

다해상도법을 적용한 유한차분 주파수영역법의 분산특성

正會員 홍 익 표*, 최 도 형*, 박 한 규**

Dispersion Characteristics of the Finite-Difference Frequency-Domain(FDFD) method with the Multi-Resolution Technique

IcPyo Hong*, DoHyung Choi*, HanKyu Park** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 다해상도법이 적용된 유한차분 주파수영역법(MR-FDFD)의 분산특성이 수치적으로 분석되었다. MR-FDFD와 유한차분 주파수영역법(FDFD)의 분산특성을 비교하여, MR-FDFD는 FDFD에 비하여 공간격자의 크기에 상대적으로 분산특성이 우수하게 주어짐을 보였다. 이로부터 다해상도법은 정확한 전자기해석을 위해 큰 용량의 컴퓨터 메모리를 요구하는 유한차분법의 단점을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

In this paper, the dispersive characteristics of the Finite-Difference Frequency-Domain method based on the Multi-Resolution Technique(MR-FDFD) are numerically analyzed. A dispersion analysis of the MR-FDFD schemes including a comparison to the Finite-Difference Frequency-Domain(FDFD) method is given. The superiority of the MR-FDFD method to the spatial discretization is shown. We expect that the multi-resolution technique will improve the disadvantage of the finite difference technique which needs the large computational memory for accurate electromagnetic analysis.

I. 서 론

*연세대학교 전자공학과
Dept. of Electronic Eng. Yonsei Univ.

**연세대학교 전파공학과
Dept. of Radio & Science Yonsei Univ.
論文番號: 96192-0629
接受日字: 1996年 6月 29日

유한차분 시간영역법(Finite-Difference Time-Domain : FDTD)은 1966년 Yee[1]에 의하여 제안되었으며, 최근에 전자기의 수치적 전파(Full-wave) 해석방법으로 매우 유용하게 쓰이고 있다. 주파수 영역 해석법(Spectral domain approach), 모멘트 법(Moment method)과 같은 수치해석방법은 해를 구하기까지 많은 노력이 요

구되고 해석가능한 기하학적 구조도 제한성이 큰 반면에, FDTD는 컴퓨터의 구현이 용이하고 기하학적 구조의 제한성이 적으며 한 번의 계산으로 광대역의 주파수영역 결과를 얻을 수 있기 때문에 MIC 및 MMIC회로의 불연속, 결합, 상호연결 등의 복잡한 구조와 산란문제 등에 다양하게 적용되어 왔다[2][3]. 그러나, 회로설계에 필수적인 산란행렬은 주파수영역에서 여러모드의 값으로 얻어지는 값이기 때문에, 단지 하나의 전파모드에 대한 값만을 얻을 수 있는 FDTD방법은 오차가 생길 수 있다. 이러한 모드개념의 단점을 극복하기 위하여 FDTD로부터 유한차분법을 주파수영역에서 적용한 유한차분 주파수영역법(Finite-Difference Frequency-Domain method:FDFD)이 제안되었으며, 이 방법이 공동공진기의 분체에 적용되었다[4].

그러나, FDFD는 FDTD와 마찬가지로 3차원의 공간을 다루는 문제에 있어서 컴퓨터의 메모리 제약을 받는다는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 최근에, 와서 M.Krumpholtz[5]에 의해 FDTD의 문제점인 컴퓨터 메모리 용량의 한계를 개선할 수 있고 FDTD보다 선형적인 분산특성을 갖는 다해상도 시간영역법(Multi-Resolution Time-Domain method:MRTD)이 제안되었다. MRTD방정식은 모멘트법(Moment Method)으로부터 FDTD가 유도되는 과정을 이용한다[6]. 모멘트법이 정규직교(orthonormal) 기저함수를 사용한다는 가정을 근간으로 scaling 함수와 wavelet 함수를 기저함수로 사용하면[7] 시간영역에 대한 새로운 Maxwell 방정식을 얻을 수 있다. FDFD에도 이러한 다해상도법(Multi-Resolution method)을 적용할 수 있으며, 이로부터 다해상도 유한차분 주파수영역법(MR-FDFD) 방정식을 얻을 수 있다[8].

