

논문 2007-44TC-10-21

2차원 ADI-FDTD 수치해석에서 이방성 오차의 감소방안

(Reduction Method of Anisotropy Error in Two Dimensional ADI-FDTD Method)

김종성*, 공기복**

(Jong-Sung Kim and Ki-Bok Kong)

요약

공간상의 전자파 전파에서 모든 각도에서 동일한 전속도를 갖는 ADI-FDTD 해석방법을 제안한다. 이는 기존의 ADI-FDTD 방법에서 시간 간격의 2차항에 x, y 에 공간 미분이 곱해진 항을 추가하고, 이에 대한 최적의 상수를 구하여 구현하였다. 새로운 ADI-FDTD 는 CFL 안정도 조건을 초과하는 시간 간격에 대해서도 안정적인 특성을 나타낸다. 이 방법에 대한 분산 관계식을 구한 후 이를 수치적인 결과와 비교하여 제안하는 방법이 기존의 방법에 비해서 나타나는 장점, 즉 등방성 전파 및 수치적 오차의 감소를 수치적 예를 통하여 검증하였다.

Abstract

A new adaptive alternating-direction-implicit finite-difference time-domain (ADI-FDTD) method is proposed to obtain isotropic wave propagation for all directional angles. We add the square terms of time-step multiplied by the spatial derivatives of x and y as a perturbed term to the conventional ADI-FDTD and can find the optimization coefficient of square terms of time-step to generate the minimum anisotropy. The new ADI-FDTD is also stable, even when its time-step is greater than the Courant-Friedrich-Levy (CFL) limit. The characteristic equation of the dispersion relation governing the new method is derived and compared with the theoretical and numerical results for the conventional ADI-FDTD and perturbed ADI-FDTD methods.

Keywords : ADI, FDTD, Anisotropy, Dispersion, Stability

I. 서론

유한요소 시간차분법(finite-difference time-domain: FDTD)은 단순한 구현, 유연성 및 쉬운 개념 등의 장점으로 인하여 많은 전자파 응용에 널리 이용되고 있다. 그러나 FDTD 는 explicit 에 의한 시간진행 방법에 의하므로 최대 허용할 수 있는 시간 간격은 CFL 조건

으로 제한된다. 따라서 미소의 크기를 갖는 구조체가 포함된 경우에 대해서는 많은 계산 시간이 소요된다^[1].

CFL 조건에 의한 제한을 없애기 위하여 ADI-FDTD 알고리즘이 Namiki 에 의하여 처음으로 제안되었다^[2]. ADI-FDTD에서 시간 간격의 크기는 기존의 FDTD에서 보다 훨씬 더 커질 수 있다. 그러나 ADI-FDTD에서 시간 간격의 크기가 증가함에 따라, 수치적인 분산과 계산 오차가 FDTD에서 보다 증가하는 것이 단점이다. 이는 ADI-FDTD 방법이 Crank Nicholson(CN) FDTD 수식에서 시간 간격의 2차항을 버리고, 2단계 식으로 나누어 구현하였기 때문이다^[3]. 따라서 ADI-FDTD 의 truncation 오차는 시간 스텝의 2차에 비례하여 증가한다^[4].

ADI-FDTD 알고리즘의 수치적인 분산 오차를 감소

* 정회원, 경성대학교 멀티미디어통신공학과
(Department of Communications Engineering,
Kyungsung University)

** 정회원, 한국정보통신대학교 공학부
(School of Engineering, Information and
Communications University)

※ 이 논문은 2005학년도 경성대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2007년2월6일, 수정완료일: 2007년10월12일

시키기 위하여 Chen 은 고차항을 추가하는 방법을 이용되었다^[6]. 그러나 이 방법은 계산량의 증가로 단순한 구조에 대해서만 의미를 갖는다. Wang과 Zhao는 최적화 파라미터 또는 이방성 지수를 도입하여 특정 각도에서는 분산 오차를 제거하는 것이 가능함을 보였다^[6-7]. 그러나 이들의 수치적 분석특성의 결과에서는 여전히 이방성 분산 특성이 존재한다.

