source model radiating in free-space for 2-D TM case. There are 18 observation points separated from the line current source. The value in parenthesis is a location of the observation points. The problem size is  $10\lambda_0 \times 10\lambda_0$ .

18개의 필드 관찰 지점(observation point)을 볼 수 있으며, 이러한 관찰 지점에서 필드의 시간 응답을 얻어 참고문헌 [6]에서 기술한 방법으로 정규화된 수치 위상 속도(numerical phase velocity)를 구하였다. 그림에서 표시한 관찰 지점쌍 A-A', B-B', C-C'를 통해서 지나가는 평면파(plane wave)의 진행 각도는 각각  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 에 해당한다. 실제 수치해석에서는 ADI-FDTD의 본래 사용목적에 맞도록 공간영역에서  $\Delta = \Delta x = \Delta y = \lambda_0 / 100$ 의 작은 격자를 사용하였으며, 시간 간격은 기존의 FDTD의 안정조건에 의해 제한된 최대값 보다 큰 값으로 CFLN = 2, 4, 6, 8에 해당하는 값을 취하였다. 여기에서 CFLN은 CFL 안정조건에 의한 시간간격의 최대값과 2-D ADI-FDTD에서 사용된 시간 간격의 비율로  $CFLN = \Delta t / \Delta t_{CFL}$ 이다.

<그림 2>는 주파수  $f = 600MHz$ 에서의 선택사항 I-TM, 선택사항 II-TM의 정규화된 위상 속도와 제안된 식 (7)의 분산식, 기존의 분산식으로부터 유도한 위상 속도를 비교하여 보여주고 있다.  $f = 600MHz$ 이므

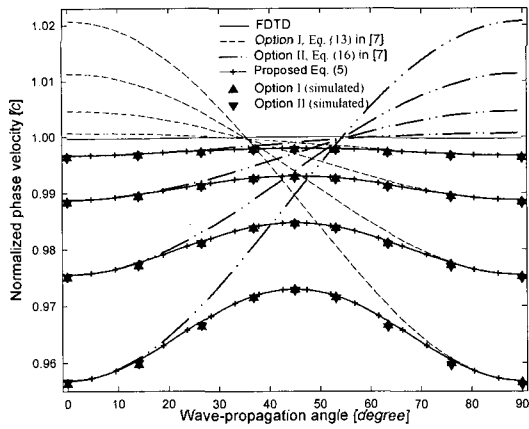


그림 2. 파의 진행각에 따른 2-D ADI-FDTD의 정규화된 수치 위상 속도, 수치해석 결과와 제안된 분산식이 매우 동일하다

Fig. 2. Normalized numerical phase velocity of the 2-D ADI-FDTD method versus wave-propagation angle. Simulation results for two update processes and a proposed dispersion relation are in good agreement.

로 격자 샘플링 밀도(grid sampling density)  $N = \lambda_0 / \Delta$  은 수치 분산식에서 50으로 선택하였다. 비교를 위하여 기존의 FDTD의 수치 위상 속도 또한 함께 나타내었으며 CFLN=1에 해당하는 시간간격에 대한 값이다. 참고문헌 [7]에서 제안된 분산식은 위상 속도가 0° 또는 90°에서 최대값을 갖는 반면 기존의 FDTD와 제안된 식 (7)의 수치 분산식을 이용한 결과는 45°에서 최대 위상 속도를 가짐을 알 수 있다. 또한 제안한 분산식으로부터 구해진 위상속도는 시간간격을 늘일수록 급격하게 이상적인 경우에 비하여 느려지는 것을 관찰할 수 있다.

시간간격이 CFL 안정조건에 제한된 값보다 작으면 ADI-FDTD와 FDTD가 비슷한 위상속도를 갖게 되지만 그림에는 나타내지 않았다. 시간간격을 늘리면서 수치해석을 이용하여 이산 각도에서 구해진 선택사항 I-TM, 선택사항 II-TM의 위상 속도 값과 제안된 분산식으로부터 구한 위상속도가 매우 비슷함을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 제안된 (7)의 2-D ADI-FDTD 수치 분산식이 올바른 식임을 보여주고 있다.

#### IV. 결 론

시간간격의 제한은 없지만 시간간격을 키우면 급격하게 나빠지는 수치적 분산특성 때문에 해석의 정확도에

의해 제한을 받는 ADI-FDTD를 사용할 때 수치적 분산특성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 수치해석결과의 정확도를 미리 예측할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 관심주파수의 파장에 비하여 매우 섬세한 구조의 해석에 있어서 기존의 FDTD보다 효율적인 해석이 가능한 ADI-FDTD의 이차원에서의 수치 분산식을 구하고 수치적인 해석을 통하여 제안된 2-D ADI-FDTD 분산식이 수치결과와 일치함을 확인하였다. 제안된 분산식이 2-D ADI-FDTD의 정확도를 예측하는데 적합한 식임을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] T. Namiki, "3-D ADI-FDTD method - unconditionally stable time-domain algorithm for solving full vector Maxwell's equations," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 48, pp. 1743~1748, Oct. 2000.
- [2] 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.
- [3] C. C.-P. Chen, T. Lee, N. Murugesan, and S. C. Hagness, "Generalized FDTD-ADI: an unconditionally stable full-wave Maxwell's equations solver for VLSI interconnect modeling," in *IEEE ICCAD-2000, IEEE/ACM Int. Conf. on Computer Aided Design, 2000*, pp. 156~163.
- [4] T. Namiki and K. Ito, "Numerical simulation of microstrip resonators and filters using the ADI-FDTD method," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, pp. 665~670, Apr. 2001.
- [5] 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.
- [6] T. Namiki and K. Ito, "Investigation of numerical errors of the two-dimensional ADI-FDTD method," *IEEE Trans. Microwave Theory*

- and Tech., vol. 48, pp. 1950~1956, Nov. 2000.
- [7] A. P. Zhao, "Analysis of the numerical dispersion of the 2-D alternating-direction implicit FDTD method," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. 50, pp. 1156~1164, Apr. 2002.
- [8] F. Zheng and 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.
- [9] S. Ju and H. Kim, "Investigation of an unconditionally stable compact 2D ADI-FDTD algorithm: formulations, numerical stability, and numerical dispersion," in IEEE AP-S Int. Symp. Dig., vol. 3, 2002, pp. 639~641.

---

 저 자 소 개
 

---



周世勳(正會員)

1997년 2월 : 한양대학교 전파공학과(공학사). 1999년 2월 : 한양대학교 전파공학과(공학석사). 1999년 3월~2000년 2월 : 서울대학교 수중음향특화연구센터 특례연구원. 2000년 3월~현재 : 한양대학교 전자통신전파공학과 박사과정.

2002년 9월~현재 : 서울대학교 수중음향특화연구센터 특례연구원. <주관심분야 : 마이크로파 회로, 전자파 수치해석, UWB 시스템>

金炯東(正會員) 第40卷 TC編 第3號 參照