

---

# 2D 원통형 좌표계를 위한 FDTD 방법에서 UPML 과 Liao 흡수경계조건의 비교

홍 익 표\*

Comparisons between UPML and Liao's ABC in the FDTD method for  
2D Cylindrical Coordinates

Ic-Pyo Hong\*

---

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임  
(KRF-2005-214-D00331)

---

요 약

본 논문에서는 2D 원통형 좌표계 구조를 해석하기 위한 전자기 수치해석 방법 중 하나인 시간영역 유한차분법 (FDTD)에서 필요한 흡수경계조건으로 UPML과 Liao 흡수경계조건을 비교하였다. 일반적인 2D 직각 좌표계에서는 UPML의 성능이 Liao의 흡수경계조건보다 우수하지만, 본 논문에서 가정한 2D 원통형 좌표계에서는 Liao에 의해 제안된 고유의 흡수경계조건이 UPML과 수정된 Liao 흡수경계조건보다 우수한 것으로 나타났다. 원통형 좌표계는 축에 대해서 대칭이기 때문에 3D 구조를 2D 구조로 가정할 수 있다는 점에서 안테나를 비롯한 다양한 마이크로파 회로의 특성해석에 널리 사용될 수 있는데, 정확한 수치해석 결과를 얻기 위해서 다양한 구조에 대한 흡수경계조건들의 비교와 검증이 필요하다.

ABSTRACT

In this paper, the comparison between UPML and Liao's absorbing boundary condition in the FDTD(Finite-Difference Time-Domain) method was performed for the analysis of the 2D cylindrical coordinate system. Generally, it is known as the absorbing characteristics of the UPML is better than Liao's absorbing boundary condition in the 2D rectangular coordinate. The simulation results in this paper showed that Liao's original absorbing boundary condition is better than other two absorbing boundary conditions, Liao's modified condition and UPML. We concluded that more numerical, theoretical studies, simulations and verifications for various absorbing boundary conditions will be needed to get more accurate results for the design of useful 2D cylindrical microwave circuits.

키워드

시간영역 유한차분법, UPML, Liao 흡수경계조건, 2D 원통형 좌표계

## I. 서론

시간영역 유한차분법은 맥스웰 미분방정식을 유한 차분의 형태로 계산하는 방법으로, 구현이 용이하고 다양한 구조에 대해서 해석이 가능하기 때문에 전자기 수치해석의 유용한 방법으로 최근 많은 연구가 이루어지고 있다[1][2]. 그러나 FDTD 알고리즘을 컴퓨터에서 구현하기 위해서는 계산영역이 유한하기 때문에 이로부터 발생하는 유한 경계면에서 진행되는 전파의 처리조건이 매우 중요하고, 현재까지 이를 위한 다양한 형태의 흡수경계조건이 제안되어 왔다[1]. 이 중 가장 널리 쓰인 흡수경계조건은 1981년 Mur에 의해 제안된 흡수경계조건[3], 1984년 Liao에 의해 제안된 흡수경계조건[4], Liao의 수정된 흡수경계조건[1] 등이 있다. 그러나 1994년 Berenger에 의해 가상적인 흡수물질을 계산영역 주변에 위치시켜 강제로 전자파를 흡수시키는 PML(Perfectly matched layer) 경계조건[5]이 제안되면서 FDTD 에는 대부분 PML 경계조건이 일반적으로 사용되게 되었다. 그러나 Berenger에 의해 제안된 PML 경계조건은 그 성능이 이전의 흡수경계조건에 비해 훨씬 우수하지만 PML을 위한 영역에서의 필드를 각각 직교성분으로 나누어 전개를 하면서 메모리의 비효율성, 맥스웰 방정식과의 비연계성을 가진 수학적인 모델 등의 단점을 가진다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 1996년 Gedney에 의해 UPML(Uniaxial Perfect Matched Layer) 경계조건이 제안되었다[6]. UPML은 Berenger의 PML 과는 다르게 흡수경계영역에서 필드를 분리하지 않고 계산영역의 필드를 그대로 사용하기 때문에 메모리 효율적이며 개념적으로 맥스웰 방정식에서 유도되기 때문에 훨씬 사용이 용이하다.