또한, Wang과 Ahmed는 ADI-FDTD에서 수치적인 오차를 줄이기 위하여 CN-FDTD 에 기반을 둔 2차항을 반복법 (Iterative Method)과 근사법 (Approximation Method)을 사용하여 가능성을 보였다^[8-9].

이 논문에서는 기존의 ADI-FDTD formulation에서 이방성 전파특성에 의한 오차를 줄이기 위하여 시간 간격의 2차항을 추가하는 방법을 제안한다. 이 방법은 넓은 대역폭에 대하여 수치적인 이방성을 줄이는 특성을 나타내었다.

II. 유한차분방정식 유도

TE-z 에 대한 2차원 맥스웰 방정식을 다음과 같이 행렬의 형태로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\epsilon \partial y} \\ 0 & 0 & -\frac{\partial}{\epsilon \partial x} \\ \frac{\partial}{\mu \partial y} & -\frac{\partial}{\mu \partial x} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ H_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기에서 ϵ 과 μ 는 자유공간에서의 유전율과 투자율을 나타낸다. 식 (1)의 3x3 행렬은 아래와 같이 x 와 y 의 변수로 분리하여 나타내는 것이 가능하다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \vec{U} = \mathbf{A} \vec{U} + \mathbf{B} \vec{U} \quad (2)$$

여기서 $\vec{U} = [E_x \ E_y \ H_z]^T$,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\epsilon \partial y} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial}{\mu \partial y} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\partial}{\epsilon \partial x} \\ 0 & -\frac{\partial}{\mu \partial x} & 0 \end{bmatrix}$$

를 각각 나타낸다. 식 (2)의 시간에 대한 미분을 차분방정식으로 대체하면 아래의 CN-FDTD 방정식이 된다.

$$\left(\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} \right) \vec{U}^{n+1} = \left(\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} \right) \vec{U}^n \quad (3)$$

여기에서 \mathbf{I} 는 3x3 단위행렬을 나타낸다. 식(3)은 시간 간격에 대해서 2차항의 정확도를 나타낸다. 식(3)을 가우스 소거법에 의하여 푸는 것이 가능하지만, 이는 오랜 계산시간을 필요로 한다. 식 (3)은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\left[\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} \right] \left[\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} \right] \vec{U}^{n+1} = \left[\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} \right] \left[\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} \right] \vec{U}^n + \frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{AB} (\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n) \quad (4)$$

식 (4)의 시간 간격의 2차항을 버리고 (n+1/2) 시간 단계를 도입하면 이것이 바로 ADI-FDTD formulation 이 된다. 이는 아래와 같은 truncation 오차를 발생시킨다.

$$\frac{\Delta t^2}{4} \mathbf{AB} (\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n) . \quad (5)$$

식(4)에서 식(5)의 항의 제거로 인하여 3개의 요소에 의한 오차가 발생한다. 이는 시간 스텝의 크기(Δt^2), 필드의 공간 미분(\mathbf{AB}), 그리고 시간적인 변화량 ($\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n$) 에 의한 것이다. 시간 스텝의 2차항과 관련한 오차는 필드의 변화가 심한 영역에서 강하다. 이는 미세한 구조에 대한 해석에서 계산 오차가 많이 발생하여 계산결과의 정확도가 떨어짐을 의미한다.

Peaceman-Ranchford 방법에 의하여 식(4)를 아래의 2개의 식으로 분할하는 것이 가능하다^[10].

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} \right] \vec{U}^{n+1/2} &= \left[\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} \right] \vec{U}^n + \frac{\Delta t^2}{8} \mathbf{AB} (\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n) \\ \left[\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} \right] \vec{U}^{n+1} &= \left[\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} \right] \vec{U}^{n+1/2} + \frac{\Delta t^2}{8} \mathbf{AB} (\vec{U}^{n+1} - \vec{U}^n) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)의 Peaceman-Ranchford 방정식의 2차항과 관련된 오차를 줄이기 위하여 Wang 은 반복법(Iterative Method)에 의하여 2차항을 고려하였고, Ahmed 는 근사법(Approximation Method)으로 이를 처리하였다^[8-9].

