

다해상도 시간영역법의 수치적 분산특성과 안정조건

Numerical Dispersive Characteristics and Stability Condition of the Multi-Resolution Time-Domain (MRTD) Method

홍익표* · 유태훈* · 윤영중** · 박한규**

Ic-Pyo Hong* · Tae-Hoon Yoo* · Young-Joong Yoon** · Han-Kyu Park**

요 약

본 논문에서는 다해상도 시간영역법의 수치적 분산특성과 수치적 안정조건을 구하였다. 다해상도 시간영역법과 유한차분 시간영역법의 분산특성을 비교하여, 다해상도 시간영역법이 유한차분 시간영역법에 비하여 공간격자의 크기에 상대적으로 분산특성이 우수하게 주어짐을 보였다. 이로부터 다해상도 시간영역법이 정확한 전자기 해석을 위해 큰 용량의 컴퓨터 메모리를 요구하는 유한차분 시간영역법의 단점을 개선할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 다해상도 시간영역법은 전자기의 수치적 모델링에 유용한 시간영역 해석방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

The numerical dispersive characteristics and the numerical stability condition of the Multi-Resolution Time-Domain (MRTD) method are calculated. A dispersion analysis of the MRTD schemes including a comparison to Yee's Finite-Difference Time-Domain(FDTD) method is given. The superiority of the MRTD method to the spatial discretization is shown. The required computational memory can be reduced by using the MRTD method. We expect that the MRTD method will be very useful method for numerical modelling of electromagnetics.

I. 서 론

유한차분 시간영역법(Finite-Difference Time-Domain : FDTD)은 1966년 Yee[1]에 의하여 제안된 이래, 최근에 전자기의 수치적 전파(Full-wave) 해석방법으로 매우 유용하게 쓰이고 있다. 주파수 영역 해석법(Spectral domain approach), 모멘트법(Moment method)과 같은 해석적 해석

방법은 해석적 해를 구하기까지 많은 노력이 요구되고 해석 가능한 기하학적 구조의 제한성이 큰 반면에, FDTD는 컴퓨터의 구현이 용이하고 기하학적 구조의 제한성이 적기 때문에 MIC 및 MMIC 회로의 불연속, 결합, 상호연결 등의 복잡한 구조와 산란문제 등에 다양하게 적용될 수 있다[2],[3]. 그러나, FDTD는 3차원의 공간을 다루는 문제에 있어서 컴퓨터의 메모리 제약을 받는다는 한계가 있으며, 이를 해결하기 위해 Hybrid FDTD[4] 등

* 연세대학교 전자공학과(Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.)

** 연세대학교 전파공학과(Dept. of Radio Science & Eng., Yonsei Univ.)

· 논문번호 : 96-3-037

· 접수일자 : 1996년 8월 20일

FDTD의 변형된 여러 방법들이 제안되어 왔다. 또한, 1992년 균일 진행방향 성분에 대한 전송선로를 해석하기 위한 방법으로 2차원 FDTD[5]가 제안되었다.

FDTD에서는 시간, 공간영역을 유한한 격자구조로 해석하기 때문에 이 격자의 크기에 따라 이상적인 공간에서의 전파와는 다른 수치적 분산특성이 나타나게 되며 이러한 분산특성은 전자기 해석결과 의 정확도에 커다란 영향을 미친다. 최근에 와서 M. Krumpholtz[6]에 의해서 FDTD에서 문제점이었던 컴퓨터 메모리 용량의 한계를 극복할 수 있고 FDTD보다 더 선형적인 분산특성을 갖는 다해상도 시간영역법(Multi-Resolution Time-Domain method : MRTD)이 제안되었다.

MRTD방정식은 모멘트법(Moment Method)으로부터 FDTD가 유도되는 과정을 이용한다[7]. 모멘트법이 정규직교(orthonormal) 기저함수를 사용하는 가정으로부터 scaling함수와 wavelet함수를 기저함수로 사용하면[8] 시간영역에 대한 새로운 Maxwell 방정식을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 MRTD방정식 중, scaling 함수만 적용된 경우의 3차원 MRTD에 대하여 전파각도에 따른 분산특성을 관찰하고, 3차원 FDTD의 분산특성 결과 [9],[10]와 비교하였으며, 또한 3차원 MRTD의 수치적 안정조건을 구하였다.

