

논문97-2-1-01

유한 차분 시간법을 이용한 마이크로스트립 패치 안테나에 관한 연구

장 용 응*, 박 상 규**, 신 철 재***

A Study on the Microstrip Patch Antenna Using FDTD Method

Yong-Woong Jang*, Sang-Kyu Park**, and Chull-Chai Shin***

요 약

본 논문에서는 FDTD법을 이용하여 마이크로스트립 패치 안테나를 해석하였다. 먼저 Yee 알고리즘으로 맥스웰 방정식을 유한 차분식으로 근사화시켜 안테나 패치면에서의 전계를 구하였다. 이때 흡수 경계 조건은 Mur의 1차식과 분산경계 조건을 적용시켰다. FDTD 법을 이용하여 단일 마이크로스트립 패치 안테나의 반사 손실파의 전파과정을 각각 계산하였다. 또한 2-배열 안테나에 FDTD를 적용한 결과, 측정된 값들은 FDTD 법을 이용하여 계산한 값들과 비교적 잘 일치하였다. 계산된 임피던스, 반사손실, 정재파비 등은 양호한 값들을 나타냈고, 이러한 계산 결과들은 본 실험의 측정치와 비교적 잘 일치하였다.

Abstract

In this paper, a microstrip patch antenna was analyzed by using FDTD method. Firstly, the electric field in the microstrip patch antenna was obtained by approximating a Maxwell's equation to a finite difference equation by means of Yee's algorithm. In this case, Mur's 1st approximation and dispersive boundary condition(DBC) were applied to an absorbing boundary condition.

We also analyzed a single microstrip patch antenna by using the FDTD method, then calculating the propagative process in the wave of a return loss. Also, as the result that FDTD was applied to 2-array antenna designed to increase the gain of antenna, the measured results was in relatively good accordance with the values calculated by the FDTD method. The calculated impedance, return loss and VSWR were comparatively good. And these results were in relatively good accordance with the measured values.

1. 서 론

마이크로웨이브 장비가 소형 경량화 되면서, 신뢰성도

함께 보장받기 위해서는 안테나의 소형 경량화가 필수적이다. 이러한 필요성에 의해 연구되어 오던 안테나중의 하나가 마이크로스트립 안테나이다. 마이크로스트립 안테나는 Deschamps[1]가 마이크로스트립 선로의 복사라는 연구를 발표하면서 시작되어, 이후 Lewin[2]의 스트립 라인에서의 불연속으로 인한 방사에 대한 연구가 초기에(50년대) 진행되어 왔으며, 지금도 연구가 활발히 진행되고 있다.

마이크로스트립 안테나의 해석 방법은 cavity model[3], transmission-line model[4], spectral-domain method[5], moment method[6], FDTD[7] 등이 있으며 여기에서는 FDTD를 이용하여 마이크로스트립 안테나를 해석하고자

*극동전문대학 전자통신과
Dept. of Tele-communication Electronics, Keukdong College

**현대우주항공(주) 연구 3부
Research depart. 3, Hyundai Space & Aircraft Co., Ltd

***아주대학교 전자공학과
Dept. of Electronics, Ajou University

한다.

FDTD법을 이용한 해석은 기존의 주파수 영역의 해석보다 시간영역에서 계산이 수행되므로 전파진행과정을 눈으로 확인 할 수 있고, 해석하고자 하는 회로나 안테나의 구조가 복잡하여도 그 모델링이 수월하나, 이 방법은 많은 양의 메모리가 필요하거나 계산시간이 오래 걸리는 것이 단점이다.

본 논문에서는 해석 경계면의 물리적인 공간에서 전자기파의 전파특성을 유지하면서 반사파가 발생되지 않게 해석 조건을 만족하기 위해 흡수경계조건(Absorbing Boundary Condition)을 사용하였다. 또한, 흡수 경계면에 대한 수식처리 방법은 Mur의 1차 근사식을 적용하여 보다 정확한 해석이 되도록 하였다. 그리고, FDTD법의 Yee 알고리즘을 이용하여 해석하고자 하는 마이크로스트립 안테나를 모델링하여 파의 전파 과정, 전계를 각각 계산하였으며, 단일 패치 안테나의 반사손실을 주파수 영역에서 계산하였다. 위에서 얻은 결과를 토대로 2-배열 마이크로스트립 안테나의 파의 전파 과정, 반사손실, 입력 임피던스, 정재파비를 각각 계산하고, 이 계산 결과들을 가지고 2-배열 마이크로스트립 안테나를 제작하여 각각의 파라메타들을 측정 및 분석하고자 한다.

