

기울어진 금속 경계면에 대한 FDTD 해석

A FDTD Analysis for the Slanted Metallic Boundaries

이 윤 경 · 윤 현 보

Yun-Kyung Lee · Hyun-Bo Yoon

요 약

본 논문에서는 기울어진 금속 경계면을 삼각형 격자법으로 해석하고, 계단 근사법과 비교하였다. 특히, 삼각형 격자법에서 금속-유전체간의 경사각도에 대한 오차 범위를 밝혔다.

그 결과, 삼각형 격자법에서 경사각이 30° 이상 60° 이하인 경우, 계단 근사법에 비하여 정확도가 향상되고, 계산속도 및 메모리를 줄일 수 있었다. 그러나 이 범위를 벗어나는 경우, 격자의 한 변의 길이가 상대적으로 늘어나 정확한 해석이 되지 않았다.

Abstract

In this paper, the slanted metallic boundaries is analyzed for the triangular cell grid method and compared with staircase approximation. Specially, this paper is derived an error range to the angle of inclination between the metal and the dielectric from the triangular cell grid method.

That result, when the angle of inclination is from 30° to 60°, the triangular cell grid method improves the accuracy, the computer memory and time requirement in comparison with the staircase approximation. But, out of this range, we do not expect the accuracy because a side of cell size lengthen.

I. 서 론

기울어진 금속 경계면을 갖는 구조체를 FDTD (finite difference time domain)로 해석하기 위해 계단 근사법이 사용된다. 그러나 정확한 결과를 얻기 위해 격자의 크기를 작게 하면 컴퓨터 기억용량이 많이 요구되며, 계산시간도 증가한다^{[1],[2]}.

따라서 기울어진 금속 경계면을 정확하게 해석하기 위하여, 기본 FDTD 알고리즘의 복잡함이 증가되지 않으면서 손쉽게 계산이 가능한 삼각형 격자법이 적용되어왔다^[3]. 삼각형 격자법은 기울어진 금속 경계면을 FDTD로 해석할 때, 삼각형 격자에 의해 기울어진 금속 경계면을 정확하게 표현할 수 있기 때문에 계단 근사법과 비교하여 오차가 적고, 기

억용량 및 계산시간을 줄일 수 있다.

본 논문에서는 전자기 결합 삼각패치 안테나에서 삼각패치의 기울어진 금속 경계면을 계단 근사법과 삼각형 격자법으로 해석하여 그 결과를 비교하였으며, 특히, 삼각형 격자법에서 금속-유전체간의 경사각도에 대한 오차 범위를 밝혔으며, 실험을 통해 FDTD 계산값과 측정값을 비교하였다.

II. 전자기 결합 삼각패치 안테나의 FDTD 계산

삼각패치 안테나에서 삼각패치 한 변이 x축과 이루는 각도 θ 가 15°, 20°, 25°, 30°, 45°, 60° 75°, 80° 인 경우에 대한 금속 경계면을 계단 근사법과

동국대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Eng., Dongguk Univ.)

· 논문 번호 : 20001107-130

· 수정완료일자 : 2001년 1월 20일

삼각형 격자법으로 해석하였다.

삼각패치 안테나는 얇은 기판 위에 마이크로스트립 선로를 갖는 2층 구조의 전자기 결합 급전기를 사용하였으며 삼각패치 안테나의 구조와 설계 값을 그림 1과 표 1에 각각 나타내었다^[4].

2-1 계단 근사법에 의한 계산

전자기 결합 삼각패치 안테나의 특성을 FDTD로 해석하기 위해 유전체의 두께 d 를 2개의 단위 격자 ($2 \Delta z$)로 분할하고, FDTD 계산 영역에서 사용한 공간 분할 간격 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)과 x, y, z 방향으로의 총 격자수를 표 2에 나타내었으며, 기울어진 금속

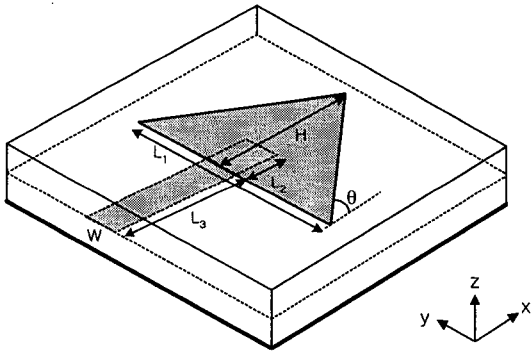


그림 1. 삼각패치 안테나의 구조
Fig. 1. The scheme of the triangular patch antenna.

