

단일 급전 원형 편파 마이크로스트립 안테나 설계

Design of Singly Fed Microstrip Antennas Having Circular Polarization

오세창* · 전중창** · 박위상*

Se Chang Oh* · Joong Chang Chun** · Wee Sang Park*

요 약

본 논문에서는 X 밴드 주파수에서 단일 마이크로스트립 선로 급전방식을 갖는 원형 편파 개구면-패치 안테나(aperture-patch antenna) 및 환 구조 안테나(ring antenna)를 설계, 제작하여 특성을 측정하였다. 개구면-패치 안테나는 동작 대역폭이 매우 넓으며, 환 구조 안테나는 크기가 작아서 대형 배열안테나의 기본 복사소자로 적합하다. 이 두 종류의 안테나에 대하여 VSWR 대역폭과 원형편파 축비(axial ratio)를 개선하기 위한 여러 가지 설계 파라미터의 영향을 분석하였다. 개구면과 환 복사소자는 공진기 모델(cavity model)에 근거하여 초기 설계를 하였으며, 원형편파를 발생시키기 위한 개구면 내부의 패치와 환 내부의 스텐브(stub)는 Ensemble 소프트웨어를 사용하여 최적화 하였다. 제작된 안테나는 개구면-패치 안테나의 경우 25 %의 VSWR 대역폭(3 dB 기준)과 1.2 dB의 최소 축비를 가지며, 환 구조 안테나에서는 6.7 %의 VSWR 대역폭과 1.6 dB의 최소 축비를 가진다.

ABSTRACT

In this paper, a microstrip aperture-patch antenna and a microstrip ring antenna, which have single microstrip line feeding systems for the circular polarization, are designed, and experimental results are presented at X-band. The microstrip aperture-patch antenna is characterized by its wide operating frequency range, and the microstrip ring antenna is suitable for a basic radiator in the large array antenna due to its small size. Several design parameters for these antennas are considered and analyzed to improve antenna characteristics such as VSWR bandwidth and axial ratio. Initially, the sizes of the aperture and ring radiator are determined on a basis of the cavity model, then shapes of the patch within the aperture and the inner stub of the ring are optimized using Ensemble software. Measurement results show that the aperture-patch antenna has 25 % of VSWR bandwidth and 1.2 dB of axial ratio at the boresight, and the ring antenna has 6.7 % of VSWR bandwidth and 1.6 dB of axial ratio at the boresight.

* 포항공과대학교 전자전기공학과, 전자파특화연구센터(Microwave Application Research Center, Department of Electronic and Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

** 위덕대학교 정보통신공학과(Department of Communications Engineering, Uiduk University)

· 논문 번호 : 990112-003

· 수정완료일자 : 1999년 7월 2일

I. 서 론

원형 편파 안테나는 위성과 지상간 또는 우주선 등과 같은 극성변환이 우려되는 통신 환경에서 우수한 전송 특성을 가지고 있으므로, 안테나의 원형 편파 구현을 위해 많은 연구가 진행되어 왔다^{[1]~[7]}. 최근에 들어서는 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 기반의 송수신 모듈이 성공적으로 구현됨에 따라 이러한 능동 소자와 함께 집적화가 용이한 평면형 복사 소자인 마이크로스트립 안테나에 대한 연구가 급증하고 있다. 마이크로스트립 안테나를 이용한 원형 편파의 구현 방법에는 단일 급전 방식과 이중 급전의 두 가지 방식이 있다. 이중 급전 방식은 axial ratio 대역폭과 동작 대역폭이 넓은 장점을 가지고 있지만 구조의 복잡성과 RF 신호의 손실이 크다는 단점이 있다. 반면에 단일 급전 방식은 axial ratio 대역폭과 동작 대역폭이 좁은 단점이 있지만 구조가 간단하고 RF 신호의 손실이 작은 장점을 가지고 있다. 따라서 대형 배열 안테나와 MMIC 기반의 능동 소자와의 집적화에는 단일 급전 방식이 더 보편적으로 사용되고 있다.