본 논문에서는 scaling 함수를 적용한 MR-FDFD에 대하여 분산특성을 관찰하고 FDFD의 분산특성 결과와 비교하여 다해상도법이 적용되었을 경우 분산특성이 좋은 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

II. 유한차분 주파수영역법(FDFD)의 개요[4][8]

공간에서 필드의 전파와 관련되는 Maxwell의 두 curl방정식은 식(1)로 나타낼 수 있으며

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

전파하는 매질이 균일성, 등방성, 균질성을 가지며 무손실이라고 가정될 때 식(1)을 식(2), (3)과 같은 유한차분 방정식을 적용하여 $\mu=1, \epsilon=1$ 인 공간에서 식(4)와 같은 유한차분 시간영역방정식을 얻을 수 있다[1][9].

$$d_x(V_{a,i,j,k}^n) = \frac{\partial V_{a,i,j,k}^n}{\partial x} = \frac{V_{a,i+\frac{1}{2},j,k}^n - V_{a,i-\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x}, \quad a=x, y, z \quad (2)$$

$$d_t(V_{a,i,j,k}^n) = \frac{\partial V_{a,i,j,k}^n}{\partial t} = \frac{V_{a,i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - V_{a,i,j,k}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t}, \quad a=x, y, z \quad (3)$$

$$\begin{aligned} d_t(E_{x,i+1/2,j,k}^{n+1/2}) &= d_y(H_{z,i+1/2,j,k}^{n+1/2}) - d_z(H_{y,i+1/2,j,k}^{n+1/2}) \\ d_t(E_{y,i,j+1/2,k}^{n+1/2}) &= d_z(H_{x,i,j+1/2,k}^{n+1/2}) - d_x(H_{z,i,j+1/2,k}^{n+1/2}) \\ d_t(E_{z,i,j,k+1/2}^{n+1/2}) &= d_x(H_{y,i,j,k+1/2}^{n+1/2}) - d_y(H_{x,i,j,k+1/2}^{n+1/2}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, d 는 미분연산자를 나타내며, k_x, k_y, k_z 를 각각 x, y, z 방향의 전파상수라고 하면, $V = V_0 e^{j(k_x i \Delta x + k_y j \Delta y + k_z k \Delta z - \omega n \Delta t)}$ 이고, 이 때 i, j, k 는 필드 절점의 위치이고, 절점들 사이의 거리는 x, y, z 방향의 공간이산화 간격 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta$ 로 주어지며, Δt 는 시간이산화 간격이고, n 은 $n\Delta t$ 만큼의 시간경과를 의미한다. 식(3)과 Yee의 격자구조[1]로부터 식(4)의 Maxwell 방정식에 대한 유한차분 방정식을 얻을 수 있다. 주파수 영역에서의 유한차분 방정식은 식(4)가 시간의존성분 $e^{j\omega t}$ 을 포함하고 있는 성질로부터 양변을 시간에 관하여 미분하여 식(5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} j\omega \tilde{E}_{x,i+1/2,j,k} &= d_y(\tilde{H}_{z,i+1/2,j,k}) - d_z(\tilde{H}_{y,i+1/2,j,k}) \\ j\omega \tilde{E}_{y,i,j+1/2,k} &= d_z(\tilde{H}_{x,i,j+1/2,k}) - d_x(\tilde{H}_{z,i,j+1/2,k}) \\ j\omega \tilde{E}_{z,i,j,k+1/2} &= d_x(\tilde{H}_{y,i,j,k+1/2}) - d_y(\tilde{H}_{x,i,j,k+1/2}) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \tilde{E}, \tilde{H} 는 주파수 영역의 전자계 성분을 의미한다. 식(5)를 자계에 관한 Maxwell 방정식과 발산정리를 이용하여 정리하면 식(6)과 같은 유한차분 주파수

영역 방정식을 얻을 수 있다[4].

