

폭이 좁아진 주 패치와 U자 형태의 기생 패치를 이용한 소형화된 광대역 기생 패치 안테나 설계

Design of Miniaturized Broadband Parasitic Patch Antenna Using Reduced Size Main Patch with U-Shaped Parasitic Patches

위상혁 · 김우태 · 홍영표 · 육재림* · 육종관

Sang-Hyuk Wi · Woo-Tae Kim · Young-Pyo Hong · Jai-Rim Yuk* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문은 크기가 소형화된 광대역 기생 패치 안테나를 제안한다. 폭이 좁아진 주 패치의 두 방사 모서리부에 U자 형태의 기생 패치를 설계하여 안테나 전체 크기를 감소시키고, 주 패치와 기생 패치 사이의 E-plane 및 H-plane을 통한 electromagnetic coupling에 의해 광대역 특성을 얻는다. 안테나 방사 소자들의 전체 크기는 $18 \times 17.6 \text{ mm}^2$ 이고, 접지면과 유전체를 포함한 전체 크기는 $25 \times 30 \times 4 \text{ mm}^3$ 이다. 설계된 안테나는 FR4 유전체를 이용해 제작하였으며, 5.12 GHz와 6.08 GHz의 공진 주파수와 5.5 GHz 중심 주파수를 기준으로 27.3 % (1.5 GHz)의 대역폭을 갖는다. 측정된 안테나의 방사 패턴은 일반적인 마이크로스트립 패치 안테나와 유사하다.

Abstract

This paper proposes miniaturized broadband parasitic patch antenna. The proposed antenna consists of a probe fed reduced size main patch and U-shaped parasitic patches. The parasitic patches are incorporated to the radiating edges of the main patch to miniaturize the antenna size. The broadband impedance matching can be achieved by either E-plane or H-plane electromagnetic coupling between main patch and parasitic elements. The size of radiating elements is $18 \times 17.6 \text{ mm}^2$ and the overall dimension of designed antenna with substrate and ground plane is $25 \times 30 \times 4 \text{ mm}^3$. The fabricated antenna on a FR4 substrate shows two resonant frequencies (5.12 GHz and 6.08 GHz) with 27.3 % (1.5 GHz) fractional bandwidth at 5.5 GHz center frequency. The calculated and measured radiation patterns are almost similar to conventional patch antenna.

Key words : Broadband Parasitic Patch Antenna, Reduced Size Rectangular Patch, U-Shaped Parasitic Patches

I. 서 론

정보통신 기술의 놀라운 발전은 이동통신과 같은 무선통신의 영역을 기존의 음성뿐만 아니라 인터넷 등의 데이터 전송을 위한 광대역 고속 통신으로 확대시키고 있다. 이러한 기술적 발전을 이루기 위해서는 광대역 소형 안테나를 이용한 이동공간 또는

이동국과 기지국간의 원활한 신호 전송이 이루어져야 한다. 마이크로스트립 안테나는 평면 구조이며 작고 가벼우면서 경제적이기 때문에 주목을 받는 안테나 구조이다. 그러나 그 대역폭이 협소하다는 단점을 가지고 있기 때문에 그 대역폭을 확장하기 위한 많은 연구들이 진행 중이다. 일반적으로 잘 알려진 마이크로스트립 안테나의 광대역화 기술에는 유

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2005-C1090-0502-0012).」
연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

*정보통신부 성남우편집중국(Sung-nam Mail Center, Ministry of Information and Communication)

· 논문 번호 : 20061220-158

· 수정완료일자 : 2007년 3월 20일

전율이 낮은 기판을 사용하는 경우^[1], 유전체의 두께를 두껍게 하는 경우^[1], 광대역 매칭 기법을 이용하는 경우^[2], 기생 패치를 사용하거나^{[3],[4]} 적층 구조를 이용하는 방법^{[5],[6]}, 슬롯 안테나 구조의 이용^[7] 등이 있다.

본 논문에서는 U자 형태의 기생소자를 이용한 광대역 마이크로스트립 패치 안테나를 제안한다. 일반적인 기생 패치 안테나는 광대역 특성을 가지고 있지만, 주 패치와 크기가 유사한 기생 패치를 방사 모서리(E-plane coupling) 혹은 비방사 모서리(H-plane coupling)에 일정한 간격을 두고 위치시키기 때문에^{[3],[4]} 그 크기가 매우 커져 소형 무선 통신 시스템으로의 적용에 문제가 발생한다. 하지만, 제안된 안테나는 주 패치의 폭을 줄이고, U자 형태의 구조적 장점을 기생 패치에 이용하였기 때문에, 일반적인 기생 패치 안테나보다 작은 크기로 광대역 특성을 만족시킬 수 있다. 제안된 안테나의 설계 및 제작에는 유전율이 4.3이고, 높이가 4 mm인 FR4 유전체를 이용하였다.