본 논문에서는 다음의 2개의 explicit 형태의 2개의 식을 사용한다. 여기에서 2차항의 최적화 계수 α 는 나중에 구한다.

$$\begin{cases} \left[\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} - \alpha \Delta t^2 \mathbf{A} \mathbf{B} \right] \bar{\mathbf{U}}^{n+1/2} = \left[\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} - \alpha \Delta t^2 \mathbf{A} \mathbf{B} \right] \bar{\mathbf{U}}^n \\ \left[\mathbf{I} - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{B} - \alpha \Delta t^2 \mathbf{A} \mathbf{B} \right] \bar{\mathbf{U}}^{n+1} = \left[\mathbf{I} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{A} - \alpha \Delta t^2 \mathbf{A} \mathbf{B} \right] \bar{\mathbf{U}}^{n+1/2} \end{cases} \quad (7)$$

식 (6)의 오른쪽에서의 implicit 항을 무시하면 ADI-FDTD 방법이 되며, 대신에 식 (7)에서와 같이 모든 계수항에 식 (6)의 2차항과 같은 미분 형태(AB)를 추가한 2단계의 방정식 (7) 식을 선택한다. 식 (7-a)의 좌측항과 (7-b)의 우측항의 계수 행렬 사이에는 공액 복소수 관계가 성립한다. 그리고 (n)과 (n+1) 시간 스텝의 2개의 계수 행렬 사이에서도 서로 공액 복소수 관계가 성립한다. 모든 시간 스텝의 1차항은 순허수이고 모든 2차항은 실수이므로 (n)에서 (n+1) 단계의 시간 진행에서 모든 계수 행렬의 절대치가 1이 유지된다.

식 (7)의 수치적인 안정도를 G. Sun이 사용하는 방식을 이용하여 분석한다^[11]. 2차원 TE-z 파동은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = \psi_0 \xi^n \exp\{j(k_x x + k_y y)\} \quad (8)$$

여기에서 j는 단위 복소수 그리고 kx, ky는 x축과 y축에 대한 파수를 나타낸다. 또한 ξ^n 은 증폭도를 나타낸다. 식(8)의 파동식을 식(7-a)의 1차 시간 간격에 대한 식에 적용하고, 그리고 식(7-b)의 2차 시간 간격을 적용하여 아래의 2개의 특성 방정식을 얻는다.

$$\begin{cases} (c^2 W_y^2 + 1) \xi_1^2 - 2(2\alpha c^4 W_x^2 W_y^2 + 1) \xi_1 + (c^2 W_x^2 + 1) = 0 \\ (c^2 W_x^2 + 1) \xi_2^2 - 2(2\alpha c^4 W_x^2 W_y^2 + 1) \xi_2 + (c^2 W_y^2 + 1) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

여기서 ξ_1, ξ_2 은 2개의 시간 간격에서 각각의 증폭도를 나타낸다. 그리고 c는 자유공간에서의 전파의 진행 속도를 나타낸다. W_x 와 W_y 는 아래와 같은 식으로 정의된다.

$$W_x = \frac{\Delta t}{\Delta x} \sin\left(\frac{k_x \Delta x}{2}\right), \quad W_y = \frac{\Delta t}{\Delta y} \sin\left(\frac{k_y \Delta y}{2}\right).$$

여기서 $\Delta x, \Delta y$ 는 2차원 공간상의 격자 크기이다. 식 (9)를 풀면 아래의 각 2개의 시간 간격에 대한 크기요소의 해를 얻는다.

$$\xi_1 = \frac{r \pm j\sqrt{pq - r^2}}{q}, \quad \xi_2 = \frac{r \pm j\sqrt{pq - r^2}}{p} \quad (10)$$

여기서 p, q, r은 아래와 같이 정의한다.

$$p = 1 + c^2 W_x^2, \quad q = 1 + c^2 W_y^2, \quad r = 1 + 2\alpha c^4 W_x^2 W_y^2$$

위의 변수에서 r에서 α 와 관계되는 항은 식 (7)에서 x, y의 2차 미분에 의해서 추가된 결과이다. 전체 1, 2차 시간 간격의 곱의 증폭 요소는 $|\xi| = |\xi_1 \xi_2| = 1$ 이다. 다음의 관계식, $\xi = \xi_1 \xi_2 = \exp\{j\alpha \Delta t\}$ 을 이용하여 아래의 분산관계식을 얻는다.