본 논문에서는 흡수경계조건으로 UPML, Liao의 고유 흡수경계조건과 Liao의 수정된 흡수경계조건을 구현하고 2D 원통형 좌표계에 적용하여 각 흡수경계조건의 성능을 비교하였다. 지금까지, 2D 직각좌표계에 대해서는 다양한 구조에 대한 흡수경계조건의 성능 비교가 이루어졌지만[7], 2D 원통형 좌표계에 대해서는 흡수경계조건들을 동일한 구조에 대해서 비교한 연구가 없기 때문에 본 논문에서는 2D 원통형 좌표계에서 각각의 흡수경계조건의 성능을 비교하고자 하였다. 우선 동일한 구조를 2D 직각좌표계로 바꾸어 구현된 각 흡수경계조건을 적용하여 흡수경계조건이 동작함을 확인하였으며

확인된 흡수경계조건들을 2D 원통형 좌표계에 적용하여 결과를 비교하였다.

## II. 흡수경계조건

### 2.1. Liao의 Original 흡수경계조건

지금까지 FDTD 방법에서는 계산영역에서 반사를 최소화하기 위해 여러 흡수경계조건들이 제안되어 왔다. 그 중에 하나가 Liao[4]의 흡수경계조건으로 Liao의 흡수경계조건은 초기에 FEM (Finite Element Method) 방법을 사용하는 탄성파를 위해 제안되었던 방법으로 “다중 전송 이론”이라고도 알려져 있다. 이 Liao의 흡수경계조건은 2차 Mur의 조건[3]에 비해서 파의 진행각도 또는 수치적 위상변화에 덜 민감하며 10-20dB 우수한 반사특성을 가진다고 알려져 있다[1].

임의의 입사각  $\theta_i$ 를 가진 입사파에 대해 파동방정식의 해는 식(1) 과 같이 다양한 평면파의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x,t) = \sum_i u_i (ct - x \cos \theta_i) \quad (1)$$

식(1)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x,t+\Delta t) &= \sum_i u_i [c(t+\Delta t) - x \cos \theta_i] \\ &= \sum_i u_i (\eta_i + \epsilon_i) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

$$\begin{aligned} \eta_i &= ct - (x - \alpha c \Delta t) \cos \theta_i \\ \epsilon_i &= c \Delta t (1 - \alpha \cos \theta_i) \end{aligned} \quad (3)$$

으로 주어진다.

여기서,  $\alpha$ 는 임의의 가중치를 갖는 값이다. 만약 하나의 평면파 성분만 존재한다면  $\alpha$ 는  $1/\cos \theta$  가 될 수 있다. 이는 Liao의 흡수경계조건이 특정한 입사각에서 Mur의 경계조건과 같아진다는 것을 의미한다. 식(2)로부터, 테일러 급수(Taylor series) 와 Z 변환을 이용하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u(\eta + \epsilon) = \sum_{m=1}^N \Delta^{m-1} u(\eta) = Z^{-1} [I - (I - Z)^N] u(\eta) \\ = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u[\eta - (j-1)\epsilon] \quad (4)$$

식(2)와 식(4)로부터, FDTD를 위한 Liao의 2차 흡수경계조건 표현식은 다음과 같이 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x, t + \Delta t) = \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N T^j \cdot \Phi_{2j+1}^i(x) \quad (5)$$

여기서

$$\Phi_{2j+1}^i(x) = [\Phi_1^j(x), \Phi_2^j(x), \Phi_3^j(x), \Phi_4^j(x), \dots, \Phi_{2j+1}^j(x)]^t \quad (6)$$

$$\Phi_i^m(x) = \Phi[x - (i-1)\Delta x, t - (m-1)\Delta t] \quad (7)$$

$$T = T^1 \begin{pmatrix} T^{j-1} & 0 & 0 \\ 0 & T^{j-1} & 0 \\ 0 & 0 & T^{j-1} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$T^1 = [(2-s)(1-s)/2, s(2-s), s(s-1)/2] \quad (9)$$

이며,  $s = \alpha c \Delta t / \Delta x$  로 주어진다.