II. 안테나 설계 및 모의실험

그림 1은 제안된 안테나의 구조를 보여준다. 안테나는 폭이 좁아진 형태의 직사각형 주 패치와 그 방사 모서리에 위치한 두 개의 기생 패치로 구성된다. 일반적인 사각형 패치 안테나는 폭과 길이가 유사하지만, 제안된 안테나는 폭(W_M)과 길이(L_M)가 다른 직사각형 형태를 갖고 있다. 이는 안테나의 고유 공진 길이를 최대한 유지하면서 기생 패치를 이용한 안테나의 특성 변화를 용이하게 하기 위함이다. 광대역 특성을 얻기 위해 이용한 U자 형태의 기생소자들은 그 구조적 장점 때문에 주 패치와 E-plane(방사 모서리) 및 H-plane(비방사 모서리) 모두를 통한 coupling을 이룰 수 있다. 기생소자를 통한 coupling 길이는 L_P 와 W_P 의 값을 통해 기생소자의 전체 길이 a 를 조정함으로써 이룰 수 있고, coupling의 세기는 주 패치와 기생 패치간의 간격 H 와 V 를 이용해 변화시킬 수 있다.

제안된 안테나는 5~6 GHz의 대역을 만족하도록 설계하였으며, 주 패치의 길이(L_M)와 동일한 폭과 길이를 갖는 정사각형 패치를 설계하여 그 결과를 비

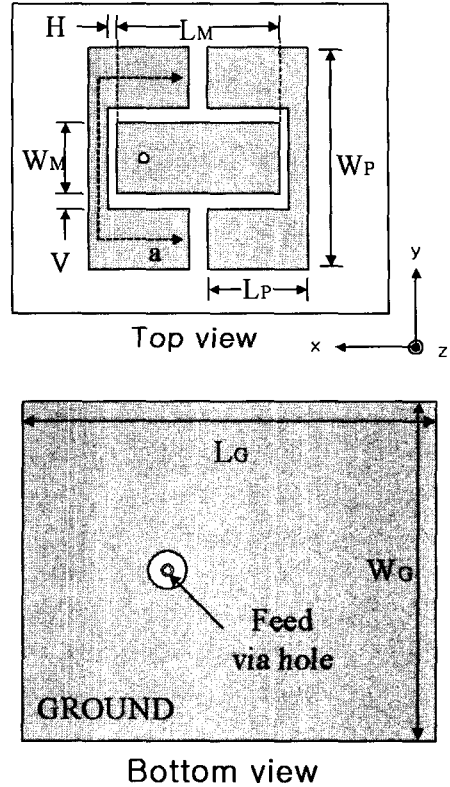


그림 1. 제안된 안테나의 구조
Fig. 1. Geometry of the proposed antenna.

교하였다. 먼저, 폭(W_M)과 길이(L_M)가 각각 13.1 mm (약 $\lambda_g/2$)인 주 패치를 설계하고, 주 패치의 왼쪽 방사 모서리로부터 약 2.2 mm 떨어진 지점에 안테나의 급전을 위치시켜 임피던스 정합을 이룬 후, 안테나의 폭을 감소시켜 그 길이가 5.8 mm(약 $\lambda_g/4$)가 되게 하였다. 여기에서 λ_g 는 5.5 GHz에서의 관내 파장 길이를 나타낸다. 폭이 좁아진 주 패치에 일반적인 기생 패치를 U자 형태로 변형시킨 후 주 패치의 방사 모서리 부에 위치시킨다. 기생 패치의 전체 길이 a 는 약 $1 \lambda_g$ 이다. U자 형태 기생 패치의 넓이 W_P 는 18 mm, L_P 는 8 mm이고, 주 패치와의 간격 H 는 0.7 mm, V 는 1.2 mm이다. 방사 소자의 전체 크기는 $18 \times 17.6 \text{ mm}^2$ 이고, 유전체와 접지면을 포함한 안테나 전체 크기는 $25(W_G) \times 30(L_G) \times 4 \text{ mm}^3$ 이다. 안테나는 probe 급전 형태를 이용하는데, via의 반지름은 0.4 mm이고 그 길이는 4 mm이다. 제안된 안테나의 결과를 비교하기 위해 설계한 정사각형 패치 안테나의 길이와 폭은 모두 13.1 mm로 주 패치의 길이와 동일

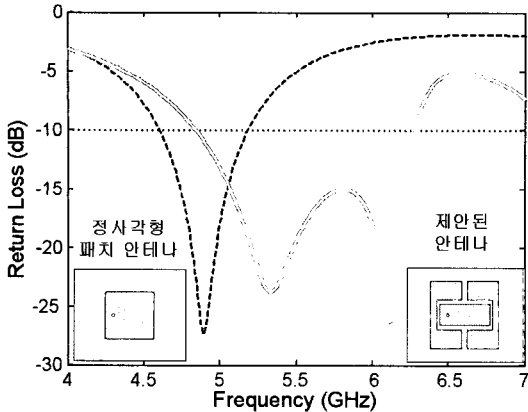


그림 2. 정사각형 안테나와 제안된 안테나 모의실험 결과
 Fig. 2. Calculated results of the square patch antenna and proposed antenna.