표 1. 삼각패치 안테나의 설계값
Table 1. The design value of the triangular patch antenna. (단위 : mm)

θ	L_1	L_2	L_3	H	W
15°	5.7879	6.8	10.0	10.8	1.0716
20°	7.2794	6.0	10.0	10.0	1.1648
25°	9.3262	6.1536	10.0	9.9996	1.4348
30°	11.0832	3.6	13.6	10.0	0.9236
45°	24.93	4.5	15.9275	12.465	1.385
60°	25.2552	2.0	21.0	9.6	2.7712
75°	46.0	2.4	22.0	9.2	2.9856
80°	104.35	2.2	22.0	9.2	4.537

경계면이 x축과 이루는 각도가 15°인 경우 x축으로 4칸, y축으로 1칸, 20°, 25°, 30°인 경우, x축으로 2칸, y축으로 1칸, 45°인 경우 x축 y축으로 각각 1칸씩, 60°인 경우 x축으로 1칸, y축으로 2칸, 75°인 경우 x축으로 1칸, y축으로 4칸, 80°인 경우 x축으로 1칸 y축으로 4칸씩 이동하여 해석하였다.

그림 2는 x축과 이루는 각도의 따른 x-y 평면상의 삼각패치 안테나에 적용된 계단 근사법을 보여주고 있다.

입력신호는 가우시안 펄스를 TEM 여기방법으로 여기하였고, 시간 간격 Δt 는 Taflove에 의해 유도

표 2. FDTD 계산영역에 사용되는 변수들
Table 2. The parameters using in FDTD computational region.

계단근사법	공간분할간격 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)	총격자수 ($x \times y \times z$)	Δt	주파수 해석영역	반복계산	해상도
15°	0.2, 0.21434, 0.4	122 × 67 × 20	0.3571 ps	직류-75.4GHz	27940	100 MHz
20°	0.3846, 0.28, 0.4	72 × 66 × 20	0.4669 ps	직류-57.4GHz	21400	100 MHz
25°	0.3846, 0.3587, 0.4	72 × 66 × 20	0.5982 ps	직류-44.8GHz	16600	100 MHz
30°	0.2, 0.2309, 0.4	138 × 90 × 20	0.3334 ps	직류-80.4GHz	29978	100 MHz
45°	0.17312, 0.17312, 0.4	184 × 184 × 20	0.28873 ps	직류-92.9GHz	34633	100 MHz
60°	0.2, 0.1732, 0.4	174 × 232 × 20	0.28873 ps	직류-80.4GHz	29978	100 MHz
75°	0.4, 0.3732, 0.4	93 × 224 × 20	0.667 ps	직류-40.2GHz	14989	100 MHz
80°	0.4, 0.4013, 0.4	93 × 300 × 20	0.667 ps	직류-40.2GHz	14989	100 MHz

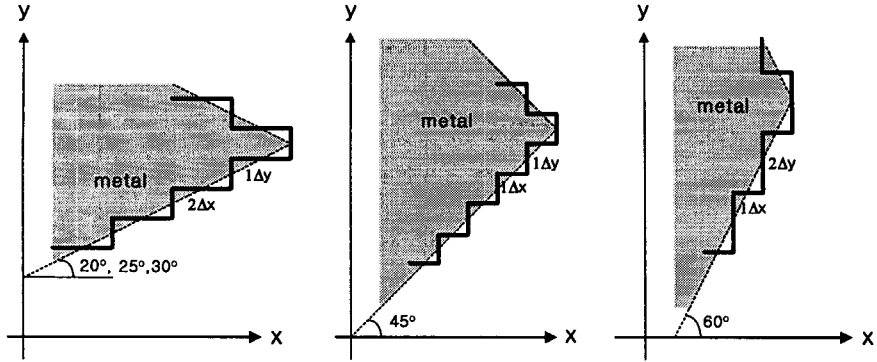


그림 2. 계단 근사법에 의한 삼각패치 안테나 해석

Fig. 2. Analysis of triangular patch antenna by using the staircase approximation.

된 Courant의 안정 조건에 만족되도록 하였다. FD-TD 계산후 Fourier 변환시 주파수 영역에서 응답 특성에 대한 해상도는 모두 100 MHz로 하기 위한 반복계산을 수행하였다^[5].