II. 3차원 FDTD의 분산[9],[10],[11]

$\mu = 1, \epsilon = 1$ 인 공간에서 Maxwell 방정식은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$j\nabla \times (H + jE) = \frac{\partial(H + jE)}{\partial t}, j = \sqrt{-1} \quad (1)$$

이 때, $V = H + jE$ 라고 하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$j\nabla \times V = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2)$$

k_x, k_y, k_z 는 각각 x, y, z 방향의 전파상수일 때, $V = V_0 e^{j(k_x p \Delta x + k_y q \Delta y + k_z r \Delta z - \omega n \Delta t)}$

$$\frac{\partial V_{p,q,r}^n}{\partial x} = \frac{V|_{p+\frac{1}{2}, q, r}^n - V|_{p-\frac{1}{2}, q, r}^n}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \Delta V, \Delta V_{p,q,r}^n = \frac{V|_{p,q,r}^{n+\frac{1}{2}} - V|_{p,q,r}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (4)$$

인 이산식을 가정하고 식 (2)에 대입하면 식 (3), (4)와 같은 3차원 FDTD에서 적용한 중심 차분 근사법과 식 (2)로부터 3×3 크기의 행렬을 얻을 수 있으며, 이 행렬의 Determinant로부터 식 (5)와 같은 3차원 FDTD의 분산식을 얻을 수 있다. 여기서 p, q, r 은 공간에 대한 이산격자 $x = p\Delta x, y = q\Delta y, z = r\Delta z$ 에서 index를 의미하고, n 은 시간에 대한 이산격자 $t = n\Delta t$ 의 index를 의미한다. (단, p, q, r, n 은 정수)

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{c\Delta t} \sin\left(\frac{\omega\Delta t}{2}\right) \right]^2 &= \left[\frac{1}{\Delta x} \sin\left(\frac{k_x\Delta x}{2}\right) \right]^2 + \\ &\left[\frac{1}{\Delta y} \sin\left(\frac{k_y\Delta y}{2}\right) \right]^2 + \left[\frac{1}{\Delta z} \sin\left(\frac{k_z\Delta z}{2}\right) \right]^2 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)로부터 전자계의 전파방향에 따른 수치적 분산특성을 보기 위하여 전파각도 θ 와 ϕ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}}, \phi = \text{Tan}^{-1} \frac{k_y}{k_x} \quad (6)$$

각 방향의 이산간격을 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta$ 로, $c\Delta t = \delta/5$ 로 설정을 하고, 이산간격 δ 를 자유공

간의 파장 λ 로 정규화하면 식 (5)와 식 (6)으로부터

$$25 \sin^2\left(\frac{\pi}{5} \frac{\delta}{\lambda}\right) = \sin^2\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos\theta \cos\phi \frac{C_n}{C_0}\right) + \sin^2\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos\theta \sin\phi \frac{C_n}{C_0}\right) = \sin^2\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \sin\theta \frac{C_n}{C_0}\right) \quad (7)$$

을 얻을 수 있다. 이때 C_n 은 해석적 위상속도, C_0 는 수치적 위상속도로서 C_n 은 자유공간에서 $(\omega/C_n)^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ 를 만족한다.

III. 3차원 MRTD의 분산

MRTD는 Yee의 FDTD가 공간 연산자로서 식 (3), (4)와 같은 중심 차분 근사법을 적용하는 것과 달리 기저함수와 테스트함수로서 펄스함수를 사용하여 공간 연산자로서 식 (8)의 연산자를 얻을 수 있다[6],[12].

$$\frac{\partial V_{p,q,r}^n}{\partial x} = \frac{\sum_{i=-11}^{+10} a(i) V_{p+i+\frac{1}{2}, q, r}^n}{\Delta x} \quad (8)$$

Maxwell 방정식의 다른 성분들에 대해서도 같은 방법으로 공간 연산자를 얻을 수 있다. 이 때 $a(i)$ 는 <표 1>의 값을 갖는 Cubic Spline Battle-Lemarie scaling[13],[14] 함수에 대한 wavelet 계수로서 $a(-1-i) = a(i)$ 의 대칭성을 갖는다. 일반적으로 $a(i)$ 의 계수는 무한개를 갖지만 $i > 10$ (< -11)에서는 크기가 작기 때문에 무시해도 큰 영향을 주지 않는다고 알려져 있다.