II. FDTD 이론

시간영역 유한 차분법은 전자기 산란문제를 해결하기 위한 방법으로서 1966년 Yee에 의하여 제시되었다. 이러한 유한 차분 근사식은 모든 증분에서 2차적인 절단 에러를 내포 하고 있다. Yee의 표시에 따라 직각 격자에서 공간 점은 $(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z)$ 로 나타낼수 있고, 시간 증분은 $t = n\Delta t$ 로 나타낼 수 있으며, 시간과 공간에 대한 임의의 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [7],[8].

$$F^n(i, j, k) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) \quad (1)$$

여기서 i, j, k, n 은 정수고, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 는 각각 x, y, z 방향의 격자 크기이다.

식(1)을 시간과 공간 도함수에 대하여 중심차분으로 근사화하고, 단위 격자 상의 방향에 대한 전계 E와 자계 H를 유한차 방정식 형태로 나타내면 식(2)와 같다.

$$H_x^{n+1/2}(i, j, k) = H_x^{n-1/2}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu} \cdot \left[\frac{E_z^n(i, j, k) - E_z^n(i, j, k-1)}{\Delta z} - \frac{E_y^n(i, j, k) - E_y^n(i, j-1, k)}{\Delta y} \right] \quad (2a)$$

$$E_x^{n+1}(i, j, k) = E_x^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i, j+1, k) - H_z^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2}(i, j, k+1) - H_y^{n+1/2}(i, j, k)}{\Delta z} \right] \quad (2b)$$

y, z 성분에 대한 유한차 방정식은 동일한 방법으로 쉽게 구할 수 있다. 이와 같은 방법에 의한 임의의 격자점에서 새로운 전자계 벡터 성분은, 단지 동일한 격자점에서 반 시간스텝전의 다른 전자계 성분 값으로 구할 수 있다.

식(2)로 나타낸 시·공간분할 알고리즘이 갖는 안정조건은 [9],

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{\max}} \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1/2} \quad (3)$$

이다. 여기서 v_{\max} 는 해석 대상영역 내에서 최대 위상속도이다. 시간 영역 유한차분법에 의한 마이크로스트립 안테나의 해석에 있어서 넓은 주파수 대역의 응답 특성을 얻기 위해서는 광대역 주파수 스펙트럼을 포함하는 Gaussian 펄스를 선택한다. 해석 대상에서 x 방향으로 진행하는 이상적인 Gaussian 펄스는 다음과 같다.

$$E(t, x) = \exp \left[-\frac{(t-t_0 - \frac{x-x_0}{v})^2}{T^2} \right] \quad (4)$$

여기서 v 는 해석 대상영역에서 펄스의 진행 속도를 나타내며, $x=x_0, t=t_0$ 에서 여기 신호는 최대 값을 갖는다. Gaussian 펄스에서 공간 펄스폭 W 는 진폭 값을 갖는 2개의 대칭점 사이의 거리로 정의되며, T 는

$$T = \frac{W}{2v\sqrt{\ln(1/a)}} \quad (5)$$

가 되도록 결정된다. 변수 T, t_0 및 x_0 를 선택하기 위해서는 두가지 조건을 충족해야 한다. 우선, 공간분할 간격 Δx 는 해석 대상영역내의 가장 미세한 구조까지 나타낼 수 있도록 작아야 하고, 시간분할 간격 Δt 는 안정조건이 충족될 정도로 미세하여야 한다. 또한, 해석하고자 하는 주파수 범위에서의 응답특성이 분석 가능한 최소 값을 갖기 위해서는 변수 T 는 충분히 좁아야 하며, 동시에 해석하고자 하는 주파수 범위 내에서의 해상도(resolution)를 좋게 하기 위해서는 변수 T 를 최대한 많이 분할하여야 한다. 만약 이 두 조건이 동시에 만족되지 않으면 Δx 는 더욱 작게 다시 선정하여야 한다.