하며, 안테나 급전의 위치 및 사용된 via 정보도 동일하다. 설계된 안테나들은 3차원 full-wave electro magnetic 해석 프로그램인 HFSS를 이용하여 모의실험하였다. 그림 2는 제안된 안테나와 정사각형 마이크로스트립 패치 안테나의 모의실험 결과를 보여준다. 설계된 정사각형 패치 안테나는 4.9 GHz의 공진 주파수를 갖고 있으며, 그 대역폭은 11.4 % (560 MHz)이다. 반면에 제안된 안테나는 5.32 GHz와 6.11 GHz의 이웃한 두 공진 주파수를 가지고 있으며 26.2 % (1.44 GHz)의 대역폭을 갖고 있으며, 5 GHz 대역 전체에서 동작할 수 있다. 제안된 안테나는 사각형 패치 안테나의 줄어든 넓이 때문에 정사각형 안테나보다 높은 주파수 영역에서 공진 주파수 및 동작 대역폭 특성을 나타냈지만, 반사 손실이 -10 dB 이하로 떨어지는 동작 주파수는 근접해 있으며, 전체 대역폭은 두 배가 넘는 것을 확인할 수 있다.

무선통신기기의 소형화와 함께 안테나 유전체와 접지면의 크기 또한 중요한 설계 파라미터가 되었다. 이는 안테나 접지면의 크기가 일정 크기보다 작아지면 안테나 공진 특성에 영향을 미치고, 유전체 크기의 변화는 전체 유효유전율을 변화시켜 공진 주파수 및 안테나 대역폭에 영향을 주기 때문이다. 본 논문에서는 W_G 와 L_G 가 각각 25 mm와 30 mm인 접지면과 유전체를 이용하였는데, 그림 3에서 보는 바와 같이 접지면과 유전체의 크기가 $25 \times 30 \text{ mm}^2$ 보다 작아지면

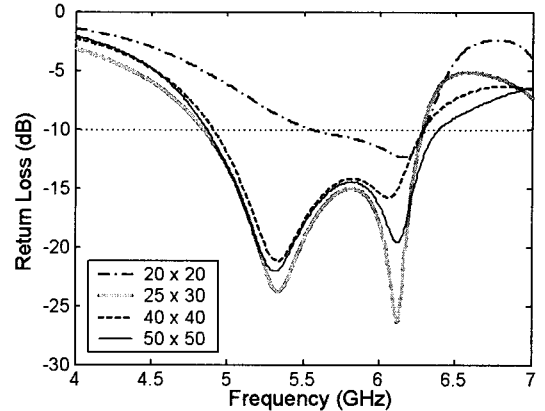


그림 3. 접지면과 유전체 크기에 따른 안테나 반사 손실 특성 ($W_G \times L_G \text{ mm}^2$)
 Fig. 3. Return loss characteristics for the various ground and substrate sizes ($W_G \times L_G \text{ mm}^2$).

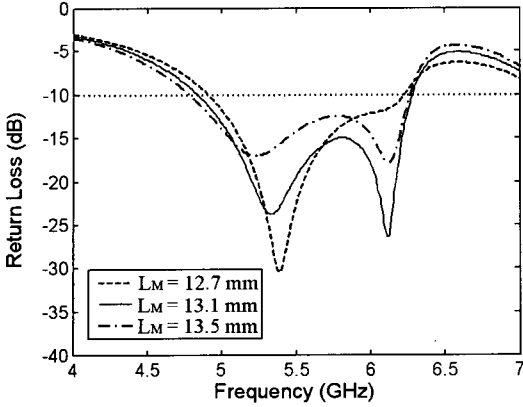
안테나의 공진 특성에 많은 변화가 나타나기 때문이다.