본 논문에서는 이러한 단일 급전 방식의 단점인 대역폭 특성을 개선하기 위해 넓은 슬롯을 이용한 원형 편파 마이크로스트립 개구면-패치(aperture-patch) 안테나를 설계하였다. 개구면-패치 안테나는 접지면 위에 모서리가 잘린 사각 개구면이 있고, 이 개구면 내부에 대각선 방향으로 금속 패치가 놓이게 된다. 이 금속 패치는 두 직교 방향으로 전자계를 분리시키는 역할을 하며, 원형 편파를 구현하는 데에 중요한 설계변수로 작용한다. 그리고 본 논문에서 설계된 다른 종류의 원형 편파 마이크로스트립 안테나는 환구조 안테나로서, 이것은 동작 대역폭은 개구면 안테나에 비하여 협소하지만 크기가 소형이므로 배열 안테나의 기본 복사소자로 적합한 구조이다. 환 구조 안테나는 급전기를

이루는 하부 기관과 환 복사기 및 환 내부의 스테르브로 이루어지는 상부 기관으로 구성된다. 환 구조 안테나에서는 내부 스테르브에 의하여 원형편파 특성이 결정되므로 이 스테르브 크기를 잘 설계하는 것이 중요하게 된다. 본 논문에서는 상기 두 종류의 안테나에 대하여, 주요 설계 변수들이 원형편파 특성에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 최적 설계치를 도출하는 방법을 보였으며, 제작된 안테나의 반사 손실, axial ratio, 방사 패턴 등을 측정하여 이론치와 비교 분석하였다.

II. 원형 편파 마이크로스트립 개구면-패치 안테나

2-1 개구면-패치 안테나의 동작 원리

넓은 슬롯을 가진 마이크로스트립 슬롯 안테나는 마이크로스트립 패치 안테나보다 10% 정도 더 넓은 동작 대역폭을 가진다. Truncated square patch로 원형 편파를 구현하는 방법을 응용하여 이를 truncated square aperture에 적용하였으며, 그림 1에 이 구조를 나타내었다^[9]. 이 구조는 ground plane위에 한 대각선 방향으로 모서리를 잘라낸 개구면을 두었고 모서리가 잘린 개구면의 대각선 방향으로 metal strip이 위치해 있다. Metal strip은 개구면 상에 수평 방향과 수직 방향의 두 직교 전계를 효율적으로 여기시키기 위해서 필요하다. 원형 편파를 구현하기 위해서는 두 전계의 위상차가 90가 되어야 한다. 90의 위상차를 얻기 위해 정사각형의 개구면의 대각선 방향으로 두 모서리를 잘라내었다. 그림 2에서 모서리를 잘라낸 구조의 원형 편파 원리를 나타내었다. 방사되는 전계는 그림 2에서 보는 바와 같이 서로 직교하고 수직으로 편향된 두 모우드에 의해 여기된다. 이는 모우드 2가 여기되는 방향으로 모서리가 잘려져 있으므로 모우드 2가 모우드 1에 비해 상대적으로 높은 주파수에서 공진이 일어나며 위상도 모우드 1에 대해

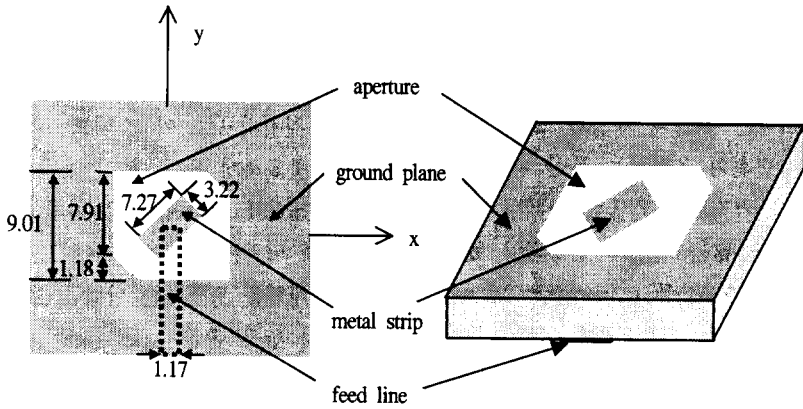
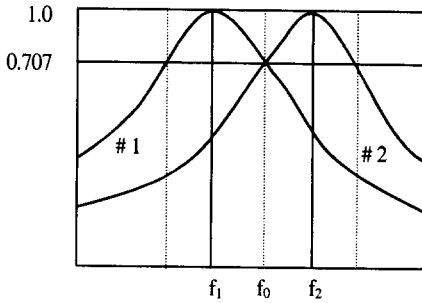
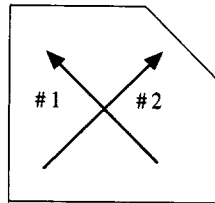
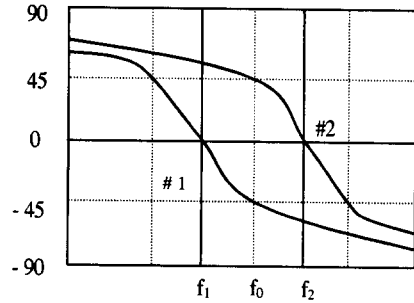


그림 1. 원형 편파 개구면-패치 안테나(단위: mm)

Fig. 1. Circularly polarized aperture-patch antenna(unit: mm).