마이크로스트립 안테나 구조의 해석에서 양 측면 및 뒷면은 Mur의 1차 흡수경계조건을 다음 식과 같이 부여한다.

$$E_{1n}^{n+1} = E_{2n}^n + \frac{v_{px}\Delta t - \Delta x}{v_{px}\Delta t + \Delta x} (E_{2n}^{n+1} - E_{1n}^n) \quad (6)$$

여기서 v_{px} 는 x 방향의 위상속도이고, E_{1n} 는 경계면(바깥영역)에서의 전계의 접선성분이고, E_{2n} 은 경계면에서 계산영역 내의 한 절점 안쪽면(mesh 영역)의 전계의 접선성분을 나타낸다. E_{Mn} 은 경계면의 접선 전기장 성분을 $E_{M-1, t}$ 은

경계면 안쪽으로 한 절점만큼 들어간 위치에서의 접선 전기장 성분이다. 2차 분산경계조건의 차분 방정식은

$$E_M^n = 2E_{M-1}^{n-1} - E_{M-2}^{n-2} + (\gamma_1 + \gamma_2)(E_M^{n-1} - E_{M-1}^n - E_{M-1}^{n-2} + E_{M-2}^{n-1}) - \gamma_1 \gamma_2 (E_M^{n-2} + 2E_{M-1}^{n-1} + E_{M-2}^n) \quad (7)$$

시간영역 유한차분법에 의해 계산된 시간영역에서의 계산 값은 Fourier 변환에 의한 주파수 영역의 응답을 구할 수 있다. 마이크로스트립 안테나의 산란 계수는 마이크로스트립 급전선로가 개방종단으로 되어 있으므로 1 port 회로가 되며, 이때 반사 계수 S_{11} 은

$$S_{11}(t) = \frac{F(V_{ref}(t))}{F(V_{inc}(t))} \quad (8)$$

이다. 여기서 $V_{ref}(t)$ 는 기준점에서 반사전압을 나타내며, $V_{inc}(t)$ 는 기준점에서 입사전압을 나타낸다. F는 Fourier 변환을 나타낸다. 안테나의 입력 임피던스는 기준점에서의 산란 계수 계산 결과를 마이크로스트립 안테나 급전종단점에 변환시킴으로 구할 수 있다.

$$Z_i = Z_0 \frac{1 + S_{11}e^{-j2kl}}{1 - S_{11}e^{-j2kl}} \quad (9)$$

여기서, Z_0 는 급전 선로의 특성 임피던스(50, Ω), k 는 파수(wave number : $2\pi/\lambda_g$), l 은 급전선로 종단으로부터 기준점까지의 길이를 나타낸다. FDTD 계산 결과로부터 식 (7)을 적용하여 안테나의 입력 임피던스 값을 계산할 수 있다.

그림 1은 far field를 얻기 위한 직사각형 좌표계를 나타낸 것으로서, 여기에서 유전체 재질은 등방성(isotropic)이고, 균일성(homogeneous), 무손실(lossless)하고, 마이크로스트립 도체와 접지면은 무한하다고 가정하고, 전기장에 대하여 풀면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다. 이 때 θ 와 ψ 방

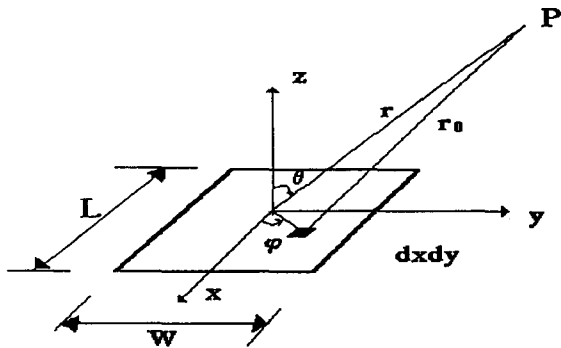


그림 1. Far field를 얻기 위한 직사각형 좌표계
Fig. 1. A rectangular coordinate to obtain the far field

향의 far-field 전기 세기는.

$$E_\theta = -j\omega A_x \cos\theta \cos\phi - j\omega A_y \cos\theta \sin\phi \quad (10)$$

$$E_\phi = j\omega A_x \sin\phi - j\omega A_y \cos\phi \quad (11)$$

이며, ω 는 각주파수이고, A_x, A_y 는 x와 y 방향의 far-zone 벡터 포텐셜이다.