III. 설계 파라미터를 이용한 안테나 특성 분석

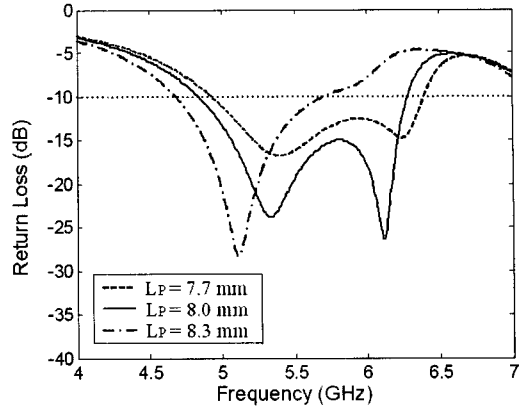
제안된 안테나의 공진 특성을 분석하기 위하여 주 패치의 길이, 기생 패치의 길이, 주 패치와 기생 패치 간의 간격 등의 안테나 설계 파라미터를 변화시키면서 모의실험하였다.

3-1 주 패치 길이에 따른 특성 변화

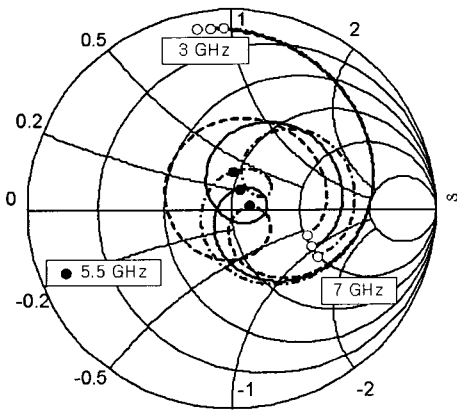
일반적으로, 기생 패치 안테나의 주 패치 길이는 공진 주파수와 밀접한 관계를 갖는다. 그림 4는 주 패치의 폭은 고정시킨 상태에서 길이 L_M 을 12.7 mm부터 13.5 mm까지 변화시켰을 때의 반사 손실 특성을 보여준다. 모의실험에서 L_M 의 길이 외에 다른 설계 파라미터들은 일정하다. 즉, 주 패치와 기생 패치 사이의 간격 H 와 V , 그리고, 두 U자 형태의 기생 패치의 크기는 II장에서 제시한 것과 같다. 그림 4(a)와 (b)를 보면, L_M 의 길이가 길어짐에 따라 반사 손실 그래프에서 첫 번째 공진 주파수는 점점 낮아지고 두 번째 공진 주파수에서의 임피던스 정합 특성이 나빠짐을 볼 수 있으며, 스미스 도표에서 안테나의 특성곡선은 인덕턴스 영역으로 이동함을 볼 수 있다. 이는 주 패치의 길이 증가에 따른 전체 인덕턴스 증가가 많은 영향을 주기 때문이다. 제안된 안테



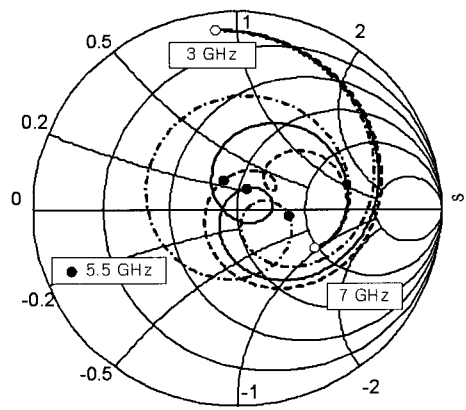
(a) 반사 손실
(a) Return loss



(a) 반사 손실
(a) Return loss



(b) 스미스 도표
(b) Smith chart



(b) 스미스 도표
(b) Smith chart

그림 4. 주 패치 길이 변화에 따른 안테나 특성
Fig. 4. Calculated antenna characteristics for various main patch lengths.

그림 5. 기생 패치 전체 길이 변화에 따른 안테나 특성
Fig. 5. Calculated antenna characteristics for various lengths of the parasitic patch.

나의 주 패치의 길이는 첫 번째 공진 주파수와 두 번째 공진 주파수에서의 임피던스 정합과 밀접한 관계를 가지며, 주 패치의 길이 조절을 통해 안테나의 첫 번째 공진 주파수를 조절할 수 있다.

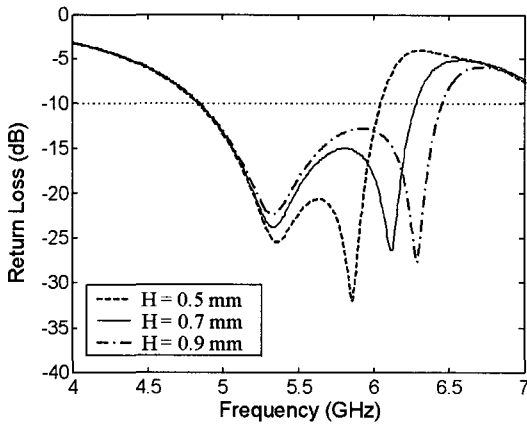
3-2 기생 패치 전체 길이에 따른 특성 변화

기생 패치 전체 길이의 영향을 살펴보기 위해 L_p 의 값을 7.7 mm부터 8.3 mm까지 변화시켜가며 안테나의 특성 변화를 살펴보았다. L_p 를 제외한 모든 설계 파라미터는 II장에서 제시한 것과 같다. 그림 5(a)의 반사 손실 그래프를 통해, L_p 의 값이 증가할수록 안테나의 두 공진 주파수는 낮아지며, 두 번째 공진 주