### 2.2. Liao의 수정된 흡수경계조건[1]

원래의 Liao 흡수경계조건은 내삽(interpolation) 방법을 적용했으나, 이 후 Taflove[1]에 의해서 보다 간단한 방법으로 Newton 역방향 차분 다항식(backward-difference polynomial)을 이용한 외삽(extrapolation) 기법이 제안되었다. 이 수정된 Liao 흡수경계조건은 원래의 Liao 흡수경계조건보다 다소 예러가 크지만, 고차의 흡수경계조건을 실제 FDTD 알고리즘에 적용하기가 쉽기 때문에 많이 사용되어 왔다.

계산영역의  $x_{\max}$  에 위치하는 외부 경계를 가정하면, 흡수경계조건을 적용하기 위해서는 경계에서 진행파는  $u(x_{\max}, t + \Delta t)$ 로 가정할 수 있다. 균일한 간격  $h = \alpha c \Delta t$ 를 가진 격자구조를 가정하고, 경계에 수직인 방향으로 이미  $L$ 개의 필드  $u_l$  을 알고 있다고 가정한다.

$$\begin{aligned} l=0 & \quad u_0 = u(x_{\max}, t + \Delta t) \\ l=1 & \quad u_1 = u(x_{\max} - h, t) \\ l=2 & \quad u_2 = u(x_{\max} - 2h, t - \Delta t) \\ l=3 & \quad u_3 = u(x_{\max} - 3h, t - 2\Delta t) \\ & \quad \dots \\ l=L & \quad u_L = u(x_{\max} - Lh, t - (L-1)\Delta t) \end{aligned} \quad (10)$$

$u_1$ 에서 시작되는 역방향 차분(backward difference) 열을  $\Delta^m$  으로 정의를 하면, 일반적으로  $u_1$ 에서  $m$ 번째 역방향 차분항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta^m u_1 = \sum_{l=1}^{m+1} (-1)^{l+1} C_{l-1}^m u[x_{\max} - lh, t - (l-1)\Delta t] \quad (11)$$

여기서,  $C_l^m$  은 이항계수로 다음과 같이 정의된다.

$$C_l^m \equiv \frac{m!}{(m-l)!l!} \quad (12)$$

식(12)를 Newton의 역방향 차분 다항식  $u_l$  대한 내삽된 값을 계산하기 위해 적용될 수 있다.  $\beta = 1 - \bar{l}$  이라고 하면

$$\begin{aligned} u_l \cong & u_1 + \beta \Delta^1 u_1 + \frac{\beta(\beta+1)}{2!} \Delta^2 u_1 \\ & + \frac{\beta(\beta+1)(\beta+2)}{3!} \Delta^3 u_1 + \dots \\ & + \frac{\beta(\beta+1)(\beta+2) \dots (\beta+L-2)}{(L-1)!} \Delta^{L-1} u_1 \end{aligned} \quad (13)$$

라고 쓸 수 있다. 식(13)으로부터  $\bar{l} = 0$  라고 하고  $\beta = 1$  로 설정하면

$$\begin{aligned} u_0 \cong & u(x_{\max}, t + \Delta t) \\ \cong & u_1 + \Delta^1 u_1 + \Delta^2 u_1 + \dots + \Delta^{L-1} u_1 \end{aligned} \quad (14)$$

와 같다. 식(14)로부터  $u_0$ 를 얻을 수 있다. 식(14)는 앞 절에서 기술한 Liao의  $L$ 차에 대한 일반적인 흡수경계조건과 같은 식을 나타낸다. Liao의 Original 흡수경계조건과 다른 점은  $h$ 의 선택이다. 식(14)로부터  $h$ 의 선택에

따라서 FDTD에서 사용되는 Yee셀과 격자구조의 일치 여부가 결정된다. 예를 들어  $\alpha = 1$ ,  $c\Delta t = \Delta/2$  이면  $h = \Delta/2$  가 되어  $u_2$  는 Yee의 격자구조와 일치하지만  $u_1, u_3$  는 Yee 격자 셀에 중간에 위치하기 때문에 사용할 수 없게 된다. Liao는 이 값들을 얻기 위해 Quadratic-interpolation 과정과 Spline function 방법을 제안하였다. 그러나 수정된 Liao 흡수 경계조건에서는  $\alpha = 2$ ,  $c\Delta t = \Delta/2$  로 설정하면  $h = \Delta$  가 되어 Yee의 격자구조와 일치하게 되어, Liao 흡수경계조건을 원하는 차수까지 쉽게 적용할 수 있게 된다.