(a) Amplitude



(b) Phase

그림 2 단일 급전 원형 편파 마이크로스트립 안테나의 동작 원리

Fig. 2. Operation principle of single-fed circularly polarized microstrip antenna.

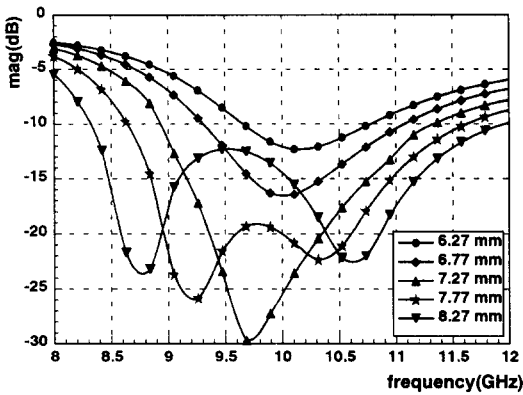
앞서게 된다. 이 두 모우드가 서로 같은 크기를 가지는 중심 주파수 f_0 에서 이들의 위상차가 90를 이루게 될 때 원형 편파가 구현된다. 그림 2의 경우 오른쪽 대각선 방향으로 모서리를 잘라낼 경우 우선회 원형편파(RHCP)를, 왼쪽 대각선 방향의 모

서리를 잘라낼 경우 좌선회 원형편파(LHCP)를 발생시킨다.

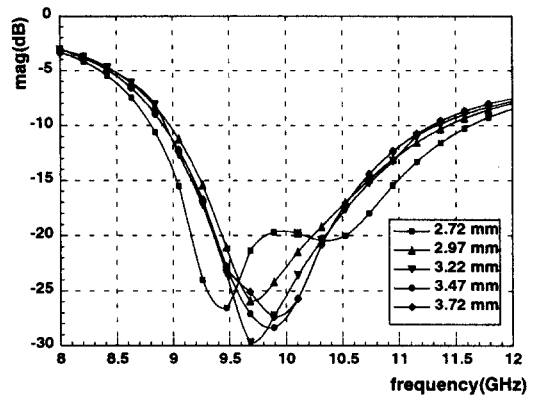
2-2 설계 및 제작

Cavity model과 perturbation method에 의해 설계된 X-band용 원형 편파 개구면-패치 안테나의 설계치를 그림 1에 나타내었다. 안테나 제작에는 유전율 3.38, 두께 20 mil, 손실 탄젠트가 0.0035인 Rogers 사의 RO4003기판을 사용하였다. 이 안테나는 오른쪽 대각선 방향의 모서리를 잘라냄으로써 접지면 위로 RHCP 특성을 가진다. 안테나의 개구면의 크기는 공진 주파수를 결정하는 설계 요소이다. 우선 metal strip을 고려하지 않고 개구면의 크기를 결정하고 원형 편파가 여기되도록 perturbation

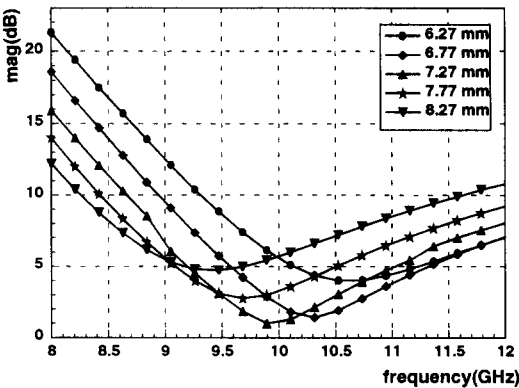
segment를 결정한다. 개구면-패치 안테나에서 개구면 위의 metal strip은 원형 편파 특성과 반사 손실을 줄이는 중요한 설계 요소이다. Ensemble 소프트웨어를 사용하여 metal strip의 길이, 폭, 각도의 변화에 따른 시뮬레이션 결과를 그림 3~5에 나타내었으며, 이 결과를 바탕으로 안테나가 최소의 반사 손실과 axial ratio값을 가지도록 metal strip의 크기와 각도를 최적화하였다. 그림 3(a)는 metal strip의 길이 변화에 따른 반사 손실을, 그림 3(b)는 axial ratio 값의 변화를 나타내었다.



