

십자형 급전선을 갖는 광대역 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나

정희원 신호섭*, 김남*, 장용웅**

The Wide-band Four-element Microstrip Slot Array Antenna with the Cross-shaped Feedline

Ho-Sub Shin*, Nam Kim*, and Yong-Woong Jang** *Regular Members*

요약

본 논문에서는 2.0 GHz대역에서 IMT-2000, PCS, WLL 등의 광대역 이동통신용으로 십자형 마이크로스트립선로 급전형 슬롯 4소자 배열 안테나를 설계하였다. 제안된 안테나는 유전율이 4.3이고 두께가 1.0mm이며 유한차분 시간영역법(FDTD)을 이용하여 수치적으로 시뮬레이션되었으며, FR-4기판상에 제작한 후 실험하였다. 단일 안테나, 2소자와 4소자 배열 안테나의 측정된 2.0 VSWR 대역폭은 각각 61.8%(1.42~2.69 GHz), 57.3%(1.42~2.69 GHz)와 57.6%(1.46~2.64 GHz)이다. 또한 4소자 배열 안테나의 -3dB대역폭은 25°이고 이득은 6.92dBi이고 교차편파가 -12.5dB이므로 단일안테나의 경우보다 훨씬 더 많은 성능개선이 이루어졌다. 측정된 결과는 FDTD 해석결과와 잘 일치하였다.

ABSTRACT

The cross-shaped microstrip line-fed printed slot four-element array antenna for IMT-2000, PCS, WLL at the 2.0 GHz band was designed in this paper. The proposed antenna with relative permittivity 4.3 and thickness 1.0mm was simulated by the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method. The antenna was fabricated on the FR-4 Laminate and was tested. It was shown that the measured 2.0 VSWR bandwidths of one-element antenna, two-element, and four-element array antennas are respectively 61.8%(1.42~2.69 GHz), 57.3%(1.42~2.69 GHz), and 57.6%(1.46~2.64 GHz). Because the -3dB beamwidth of four-element array antenna is 25°, the gain is 6.92 dBi, and the cross-polarization is -12.5dB, the 4-element array antenna has far more performance improvement than a 1-element antenna. The measured results are in good agreements with the FDTD results.

I. 서론

최근 사용자들이 소형, 경량의 마이크로웨이브 장비를 요구함에 따라 신뢰성을 보장하기 위해 소형, 경량 안테나를 가지는 것이 필수적인 요구사항이 되고 있다. 이 요구사항에 맞춰 연구되어온 안테나 중의 하나가 마이크로스트립 안테나이다. 마이크로스트립 안테나는 소형, 경량뿐만 아니라 다양한 구조로 유연하게 만들수 있고 적은 비용, 제작의 용이

와 반도체 소자와 집적화하기 용이하다는 장점을 갖고 있다. 그러나 마이크로스트립 안테나는 약 1-2%의 협대역폭을 가지는 큰 단점이 있다^[1]. 마이크로스트립 안테나의 대역폭을 넓히기 위해 지난 십여년동안 많은 연구가 이루어져왔다. 이 중에서 널리 쓰이는 방법은 다른 층 (적층 구조)이나 같은 층 (공평면형 구조)에 기생패치를 이용하는 것이다^[2,3]. 그러나 적층 구조는 안테나의 두께를 증가시키는 단점이 있고 공평면형 구조는 안테나의 측면 크기

* 충북대학교 정보통신공학과

** 극동정보대학교 전자통신과

논문번호: 00351-0901, 접수일자: 2000년 9월 1일

를 증가시키는 단점이 있으므로 크기를 증가시키지 않고 안테나 구조자체를 변경시키는 방법이 연구되어왔다. 이중 마이크로스트립 슬롯 안테나는 마이크로스트립 급전선로를 슬롯 중심에 수직으로 가로지르는 방식^[4]이 공진주파수에서 400이상의 높은 복사저항을 가지므로 Yoshimura가 급전선로를 슬롯의 양끝단쪽으로 offset시켜서 복사저항을 낮추는 방식을 제안하였다^[5]. 그러나 이 방법도 슬롯폭이 좁은 경우에 한해 20%이내의 2.0 VSWR 대역폭을 가지는 단점이 있다.