2-2 삼각형 격자법에 의한 계산

그림 3은 기울어진 금속 경계면을 삼각형 격자법에 의한 FDTD 로 해석하기 위하여 한 격자를 확대하여 보여 주고 있다. 여기에서 도체부분에 위치하는 접선 전기 성분들은 0으로 처리되고, 또한 대각선으로 존재하게 되는 접선 전기 성분 E_{tan}^n 도 도체 표면에 매우 인접하게 위치하므로 0으로 간주한다^{[3],[6]}.

맥스웰의 적분방정식을 그림 3과 같은 격자에 적

용하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 & E_x^n(i+1/2, j, k)\Delta x + E_y^n(i+1, j+1/2, k)\Delta y \\
 & - E_{tan}^n(i+1/2, j+1/2, k)\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \\
 & = -(\mu\Delta x\Delta y/2\Delta t)[H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) \\
 & - H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2, k)] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 은 공간간격이고, Δt 는 시간간격이며, $E_{tan}=0$ 이다.

따라서 식 (1)로부터 자계성분 (H_z)을 다시 쓰면, 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) \\
 & = H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2, k) \\
 & - (2\Delta t/\mu\Delta x\Delta y)[E_x^n(i+1/2, j, k)\Delta x \\
 & + E_y^n(i, j+1/2, k)\Delta y] \quad (2)
 \end{aligned}$$

그림 4는 x - y 평면상의 삼각패치 안테나로 삼각패치의 기울어진 경계면을 삼각형 격자법으로 나타내기 위하여 기울어진 금속 경계면에 대한 방정식은 식 (3)과 같다.

$$y = mx + C \quad (3)$$

여기서, $m=\tan \theta$ 이고, θ 는 x 축과 기울어진 금속 경계면이 이루는 각도이다.

θ 값을 대입하여 선로 위에 위치하는 (x, y) 좌표와 C 값을 구할 수 있으며, FDTD 계산 영역에서 각 격자의 가로세로비가 적절하다면 기울어진 면을 정

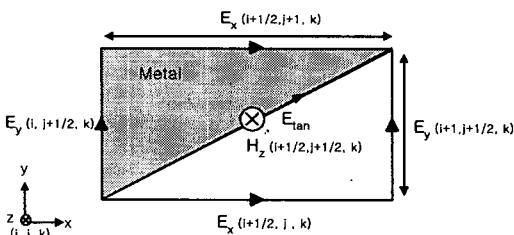


그림 3. 기울어진 금속표면에 밀접한 확대된 한 개의 격자

Fig. 3. Enlargement of a cell close to the slanted metallic surface.

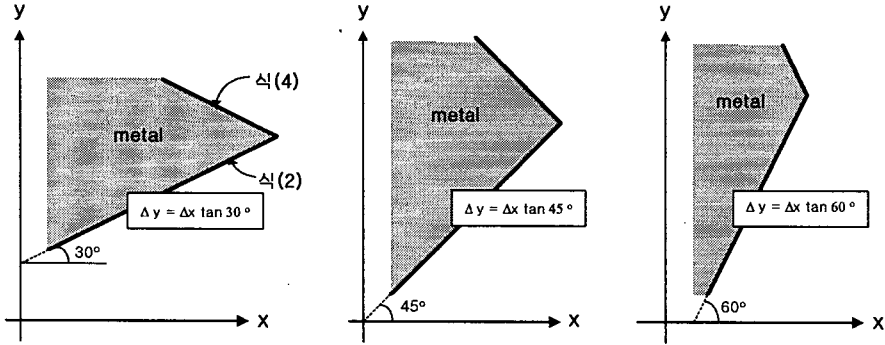


그림 4. 삼각형 격자법에 의한 삼각패치 안테나 해석

Fig. 4. Analysis of triangular patch antenna by using the triangular cell grid.

확하게 표현할 수 있다. 만약, x축과 이루는 각도가 30°인 경우, $\Delta x = 0.4 \text{ mm}$ 라면 $\Delta y = \Delta x \tan 30^\circ$ 로 격자의 가로, 세로 길이를 계산할 수 있다. 다른 각도에서도 마찬가지로 방법으로 격자의 가로, 세로의 길이를 정할 수 있다.