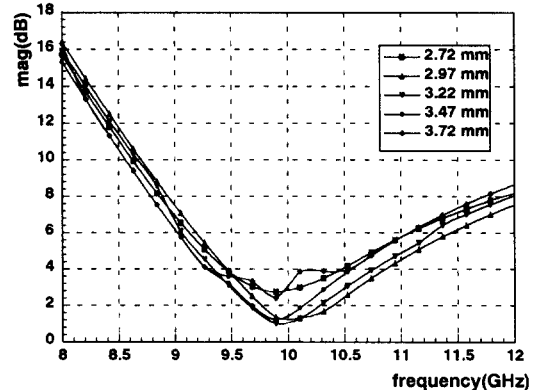
(a) Return loss



(a) Return loss



(b) Axial ratio



(b) Axial ratio

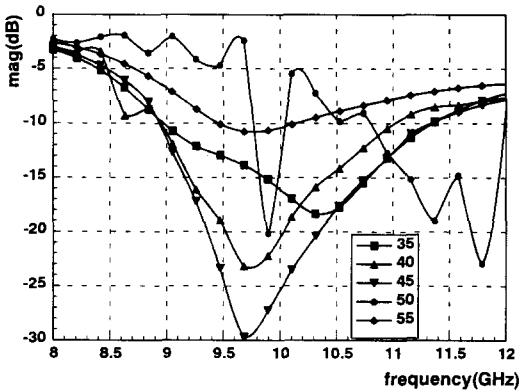
그림 3. Metal strip 길이 변화에 따른 특성

Fig. 3. Characteristics for the different metal strip lengths.

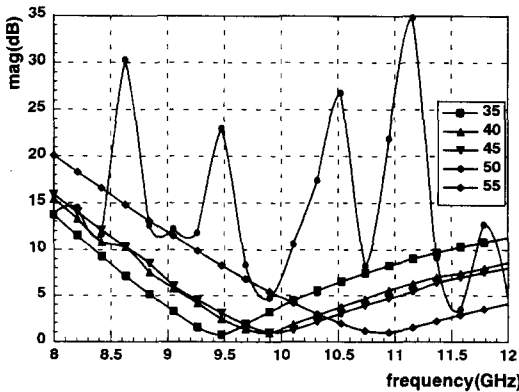
그림 4. Metal strip 폭 변화에 따른 특성

Fig. 4. Characteristics for the different metal strip widths.

그림에서 보는 바와 같이 metal strip의 길이가 7.27 mm일 경우가 최적화가 된 상태이다. Metal strip의 길이가 길어질수록 공진은 높은 주파수에서 낮은 주파수로 이동하는 현상을 나타내고 있다. 그리고 metal strip의 길이가 최적화된 값보다 작아질 경우 반사 손실의 값이 커짐을 알 수 있다. Axial ratio의 경우도 반사 손실의 경우와 비슷하게 metal strip의 길이가 7.27 mm보다 길어질수록 최소 axial ratio의 주파수는 높은 주파수에서 낮은 주파수로 이동한다. Axial ratio의 최소값 또한 7.27 mm보다 길어지거나 짧아질수록 큰 값을 가진다. 그림 4(a), (b)



(a) Return loss



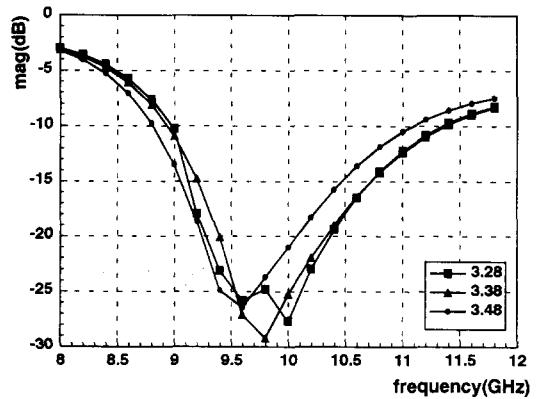
(b) Axial ratio

그림 5. Metal strip 각도 변화에 따른 특성
Fig. 5. Characteristics for the different metal strip degrees.