이에 본 논문에서는 급전선의 모양을 일자형에서 십자형으로 변경시켜서 슬롯폭이 증가하여도 복사저항값을 현저하게 줄일 수 있기 때문에 넓은 주파수 대역폭에 걸쳐서 우수한 정합특성을 가지는 4소자 마이크로스트립 슬롯 안테나를 설계하였다. 이 안테나는 넓은 주파수 대역에 걸쳐서 정합특성이 우수할 뿐만 아니라 높은 이득과 낮은 교차편파를 가지며, 빔폭이 좁아서 높은 지향성 특성을 가지므로 PCS IMT-2000 WLL 등의 이동통신용 기지국이나 중계기 안테나로 사용하기에 적합하다.

마이크로스트립 안테나를 해석하는데 많은 방법이 있다. 가장 일반적인 방법은 TLM(Transmission-Line Method), Cavity Method 등과 MOM(Moment Method), FEM(Finite Element Method), FDTD(Finite Difference Time Domain) method 등의 full-wave 해석방법이 있다. 이중 FDTD방법을 이용한 해석방법은 시간영역에서 계산을 수행하므로 필드의 진행과정을 눈으로 확인할 수 있고 한번의 Fourier 변환을 통해 공진주파수를 기준으로 광대역 응답을 쉽게 볼 수 있고 정확한 해석을 할 수 있다.

본 논문에서는 십자형 급전선을 가지는 광대역 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나를 FDTD방법을 이용하여 설계하였다. 두번째 절에서는 FDTD 해석이론을 보여준다^[6,7,8]. FDTD 코드에 의해 개발된 수치해석결과가 3번째 절에 보여진다. 4번째 절에서 실제로 제작한 안테나를 대상으로 측정결과가 보여진다. 마지막으로 FDTD 해석결과와 측정결과를 비교하여 FDTD방법이 정확함을 증명하였고 본 안테나의 연구결과와 응용분야를 요약하여 결론을 내렸다.

II. FDTD 해석이론

FDTD방법은 유한체적에 걸쳐 맥스웰의 회전방정식을 이산화하고 중심차분 근사식을 가지고 도함수를 근사화함으로써 공식화되어진다. 유한차분 시간

영역 차분방정식은 공간과 시간영역에서 2차함수의 양자화 오차를 갖고 있다. Yee의 기호법에 의하면 FDTD셀에서 공간점은 (idx, jdy, kdz)이고 시간중분은 ndt이고 임의의 함수는 F(idx, jdy, kdz, ndt)로 나타내어진다. 마이크로스트립 슬롯 안테나의 해석에서 흡수경계조건으로써 Mur의 흡수경계조건을 적용하였다^[9].

유한차분 시간영역법에 의해 계산된 시간영역의 계산값에 Fourier변환을 함으로써 주파수영역의 응답값이 계산될 수 있다. 마이크로스트립 급전선로가 개방 스테브이므로 마이크로스트립 안테나는 1포트 회로이다. 따라서 마이크로스트립 안테나의 반사손실계수 S₁₁는 다음과 같다.

$$S_{11} = \frac{F[V_1^{ref(t)}]}{F[V_1^{inc(t)}]} \quad (1)$$

여기서 V₁^{ref(t)}는 반사전압이고 V₁^{inc(t)}는 입사전압이며, F는 Fourier 변환기호이다. 계산된 반사손실계수로부터 전압정제파비(VSWR)는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1 + |S_{11}(w)|}{1 - |S_{11}(w)|} \quad (2)$$

원거리장 패턴의 전자장은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$E_{\theta} = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (L_{\theta} + \eta N_{\theta}) \quad (3)$$

$$H_{\phi} = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} (N_{\phi} + \frac{L_{\phi}}{\eta}) \quad (4)$$

여기서 E_θ, N_θ는 전계 복사패턴이며 L_θ, L_φ는 자계 복사패턴이다.