$$\begin{aligned} \omega^2 \tilde{E}_{x,i+1/2,j,k} &= (d_x)^2 (\tilde{E}_{x,i+1/2,j,k}) + (d_y)^2 \\ &(\tilde{E}_{x,i+1/2,j,k}) + (d_z)^2 (\tilde{E}_{x,i+1/2,j,k}) \\ \omega^2 \tilde{E}_{y,i,j+1/2,k} &= (d_x)^2 (\tilde{E}_{y,i,j+1/2,k}) + (d_y)^2 \\ &(\tilde{E}_{y,i,j+1/2,k}) + (d_z)^2 (\tilde{E}_{y,i,j+1/2,k}) \\ \omega^2 \tilde{E}_{z,i,j,k+1/2} &= (d_x)^2 (\tilde{E}_{z,i,j,k+1/2}) + (d_y)^2 \\ &(\tilde{E}_{z,i,j,k+1/2}) + (d_z)^2 (\tilde{E}_{z,i,j,k+1/2}) \end{aligned} \quad (6)$$

III. 유한차분 주파수영역법(FDFD)의 분산

식(6) 으로부터 3×3 크기의 FDFD 에 관한 분산 행렬을 얻을 수 있으며, 이 행렬의 Determinant로 부터 식(7)의 분산방정식을 얻을 수 있다[8][10].

$$((d_x)^2 + (d_y)^2 + (d_z)^2 + \omega^2)^3 = 0 \quad (7)$$

식(7)의 분산방정식에 식(3)의 중심차분 근사법을 적용하여 식을 다시쓰게 되면 공간격자와 전파상수에 관한 분산방정식 식(8)을 얻는다[10][11].

$$\begin{aligned} &[\frac{1}{\Delta x} \sin(\frac{k_x \Delta x}{2})]^2 + [\frac{1}{\Delta y} \sin(\frac{k_y \Delta y}{2})]^2 \\ &+ [\frac{1}{\Delta z} \sin(\frac{k_z \Delta z}{2})]^2 = \omega^2. \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)로 부터 전자계의 전파방향에 따른 수치적 분산 특성을 보기 위하여 전파각도 θ 와 ϕ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\theta = \text{Sin}^{-1} \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}}, \phi = \text{Tan}^{-1} \frac{k_y}{k_x} \quad (9)$$

각 방향의 이산간격을 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta$ 로, Courant의 안정조건[3]을 만족하는 값 여러 Δt 값들 중에서 $\Delta t = \delta/2$ 로 설정을 하고, 이산간격 δ 를 자유공간의 파장 λ 로 정규화하면 식(8)와 식(9)로 부터

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\delta^2} \sin^2(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos \theta \cos \phi \frac{c'}{c}) + \\ &\frac{1}{\delta^2} \sin^2(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos \theta \sin \phi \frac{c'}{c}) + \frac{1}{\delta^2} \sin^2(\pi \frac{\delta}{\lambda} \sin \theta \frac{c'}{c}) = \omega^2 \end{aligned} \quad (10)$$

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

IV. 다해상도 유한차분 주파수영역법(MR-FDFD)의 분산

널리 쓰이는 마이크로파 회로의 해석방법중 하나인 모멘트법이 직교함수의 성질을 갖는 기저함수와 테스트함수의 전류분포를 가정하여 회로를 해석한다는 사실은 이미 널리 알려져 있다. 1993년 M.Krumpholz는 모멘트법으로 부터 FDTD가 유도됨을 증명하였는데[6], 이것은 FDTD역시 직교함수인 기저함수와 테스트함수에 의해 유도될 수 있음을 의미한다. 다해상도법(Multi-Resolution method)은 공간 연산자로서 식(3)과 같은 중심 차분 근사법을 적용하는 것과는 달리 FDTD가 직교함수인 기저함수와 테스트함수로 유도되는 사실로부터 기저함수와 테스트함수로서 wavelet의 기저인 펄스함수와 scaling함수를 사용하는 방법이다. 특별히 wavelet의 기저를 사용하는 까닭은 wavelet은 일반적으로 적절한 펄스함수와 scaling함수와 같은 공간(시간)영역 함수의 설정으로 특정 주파수영역에 대한 해상도를 한정지을 수 있기 때문에, 우리가 자주 사용하는 시간-주파수 영역에 전적으로 의존되는 변환인 푸리에 변환의 단점을 개선하여 시간영역과 주파수 영역의 해상도의 의존성에 대한 영향을 줄일 수 있기 때문이다[12]. D 를 MR-FDFD에서의 새로운 미분연산자로 정의할 때 이러한 wavelet 기저의 성질들을 이용한 복잡한 연산을 통하여 식(11)과 같은 새로운 형태의 유한 차분방정식을 얻을수 있다[5][13].