따라서 삼각패치 안테나에서 기울어진 두 금속 경계면을 삼각형 격자로 정확하게 표현하고, 여기서 기울어진 부분은 식 (2)의 수정된 방정식 H_z 과 다른 기울어진 금속 경계면에 대한 수정된 H_z 성분은 식 (4)를 이용하여 기본 FDTD 알고리즘에 적용하여 해석하였다.

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k)$$

$$= H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - (2\Delta t / \mu \Delta x \Delta y) \cdot [E_x^n(i+1/2, j+1, k)\Delta x - E_y^n(i, j+1/2, k)\Delta y] \quad (4)$$

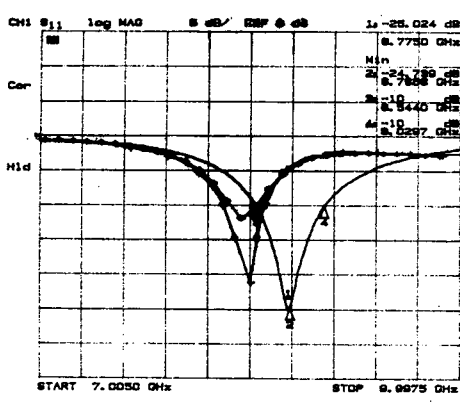
삼각패치 안테나의 기울어진 금속 경계면을 삼각형 격자법으로 해석하기 위해 유전체의 두께 d 를 2개의 단위 격자($2\Delta z$)로 분할하고, FDTD 계산 영역에서 사용한 공간 분할 간격($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)과 x, y, z 방향으로의 총 격자수를 표 3에 나타내었다.

계단 근사법과 마찬가지로 입력신호는 가우시안 펄스를 TEM 여기방법으로 여기하였고, 시간 간격 Δt 는 Courant의 안정 조건에 만족되도록 하였으

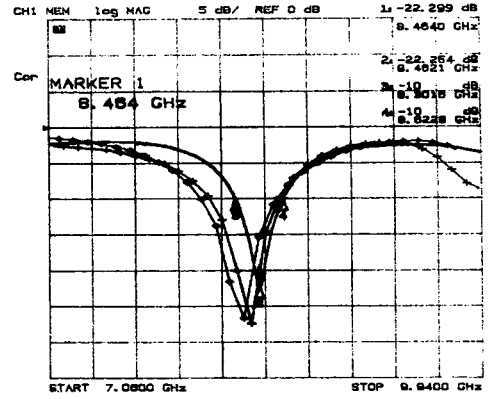
표 3. FDTD 계산영역에 사용되는 변수들

Table 3. The parameters using in FDTD computational region.

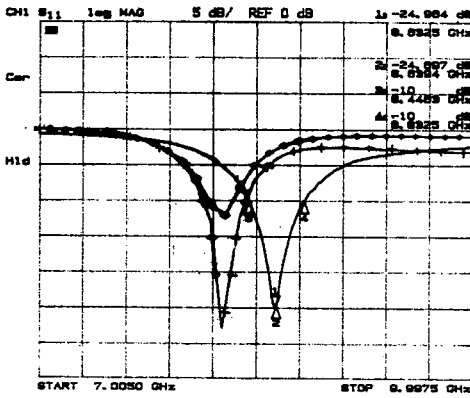
삼각 격자법	공간분할간격 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$	총격자수 (x×y×z)	Δt	주파수 해석영역	반복계산	해상도
15°	0.4, 0.10717, 0.4	72×94×20	0.178 ps	직류-150GHz	55943	100 MHz
20°	0.4, 0.1456, 0.4	70×90×20	0.2428 ps	직류-120GHz	41000	100 MHz
25°	0.4, 0.1865, 0.4	70×90×20	0.311 ps	직류-86.1GHz	31955	100 MHz
30°	0.4, 0.2309, 0.4	79×90×20	0.384 ps	직류-69.6GHz	25965	100 MHz
45°	0.34625, 0.34625, 0.4	108×112×20	0.577 ps	직류-46.4GHz	17316	100 MHz
60°	0.4, 0.69282, 0.4	97×88×20	0.667 ps	직류-40.2GHz	14989	100 MHz
75°	0.4, 1.49282, 0.4	93×86×20	0.667 ps	직류-40.2GHz	14989	100 MHz
80°	0.4, 2.2685, 0.4	93×86×20	0.667 ps	직류-40.2GHz	14989	100 MHz