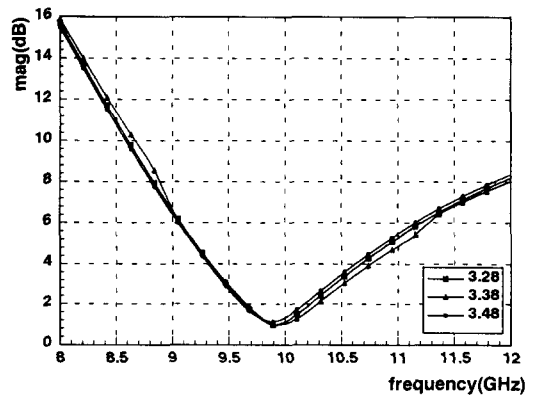
는 metal strip의 폭의 변화에 따른 반사 손실과 axial ratio의 변화를 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 metal strip의 폭은 최적화 값인 3.22 mm인 값에서 커지거나 줄어드는 경우에 대해 반사 손실, axial ratio에 큰 영향을 주지 않는다. 그림 5(a), (b)에서는 metal strip의 각도가 변화할 때 반사 손실과 axial ratio의 변화를 살펴보았다.

Metal strip이 45°로 놓여질 경우에 대해 $\pm 5^\circ$, $\pm 10^\circ$ 의 변화에 대해 살펴보았다. 각도가 커질수록 공진 주파수 및 axial ratio가 최소가 되는 주파수는 낮



(a) Return loss



(b) Axial ratio

그림 6. 유전율의 변화에 따른 안테나 특성
Fig. 6. Characteristics for the different permittivities.

은 주파수에서 높은 주파수로 조금 이동하는 현상을 보인다. 이 시뮬레이션을 통하여 최적화된 metal strip의 크기는 길이가 7.27 mm, 폭은 3.22 mm 이다.

유전율이 변화할 경우 안테나에 미치는 영향을 알아보기 위하여 안테나의 유전율을 제외한 다른 설계 인자는 고정시키고 유전율을 변화시켜가면서 그 특성을 조사하였다. 그림 6(a), (b)에 유전율 변화에 대한 반사 손실과 axial ratio 특성 변화를 나타내었다.

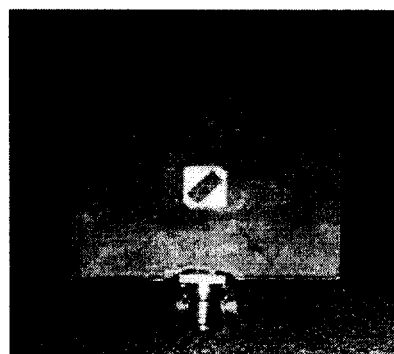
반사 손실 특성에서 유전율이 3.38보다 높아질 경우에 공진은 낮은 주파수로, 낮아질 경우에는 높은 주파수로 천이됨을 알 수 있고 axial ratio의 경우 유전율의 변화에 거의 영향을 받지 않는다.

2-3 측정 및 결과

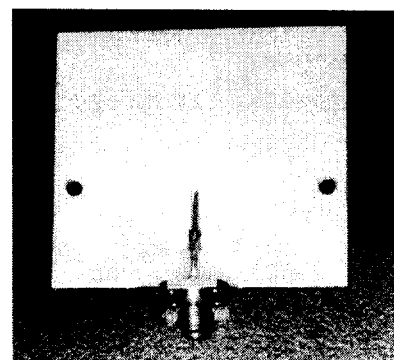
그림 7에서는 2-2절의 최적화 설계 과정에 의해 제작된 안테나를 나타내었다.

이 안테나의 반사 손실을 HP 8510-B network analyzer를 이용하여 측정하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 안테나의 반사 손실에 대한 동작 대역폭 (VSWR 2 : 1기준)은 25 % 이상을 나타내고 있으며, 9.6 GHz의 중심 주파수에서 반사 손실은 -33.6 dB이다. 측정된 결과는 시뮬레이션 결과인 9.7 GHz의 중심 주파수에 대해 0.1 GHz 낮은 주파수에서 중심 주파수를 가진다. 이는 connector의 연결부분, 그리고 안테나 패턴 가공작업 등에서 발생한 제작 오차에 기인된 것으로 판단된다. Metal strip과 개구면의 크기, 이 두 변수들이 공진 주파수에 영향을 주므로 이들의 크기를 잘 조정함으로써 원하는 중심 주파수에서 공진이 일어나게 할 수 있다. 그림 9는 설계된 안테나의 주파수 변화에 따른 axial ratio 시뮬레이션 결과를 도시한 것이다.