III. 결과 및 고찰

1. 단일 패치 안테나

본 논문에서는 단일 직사각형 모양의 마이크로스트립 패치 안테나를 3차원 공간에 대하여 해석하였다.

여기서 사용할 기판은 유전율(ϵ)이 2.5, 두께가 0.5258mm, loss tangent($\tan \delta$)는 0.002인 테이프론 기판을 대상으로 시뮬레이션하였다.

그림 2는 해석하고자 하는 안테나의 구조이며, 공간 격자는 $\delta_x=0.389, \delta_y=0.400, \delta_z=0.265$ mm이고, 시간 간격은 0.441ps이며 총 해석 공간은 $60 \times 100 \times 16$ 개의 격자로 구성한다. 또한 인가 신호는 펄스폭을 조절함으로써 DC에서부터 원하는 주파수 대역에 관한 정보를 얻을 수 있는 T가 15.435ps인 Gaussian pulse를 인가하였다.

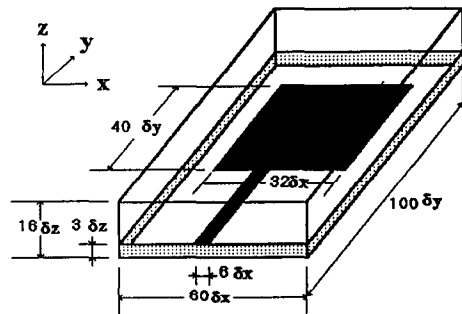


그림 2. 마이크로스트립 패치 안테나의 해석 구조
Fig. 2. Analysis structure of a microstrip patch antenna

위의 구조에서 파가 y방향으로 진행한다고 가정하고 파의 진행 방향과 접지면의 접선 방향의 전기장과 수직 방향의 자기성분을 0으로 하였다.

안테나의 Near-field에서의 전자파 분포는 곧 전파의 진행 과정을 의미하며 FDTD해석으로 직접 구할 수 있다. 또한, 입력임피던스와 S 파라미터는 그림 1과 같은 패치 구조면의 측정 기준 점에서 시간에 대한 입력파와 반사파를 구하여 주파수 영역으로 변환함으로써 가능하다. 주파수 영역으로의 변환은 일반적인 FFT알고리즘인 radix 2 FFT 알고리즘을 이용하였다.

FDTD 해석을 사용된 컴퓨터의 기종은 Sun사의 Sparc 10을 사용하였다.

그림 3은 안테나 상에서 펄스가 시간에 따라 진행되는 것으로서 n=400 일 때 전파의 진행 과정을 시각적으로 나타낸 것이다.

그림 4는 회로 상에서 파의 진행 과정과 반사 과정을 확인할 수 있으며 이는 다른 수치 해석법과 비교하여 계산 시간이 많이 소요되는 것이 단점이지만, 계산이 정확하고, 광대역 주파수 범위에서 특성들을 한 눈에 볼 수 있는 장점이라 할 수 있다.

그림 5는 단일 마이크로 스트립 패치 안테나의 반사손실 값을 나타낸 것으로서, 시뮬레이션 값과 측정값을 비교하였다[10]. 20GHz까지의 결과를 비교해 보면 첫번째 공진 주파수는 두 가지의 결과 값이 정확히 일치하며 두 번째 공진 주파수는 측정값이 조금 상향 이동되어 있는 것을 알 수 있지만, 이는 실제 안테나 크기와 모델링을 하기 위한 크기와의 수치적인 차이로 인하여 발생된 에러때문인 것으로 사료된다. 크기가 12.45 × 16 mm² 이고, 안테나에 대한 해석 결과는 공진 주파수가 7.5GHz이며, 반사손실은