$$\cos^2(\alpha \Delta t / 2) = \frac{r^2}{pq} \quad (11)$$

계수 p, q, r의 정의로부터 α 가 0이면 제안한 알고리즘이 기존의 ADI-FDTD 알고리즘이 된다. 일반적으로 FDTD 방식에서 대각방향(45°)의 수치적 위상속도는 축 방향(0°, 90°)의 속도에 비해서 크거나 작다. α 파라미터의 크기는 주어진 수치적 조건, 즉 파장당 격자의 갯수 및 시간 간격에 대해서 수치적 위상속도를 제어할 수 있음을 의미한다. 식(11)의 제안 ADI-FDTD에서 모든 전파방향에 대해서 동일한 전송속도를 갖도록 하기 위해서 45도 방향에서의 위상속도를 0도 또는 90도에서의 위상속도와 같도록 하는 조건으로부터 아래의 α_0 파라미터를 구할 수 있다.

$$\alpha_0 = \frac{\sqrt{(c^2 W_{x0}^2 + 1)(c^2 W_{y0}^2 + 1) / (1 + (c \Delta t \sin(k_0 \Delta x / 2) / \Delta x)^2)} - 1}{2c^4 W_{x0}^2 W_{y0}^2} \quad (12)$$

여기서 관련 변수는 아래와 같다.

$$W_{x0} = \frac{\Delta t}{\Delta x} \sin\left(\frac{k_0 \Delta x}{2\sqrt{2}}\right), \quad W_{y0} = \frac{\Delta t}{\Delta y} \sin\left(\frac{k_0 \Delta y}{2\sqrt{2}}\right).$$

k_0 는 자유공간에서의 파수를 나타낸다. 결론적으로 식 (7)은 ADI-FDTD의 perturbed 형태로서, 이는 $\Delta t^2 \mathbf{A} \mathbf{B}$ 항을 기존의 ADI-FDTD에 추가한 후, 최적화에 의한 위상속도의 제어에 의하여 등방성 전파 특성을 구현하였다.

III. 수치해석 결과

식 (7)의 차분 형태의 맥스웰 방정식을 자세히 나타내면 다음과 같다. 식 (7)은 1차 및 2차 과정으로 나타낼 수 있는데 1차과정인 (7-a)는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_x|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - E_x|_{i-1/2,j}^n = \frac{\Delta t}{2\epsilon} \left[\frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta y} - \frac{\alpha \Delta t^2}{\epsilon \mu} \frac{E_y|_{i+1,j+1/2}^{n+1/2} - E_y|_{i+1,j-1/2}^{n+1/2} - E_y|_{i,j+1/2}^{n+1/2} + E_y|_{i,j-1/2}^{n+1/2}}{\Delta x \Delta y} \right] \quad (13)$$

$$E_y|_{i,j+1/2}^{n+1/2} - E_y|_{i,j-1/2}^n = \frac{\Delta t}{2\epsilon} \left[-\frac{H_z|_{i+1/2,j+1/2}^n - H_z|_{i-1/2,j+1/2}^n}{\Delta x} \right] \quad (14)$$

$$H_z|_{i+1/2,j+1/2}^{n+1/2} - H_z|_{i+1/2,j+1/2}^n = \frac{\Delta t}{2\mu} \left[\frac{E_x|_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} - E_x|_{i+1/2,j}^n}{\Delta y} - \frac{E_x|_{i+1,j+1/2}^n - E_x|_{i,j+1/2}^n}{\Delta x} \right] \quad (15)$$