III. 안테나의 설계

단일 안테나, 2소자, 4소자 배열 안테나의 구조는 그림 1에 보여진다. 단일 안테나는 마이크로스트립 선로에 3개의 개방 스테브를 연결함으로써 설계하였다. 또한 2소자, 4소자 배열 안테나는 λ_g/4전력 분배기와 두개의 포트에 동일한 전력을 공급해주는 T-junction전력분배기를 이용하여 설계하였고 단일 안테나 사이의 간격은 중심주파수 2.0GHz에서 약

0.57로 정하였다. 설계기판의 상대유전율은 4.3이고 기판의 두께는 1.0 mm이다. 그림 1에서 L_s 는 슬롯 길이이고 W_s 는 슬롯폭이며, L_d 는 십자형 급전선로의 상단부 길이이고 W_r 는 급전선로의 폭이고 offset는 슬롯중심과 수평부 급전선로중심사이의 간격이다. 안테나를 정확하게 해석하기 위해 Δx 와 Δy 는 정수배의 마디점(node)이 급전선로와 슬롯을 정확하게 일치하도록 선택된다. 또한 Δz 는 정수배의 마디점이 기판의 두께를 정확하게 일치하도록 선택된다.

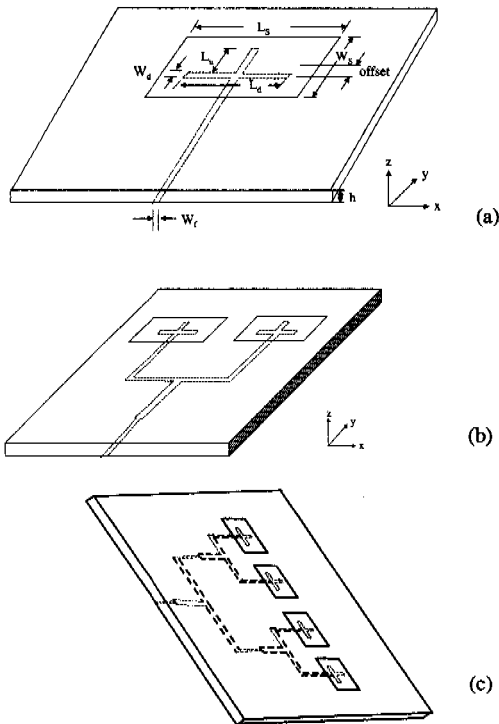


그림 1. (a) 단일 마이크로스트립 슬롯 안테나의 구조와 설계변수 (b) 2소자 (c) 4소자

이용된 공간스텝 크기는 $\Delta x = 0.97\text{mm}$, $\Delta y = 1.0\text{mm}$ 와 $\Delta z = 1.0\text{mm}$ 이다. 기판의 두께(h)는 $1\Delta z$ 이고 슬롯의 길이(L_s)는 $65\Delta x$ 이며, 슬롯의 폭(W_s)은 $32\Delta y$ 이고 수평부 급전선로의 길이(L_d)는 $32\Delta x$ 이며, 급전선로 상단부 수직방향의 길이는 $10\Delta y$ 이고, 그리고 슬롯중심으로부터 수평부 급전선로 중심 사이 간격의 offset길이는 $8\Delta y$ 이다. 원거리장을 계산하기 위해 10 자유공간 매쉬 셀이 기판의 위아래에 추가된다. 단일 안테나, 2소자, 4소자 배열 안테나의 총 매쉬크기는 $148\Delta x \times 112\Delta y \times 21\Delta z$, $246\Delta x \times 121\Delta y \times 21\Delta z$ 와 $414\Delta x \times 177\Delta y \times 21\Delta z$

이다. 시간스텝은 Courant 안정조건^[10]을 만족하도록 1.9 ps으로 하였다. 입력신호로써 넓은 주파수 대역을 갖는 가우시안 펄스가 안테나의 유전체와 도체의 접합면 바로 밑에 급전되어진다.

그림 2는 단일 안테나, 2소자, 4소자 배열 안테나의 계산된 VSWR값의 비교를 보여준다. 단일 안테나, 2소자와 4소자 배열 안테나의 VSWR값이 2.0이하에서 계산된 대역폭은 63.5%(1.42~2.74 GHz), 52.7%(1.48~2.54 GHz), 49.6%(1.59~2.64 GHz)이다. 기존의 급전구조에서는 슬롯과 급전선의 임피던스 매칭이 협대역의 주파수에 대해서만 이루어졌지만 십자형 급전선을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나는 파라미터 변수가 많아 임피던스 정합이 용이하고 복사저항이 낮기 때문에 대역폭을 넓힐 수 있었다.