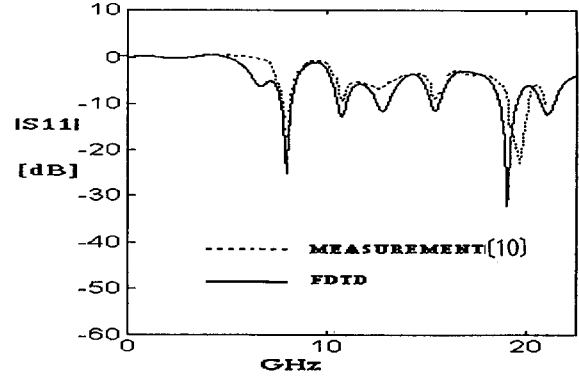


그림 5. 단일 패치 안테나의 반사손실
Fig. 5. Return loss of a patch antenna

-25dB 이하였다

2. 2-배열 안테나

2-배열 안테나의 구조는 그림 8과 같으며, 적육면체 모양의 2개-안테나와 급전부의 구조로 구성하였다. 시뮬레이션한 기판은 단일 마이크로스트립 안테나에서 사용한 것으로서, 유전율 2.5, 기판의 두께 0.5258mm, loss tangent(tanδ)는 0.002인 테이프론 기판을 대상으로 시뮬레이션하였다. 또한, 공간 격자는 $\delta x = \delta y = \delta z = 0.89\text{mm}$ 이며, 시간 간격은 0.856 ps 이고, 총 해석 공간은 219×140×10개의 격자로 구성한다. 인가 신호는 T가 15.435 ps 인 Gaussian pulse를 주었으며, time delay는 3T로 하여 처음 시작점을 충분히 0에 가깝게 하였다. 실행 시간은 반사파가 0이 될 수 있는 충분한 시간인 100000 time step 을 돌렸으며, 소요시간은 Sun사의 Sparc 10으로 약 50시간 정도 소요되었다.

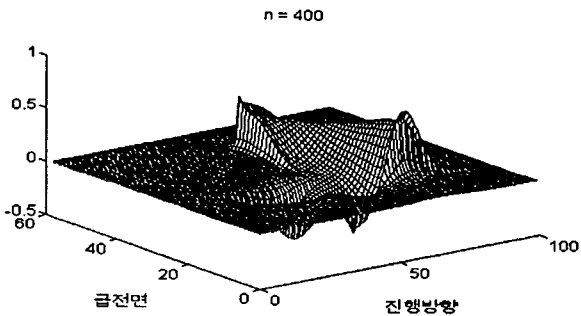


그림 3. 안테나 상의 파의 진행 과정(n = 400)
Fig. 3. Progress process of the wave(n=400)