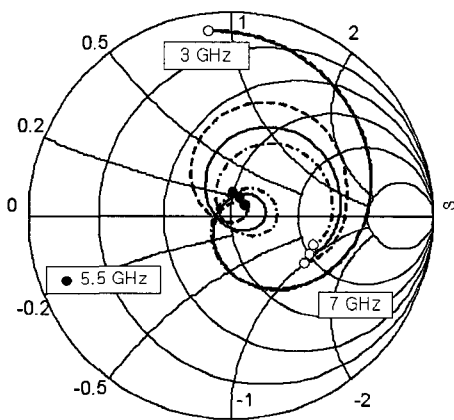
파수의 정합 특성이 나빠짐을 볼 수 있다. 그림 5(b)의 스미스 도표에서는 안테나 특성 곡선이 커패시턴스 영역으로 이동한다. 이는 U자 형태의 기생 패치가 길어질수록 주 패치와의 H-plane coupling 길이가 길어지기 때문에 나타나는 현상으로, 위 결과를 통해 기생 패치의 전체 길이는 두 공진 주파수의 변화와 임피던스 정합에 영향을 줄 수 있다.

3-3 주 패치와 기생 패치 사이의 간격

제한된 안테나의 기생 패치는 주 패치와의 electromagnetic coupling을 통해 여기된다. 그러므로, U자 형태의 기생 패치와 주 패치간의 간격 H 와 V 는 제한



(a) 반사 손실
(a) Return loss

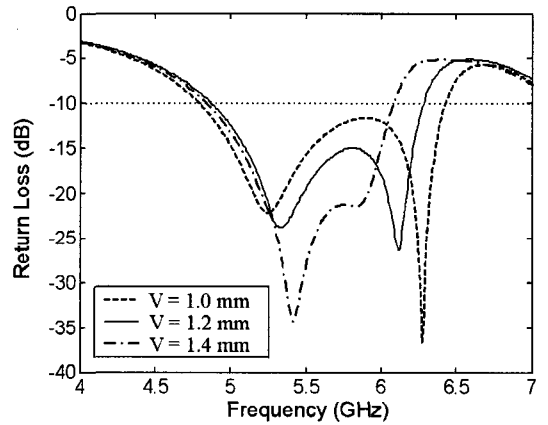


(b) 스미스 도표
(b) Smith chart

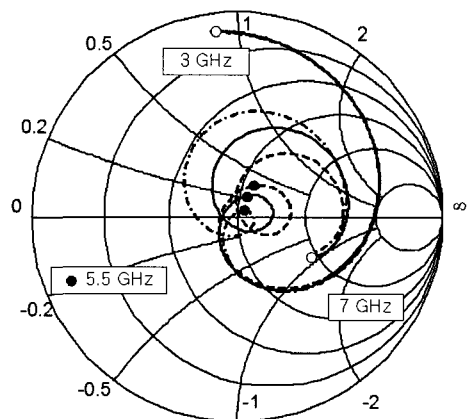
그림 6. H 의 변화에 따른 안테나 특성
Fig. 6. Calculated antenna characteristics for various H widths.

된 안테나의 광대역 특성과 밀접한 관계를 갖는다. 그림 6(a)와 (b)는 H 의 변화에 따른 안테나 특성을 보여준다. 모의실험에서 H 를 제외한 나머지 설계 파라미터들은 II장에서 제시한 값과 동일하다. 반사 손실 그래프에서는 H 가 증가함에 따라 두 번째 공진 주파수는 높은 공진 주파수 쪽으로 이동하고, 스미스 도표상에서 중심 부분의 임피던스 궤적이 점점 커짐을 볼 수 있다. 모의실험 결과를 통해 H 는 제안된 안테나의 두 번째 공진 주파수의 변화에 밀접히 관계하고, 각 주파수에서 임피던스 정합에 주는 영향은 크지 않다. 즉 E-plane coupling의 크기를 이용하여 안테나의 전체 대역폭을 조절할 수 있다.