$$D_x(V_{a,i,j,k}^n) = \frac{\partial V_{a,i,j,k}^n}{\partial x} = \frac{\sum_{m=-9}^{+8} a(m)V_{a,i+m+\frac{1}{2},j,k}^n}{\Delta x}, a = x, y, z \quad (11)$$

Maxwell 방정식의 다른 성분들에 대해서도 같은 방법으로 유한 차분방정식을 얻을 수 있다. 이 때 $a(m)$ 는 <표 1>의 값을 갖는 Cubic Spline Battle-Lemarie scaling[14][15] 함수에 대한 wavelet 계수로서 $a(-1-m) = a(m)$ 의 대칭성을 갖는다. 일반적으로 $a(m)$ 의 계수

는 무한개를 갖지만 $m > 8$ ($m < -9$)에서는 10^{-4} 의 값을 가져 무시해도 계산결과에 큰 영향을 주지 않는다.

표 1. $a(m)$ 의 계수

Table 1. Coefficients of $a(m)$

| m | $a(m)$ |
|-----|-----------|
| 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 |

$$\begin{aligned} \omega^2 \tilde{E}_{x,i+1/2,j,k} &= (D_x)^2 (\tilde{E}_{x,i+1/2,j,k}) + (D_y)^2 (\tilde{E}_{x,i+1/2,j,k}) + (D_z)^2 (\tilde{E}_{x,i+1/2,j,k}) \\ \omega^2 \tilde{E}_{y,i,j+1/2,k} &= (D_x)^2 (\tilde{E}_{y,i,j+1/2,k}) + (D_y)^2 (\tilde{E}_{y,i,j+1/2,k}) + (D_z)^2 (\tilde{E}_{y,i,j+1/2,k}) \\ \omega^2 \tilde{E}_{z,i,j,k+1/2} &= (D_x)^2 (\tilde{E}_{z,i,j,k+1/2}) + (D_y)^2 (\tilde{E}_{z,i,j,k+1/2}) + (D_z)^2 (\tilde{E}_{z,i,j,k+1/2}) \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)는 다해상도법이 적용된 유한차분 주파수영역 방정식이며 FDFD와 마찬가지로 식(13)의 분산방정식을 얻을 수 있다.

$$((D_x)^2 + (D_y)^2 + (D_z)^2 + \omega^2)^3 = 0 \quad (13)$$

FDFD에서와 마찬가지로 식(13)을 다시 쓰면 식(14)의 분산방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \left[\frac{1}{\Delta x} \sum_{i=0}^{+8} a(i) \sin\left(\frac{k_x \Delta x}{2} \left(i + \frac{1}{2}\right)\right) \right]^2 + \\ & \left[\frac{1}{\Delta y} \sum_{i=0}^{+8} a(i) \sin\left(\frac{k_y \Delta y}{2} \left(i + \frac{1}{2}\right)\right) \right]^2 + \\ & \left[\frac{1}{\Delta z} \sum_{i=0}^{+8} a(i) \sin\left(\frac{k_z \Delta z}{2} \left(i + \frac{1}{2}\right)\right) \right]^2 \end{aligned} \quad (14)$$