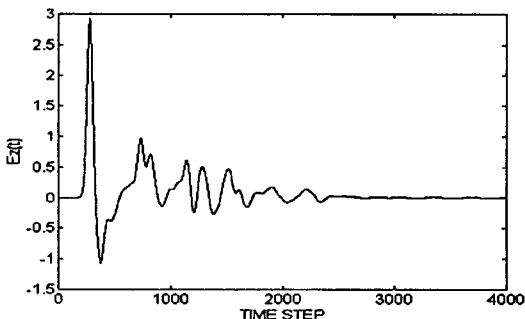


그림 4. 전계의 세기
Fig. 4. Amplitude of an electric field

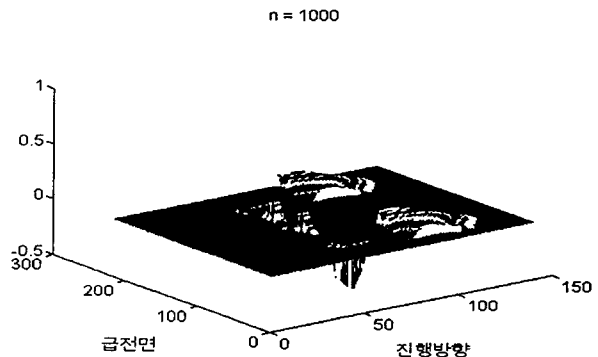
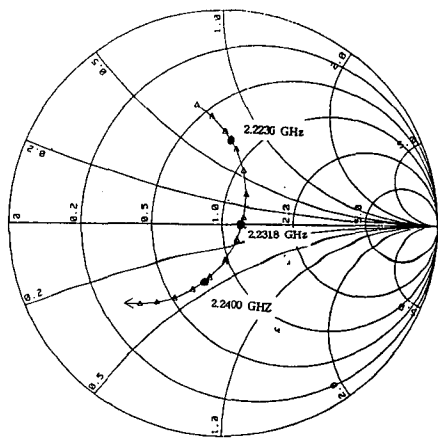


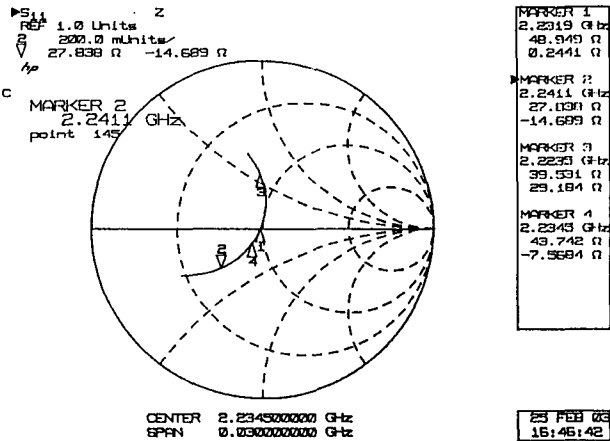
그림 6. 2-배열 안테나에서 파의 전파 과정
Fig. 6. Progress process of the wave on the 2-array antenna

그림 6은 안테나 상에서 펄스가 시간에 따라 진행되는 것으로써, 시간 스텝이 $1000\Delta t$ 에서의 전파 진행 과정을 시각적으로 나타내었다.

그림 7(a), (b)는 2-배열 마이크로 스트립 안테나의 입력 임피던스를 스미스 도표로 나타낸 것으로써, (a)는 입력 임피던스의 계산 값을 나타낸 것이며, 공진 주파수 2.2319 GHz에서 입력임피던스의 real 값은 약 50Ω 에 정합되었다. 그림 (b)는 측정값을 나타낸 것으로써, 같은 공진 주파수에서 입력 임피던스는 $49.949+j0.2441[\Omega]$ 이므로,



(a) 계산치

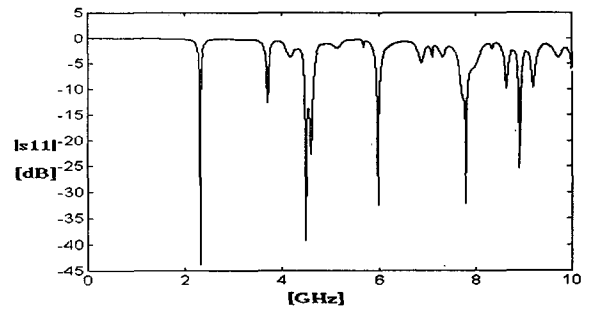


(b) 측정치

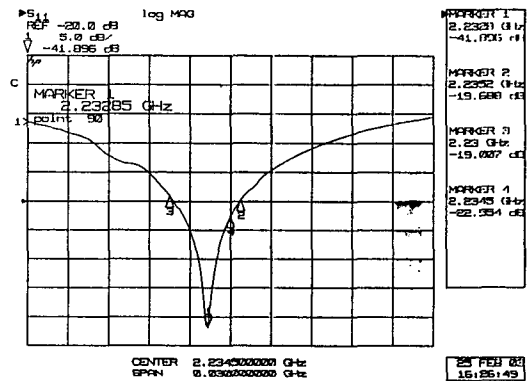
그림 7. 2-배열 안테나의 입력 임피던스
Fig. 7. Input impedance of 2-array antenna
(a) Calculated value, (b) Measured value

FDTD방법으로 계산한 값과 측정 값은 거의 일치하는 결과를 얻었다.