2차 과정은 위의 1차 과정과 유사한 방법으로 (7-b)로부터 구할 수 있다. (13) 과 (15)의 E_x 와 H_z 는 implicit 로 표현되어 있다. 식 (15)의 H_z 를 식 (13)에 대입하면 아래의 E_x 에 대한 Explicit 표현식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & -\frac{\Delta t^2}{4\epsilon\mu\Delta y^2} E_x|_{i+1/2,j+1}^{n+1/2} + \left(1 + \frac{\Delta t^2}{2\epsilon\mu\Delta y^2}\right) E_x|_{i+1/2,j}^{n+1/2} - \frac{\Delta t^2}{4\epsilon\mu\Delta y^2} E_x|_{i+1/2,j-1}^{n+1/2} \\ & = E_x|_{i+1/2,j}^n + \frac{\Delta t}{2\epsilon\Delta y} (H_z|_{i+1/2,j+1/2}^n - H_z|_{i+1/2,j-1/2}^n) \\ & \quad - \frac{\Delta t^2}{4\epsilon\mu\Delta x\Delta y} (E_y|_{i+1,j+1/2}^n - E_y|_{i,j+1/2}^n) + \frac{\Delta t^2}{4\epsilon\mu\Delta x\Delta y} (E_y|_{i+1,j-1/2}^n - E_y|_{i,j-1/2}^n) \\ & \quad - \frac{\alpha \Delta t^2}{\epsilon\mu\Delta x\Delta y} (E_y|_{i+1,j+1/2}^{n+1/2} - E_y|_{i+1,j-1/2}^{n+1/2} - E_y|_{i,j+1/2}^{n+1/2} + E_y|_{i,j-1/2}^{n+1/2}) \\ & \quad + \frac{\alpha \Delta t^2}{\epsilon\mu\Delta x\Delta y} (E_y|_{i+1,j+1/2}^n - E_y|_{i+1,j-1/2}^n - E_y|_{i,j+1/2}^n + E_y|_{i,j-1/2}^n) \end{aligned} \quad (13)'$$

1차 과정을 수치적으로 구하는 순서는 식 (14)에 의하여 E_y 를 구하고, 다음은 식 (13)'으로 E_x 를 구한다. 여기에서 E_x 는 3열 대각요소 행렬을 이용하여 구한다. 그리고 마지막으로 H_z 를 식 (15)를 이용하여 구한다. 2차원 TE-z 문제에 대하여 2차 과정을 포함한 전체적인 계산 과정은 그림 1에 순서도에 나타내었다.

위의 식 (13)~(15)에 나타난 바와 같이 E_x 항만이 시간 간격의 제곱항을 갖는다.

앞에서 유도한 제안 방식의 효과를 수치적으로 검증하기 위하여 식 (7)을 프로그래밍 하였다. 자유공간에서 전자파의 전파특성, 즉 분산특성을 구하여 기존의 ADI와

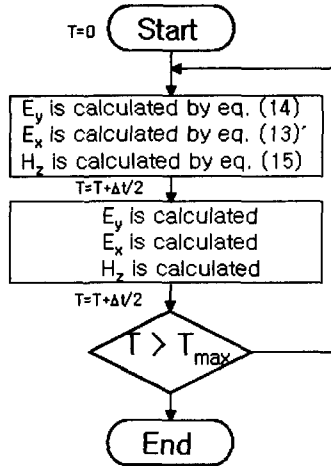


그림 1. 제안한 ADI-FDTD 에 대한 계산 순서도 (2차원 TE-z의 경우)

Fig. 1. Flowchart of the proposed ADI-FDTD. (2-D TE-z wave)

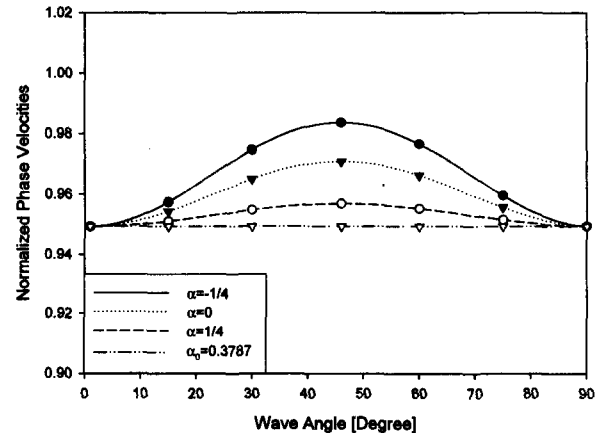


그림 2. α 값을 파라미터에 대한 전파각도에 따른 정규 위상속도의 변화 (s=1, N=10)

Fig. 2. Normalized phase velocities at various parameters at s=1 and N=10 cells per wavelength as a function of propagation angles.