그림 7(a)와 (b)는 V 가 1.0 mm부터 1.4 mm까지 변화할 때의 안테나 공진 특성을 나타낸다. V 의 값이 증가할수록 첫 번째 공진 주파수는 조금씩 높은 주파수 영역으로 이동하고, 두 번째 공진 주파수는 낮은 주파수 쪽으로 이동함을 볼 수 있다. 또한, 스미스 도표를 통해 주 패치의 비 방사 모서리와 기생 패치 간의 coupling 감소가 임피던스 그래프의 중심 부분을 작게 만든다는 것을 알 수 있다. 즉, 두 패치 사이의 간격이 너무 크면, 안테나의 두 공진 주파수가 너무 가까워져 결과적으로는 대역폭이 좁아지는 결과를 가져오게 된다. 반대로, 간격이 너무 좁아지게 되면 두 공진 주파수 사이의 간격이 멀어지기 때문



(a) 반사 손실
(a) Return loss



(b) 스미스 도표
(b) Smith chart

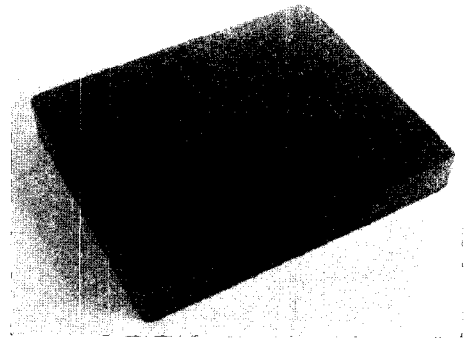
그림 7. V 의 변화에 따른 안테나 특성
Fig. 7. Calculated antenna characteristics for various V widths.

에 이중 대역 특성을 갖게 되므로, V 를 이용하여 H-plane coupling을 적절하게 조절하여야 한다. 즉, H-plane coupling도 안테나의 두 공진 주파수에서의 임피던스 정합보다는 안테나의 공진 주파수 변화를 이용한 대역폭 증감에 관련됨을 볼 수 있다.

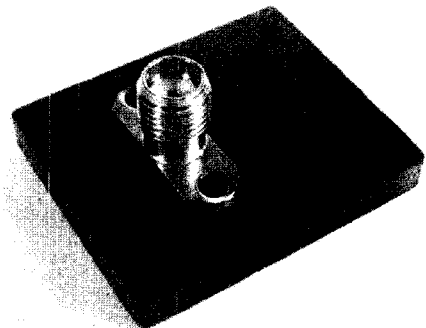
IV. 안테나 제작 및 측정

설계된 안테나를 유전율이 4.3인 FR4 유전체 기판을 이용하여 제작하였다. 그림 8(a)와 (b)는 각각 제작된 안테나를 위에서 본 모습과 아래에서 본 모습을 보여준다. 제작된 안테나의 측정은 Vector Network Analyser와 Anechoic Chamber를 이용하였으며, 그림 9에 안테나 반사 손실의 측정 결과를 나타냈다. 그림 9에서 볼 수 있듯이, 제작된 안테나는 모의실험보다 약간 낮은 5.12 GHz와 6.08 GHz의 공진 주파수를 보였으며, 그 대역폭은 4.78~6.28 GHz로 약 1.5 GHz(27.3 %)다. 제안된 안테나는 5 GHz부터 6 GHz까지 1 GHz 대역을 충분히 만족시킴을 볼 수 있다.

그림 10(a)와 (b)는 첫 번째 공진 주파수에서의 XZ면과 YZ면의 방사 특성을 나타내고, (c)와 (d)는 두 번째 공진 주파수에서의 XZ면과 YZ면의 방사 특성을 보여준다. 각각의 그림에서 굵은 회색빛 실선은 co-polarization을, 상대적으로 가는 검은색 실선은 cross-polarization을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 공진 주파수에서 방사 패턴은 일반적인 마이크로 스트립 안테나와 유사한 broadside 방사 패턴 형태를 갖고 있음을 볼 수 있으며, 상대적으로 낮은 cross-polarization 레벨을 갖고 있다. 그림 10(a)와 (c)에서 시계 반대 방향으로의 지향성은 안테나의 급전이 정확하게 안테나의 중심부에서 이루어지지 않았기 때문이다. 즉, X축과 Y축을 기준으로 봤을 때, 안테나의 급전이 X축을 기준으로는 대칭이지만, Y축을 기준으로 했을 때는 비대칭이기 때문에 안테나의 두 방사모서리 및 기생 패치간의 위상차로 인해 약간의 지향성이 발생하게 된다. 또한, 두 번째 공진 주파수에서 YZ면의 cross-polarization 크기가 첫 번째 공진 주파수에서 보다 큰 이유는 기생 패치 중앙 부분에서의 Y축 방향 전류 성분 때문이다. 안테나의 이득은 첫 번째 공진 주파수에서는 6.4 dB, 두 번째 공진 주파수에서는 5.2 dB로 특성을 비교하기 위해 II장에서



(a) 윗면
(a) Top view



(b) 아랫면
(b) Bottom view

그림 8. 제작된 안테나
Fig. 8. Fabricated antenna.