그림 8 (a)는 2-배열 안테나의 S11특성을 FDTD로 해석하여 계산한 것으로써, 주기적인 공진점이 나타나지만 주파수가 증가됨에 따라 2.23GHz에서 가장 잘 공진되는 것을 알수 있다. 여기서 그림 (a)는 반사손실의 계산값을 나타낸 것이며, 반사손실 값은 -40 dB 이며, 그림 (b)는



(a) 계산값



(b) 측정값그림

그림 8. 2-배열 패치 안테나의 반사손실
Fig. 8. Return loss of 2-array patch antenna
(a) Calculated value, (b) Measured value

반사손실의 측정값을 나타낸 것으로써, 동일한 공진 주파수에서 반사손실의 측정치는 약 -41 dB 이며, -10 dB 이하에서 대역폭은 약 20 MHz 이상이였다. 안테나의 측정은 HP 8510C Network analyzer를 사용하였다.

그림 9은 2배열 안테나의 정재파비를 측정한 것으로써, 2.2319GHz에서 정재파비는 1.009이며, 대역폭은 약 30MHz 정도이다.

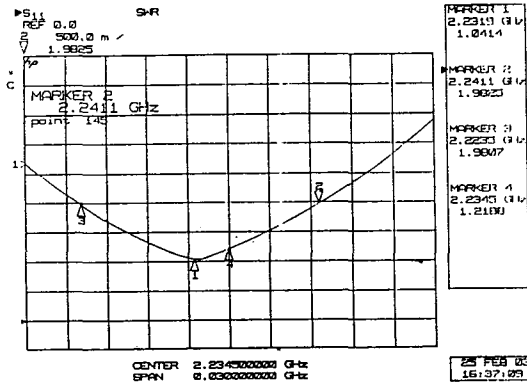


그림 9. 측정된 정재파비
Fig. 9 Measured VSWR

와 같으며, 계산치는 실선으로 나타내고, 측정치는 점선으로 나타내었다. 또한 수직 복사패턴은 그림 10(b)에 나타내었으며, 계산치와 측정치는 비교적 잘 일치하였다.

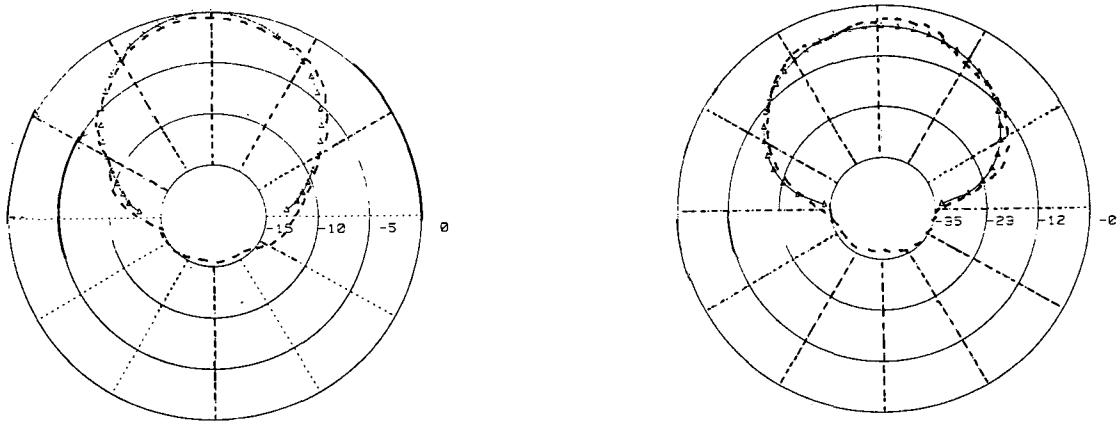
IV. 결론

본 논문에서는 시간 영역의 해석 방법인 FDTD법을 이용하여 마이크로스트립 패치 안테나를 해석하였으며, 먼저, 계산 과정의 신뢰성을 확인하기 위하여 단일 사각형 패치 안테나에 대한 반사손실을 계산하였고, 안테나의 이득을 향상시키기 위해 2-배열 안테나를 해석하였다. Yee 알고리즘으로 맥스웰 방정식을 유한 차분식으로 근사화시켜 안테나 패치면에서의 전계 및 전류분포를 계산하여 단일 마