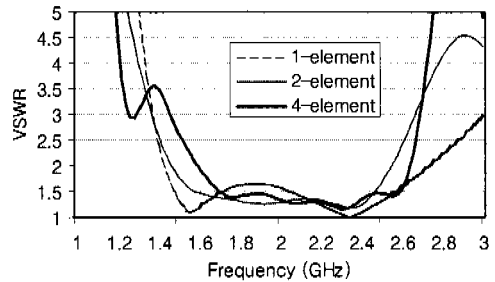


그림 2. 단일 마이크로스트립 슬롯 안테나, 2소자, 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 VSWR 값의 비교 (계산값)

그림 3는 수평부 급전선로 길이(L_d)의 변화에 따른 2소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 계산된 VSWR값을 보여준다. 그림 3에서 수평부 급전선로 길이(L_d)를 제외한 다른 파라미터는 또한 기본값으로 맞춰진다. 대역폭은 L_d 값이 35mm일때 약 1.05GHz이고 L_d 값이 31mm일때 약 1.06GHz이며 그리고 L_d 값이 27mm일때 1.03GHz이다. 따라서 L_d 값이 31mm일때 대역폭이 최대가 된다.

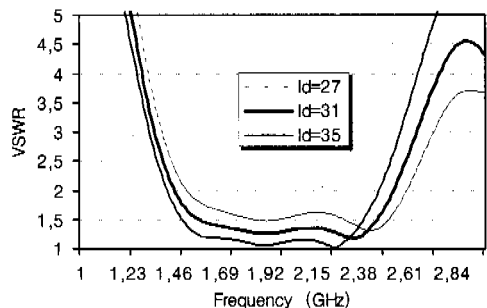


그림 3. 수평부 급전선로 길이(L_d)의 변화에 따른 2소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 VSWR 계산값

그림 4는 1600 시간스텝에서 유전체와 도체 접속면 바로 밑에서 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 전계 $E_z(x,y,t)$ 분포를 보여준다. 스트립 선로에서 각 소자를 따라 골고루 전계가 전파해가는 것을 볼 수 있다.

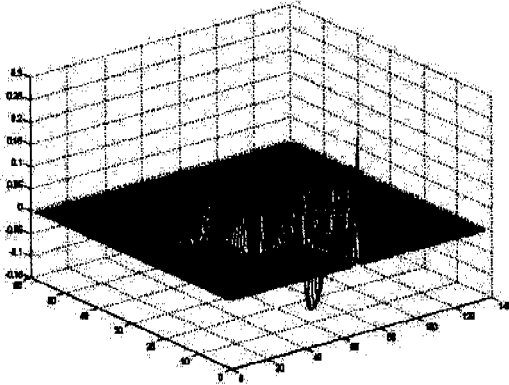


그림 4. 1600 시간스텝에서 유전체와 도체 접속면 바로 밑에서 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 $E_z(x,y,t)$ 분포

IV. 실험결과 및 분석

FR-4 기판을 이용하여 안테나들을 제작하고 실험하였다. 단일 안테나, 2소자와 4소자 배열 안테나의 접지면 크기는 143mm × 112mm, 239mm × 121mm와 403mm × 157mm이다. 안테나의 반사손실은 HP-35181E 회로망 분석기를 가지고 측정되었다.

그림 5는 스미스차트상에서 4소자 배열 안테나의 입력 임피던스의 궤적을 보여준다. 1GHz의 낮은 주파수영역에서는 유도성으로 결합되었고, 주파수가 증가하면서 용량성으로 결합하였다가 유도성으로 결합하면서 1.96GHz의 주파수에서는 완전 정합이 일어남을 볼 수 있다. 다시 주파수가 증가하면서 용량성으로 결합하고 유도성으로 결합했다가 용량성으로 결합한 후 2.64GHz에서 유도성으로 결합하는 과정을 볼 수 있다. 이와 같이 여러 번의 유도성과 용량성 결합이 스미스차트의 중심점에서 가까운 곳에서 번갈아가면서 일어나는 과정을 거쳐 광대역 동작특성을 가짐을 알 수 있다.