상호 비교한다. 제안 방식에 대한 분산특성은 (11) 식으로 나타나는데 이를 전파 방향에 따라서 위상속도를 구한다. 이 논문에서 모든 자유공간에 대한 수치적인 구현은 150 x 150 셀 공간에서 이루어졌으며 PML (Perfectly Matched Layer) 경계조건을 이용하여 흡수 자유공간을 구현하였다. 입력신호는 셀의 중심에서 인가되고, 수치적인 속도는 2개의 점간의 시간 지연의 관계로부터 계산한다. 그림 2는 여러 가지 α 값에 대해서 (11)을 이용한 이론적인 결과를 실선으로 표시하였고, (7)의 코딩 결과를 마커로 표시하였다. 해석 조건은 s=1, 파장당 10개의 셀에 대해서 해석한 결과이다.

여기에서 $s = \sqrt{2} \Delta t / \Delta x$ 로 정의되는 지수이며 편

의상 가로와 세로 방향의 셀의 크기가 동일하다고 가정한다. 가장 빠른 수치적 속도는 대각 방향(45°)에서 일어난다. 축방향(0°, 90°)에서는 α 값에 무관하게 동일한 속도를 나타낸다. 식 (12)에서 구한 $\alpha_0=0.3787$ 에서 방향에 무관하게 동일한 속도를 나타낸다.

그림 3은 $s=1, 2, 5$ 그리고 파장당 셀의 수가 20, 50, 100 인 경우에 대한 수치적 위상속도를 ADI-FDTD와 제안하는 방식의 ADI-FDTD에 대한 결과를 나타내었다. 이 그림은 제안하는 방식의 ADI-FDTD의 위상속도가 전파방향에 무관하게 일정함을 알 수 있다. 이론적인 결과와 수치해석의 결과가 잘 일치하였다. 그러나 2개의 결과에서의 작은 차이, 즉 1×10^{-4} 정도는 수치적 속도를 구하는 과정에서의 계산 오차이다.

그림 4는 파장당 셀의 수에 따른 이방성 오차를 나타낸 것이다. 여기에서 이방성 오차는 아래와 같이 정의한다.

$$\frac{\max[v(\phi)] - \min[v(\phi)]}{\min[v(\phi)]} \quad (16)$$

여기에서 $v(\phi)$ 는 방향에 따른 속도를 나타낸다. 이는 최대 위상속도와 최소 위상속도에 대한 편차를 나타내는 지수이다.

10의 셀 밀도에서 $s=0.707$ 의 상태에서 ADI-FDTD의 이방성 오차는 0.0086이며 이는 FDTD 방식보다 크다. 반면에 제안한 방식의 ADI-FDTD는 동일 조건에서 1.724×10^{-6} 을 나타내었다. 파장당 셀의 수가 클수록 이방성 오차는 줄어들었다. 다른 CFL 지수에서도 그림 4와

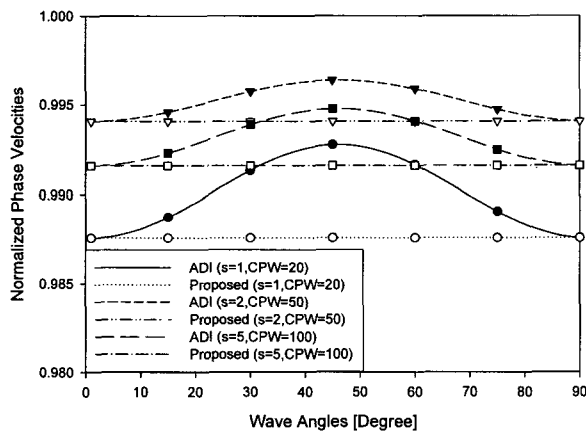


그림 3. 셀의 크기와 CFL 지수에 따른 제안하는 ADI-FDTD 방식과 기존의 ADI-FDTD 방식에 대한 위상속도 결과

Fig. 3. Numerical dispersion of the proposed ADI FDTD at the specified mesh densities and the CFL number.