이를 식 (2)에 적용하면 3차원 FDTD와 마찬가지로 3×3 의 크기를 갖는 행렬식을 얻을 수 있고, 이 행렬의 Determinant로부터 식 (9)의 MRTD의 분산식을 얻을 수 있다.

식 (9)에 식 (6)을 적용하고 3차원 FDTD에서와 마찬가지로 각 방향의 이산간격을 $\Delta x = \Delta y =$

<표 1> $a(i)$ 의 계수

<Table 1> Coefficients of $a(i)$

i	$a(i)$
0	1.291841
1	-0.156071
2	0.059636
3	-0.029310
4	0.015374
5	-0.008192
6	0.004385
7	-0.002349
8	0.001256
9	-0.000671
10	0.000356

$$\begin{aligned} \left[\frac{1}{c\Delta t} \sin\left(\frac{\omega\Delta t}{2}\right)\right]^2 &= \left[\frac{1}{\Delta x} \sum_{i=0}^{+10} a(i) \sin\left(\frac{k_x\Delta x}{2}\left(i+\frac{1}{2}\right)\right)\right]^2 + \frac{1}{\Delta y} \sum_{i=0}^{+10} a(i) \sin\left(\frac{k_y\Delta y}{2}\left(i+\frac{1}{2}\right)\right)\right]^2 + \frac{1}{\Delta z} \sum_{i=0}^{+10} a(i) \sin\left(\frac{k_z\Delta z}{2}\left(i+\frac{1}{2}\right)\right)\right]^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$\Delta z = \delta$ 로, $c\Delta t = \delta/5$ 로 설정을 하고, 이산간격 δ 를 자유공간의 파장 λ 로 정규화하면 식 (10)을 얻는다.

$$25 \sin^2\left(\frac{\pi}{5} \frac{\delta}{\lambda}\right) = \left[\sum_{i=0}^{+10} a(i) \sin\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos\theta \cos\phi \frac{C_n}{C_0}\left(i+\frac{1}{2}\right)\right)\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{+10} a(i) \sin\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos\theta \sin\phi \frac{C_n}{C_0}\left(i+\frac{1}{2}\right)\right)\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^{+10} a(i) \sin\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \sin\theta \frac{C_n}{C_0}\left(i+\frac{1}{2}\right)\right)\right]^2 \quad (10)$$

IV. 3차원 MRTD의 수치적 안정조건

3차원 MRTD의 수치적 안정조건을 구하기 위하여 식 (4)로부터 증가인자를 식 (11)과 같이 정의한다.

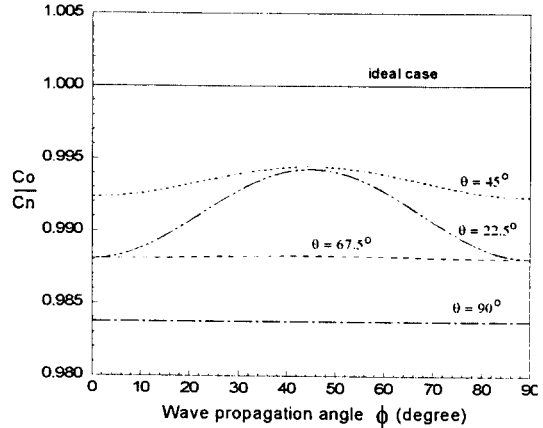
$$G_{p,q} = \frac{V|_{p,q}^{n+1/2}}{V|_{p,q}^{n-1/2}} \quad (11)$$

MRTD의 알고리즘이 주어진 공간내에서 발산하지 않고 수렴하기 위해서는 공간내의 모든 절점들에 대하여 $|G_{p,q}| \leq 1$ 을 만족해야 한다는 사실을 쉽게 알 수 있으며, 이로부터 시간과 공간의 고유치 문제를 적용하여 풀면, MRTD의 안정조건을 식 (12)와 같이 구할 수 있으며, 이 결과는 참고문헌 [6]과도 일치하는 것을 볼 수 있다. FDTD에서는 계산의 수치적 안정도가 공간격자의 크기에 의해서만 결정되는데 비해 MRTD에서는 수치적 안정도가 공간격자의 크기뿐 아니라 wavelet 계수 절대크기값의 합에 따라 결정되는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 3차원 FDTD의 안정조건과 식 (12)의 안정조건을 만족시키도록 $c\Delta t = \delta/5$ 로 설정을 하였다.