그림 6는 단일 안테나의 VSWR값을 보여준다. VSWR값 2이하의 대역폭은 61.8%였다. 2소자 배열 안테나의 VSWR값은 그림 7에 나타내었으며 대역폭은 57.3%였다. 4소자 배열 안테나의 경우는 그림 8에 나타내었으며 대역폭은 57.6%였다. 계산결과와 비교해보면 단일 안테나의 경우는 아주 잘 일치하

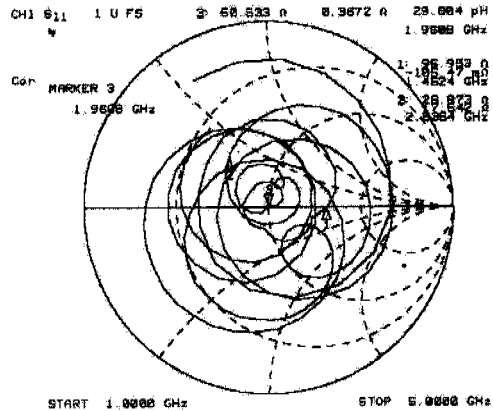


그림 5. 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 입력 임피던스값 측정

였으나 2소자, 4소자 배열 안테나의 경우는 오차가 조금 있는데 이는 배열 안테나의 경우 단일 소자간의 상호결합과 표면파 손실을 FDTD 해석방법에서 고려하지 않았기 때문이다.

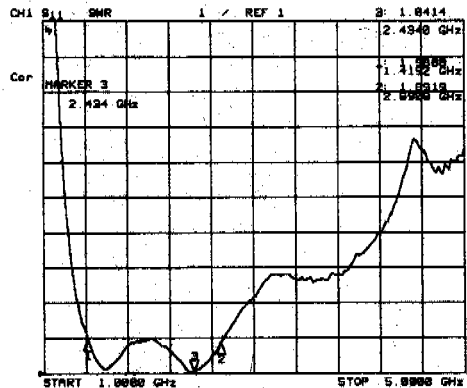


그림 6. 단일 마이크로스트립 슬롯 안테나의 VSWR값 측정

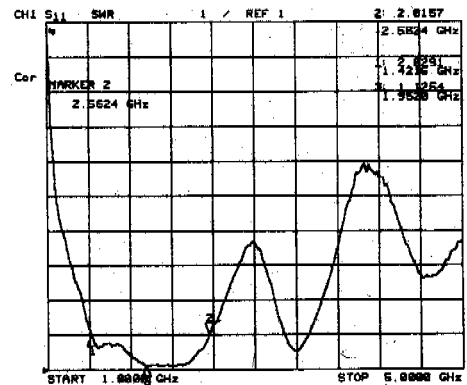


그림 7. 2소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 VSWR값 측정

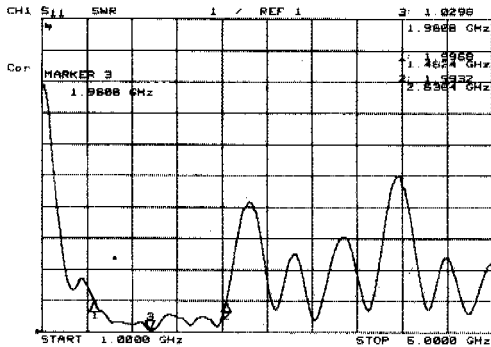


그림 8. 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 VSWR 값 측정

그림 9는 중심주파수 2.0GHz에서 측정된 단일소자 안테나의 xz면 동일편파(Co-polarization) 및 교차편파(Cross-polarization) 복사패턴을 보여준다. 단일 안테나의 -3dB 빔폭은 66°이며 이득은 2.75 dBi이고 교차편파 레벨은 -7.0 dB였다. 그림 10은 2소자 배열 안테나의 경우로써 중심주파수 2.0GHz에서 -3dB 빔폭은 45°이며 이득은 4.75 dBi이고 교차편파 레벨은 -17.5 dB였다. 그림 11에서 4소자 배열 안테나는 중심주파수 2.0GHz에서 측정된 4소자 배열 안테나의 -3dB 빔폭은 25°이며 이득은 6.92 dBi이고 교차편파 레벨은 -12.5dB였다. 배열 안테나 이론^[11,12,13]에 나와있듯이 배열소자의 갯수가 많아질수록 빔폭이 좁아지고 이득이 커져서 더 예리한 지향성 특성을 가지는 것을 볼 수 있다.