### 2.3. UPML

서론에서 기술했듯이 Berenger[5]에 의해 제안된 PML은 흡수경계영역에서 필드성분을 계산을 위해 나누어 계산하는 알고리즘으로, 계산을 위한 메모리가 많이 필요하며 복잡하다는 단점을 갖는다. 이러한 단점을 극복하기 위해, Chew 와 Weedon[8] 에 의해 Complex coordinate stretching variable 에 근거한 다른 형태의 PML 이 제안되었다. 여기서는 전체 계산영역을 균일한 주계산영역 매질과 PML이 적용되기 위한 Uniaxial anisotropic 매질로 나누어 계산할 것을 제안하였다. Uniaxial 매질을 적용하게 되면 Berenger PML에서 발생하는 비 물리적인 필드의 분리가 없어지면서 비슷한 성능을 가진 흡수경계조건을 구현할 수 있다는 장점이 있다.

FDTD 계산 영역에서, Maxwell의 일반적인 방정식은 식(15)와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot [\epsilon] \vec{E} &= 0 \\ \nabla \cdot [\mu] \vec{H} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= -j\omega [\mu] \vec{H} - [\sigma_M] \vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= j\omega [\epsilon] \vec{E} + [\sigma_E] \vec{E} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $\sigma_M, \sigma_E$  는 anisotropic 매질의 도전율을 나타낸다. 매질상수로서  $[\epsilon], [\mu]$  는 각각 다음과 같은 복소텐서값의 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} [\epsilon] &= \epsilon_0 \begin{pmatrix} \epsilon_x + \frac{\sigma_E^x}{j\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_y + \frac{\sigma_E^y}{j\omega} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z + \frac{\sigma_E^z}{j\omega} \end{pmatrix} \\ [\mu] &= \mu_0 \begin{pmatrix} \mu_x + \frac{\sigma_M^x}{j\omega} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y + \frac{\sigma_M^y}{j\omega} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z + \frac{\sigma_M^z}{j\omega} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 두 매질사이 정합이 되기 위한 조건은

$$\frac{[\epsilon]}{\epsilon_0} = \frac{[\mu]}{\mu_0} \quad (17)$$

로 주어진다. 식(16)과 식(17)을 보다 일반적인 두 매질  $\epsilon_1, \mu_1$  과  $[\epsilon_2], [\mu_2]$  의 관계로 다시 쓰면,

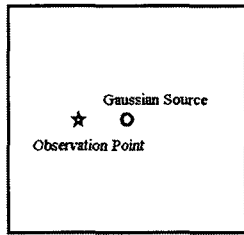
$$[\epsilon_2] = \epsilon_1 \vec{s}, \quad [\mu_2] = \mu_1 \vec{s}, \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} s_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{pmatrix} \quad (18)$$

로 쓸 수 있다. 여기서  $s_x$  는 식(16)으로부터 Berenger의 PML 과 비교하여,  $1 + \sigma_x / j\omega \epsilon_1$  로 정의된다. 따라서, 매질에서 2D 직교좌표계 TM-z 모드에 대해서 식(15)를 식(18)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

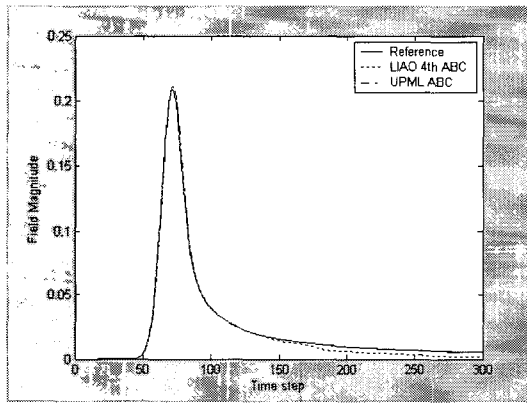
$$\begin{aligned} \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} &= j\omega \epsilon_0 s_x s_y E_z \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} &= -j\omega \mu_0 \frac{s_y}{s_x} H_x \\ \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -j\omega \mu_0 \frac{s_x}{s_y} H_y \end{aligned} \quad (19)$$