$$c\Delta t \leq t_{\max} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{+10} |a(i)| \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}} \quad (12)$$

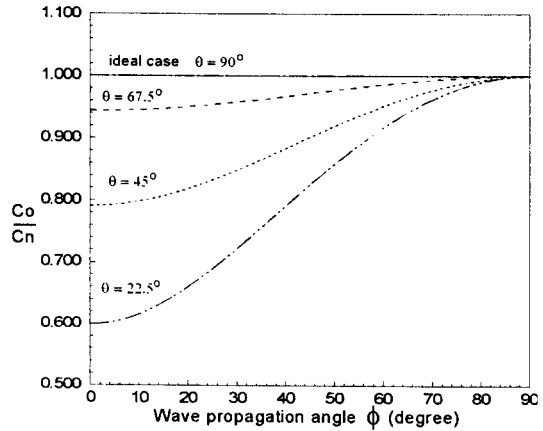
V. Simulation 결과

[그림 1]과 [그림 2]는 $\delta = \lambda/10$ 인 경우 $\theta = 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 ϕ 가 변함에 따라 해석적 위상속도 C_a 와 수치적 위상속도 C_n 의 비를 나타낸 것으로 격자구조가 없는 자유공간의 이상적인 경우는 그 비가 1이다. [그림 1]로부터 3차원 FDTD의 경우에는 파가 $\theta = 45^\circ, \phi = 45^\circ$ 의 경사입사일 때 분산특성이 가장 좋은 것을 알 수 있다. [그



[그림 1] FDTD : 전파각도 $\theta = 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 위상속도 ($\delta = \lambda/10$)

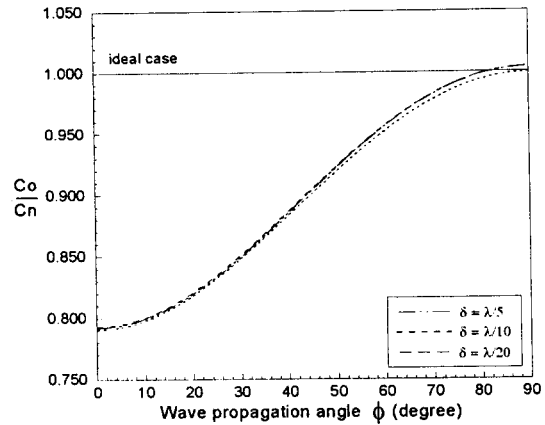
[Fig. 1] FDTD : Numerical phase velocity vs. Propagation angle ϕ When $\theta = 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ ($\delta = \lambda/10$).



[그림 2] MRTD : 전파각도 $\theta = 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 위상속도 ($\delta = \lambda/10$)

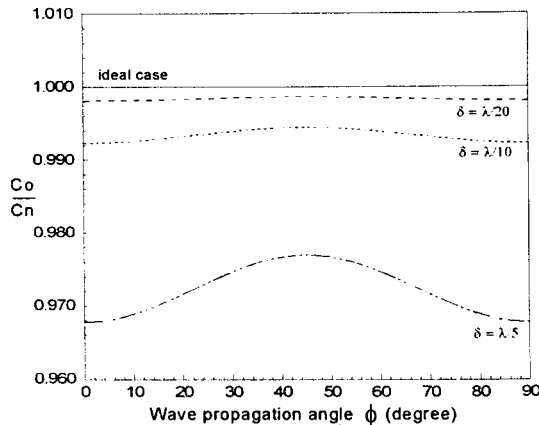
[Fig. 2] MRTD : Numerical phase velocity vs. Propagation angle ϕ When $\theta = 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ$ ($\delta = \lambda/10$).