측정치의 복사패턴에서 리플이 생기는 이유는 두 가지를 생각할 수 있다. 첫째, 제작된 안테나의 접지면의 크기가 한정되어 생긴 원인으로 생각되며, 좌우특성이 완전히 일치하지 않은 것은 패턴 측정 장치에 연결된 케이블과 커넥터의 영향으로 생각된다. 둘째, 안테나 주위의 실험환경이 사방팔방으로

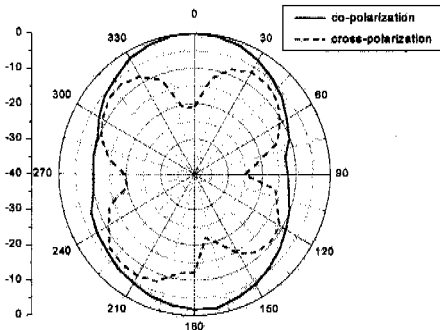


그림 9. 단일 마이크로스트립 슬롯 안테나의 xz면 복사 패턴 측정

완전히 흡수체로 둘러싸여 있지 않기 때문에 신호 반사파가 생기기 때문이다.

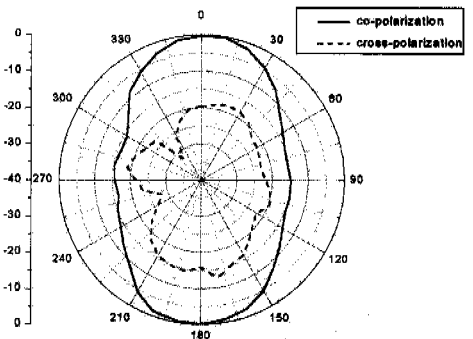


그림 10. 2소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 xz면 복사패턴 측정

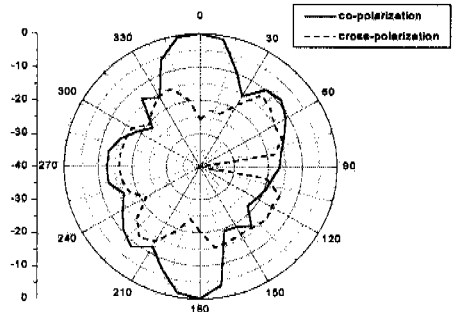


그림 11. 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 xz면 복사패턴 측정

표 1은 단일 안테나, 2소자와 4소자 배열 안테나의 계산값과 측정값의 성능을 보여준다. 우리는 이 안테나들의 VSWR값이 2.0이하일때의 대역폭값들이 거의 같다는 것을 볼 수 있지만 소자의 갯수가 증가하면 증가할 수록 안테나의 이득은 커진다는 것을 볼 수 있다.

표 1. 단일 안테나, 2소자, 4소자 마이크로스트립 슬롯 배열 안테나의 성능 비교

| Type of antenna | Frequency (GHz) | | BW (%) | | -3 dB 빔폭 (°) | |
|-----------------|-----------------|-------------|--------|------|--------------|-----|
| | Cal | Mea | Cal | Mea | Cal | Mea |
| One-element | 1.42 ~ 2.74 | 1.42 ~ 2.69 | 63.5 | 61.8 | 70 | 66 |
| Two-element | 1.48 ~ 2.54 | 1.42 ~ 2.56 | 52.7 | 57.3 | 46 | 45 |
| Four-element | 1.59 ~ 2.64 | 1.46 ~ 2.64 | 49.6 | 57.6 | 21 | 25 |

* Cal : Calculated, Mea : Measured

또한 대규모의 전자파무반사실에서 실험할 수 있으면 리플이 제거되면서 더욱 이득이 커지리라 생각된다.

V. 결론

본 논문에서 FDTD방법을 이용한 광대역 마이크로스트립 안테나의 계산결과를 나타내었다. 이 계산결과를 토대로 최대 대역폭을 가진 안테나들이 제작되고 측정되었다. 단일 안테나는 거의 정확하게 FDTD 계산결과와 측정결과가 일치하였고 2소자, 4소자 배열 안테나의 계산결과는 측정결과에 비해 조금 오차가 있는데 이는 배열 안테나의 경우 단일 안테나간의 상호결합과 표면파 손실을 FDTD방법에서 고려하지 않았기 때문이다. 단일 안테나, 2소자, 4소자 배열 안테나의 VSWR값이 2.0이하일 때를 기준으로 한 측정된 대역폭은 각각 61.8%, 57.3%와 57.6%이다. 단일 안테나, 2소자, 4소자 배열 안테나의 측정된 -3dB빔폭은 각각 약 66°, 45°와 25°이다. 실제로 표 1에서 우리는 단일 안테나, 2소자, 4소자 배열 안테나의 이득이 각각 2.75 dBi, 4.75 dBi와 6.92 dBi임을 볼 수 있다. 따라서 소자의 갯수를 늘림으로써 이득을 더 키울수 있음을 알 수 있다. 또한 최근에 와서 안테나의 중요한 특성이 되고 있는 교차편파레벨도 단일 안테나가 -7.0dB인데 반해 4소자 배열 안테나의 경우는 -12.5dB였으므로 성능이 훨씬 더 개선됐음을 알 수 있다.