식(19)로부터 FDTD를 위한 차분 방정식을 유도할 수 있다. 이로부터 얻어지는 경계조건을 UPML 이라고 하며, 기존의 흡수경계조건보다 성능이 우수하기 때문에 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 우선 수정된 Liao의

4차 흡수경계조건과 UPML 과의 성능을 비교하였다. 그림 1(a)와 같은 2차원 정사각형 구조에 대해서 중심에서 가우시안 펄스를 인가하고 일정하게 떨어진 지점에서 파형을 관찰하였다. 그림 1(b)에 UPML 과 수정된 Liao 4차 흡수경계조건에 따라서 관찰점에서 나타난 파형을 도시하였다.



(a)



(b)

그림 1. 두 흡수경계조건을 비교하기 위한 시뮬레이션 구조.

Fig. 1. The Simulation structure for comparing each absorbing boundary conditions

그림 2 에는 시뮬레이션 구조의 경계면에서 반사된 파형으로 인한 반사파와 경계면이 없다고 가정한 기준 값과의 차이를 dB 로 나타내었다. 그림 2 에서 볼 수 있듯이 수정된 Liao 의 4차 흡수경계조건에 비해 UPML 이 전체적으로 수십 dB 이상 우수한 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

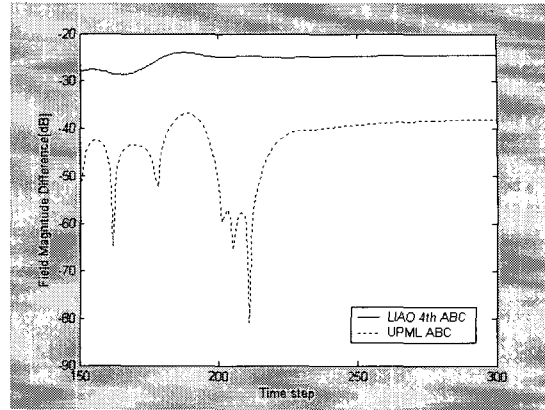


그림 2. 두 흡수경계조건의 성능 비교

Fig. 2. Comparison between Liao 4th Order ABC and UPML

### III. Simulation

#### 3.1. 2D 직각 좌표계의 비교

본 논문에서 우선 2D 원통형 좌표계에 각각의 흡수경계조건을 적용하기 위한 구조는 다음 그림 3과 같다. 3D 원통형 좌표계는 축을 중심으로 원형대칭인 경우 2D 구조로 그림 3 과 같이 축의 방향을 제외 한 나머지 3방향에 대해서만 흡수경계조건을 설정하여 계산을 할 수 있다. 2D 원통형 좌표계 FDTD 를 계산하기 전에, 그림 3 의 구조를 2D 직각좌표계로 변환하여 먼저 각 흡수경계조건을 비교하였다.

그림 4 에 각 흡수경계조건에 대한 경계면으로부터의 반사파 크기를 나타내었다. 실선은 UPML 을 적용한 경우 반사파의 크기이며, 두 점선은 각각 Liao 의 Original 흡수경계조건을 2차항까지 적용한 경우와 수정된 Liao 흡수경계조건을 4차항까지 적용하여 나타낸 것이다. 다른 연구결과에서 발표된 것처럼 UPML 의 흡수경계조건이 가장 우수하게 나타난 것을 확인할 수 있다.