림 2]에서 MRTD의 경우에는 $\theta=90^\circ$, $\phi=90^\circ$ 일 때 수치적 분산이 거의 일어나지 않으며, 파의 입사가 경계면의 수직에 가까울수록 분산특성이 좋아짐을 알 수 있다. 두 결과로부터 파가 경계면에 수직으로 입사할 때 MRTD는 FDTD에 비해 훨씬 좋은 분산 특성을 나타내어 이상적인 경우와 거의 일치하지만, 파가 경사입사를 할 경우에는 MRTD가 FDTD에 비해 분산특성이 현저하게 떨어짐을 볼 수 있다. [그림 3]과 [그림 4]는 $\theta=45^\circ$ 일 때 $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ 에 대하여 전파각도 ϕ 의 변화에 따른 파의 분산특성을 각각 나타내었다. FDTD에서는 격자크기가 전파하는 파의 파장에 비해 작으면 작을수록 분산특성이 좋게 나타나는데 반하여, MRTD는 이 경우 격자크기가 파의 파장의 변화에 상대적으로 영향을 덜 받는 분산특성을 갖는 것을 알 수 있다. [그림 5]와 [그림 6]은 $\theta=90^\circ$ 일 때 $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ 에 대하여 전파각도 ϕ 의 변화에 따른 FDTD와 MRTD에서의 파의 분산특성을 각각 나타내었다. 이 때의 분산특성은 MRTD의 경우가



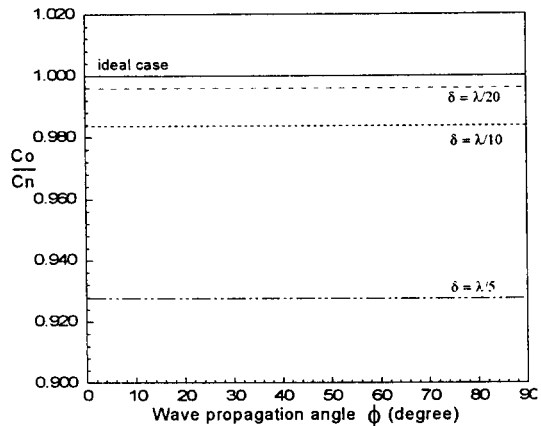
[그림 4] MRTD : 격자크기 $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 위상속도 ($\theta=45^\circ$)

[Fig. 4] MRTD : Numerical phase velocity vs. Propagation angle ϕ When Mesh size $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ ($\theta=45^\circ$).



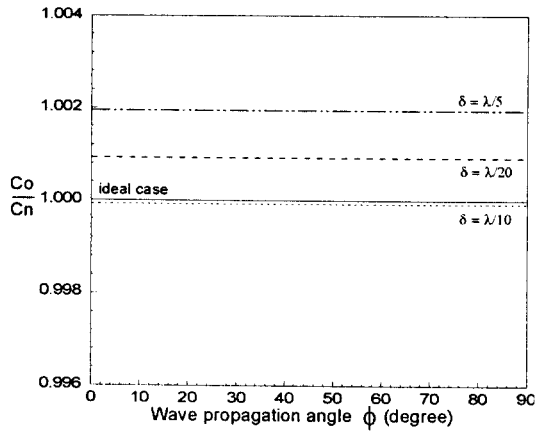
[그림 3] FDTD : 격자크기 $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 위상속도 ($\theta=45^\circ$)

[Fig. 3] FDTD : Numerical phase velocity vs. Propagation angle ϕ When Mesh size $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ ($\theta=45^\circ$).



[그림 5] FDTD : 격자크기 $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 위상속도 ($\theta=90^\circ$)

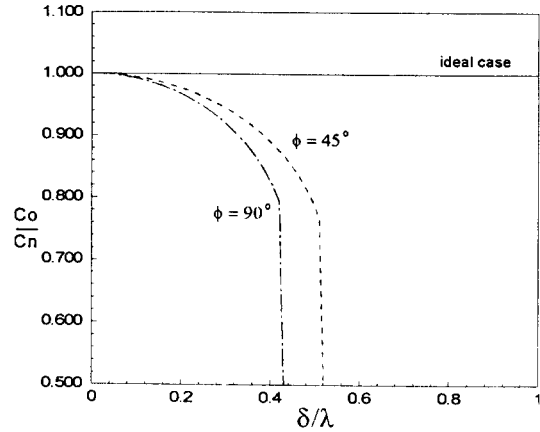
[Fig. 5] FDTD : Numerical phase velocity vs. Propagation angle ϕ When Mesh size $\delta=\lambda/5$, $\lambda/10$, $\lambda/20$ ($\theta=90^\circ$).