Axial ratio 대역폭(3 dB 기준)은 9.5~10.5 GHz로 10 %의 대역폭을 가진다. 이는 약 10 % 정도로 보통 단일 급전의 원형 편파 패치 안테나들의 경우보다 더 넓은 대역폭을 가진다. 10 GHz에서 1.0



(a) ground plane, metal strip, truncated square aperture



(b) feedline with $\lambda_g / 4$ transformer

그림 7. 제작된 원형 편파 마이크로스트립 개구면-패치 안테나

Fig. 7. Fabricated circularly polarized microstrip aperture-patch antenna.

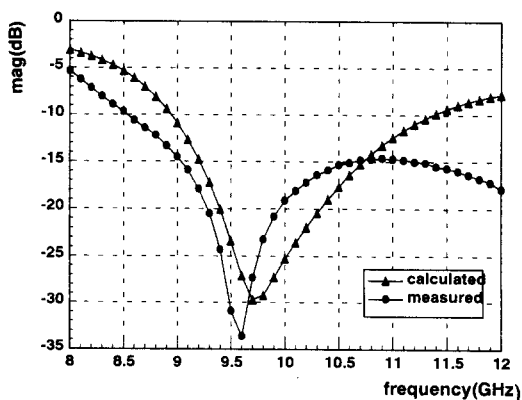


그림 8. 개구면-패치 안테나의 반사 손실

Fig. 8. Return loss of aperture-patch antenna.

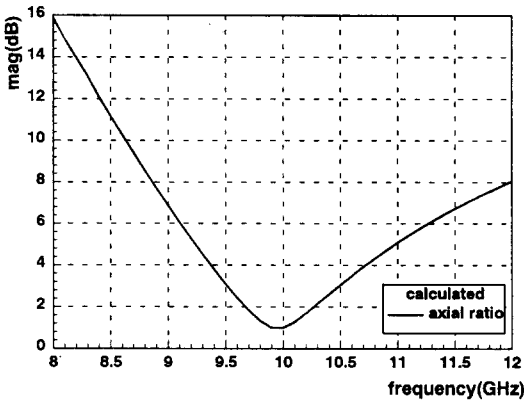


그림 9. 설계된 개구면-패치 안테나의 axial ratio 시뮬레이션 결과

Fig. 9. Simulation result for the axial ratio of the designed aperture-patch antenna.

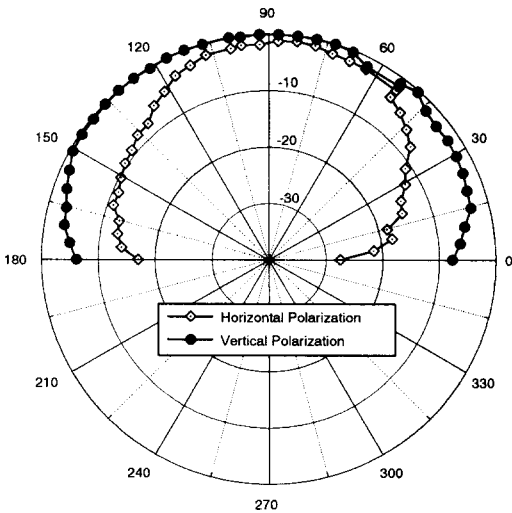


그림 10. 개구면-패치 안테나의 방사 패턴 측정결과 (10 GHz, xz-plane)

Fig. 10. Radiation pattern of aperture-patch antenna. (10 GHz, xz-plane)

dB의 axial ratio 값을 가지고 있다. 그림 10은 compact range에서 측정된, 주파수 10 GHz에서, zx-면의 방사 패턴을 보인 것이다. 측정 방법으로는 개구면-패치 안테나를 수신 안테나로 사용하고 송신

용 혼 안테나의 편파를 수평(horizontal)방향과 수직(vertical)방향으로 하여 각 편파에 대한 방사 패턴을 측정하였다. 이 그림에서 boresight의 axial ratio는 1.2 dB를 나타내며, 그림 9의 이론치인 1.0 dB에 근접한다.