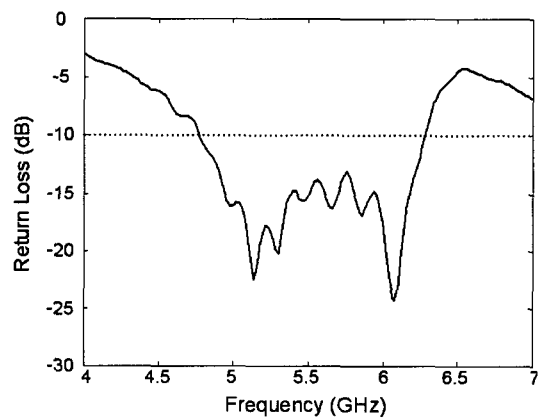


그림 9. 제작된 안테나의 측정 결과
Fig. 9. Measured result of the fabricated antenna.

설계된 정사각형 패치안테나의 공진 주파수에서의 모의실험 결과 이득 5.86 dB와 유사하다.

폭이 좁아진 주 패치와 U자 형태의 기생 패치를 이용한 소형화된 광대역 기생 패치 안테나 설계

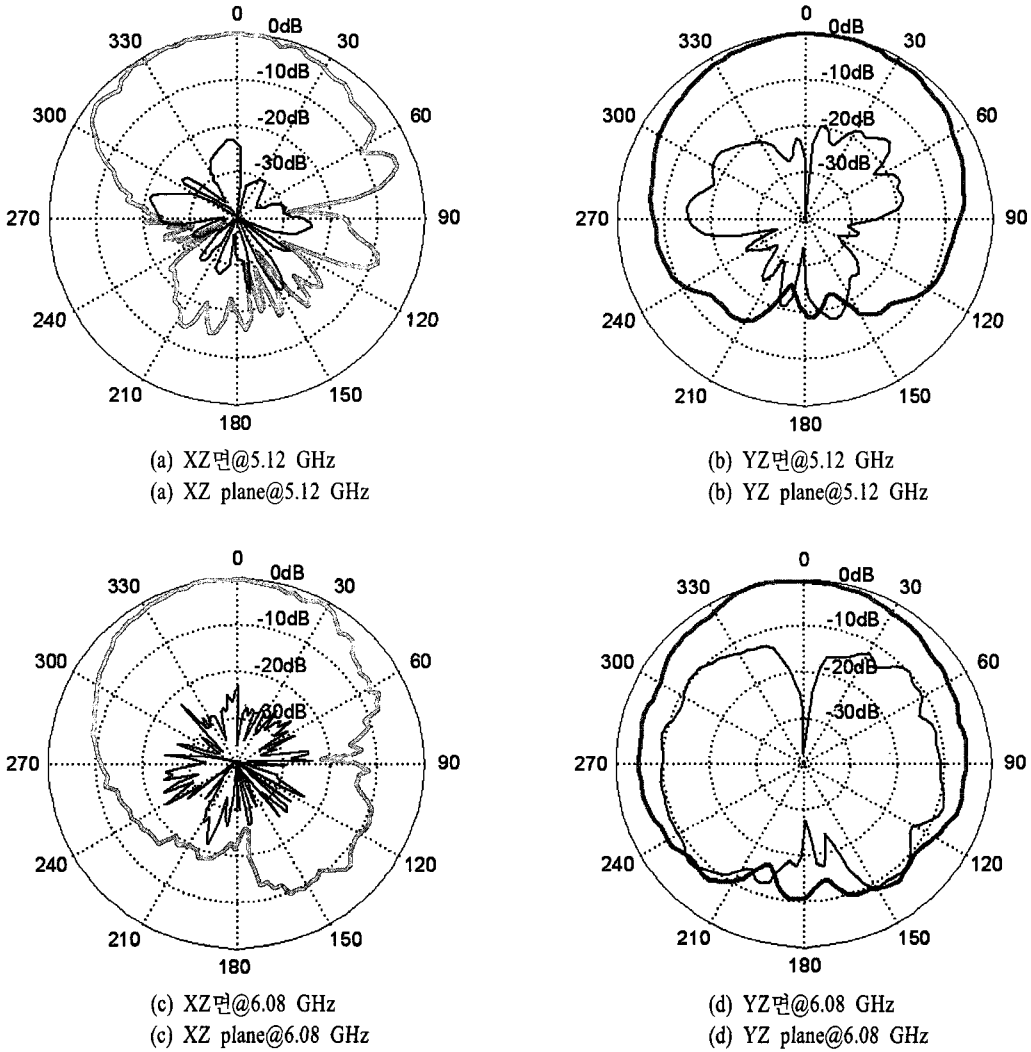


그림 10. 제작된 안테나의 방사 특성
Fig. 10. Measured radiation patterns.