[그림 6] MRTD : 격자크기 $\delta = \lambda/5, \lambda/10, \lambda/20$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 위상속도 ($\theta = 90^\circ$)

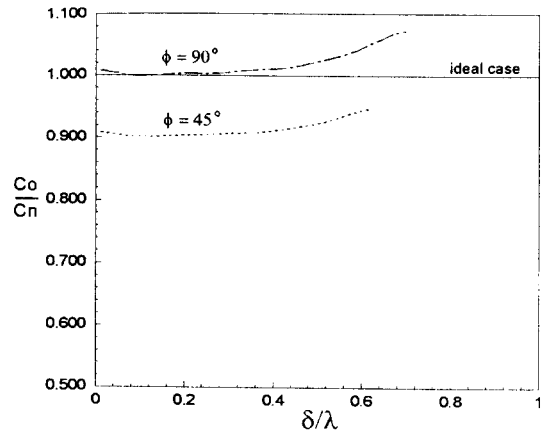
[Fig. 6] MRTD : Numerical phase velocity vs. Propagation angle ϕ When Mesh size $\delta = \lambda/5, \lambda/10, \lambda/20$ ($\theta = 90^\circ$).

FDTD의 경우보다 월등하게 좋은 것을 볼 수 있다. 이것은 동일한 3차원 공간을 모델링할 때 MRTD가 FDTD보다 훨씬 더 적은 격자수로 모델링을 할 수 있는 것을 의미하며 따라서 컴퓨터의 메모리와 계산속도를 매우 효율적으로 줄일 수 있다. [그림 7]과 [그림 8]은 $\theta = 45^\circ$ 일 때 $\phi = 45^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 격자크기의 변화에 따른 파의 분산특성을 각각 나타내었으며 FDTD의 경우에는 격자크기의 크기가 증가하면 수치적 위상속도가 감소하는 것을 볼 수 있다. MRTD의 경우에는 [그림 8]로 부터 격자크기가 증가할수록 수치적 위상속도가 약간 증가하는 것을 볼 수 있지만 그 정도는 FDTD에 비해서 작다. 일반적으로 수치적인 분산효과에 대한 오차를 무시하기 위해서 FDTD에서는 격자크기 δ 가 파장 λ 의 0.05배 이하가 되어야 한다고 알려져 있으며 [3], $\pm 1\%$ 의 분산정도를 기준으로 할 때 FDTD와 MRTD는 <표 2>와 같은 값을 얻으며, $\phi = 90^\circ$ ($\theta = 45^\circ$)인 경우 MRTD가 FDTD보다 약 3.45배로



[그림 7] FDTD : 전파각도 $\phi = 45^\circ, 90^\circ$ ($\theta = 45^\circ$)일 때 격자크기 δ 에 따른 수치적 위상속도

[Fig. 7] FDTD : Numerical phase velocity vs. Mesh size δ When $\phi = 45^\circ, 90^\circ$ ($\theta = 45^\circ$).



[그림 8] MRTD : 전파각도 $\phi = 45^\circ, 90^\circ$ ($\theta = 90^\circ$)일 때 격자크기 δ 에 따른 수치적 위상속도

[Fig. 8] MRTD : Numerical phase velocity vs. Mesh size δ When $\phi = 45^\circ, 90^\circ$ ($\theta = 90^\circ$).

격자크기를 설정하여도 같은 정도의 해상도를 갖는 결과값을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

<표 2> ±1%의 동일 분산정도에서 FDTD와 MRTD의 상대적인 격자크기

<Table 2> Relative mesh size in FDTD and MRTD with ±1% same dispersion,

	FDTD의 격자크기 δ	MRTD의 격자크기 δ
$\phi=90^\circ(\theta=45^\circ)$ 인 경우	1(기준:0.11 λ)	3.45