식(14)에 식(9)를 적용하고 FDFD의 분산특성과 같은 조건에서 비교하기 위하여 각 방향의 이산간격을 Δ

$x = \Delta y = \Delta z = \delta$ 로, $\Delta t = \delta/2$ 로 설정을 하고 이산간격 δ 를 자유공간의 파장 λ 로 정규화하면 식(15)와 같은 MR-FDFD 분산방정식을 얻을 수 있다. 이 때 사용한 시간간격 $\Delta t = \delta/2$ 는 FDFD와 MR-FDFD의 안정조건을 동시에 만족하도록 설정하였다.

$$\begin{aligned} (\delta\omega)^2 &= \left[\sum_{i=0}^{+8} a(i) \sin\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos\theta \cos\phi \frac{c'}{c} \left(i + \frac{1}{2}\right)\right) \right]^2 + \\ & \left[\sum_{i=0}^{+8} a(i) \sin\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \cos\theta \sin\phi \frac{c'}{c} \left(i + \frac{1}{2}\right)\right) \right]^2 + \\ & \left[\sum_{i=0}^{+8} a(i) \sin\left(\pi \frac{\delta}{\lambda} \sin\theta \frac{c'}{c} \left(i + \frac{1}{2}\right)\right) \right]^2 \end{aligned} \quad (15)$$

이때 FDFD에서와 마찬가지로 C' 은 해석적 위상속도, C 는 수치적 위상속도이다.

V. Simulation 결과

<그림 1>과 <그림 2>는 $\delta = \lambda/10$ 인 경우 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ 에 대하여 ϕ 가 변할 때 각각 해석적 위상속도 C' 와 수치적 위상속도 C 의 비를 나타낸 것으로 격자 구조가 없는 자유공간의 이상적인 경우는 그 비가 1이다. <그림 1>로 부터 파가 $\theta = 45^\circ, \phi = 45^\circ$ 로 경사 입사할 때 FDFD는 분산특성이 이상적인 경우에 가깝게 나타나지만 MR-FDFD의 경우에는 FDFD에 비해서

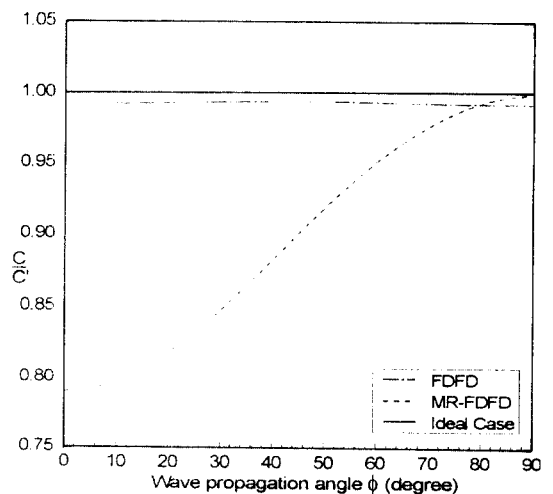


그림 1. 전파각도 $\theta = 45^\circ$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 분산 ($\delta = \lambda/10$)

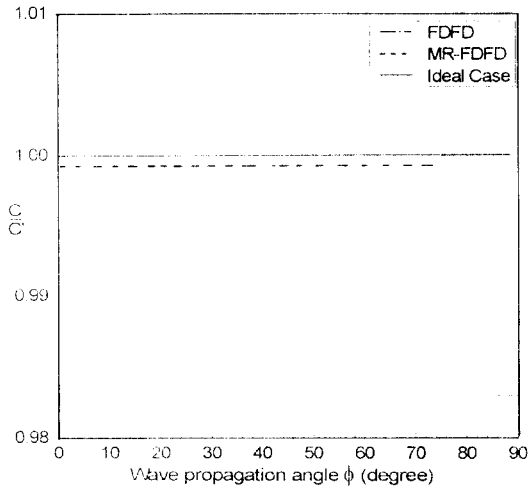


그림 2. 전파각도 $\theta=90^\circ$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 분산 ($\delta = \lambda/10$)