V. 결 론

본 논문에서는 일반적인 기생 패치 안테나보다 크기는 소형이면서 광대역 특성을 갖는 마이크로스트립 기생 패치 안테나를 구현하기 위해 폭이 좁아진 주 패치와 U자 형태의 기생 패치를 이용하였다. U자 형태의 기생 패치들은 주 패치의 방사 모서리에 위치하고 주 패치와 electromagnetic coupling을 이용하여 여기된다. 설계 파라미터를 이용한 안테나의 분석을 통해, 주 패치와 기생 패치의 길이는 공진 주파수 결정과 각 공진 주파수에서의 임피던스 정합에 중요한 설계 파라미터이며 주 패치와 기생 패치 사이

의 E-plane 및 H-plane coupling은 안테나의 광대역 특성과 밀접한 관계를 갖는다는 것을 확인하였다. FR4 유전체를 이용해 제작한 안테나는 모의실험 결과와 유사한 공진 특성을 보였으며, 5~6 GHz 대역에서 충분히 이용할 수 있다. 두 공진 주파수에서 안테나의 방사특성은 일반적인 마이크로스트립 패치 안테나와 유사한 broadside 방사 패턴 형태를 갖고 낮은 cross-polarization 레벨 특성을 나타냈다.

참 고 문 헌

[1] D. H. Schaubert, D. M. Pozar, and A. Adrian,

- "Effect of microstrip antenna substrate thickness and permittivity: comparison of theories and experiment", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-37, pp. 677-682, Jun. 1989.
- [2] H. F. Pues, Antioine R. Van De Capelle, "An impedance-matching technique for increasing the bandwidth of microstrip antennas", *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, vol. AP-37, no. 11, pp. 1345-1354, Nov. 1989.
- [3] Girish Kumar, Kuldip C. Gupta, "Broad-band microstrip antennas using additional resonators gap-coupled to the radiating edges", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-32, no. 12, pp. 1375-1379, Dec. 1984.
- [4] Girish Kumar, Kuldip C. Gupta, "Nonradiating edges and four edges gap-coupled multiple resonator broad-band microstrip antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-33, no. 2, pp. 173-178, Feb. 1985.
- [5] Frederic Crop, David M. Pozar, "Millimeter-wave design of wide-band aperture-coupled stacked microstrip antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagation*, vol. 39, no. 12, pp. 1770-1776, Dec. 1991.
- [6] Sang-Hyuk Wi, Young-Bin Sun, In-Sang Song, Sung-Hoon Choa, Il-Suek Koh, Yong-Shik Lee, and Jong-Gwan Yook, "Package-level integrated antennas based on LTCC technology", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 8, pp. 2190-2197, Aug. 2006.
- [7] Sang-Hyuk Wi, Jung-Min Kim, and Jong-Gwan Yook, "Microstrip-fed bow-tie-shaped meander slot antenna with compact and broadband characteristics", *Microwave and Optical Technological Letters*, vol. 45, no. 1, pp. 88-90, Apr. 2005.

위 상 혁



2001년 2월: 여수대학교 전자통신 공학과 (공학사)
 2001년 9월~2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2003년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 및 초고주파

회로설계

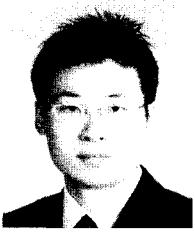
김 우 태



2001년 8월: 연세대학교 전기전자 공학과 (공학사)
 2001년 9월~2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2003년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 수치해

석, Isotropic dispersion FDTD algorithm

홍 영 표



동 소자 및 시스템

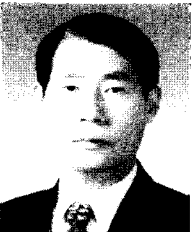
2003년 2월: 한밭대학교 정보통신 공학과 (공학사)
 2003년 3월~2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2005년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 수동/능

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년: University of Michigan 전기전자공학과 (공학박사)
 1997년 1월~1998년 10월: University of Michigan Research Fellow
 1998년 11월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
 1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
 2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 부교수
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템, 안테나, 수치해석, RF MEMS, EMI/EMC

육 재 림



1985년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 1987년 7월: 연세대학교 공학대학원 전자공학전공 (공학석사)
 2000년 12월: 국방대학교 안보정책과정 수료
 2002년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 1970년 6월~1993년 8월: 정보통신부 전파연구소
 1993년 9월~1999년 12월: 정보통신부 전파관리국
 2001년 4월~2005년 10월: 정보통신부 전파연구소 전파환경연구과장
 2005년 11월~현재: 정보통신부 성남우편집중국장
 [주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 전리층, 주파수관리 및 전파감시, EMC