V. 결 론

본 논문에서는 MRTD의 분산특성을 FDTD의 분산특성과 비교하였고 MRTD의 수치적 안정조건을 구하였다. 본 논문의 분산특성에 대한 결과로부터 FDTD는 공간격자의 크기에 따라 분산특성이 크게 좌우되는 데, 이와 달리 MRTD는 공간격자의 크기에는 영향을 받지 않지만 파의 입사 또는 전파 각도에 따라 분산특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 그러나, 파의 입사가 경계면에 수직으로 이루어진다면 적절한 경계조건과 함께 쓰여, MRTD는 FDTD에 비해 공간격자 수를 줄일 수 있어 FDTD의 문제점이었던 컴퓨터 메모리 용량의 문제를 해결할 수 있고 이는 동일구조에 대한 계산속도를 증가시킬 수 있기 때문에 마이크로파 회로의 유용한 해석방법으로 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, May, 1966.
- [2] T. Shibata, T. Hayashi and T. Kimura, "Analysis of Microstrip Circuits Using Three Dimensional Full-Wave Electromagnetic Field Analysis in the Time Domain," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 36, no. 6, pp. 1064-1070, Jun, 1988.
- [3] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra and J. A. Kong, "Application of the Three-Dimensional Finite-Difference Time-Domain Method to the Analysis of Planar Microstrip Circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 38, no. 7, pp. 849-857, Jul., 1990.
- [4] P. H. Aoyagi, J. F. Lee and R. Mittra, "A Hybrid Yee Algorithm/Scalar Wave Equation Approach," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 41, no. 9, pp. 1593-1600, Sep., 1993.
- [5] A. Asi and L. Shafai, "Dispersion Analysis of Anisotropic Inhomogeneous Waveguides Using Compact 2D-FDTD," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 15, pp. 1451-1452, Jul., 1992.
- [6] M. Krumpholz and Linda P. B. Katehi, "MRTD:New-Time Domain Schemes Based on Multiresolution Analysis," *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 44, no. 4, pp. 555-571, Apr., 1996.
- [7] M. Krumpholz and P. Russer, "Two-Dimensional FDTD and TLM," *Int. Jour. of Numerical Modelling*, vol. 7, pp. 141-153, Dec., 1993.
- [8] B. Z. Steinberg and Y. Leviatan, "On the Use of Wavelet Expansions in the Method of Moments," *IEEE Trans. Antennas and Propagation.*, vol. 41, no. 5, pp. 610-619, May, 1993.
- [9] Allen Taflove, *Computational Electrodynamics : The Finite Difference Time Domain Method*, Artech house, 1995.
- [10] A. C. Cangellaris, "Numerical Stability

and Numerical Dispersion of a Compact 2-D/FDTD Method Used for the Dispersion Analysis of Waveguides," *IEEE Microwave and Guided Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 3-5, Jan, 1993.

- [11] 진중창, "유한차분 시간영역법을 이용한 마이크로스트립 균일 및 불연속 선로해석," 포항공과대학교 박사학위 논문, 1994.
- [12] M. Krumpholz and Linda P. B. Katehi, *Time Domain Schemes Based on Multiresolution Analysis*, Tutorial of Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1996.

- [13] G. Battle, "A Block Spin Construction of Ondelettes," *Comm. Math. Phys.*, vol. 110, pp. 601-615, 1987.
- [14] I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets," *SIAM Rev.*, Philadelphia, PA, 1992.
- [15] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical solution of Steady-State Electromagnetic Scattering Problems Using the Time-Dependent Maxwell's Equations," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, pp. 623-630, 1975.

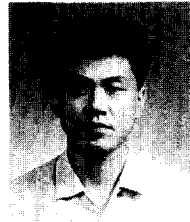
홍 익 표



1994년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월 : 연세대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
 1996년 3월~현재 : 연세대학교 전자공학과 대학원 박사과정

[주 관심분야] 전자기 해석, 초고주파 회로설계

유 태 훈



1985년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 2월 : 연세대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
 1987년 2월~1993년 2월 : 삼성전자 정보통신 연구소

1993년 3월~현재 : 동양공업전문대학 전자통신과 조교수
 1994년 8월~현재 : 연세대학교 전자공학과 대학원 박사과정

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 전자기 해석

윤 영 중



1959년 3월 9일생
 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 9월 : 연세대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
 1991년 12월 : Georgia Institute of

Technology, Ph. D.

1992년 3월~1993년 2월 : 한국전자통신 연구소 위성통신기술연구단 선임연구원

현재 : 연세대학교 전파공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나, 전파전파, 위성통신

박 한 규



1941년 6월 21일생
 1964년 2월 : 연세대학교 전기공학과 (공학사)
 1968년 2월 : 연세대학교 전기공학과 대학원 (공학석사)
 1973년 : 불란서 파리대학교(소르

본) 박사과정 수료(DEA)

1975년 : 불란서 파리6대학교, Ph. D.

1976년~1992년 : 연세대학교 전자공학과 교수

1992년~현재 : 연세대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 마이크로파, 안테나, 전파전파