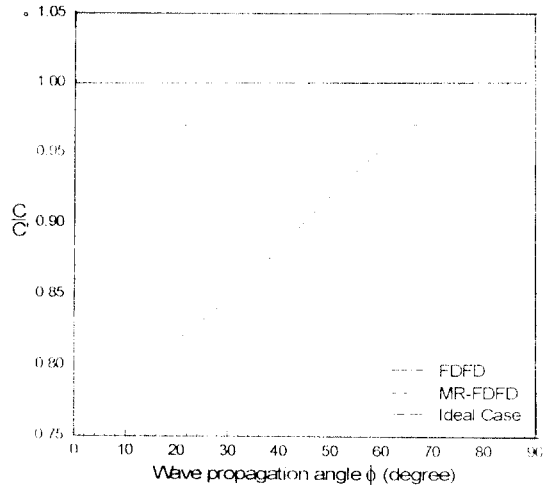


그림 3. 전파각도 $\theta=45^\circ$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 분산 ($\delta = \lambda/5$)

분산특성이 좋지 않으며 전파각도 ϕ 가 80° 이상일 경우에 FDFD 보다 분산특성이 좋아지게 된다. 반면에, <그림 2>에서 MR-FDFD의 경우에는 $\theta=90^\circ$ 일 때 FDFD에 비하여 수치적 분산이 없고 이상적인 경우와 거의 일치함을 볼 수 있다. <그림 1>과 <그림 2>의 결과로부터 파가 경계면에 수직으로 입사할 때 MR-FDFD는 FDFD에 비해 훨씬 좋은 분산특성을 나타내어 이상적인 경우와 거의 일치하지만, 파가 경사 입사를 할 경우에는 MR-FDFD가 FDFD에 비해 분산특성이 현저하게 떨어짐을 볼 수 있다.

<그림 3>와 <그림 4>는 각각 $\theta=45^\circ$, $\theta=90^\circ$ 일 때 $\delta = \lambda/5$ 인 경우의 수치적 분산특성을 보였다. <그림 1>과 <그림 2>의 경우와 비교해 볼 때 FDFD의 경우는 격자크기가 커질 때 분산특성이 안 좋아짐을 볼 수 있고, MR-FDFD의 경우에는 격자크기가 커지더라도 분산특성이 영향을 거의 받지 않는다는 것을 볼 수 있으며, 이는 동일한 계산공간에 대하여 MR-FDFD가 더 적은 격자수로 모델링을 하더라도 분산특성에는 영향이 없다는 것을 의미한다.

<그림 5>와 <그림 6>은 $\phi=90^\circ$ ($\theta=45^\circ$), $\phi=90^\circ$ ($\theta=90^\circ$)에 대하여 격자크기의 변화에 따른 파의 분산특성을 각각 나타내었으며 FDFD의 경우에는 격자크기의 크기가 증가하면 수치적 위상속도가 감소하여 수치적으로 지역통과 특성을 갖는 것을 볼 수 있다.

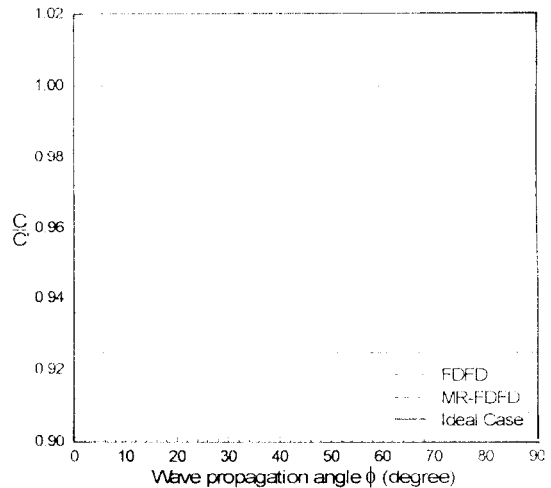


그림 4. 전파각도 $\theta=90^\circ$ 일 때 전파각도 ϕ 에 따른 수치적 분산 ($\delta = \lambda/5$)