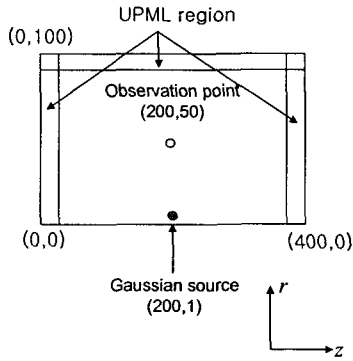


그림 3. Simulation 을 위한 2D 구조  
Fig. 3. 2D Structure for FDTD simulation

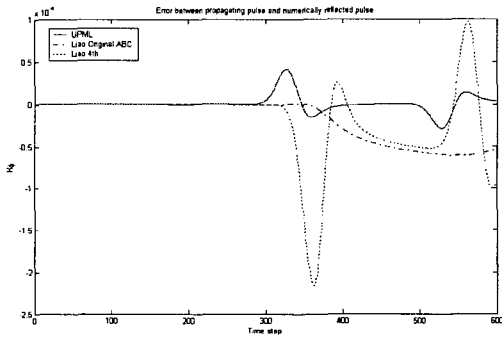


그림 4. 직각좌표계에서 각 흡수경계조건에 대한 반사파의 크기

Fig. 4. Field magnitude comparisons due to each absorbing boundary condition in rectangular coordinate

### 3.2. 2D 원통형 FDTD

본 논문에서는 2D 원통형 구조영역에 대한 FDTD에 Liao 흡수경계조건과 UPML 흡수경계조건을 적용하여 비교하였다. 그림 5에 2D 원통형 좌표계 시뮬레이션을 위한 FDTD 기본 격자구조를 나타내었다. 원통형 좌표계는 축에 대해 회전방향으로 대칭이기 때문에 2D의 결과로 3D의 결과를 유추할 수 있다[9]. 그림 5로부터 2D 원통형 영역에 대한 TM 모드에 관한 맥스웰 방정식은 식(20)과 같이 주어진다[10].

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} &= \mu_0 \frac{\partial H_\phi}{\partial t} \\ -\frac{\partial H_\phi}{\partial z} &= \epsilon_0 \frac{\partial E_r}{\partial t} \\ \frac{1}{r} \frac{\partial r H_\phi}{\partial r} &= \epsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t} \end{aligned} \quad (20)$$

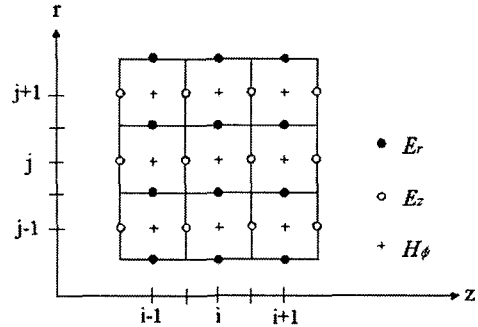


그림 5. 2D 원통형 FDTD 의 격자구조  
Fig. 5. Lattice structure for 2D Cylindrical FDTD

식(20)을 차분방정식으로 나타내면 2D 원통형 좌표계에 대한 FDTD 차분방정식을 유도할 수 있다. 본 논문에서는 그림 3 과 동일한 구조에 대해 2D 원통형 FDTD 방정식을 적용하여 각 흡수경계조건에 대한 반사파의 크기를 얻었다. 그림 6 에 경계면에 대한 각 흡수경계조건에 따른 반사파의 크기를 나타내었다. 그림으로부터 Liao의 2차항까지 전개된 Original 흡수경계조건이 UPML 과 Liao의 수정된 4차 흡수경계조건 보다도 우수하게 나타나는 것이 관찰되었다. 이러한 사실로부터 2D 원통형 좌표계에 대한 FDTD의 적용시 흡수경계조건으로서 UPML 보다 Liao의 Original 흡수경계조건이 우수하다고 단정지을 수는 없지만 매우 흥미로운 현상이며, 보다 다양한 구조와 조건에 대한분석과 Simulation이 필요하다는 것을 확인할 수 있다.