동일한 경향의 결과를 얻었다.

위의 그림 2-4는 제안 방식에 대한 이방성 오차의 감소에 대한 특성을 나타낸 것이며, 덧붙여 수치해석에 의한 구조체의 계산 오차에 대하여 기존의 ADI-FDTD 방식의 결과와 상호비교 및 분석한다. 그림 5에는 Garcia^[4]와 Ahmed^[9] 위 논문에서 사용한 PMC (Perfect Magnetic Conductor)로 둘러싸인 구조의 중심에 0.2 mm의 간격을 두고 2개의 2m의 길이의 평행판 도체 모델을 해석하였다. 여기에 2개의 도체 사이에 인가되는 전원은 raised 형태의 Envelope을 갖는 Gaussian 전압 원을 사용하였다. 하나의 그리드 셀의 크기는 0.2m 균등 분할하였다. 그림 6에는 전원인가 후 정상상태에서의 평행판 도체사이의 수평선을 따라서 E_y 전계의 세기를 나타내었다. 4m에서 6m 사이의 영역에서는 전계의 크기가 일정하고, 이 영역 외부에서는 전계의 세기가 빠르게 0으로 감쇄한다. $s=0.5, 3, 5, 15$ 에 대해서 기존의 ADI-FDTD 방식(실선)과 제안 ADI-FDTD 방식(점선)을 상호 비교하여 나타내었다. 이 구조의 해석에

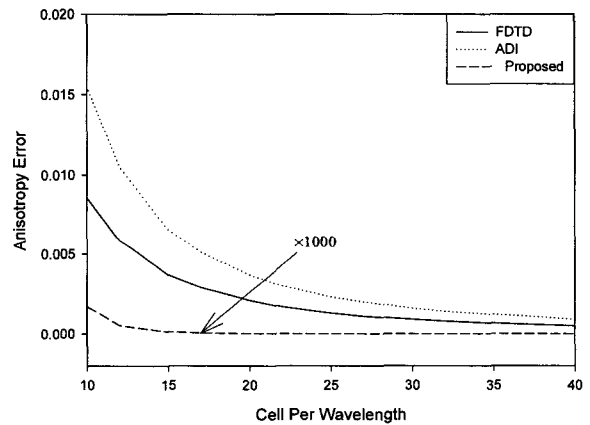


그림 4. 이방성 오차의 비교(제안 방식, 기존의 ADI-FDTD, FDTD 방식)

Fig. 4. Anisotropy error of the proposed ADI-FDTD with those of the FDTD and the ADI-FDTD for comparison.

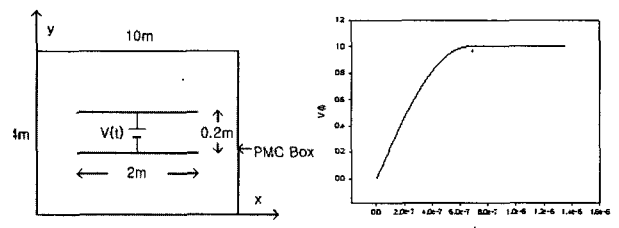


그림 5. 2-D TE-z PMC 에 의하여 둘러싸인 2개의 평판 캐패시터 및 인가 전압 파형

Fig. 5. 2-D TEz model of a parallel plate capacitor excited by a voltage source.

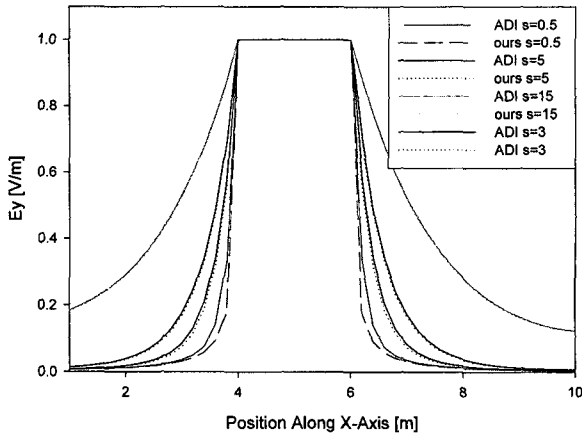


그림 6. $y=2m$ 지점에서의 전계의 세기분포의 비교
 Fig. 6. Electric Fields Calculated by the Standard ADI-FDTD and the proposed ADI-FDTD Schemes.