MR-FDFD의 경우에는 격자크기가 증가할수록 수치적 위상속도가 약간 증가하는 것을 볼 수 있지만 그 정도는 FDFD에 비해서 작고 선형적인 분산특성을 갖는 것을 알 수 있다. 일반적으로 수치적인 분산효과에 대한 오차를 무시하기 위해서 FDTD에서는 격자크기 δ 가 파장 λ 의 0.05배 이하가 되어야 한다고 알려져 있으며[3], FDFD에서도 마찬가지이다. $\pm 0.01\%$

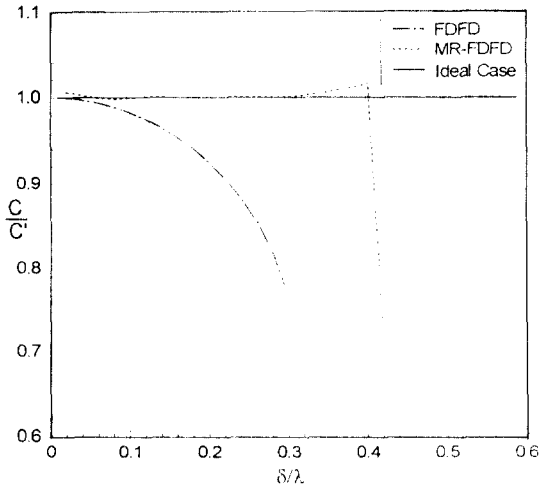


그림 5. 전파각도 $\phi = 90^\circ (\theta = 45^\circ)$ 일 때 격자크기 δ 에 따른 수치적 분산

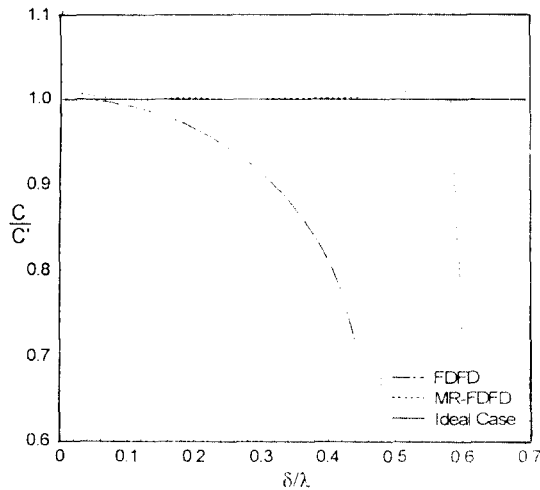


그림 6. 전파각도 $\phi = 90^\circ (\theta = 90^\circ)$ 일 때 격자크기 δ 에 따른 수치적 분산

의 분산정도를 기준으로 할 때 FDFD와 MR-FDTD는 <표 2>와 같은 값을 얻으며, $\phi = 90^\circ (\theta = 90^\circ)$ 인 경우 MR-FDFD가 FDFD보다 약 5.8배로 격자크기를 설정하여도 결과값에는 영향이 없다는 것을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 MR-FDFD가 동일한 구조에 대하여 FDFD보다 격자크기를 해석하는 과정에 비해 크게 설정하더라도 그 결과에는 오차가 거의 없으며 FDFD에 비하여 계산공간 즉, 컴퓨터 메모리를 효율적으로 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 scaling 함수를 이용한 다해상도법을 적용한 MR-FDFD의 분산특성을 계산하였고 FDFD의 분산특성과 비교하였다. 본 논문의 분산특성에 대한 결과로부터 FDFD는 공간격자의 크기가 파장에 비하여 커짐에 따라 그리고 파의 입사가 경계면에 수직일수록 해석적 위상속도에 비하여 수치적 위상속도가 저하되어 분산특성이 나빠지는데 반하여, 이와 달리 MR-FDFD는 공간격자의 크기에는 덜 영향을 받지만 파의 입사 또는 전파각도에 따라 분산특성이 달라지는 것을 알 수 있다. MR-FDFD는 FDFD에 비해 공간격자 수를 약 1/5 정도로 줄일 수 있어 컴퓨터 메모리 용량의 문제를 해결할 수 있고 이는 동일구조에 대한 계산속도를 증가시킬 수 있기 때문에 주파수 영역에서의 마이크로파 회로의 유용한 해석또는 설계방법으로 다양하게 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 본 논문에서는 scaling 함수를 이용한 다해상도법을 적용하였지만 일반적으로 다해상도법에는 scaling 함수와 wavelet 함수를 같이 적용할 수 있으며 이에 대한 특성 연구가 필요하리라 생각된다.