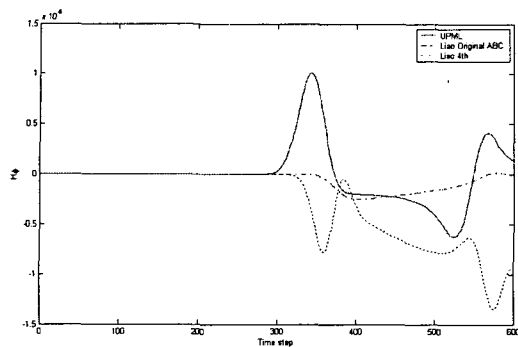


그림 6. 원통형 좌표계에서 각 흡수경계조건에 대한 반사파의 크기

Fig. 6. Field magnitude comparisons due to each absorbing boundary condition in 2D cylindrical coordinate

#### IV. 결 론

본 논문에서는 2D 원통형 좌표계 구조를 해석하기 위하여 전자기 수치해석 방법 중 하나인 시간영역 유한차분법(FDTD)과 이에 적용하기 위한 흡수경계조건의 특성에 대하여 연구하였다. FDTD 방법을 위한 흡수경계조건으로 UPML과 Liao 흡수경계조건을 2D 직각좌표계와 원통형 좌표계에서 각각 비교하였다. 특히, Liao 흡수경계조건의 경우는 Liao에 의해 초기에 제안된 Original Liao 흡수경계조건과 이후 수정된 Liao 흡수경계조건으로 나누어 Simulation 을 수행하였다. 2D 직각 좌표계에서는 여러 선행연구결과들에서 알려진 것과 같이 UPML의 성능이 두 Liao의 흡수경계조건들보다 우수하지만, 본 논문에서 가정된 2D 원통형 좌표계에서는 Liao의 Original 흡수경계조건이 UPML과 수정된 Liao 흡수경계조건보다 우수한 것으로 나타났다. 본 논문의 연구결과로부터 Liao 흡수경계조건이 특정한 경우에 UPML보다 우수한 성능을 가질 수 있다는 사실을 확인할 수 있으며, 특히 원통형 좌표계는 축에 대해서 대칭이기 때문에 3D 구조를 2D 구조로 가정할 수 있다는 점에서 안테나를 비롯한 다양한 마이크로파 회로의 특성해석에 널리 사용될 수 있기 때문에, 정확한 수치해석 결과를 얻기 위해서 다양한 구조에 대한 흡수경계조건들의 분석 비교연구와 검증이 필요하다.

#### 참고문헌

- [1] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics : the Finite-Difference Time-Domain Method*, Boston, 3rd Ed., Artech House, 2005.
- [2] D. B. Davidson, *Computational Electromagnetics for RF and Microwave Engineering*, Cambridge, Cambridge University Press, 2005.
- [3] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 23, pp. 377-382, 1981.
- [4] Z. P. Liao, H. L. Wong, B. P. Yang and Y. F. Yuan, "A transmitting boundary for transient wave analyses," *Scientia Sinica(series A)*, Vol. XXVII, pp. 1063-1076, 1984.
- [5] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Computational Physics*, Vol. 114, pp.185-200, 1994.
- [6] S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer absorbing media for the truncation of FDTD lattices," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 44, pp. 1630-1639, 1996.
- [7] N. V. Kantartzis and T. D. Tsiboukis, "A comparative study of the Berenger perfectly matched layer, the superabsorption technique and several higher-order ABC's for the FDTD algorithm in two and three dimensional problems," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, pp. 1460-1463, 1997.
- [8] W. C. Chew and W. H. Weedon, "A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 7, pp. 599-604, 1994.
- [9] Y. Chen, R. Mittra and P. Harms, "Finite-difference time-domain algorithm for solving Maxwell's equations in rotationally symmetric geometries," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 44, pp.832-839, 1996.
- [10] J. G. Maloney, G. S. Smith and W. R. Scott, "Accurate computation of the radiation from simple antennas using the Finite-difference time-domain method," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 38, pp.1059-1068, 1990.

## 저자소개



홍 익 표(Ic-Pyo Hong)

2000년 연세대학교 전기컴퓨터공학과  
공학박사

2000년 3월 - 2003년 2월 삼성전자  
정보통신총괄 책임연구원

2003년 3월 - 현재: 공주대학교 정보통신공학부 조교수

※ 관심분야: 전자기 수치해석