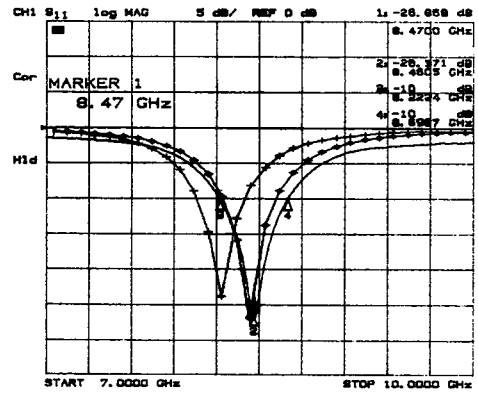
(a) x축과 이루는 각도가 20°인 경우



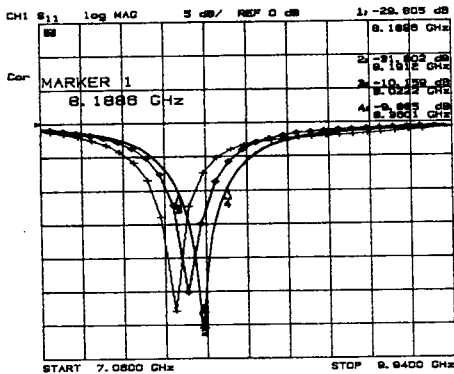
(d) x축과 이루는 각도가 45°인 경우



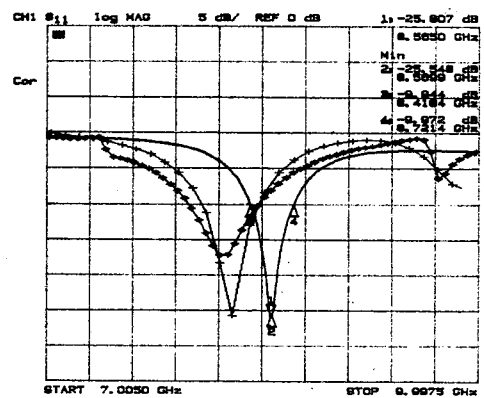
(b) x축과 이루는 각도가 25°인 경우



(e) x축과 이루는 각도가 60°인 경우



(c) x축과 이루는 각도가 30°인 경우



(f) x축과 이루는 각도가 75°인 경우

그림 5. 삼각패치 안테나의 반사손실

(+++ : 계단 근사법, *** : 삼각형 격자법, --- : 측정값)

Fig. 5. The return loss of the triangular patch antenna.

(+++ : staicase, *** : triangular cell grid, --- : measured results)

며, Fourier 변환시 주파수 영역에서 응답 특성에 대한 해상도는 모두 100 MHz 로 하였다^[5].

III. 실험 및 결과고찰

3-1 제작 및 측정

제작에 사용한 기판은 비유전율이 3.5 , 높이는 0.8 mm, 동박두께는 18 μ m, loss tangent 는 0.003 인 테프론 기판을 사용하였고 회로는 마이크로스트립 선로를 사용하여 사진 부식법으로 제작하였다.

제작된 삼각패치 안테나들의 반사손실을 HP 8722A Network Analyzer 로 측정하였다.

그림 5는 전자기결합 삼각패치 안테나의 기울어진 금속 경계면을 계단 근사법과 삼각형 격자법에 의한 FDTD 계산 결과와 실제 제작하여 측정한 결과를 비교하여 나타내었다.

3-2 결과 검토

FDTD 계산후 Fourier 변환시 주파수 영역에서 응답 특성에 대한 해상도는 모두 100 MHz 로 하였으며, z 방향으로 격자의 크기는 모두 0.4 mm 로 하였다. 표 4는 계단 근사법, 삼각형 격자법과 측정결과를 비교하여 나타내었으며 여기서 기억용량 및

계산시간은 삼각형 격자법을 기준으로 비교하였으며, 공진 주파수 편이는 측정값을 기준으로 계산하였다.