본 4소자 배열 안테나는 소형, 경량이고 적은 비용, 제작의 용이와 반도체 소자와 쉽게 집적화할 수 있을뿐만 아니라 광대역이고 이득이 높고 빔폭이 좁으며 교차편파가 작으므로 IMT-2000, PCS, 이동통신, WLL, 광대역 통신시스템 등에 응용될 수 있으리라 생각된다.

참고 문헌

[1] J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antenna*, Peter Peregrines, London, 1989.
 [2] S. H. David, "A survey of broadband microstrip patch antennas," *Microwave J.*, pp. 60-84, Sept. 1996.
 [3] P. B. Katehi, N. G. Alexopoulos, and I. Y. Hsia, "A bandwidth enhancement method for microstrip antennas," *IEEE Trans. Antennas*

and Propagat., vol. 35, pp. 5-12, Jan. 1987.
 [4] M. Kahrizi, T. K. Sarkar and Z. H. Maricevic, "Analysis of a wide radiating slot in the ground plane of a microstrip ling," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. 41, pp. 29-37, Jan. 1993.
 [5] Y. Yoshimura, "A microstrip slot antenna," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 20, pp.760-762, Nov. 1972.
 [6] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, *The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics*, CRC Press, Inc, 1993.
 [7] Allen Taflove, *Computational Electrodynamics*, Artech House, 1995.
 [8] Allen Taflove, *Advances In Computational Electrodynamics*, Artech House, 1998.
 [9] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite difference approximation of the time domain electromagnetic field equations," *IEEE Trnas. Electromagn. Compat.*, vol. 23, pp. 377-382, Nov. 1981.
 [10] 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. MTT-23, pp. 623-630, 1975
 [11] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, *Microstrip Antennas*, IEEE PRESS, 1995.
 [12] J. F. Zurcher and F. E. Gardiol, *Broadband Patch Antennas*, Artech House, 1995
 [13] H. F. Lee and W. Chen, *Advances in Microstrip and Printed Antennas*, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, 1997

신 호 섭(Ho-Sub Shin)



1995년 8월 : 충북대학교
정보통신공학과 졸업
(공학사).
1998년 2월 : 충북대학교
정보통신공학과 졸업
(공학석사).

1998년 9월~현재 : 충북대학교 정보통신공학과
박사과정.
<주관심 분야> 전자파 해석, 안테나 설계, 전파전파,
EMI/EMC

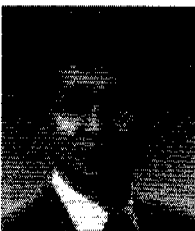
김 남(Nam Kim)



1981년 2월 : 연세대학교
전자공학과 졸업(공학사)
1983년 2월 : 연세대학교 대학원
전자공학과 졸업
(공학석사)
1988년 8월 : 연세대학교 대학원
전자공학과 졸업
(공학박사)

1992년 8월~1993년 8월 : 미 Stanford 대학방문교수
1989년 2월~현재 : 충북대학교 정보통신공학과 교수
<주관심 분야> 전자파 해석, 전파전파, EMI/EMC,
DS/CDMA

장 옹 웅(Yong-Woong Jang)



1989년 2월 : 명지대학교 전자
공학과 졸업(공학사)
1991년 8월 : 명지대학교
전자공학과 졸업
(공학석사)
1999년 2월 : 아주대학교
전자공학과 졸업
(공학박사)

1994년 3월~현재 : 극동정보대학 조교수
<주관심 분야> 안테나 해석 및 설계, 초고주파 회로
설계