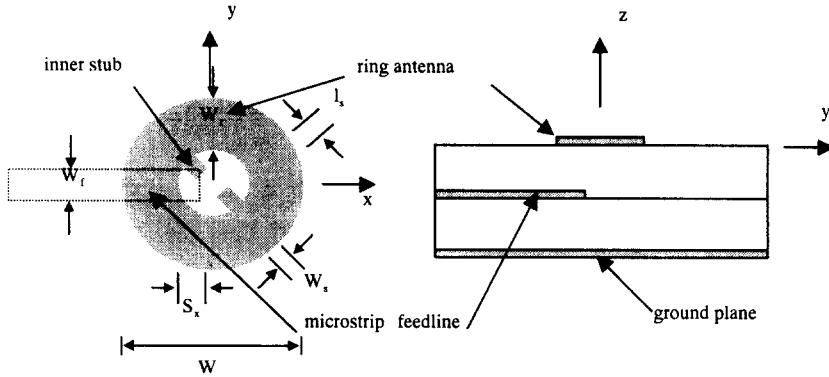
III. 원형 편파 마이크로스트립 환 구조 안테나

3-1 동작 원리

원형 패치를 이용한 원형 편파 구현 방법에는 원형 패치의 대각선 방향으로 홈을 내거나 stub를 두는 것이다. 하지만 이런 방식의 안테나는 급전기로 동축선을 사용함으로써 MMIC 기반의 능동 소자와의 집적화가 어렵고 제작상의 복잡성이 있다. 그리고 복사 소자로 원형 패치를 사용함에 따라 생기는 동작 대역폭이 협소하다는 문제점이 있다.

본 절에서는 이런 단점을 개선하기 위해 급전기로 마이크로스트립 라인을 사용하여 집적화가 가능하고 환 구조의 패치 안테나를 사용함으로써 동작 대역폭을 증가시키는 원형 편파 마이크로스트립 환 구조 안테나의 동작 원리에 대해 살펴본다^[12]. 원형 편파 마이크로스트립 환 구조 안테나의 구조를 그림 11에 도시하였다.

이 구조는 두 개의 기판으로 구성되며 상부 기판에 환 구조의 복사 소자를 그리고 하부 기판에 급전기를 두어 RF 신호가 급전 선로에서 복사 소자로 여기되게 한다. 복사 소자 부분은 동작 대역폭을 증가시키기 위해 환 구조를 사용하였고, 이 환 구조의 안테나의 안쪽 부분에 stub를 두어 원형 편파를 구현하였다. 급전기 영역은 특성 임피던스가 50 Ω을 가지는 마이크로스트립 라인으로 구성되어 있으며 급전 선로의 offset 정도에 따라 안테나와의 정합이 이루어진다. 이 안테나의 원형 편파 구현 원리는 급전 영역으로부터 안테나로 인가된 신호가 환 구조 복사 소자의 내부 stub에 의해 서로 직교하고 수직으로 편향된 두 개의 모우



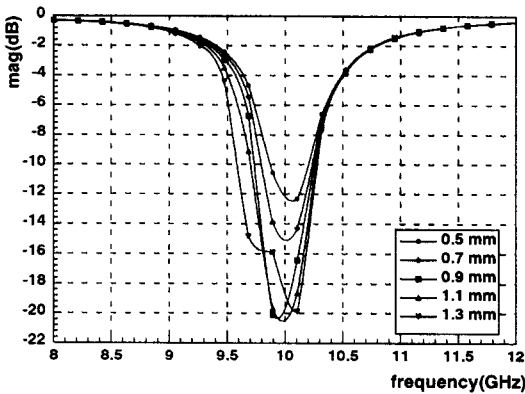
ring width: $W_r = 2.36$, inner stub width: $W_s = 1.33$, total size: $W = 8.05$,
 offset feedline: $S_x = 1.01$, inner stub length: $l_s = 0.9$, feedline width: $W_f = 1.17$

그림 11. 원형 편파 마이크로스트립 환 구조 안테나(단위: mm)
 Fig. 11. Circularly polarized microstrip ring antenna(unit: mm).

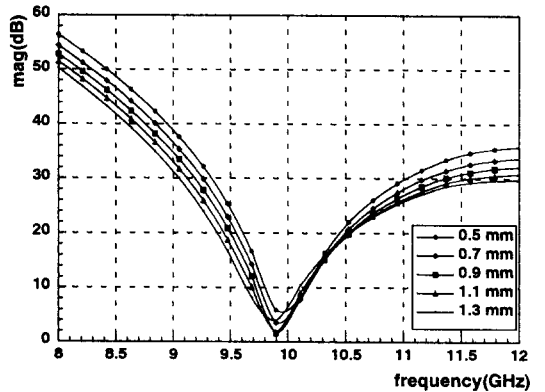
드를 여기시킨다. 이 두 모우드가 같은 크기를 가지는 중심 주파수 f_0 에서 위상차가 90° 를 이루게 될 때 원형 편파가 구현된다. 편파의 극성은 내부 stub가 오른쪽 대각선 방향으로 있으면 RHCP로, 왼쪽 대각선 방향으로 있을 경우 LHCP로 된다.