표 2. $\pm 0.01\%$ 의 동일 분산정도에서 FDFD와 MR-FDFD의 상대적인 격자크기

| | FDFD의 격자크기 δ | MR-FDFD의 격자크기 δ |
|--|-------------------------|------------------------|
| $\phi = 90^\circ (\theta = 45^\circ)$ 인 경우 | 1(기준 : 0.06λ) | 6.67 |
| $\phi = 90^\circ (\theta = 90^\circ)$ 인 경우 | 1.67 | 9.67 |

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 Tech.*, 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 Tech.*, Vol. 38, No. 7, pp 849-857, Jul. 1990.
4. K. Beilenhoff, W. Heinrich and H. L. Hartnagel, "Improved Finite- Difference Fomulation in Frequency Domain for Three-Dimensional Scattering Problems," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 40, No. 3, pp 540-546, Mar. 1992.
5. M. Krumpholz and Linda P. B. Katehi, "MRTD: New-Time Domain Schemes Based on Multiresolution Analysis," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 44, No. 4, pp 555-571, Apr. 1996.
6. M. Krumpholz and P. Russer, "Two-Dimensional FDTD and TLM," *Int. Jour. of Numerical Modelling*, Vol. 7, pp 141-153, Dec. 1993.
7. 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.
8. M. Krumpholz and Linda P. B. Katehi, "New Prospectives for FDFD," *to be published.*
9. Allen Taflove, *Computaitional 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. 전중창, "유한차분 시간영역법을 이용한 마이크로스트립 균일 및 불연속 선로해석," 포항공과대학교 박사학위 논문, 1994.
12. Gaofeng Wang and Guang-Wen Pan, "Full Wave Analysis of Microstrip Floating Line Structures by Wavelet Expansion Method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 43, No. 1, pp 131-142, Jan. 1995.
13. M. Krumpholz and Linda P. B. Katehi, *Time Domain Schemes Based on Multiresolution Analysis*, Tutorial of Univ. of Michigan, Ann Arbor, 1996.
14. G. Battle, "A Block Spin Construction of Ondelettes," *Comm. Math. Phys.*, Vol. 110, pp 601-615, 1987.
15. I. Daubechies, "Ten Lectures on Wavelets," *SIAM Rev.*, Philadelphia, PA, 1992.

홍 익 표(Ic Pyo Hong) 정회원
 1994년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 대학원(공학석사)
 1996년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 대학원 박사과정
 ※주관심 분야: 전자기 해석, 초고주파 회로설계

최 도 형(Do Hyung Choi) 정회원
 1986년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 대학원(공학석사)
 1988년 3월~1994년 11월: 삼성전자 통신 연구소 선임 연구원
 1995년 3월~현재: 연세대학교 전자공학과 대학원 박사과정
 1996년 9월~현재: 한솔PCS
 ※주관심 분야: 무선통신, 이동통신

박 한 규(Han Kyu Park) 정회원
 1941년 6월 21일생
 1964년 2월: 연세대학교 전기공학과(공학사)
 1968년 2월: 연세대학교 전기공학과 대학원(공학석사)
 1973년: 불란서 파리대학교(소르본) 박사과정 수료(DEA)
 1975년: 불란서 파리6대학교, Ph.D.
 1976년~1992년: 연세대학교 전자공학과 교수
 1992년~현재: 연세대학교 전파공학과 교수
 ※주관심 분야: 마이크로파, 안테나, 전파전파