이크로스트립 안테나와 2개 배열한 안테나를 각각 설계 및 제작하였다. 단일 마이크로스트립 패치 안테나의 계산된 특성은 공진 주파수 7.5 GHz에서 반사 손실이 -25dB이었다. 2-배열 마이크로스트립 패치 안테나는 공진 주파수 2.2328 GHz에서 설계 및 제작하였으며, 2-배열 안테나의 측정치는 주파수 2.2328에서 반사손실이 -41 dB, 정재파비는 1.0414 로 비교적 양호한 측정 값을 얻었으며, FDTD 법으로 해석한 계산값과 잘 일치하였다. 결과적으로, 여기서 제안된 FDTD 방법은 패치 안테나뿐만 아니라, 마이크로 스트립 라인을 이용한 초고주파 선로에 적용될 수 있으며, 또한 본 논문에서 제작된 안테나는 위성 탑재용 및 이동 통신용 안테나로 응용될 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- [1] G.A. Deschamps, "Microstrip microwave antennas," presented at USAS Symp. Antennas, 1953.
- [2] L. Lewin, "Radiation from discontinuities in striplines," Proc. Elec. Eng. vol. 107, pp. 163-170, 1960.
- [3] K.R. Carver and J.W. Mink, "Microstrip antenna technology," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-29, pp. 2-24 Jan. 1981.
- [4] R.W. Dearnley and R.F. Barel, "A broad-band transmission line model for a rectangular microstrip antenna," IEEE Trans. AP., vol. 37, pp. 6-15, Jan. 1989.
- [5] D.M. Pozar and S.M. Voda, "A rigorous analysis of a microstripline fed patch antenna," IEEE Trans. AP. vol. AP-35, pp. 1343-1350, Dec. 1987.



(a) 수평 복사 패턴

(b) 수직 복사 패턴

그림 10. 복사 패턴(Δ : 계산치, - - : 측정치)

Fig. 10. Radiation pattern(Δ : Calculated value, - - : Measured value)
(a) Horizontal radiation pattern (b) Vertical radiation pattern

[6] M.D. Deshpande and M. C. Bailey, "Input impedance of microstrip antenna." *IEEE Trans. Antenna propagat.*, vol. AP-30, pp. 654-650, July 1982.

[7] K.S. Kunz and R. J. Luebbers, "The finite difference time domain method for electromagnetics." *CRC Press, Inc.* pp. 11-26, 1993.

[8] N.O. Sadiku, Numerical techniques in electromagnetics, CRC Press, pp. 179-203, 1992.

[9] A.T 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. MTT-23, no. 8, pp. 623-630, Aug. 1975.

[10] D.M. Sheen, S.M. Ali, 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 July 1990.

저 자 소 개



장 용 응

1982~1989. 2. 명지대학교 전자공학과(공학사)
 1989. 9.~1991. 8. 명지대학원 전자공학과(공학석사)
 1993~ 아주대학교 전자공학과 박사과정 수료
 1994. 3. 현재 충북전문대학 전자통신과 전임강사
 주관심분야 : 초고주파 소자(안테나, 능동소자 설계 및 제작) 광파 및 광통신

박 상 규

1988. 2. 명지대학교 전자공학과 졸업
 1988. 4.~1992. 4. 통일 중공업
 1992. 4.~1995. 4. (주)하인게인 안테나
 1995. 5.~현재 (주)현대우주항공
 1996. 8. 아주대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
 주관심분야 : 마이크로 스트립 안테나, 위성통신



신 철 재

1964. 연세대학교 전기공학과 졸업
 1968. 연세대학교 공학석사
 1983. 연세대학교 공학박사
 1968. ~1970. 동양공업전문대학교 조교수
 1970.~1977. 광운대학교 조교수
 1977.~ 현재 아주대학교 교수
 주관심분야 : 무선통신에 사용되는 각종부품의 설계, 제작 안테나 설계, EMI·EMC측정 및 해석