서는 0 으로 빨리 감쇄하는 것이 더 정확한 값이며, 이를 기준으로 점선이 실선에 비해서 미세하게나마 빨리 감쇄하는 것을 볼 수 있다. 결론적으로 제안하는 ADI-FDTD 방식이 균일한 전파속도를 가지는 장점이 있으며 정확도에 있어서 기존의 ADI-FDTD 에 비하여 약간 우세하다.

IV. 결 론

이 논문에서는 ADI-FDTD 방식의 전파속도의 이방성을 줄이기 위하여 새로운 ADI-FDTD 방법을 제안하였다. 이는 기존의 방식에서 시간 스텝의 재공급을 추가하고 이를 최적화하는 방식을 이용하였다. 이 방식은 넓은 대역에 대해서 수치적인 이방성을 제거할 수 있었다. 이의 장점으로는 모든 방향에 대해서 위상속도가 동일하게 되는 것과, 기존 ADI-FDTD에서의 분할 오차가 감소함을 수치해석의 예제를 통하여 확인하였다. 이를 적용할 경우 기존 ADI-FDTD가 갖는 빠른 계산속도와 덧붙여 정확도의 향상을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

[1] A Taflove, Computational Electrodynamics., Norwood, MA: Artech House, 1995.
 [2] T. Namiki, "A New FDTD Algorithm Based on Alternating-Direction Implicit Method", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 47, No. 10, pp. 2003-2007, Oct. 1999.
 [3] F. Zheng, Z. Chen, and J. Zhang, "A Finite-

Difference Time-Domain Method Without the Courant Stability Conditions", IEEE Microwave Guided Wave Letters, Vol.9, No.11,441-443, Nov. 1999.
 [4] S. G. Garcia, and T. W. Lee, and S. C. Hagness, "On the Accuracy of the ADI-FDTD Method," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 1, pp.31-34, 2002.
 [5] J. Chen, Zhu Wang, and Yinchao Chen, "Higher-order alternative direction implicit FDTD method," Electronics Letters, Vol. 38, No. 22, pp.1321-1322, October, 2002.
 [6] Muhu Wang, Zhu Wang, and Ji Chen, "A Parameter Optimized ADI-FDTD Method," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 2, pp.118-121, 2003.
 [7] An Ping Zhao, "Improvement on the Numerical Dispersion of 2-D ADI-FDTD with Artificial Anisotropy," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol.14, No.6,pp.292-294, July 2005.
 [8] S. Wang, F. L. Teixeira, and J. Chen, "An Iterative ADI-FDTD With Reduced Splitting Error," IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 15, No.2, pp.92-94, Feb. 2005.
 [9] I. Ahmed, and Z. Chen, "Error Reduced ADI-FDTD Method," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 4, pp.323-325, Jul. 2005.
 [10] K. W. Mortan and D. F. Mayer, Numerical Solution of Partial Differential Equations. Cambridge University Press, 1994.
 [11] G. Sun, and C. W. Trueman, "Analysis and Numerical Experiments on the Numerical Dispersion of Two-Dimensional ADI-FDTD," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 2, pp.78-81, 2003.

저 자 소 개



김 종 성(정회원)
 1988년 경북대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1990년 한국과학기술원 전기 및
 전자공학과 석사 졸업.
 2001년 포항공과대학교 전자전기
 공학과 박사 졸업.

1990년~2002년 KT 연구개발본부 근무
 2004년~현재 경성대학교 멀티미디어통신공학과
 조교수
 <주관심분야 : 초고주파 공학, 전자파 수치해석,
 평가입자망>



공 기 복(정회원)
 1992년 경북대학교 수학과 학사
 졸업.
 1999년 한국과학기술원 응용수학과
 석사 졸업.
 2003년 한국과학기술원 응용수학과
 박사 졸업.

2003년~현재 한국정보통신대학교 공학부
 연구교수
 <주관심분야 : 전자파 수치해석, 편미분방정식>