비교 결과, 삼각형 격자법이 계단 근사법에 비하여 기억용량 및 계산시간이 줄어들고 동시에 공진 주파수 편이도 적음을 알 수 있었다. 또한 45°를 이루고 있는 경우, 측정치와의 공진 주파수 편이가 가장 적었으며, 30°, 60°인 경우에는 공진 주파수 편이가 많았으나, 계단 근사법에 의한 해석보다는 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 또한 x 축과 이루는 각도가 20°, 25°, 75°인 경우, 계단 근사법이 삼각형 격자법과 비교하여 측정값에서 더 작은 주파수 편이를 볼 수 있었다. 그러나 15° 이하, 80° 이상인 경우, 삼각형 격자법으로 해석한 결과 안테나의 공진 주파수를 확인할 수 없었다. 그 이유는 삼각형 격자법에서 격자의 크기는 금속 경계면이 기울어진 각도에 따라 결정되는데 각도가 너무 작거나 큰 경우에 격자의 크기가 한쪽 방향으로만 길어져 정확하게 해석되지 않는다.

따라서 격자의 한 변이 1일 때 나머지 한 변의 길이가 0.5 에서 1.7 범위 안에 존재한다면 삼각형 격자법은 FDTD 알고리즘의 복잡성을 증가하지 않고, 많은 기억용량과 부가된 계산시간 없이도 계단 근사법보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다.

표 4. 결과 비교

Table 4. Comparison of results.

경계면 해석 방법		20도	25도	30도	45도	60도	75도
계 단 근사법	기억용량	0.4배	0.4배	1.74배	2.8배	4.73배	2.6배
	계산시간	0.53배	0.53배	2.35배	5.75배	14.3배	3배
	공진주파수 편이	273.7 MHz 낮아짐	378 MHz 낮아짐	211.6 MHz 낮아짐	130 MHz 낮아짐	90 MHz 낮아짐	283 MHz 낮아짐
	Cell size	Δy 2 확대	Δy 2 확대	Δy 1/2 축소	Δx 1/2 축소 Δy 1/2 축소	Δx 1/2 축소 Δy 1/4 축소	Δy 1/4 축소
삼각형 격자법	기억용량	1	1	1	1	1	1
	계산시간	1	1	1	1	1	1
	공진주파수 편이	350 MHz 낮아짐	350 MHz 낮아짐	86.6 MHz 낮아짐	20 MHz 낮아짐	74 MHz 낮아짐	315 MHz 낮아짐
측정값(공진주파수)		8.775 GHz	8.6325 GHz	8.1866 GHz	8.47 GHz	8.464 GHz	8.565 GHz

IV. 결 론

본 논문에서는 전자기결합 삼각패치 안테나의 기울어진 금속 경계면을 계단 근사법과 삼각형 격자법으로 해석하고, 비교하였다.

그 결과, 삼각형 격자법은 계단 근사법에 비하여 정확도가 향상되고, 계산시간 및 기억용량을 줄일 수 있었지만 금속-유전체 경계면의 경사각이 15도 이하 80도 이상인 경우, 격자의 길이가 한쪽 방향으로 상대적으로 늘어나기 때문에 안테나의 공진 주파수를 확인할 수 없었다. 그러나 경사각이 30도와 60도 범위 내에 존재한다면 삼각형 격자법은 FDTD 알고리즘의 복잡도를 증가하지 않고도 손쉽게 계산하여 계단 근사법보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-14, pp. 302-307, May, 1966.

[2] A. Taflove and M. E. Brodwin, "Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Max-

well's equations," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-23, no. 6, pp. 623-630, Jun., 1975.

[3] I. S. Misra, S. K. Chowdhury, "Study of Impedance and Radiation Properties of a Concentric Microstrip Triangular-Ring Antenna and Its Modeling Techniques Using FDTD Method" *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*. vol. 46, no. 4 pp. 531-537, April, 1998.

[4] S. H. Al-Charachafchi, W. K. Wan Ali, M. R. Ibrahim and S.R.Barnes "Design of a dual patch triangular microstrip antenna", *Applied Microwave & Wireless* pp.60-67, March, 1998.

[5] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic-field equations", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377-382, Nov., 1981.

[6] P. Mezzanette, L. Roselli, and R. Sorrentio. "A simple way to model curved metal boundaries in FDTD algorithm avoiding staircase approximation", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 5, pp. 267-269, Aug., 1995.

[7] Karl S. Kunz, Raymond J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, 1993.

이 윤 경

1993년: 서울산업대학교 매체공학과(공학사)
1995년: 동국대학교 전자공학과(공학석사)
1996년~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정

윤 현 보

1979년~현재: 동국대학교 전자공학과 교수