3-2 설계 및 제작

Cavity model에 의해 설계된 X-band용 원형 편파 마이크로스트립 환 구조 안테나의 설계치를 그림 11에 나타내었다. 유전율이 3.38, 두께 20 mil, 손실 탄젠트가 0.0035인 기판을 이용하여 복사 영역과 급전기 영역을 각각 제작하였다. Ensemble 소프트웨어를 사용하여, 동작 중심 주파수가 10 GHz가 되도록 환 구조 안테나의 폭과 반지름을 결정하였다. 환 구조 안테나의 내부 stub와 급전 선로



(a) Return loss



(b) Axial ratio

그림 12. 내부 stub 길이 변화에 따른 안테나 특성
 Fig. 12. Characteristics for the different inner stubs.

의 offset은 원형 편파 특성과 공진 주파수 특성에 중요한 설계 요소이다. 그림 12와 그림 13에서는 내부 stub와 급전 선로의 offset을 변화 시키면서 주파수에 따른 반사 손실과 axial ratio 특성을 시뮬레이션 하였다.

그림 12에서 보는 바와 같이 내부 stub는 공진 주파수의 결정에는 큰 영향을 미치지 않는다. 내부 stub의 길이가 0.9 mm일 때 반사 손실과 axial ratio가 최소값을 가진다. 그림 13은 급전 선로의 길이가 길어짐에 따라 공진 주파수가 증가함을 보이고 있다. 그리고 급전 선로의 offset은 axial ratio

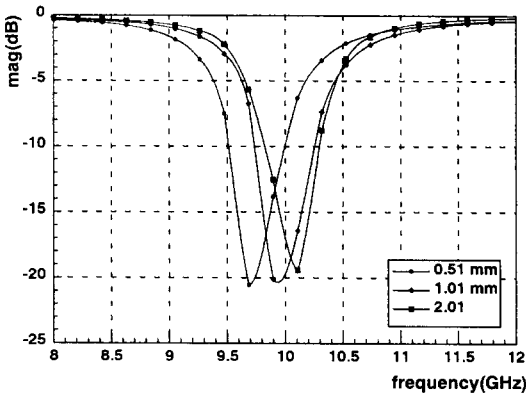
에는 영향을 미치지 않는다.

3-3 측정 및 결과

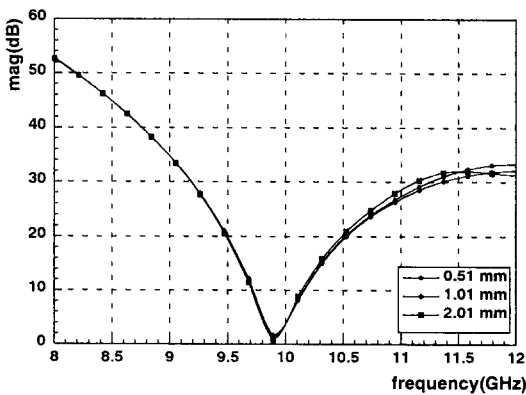
3-2절의 최적화 설계과정에 의해 제작된 안테나의 모양을 그림 14에 나타내었다.

이 안테나의 반사 손실에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 그림 15에 도시하였다.

안테나의 반사 손실에 대한 동작 대역폭(VSWR 2 : 1 기준)은 9.76 GHz~10.43 GHz로 6.7 % 정도의 동작 대역폭을 나타내고 있으며 중심 주파수 10.16 GHz

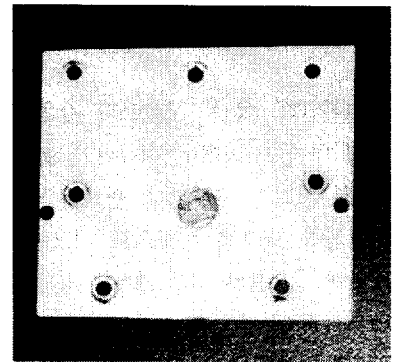


(a) Return loss

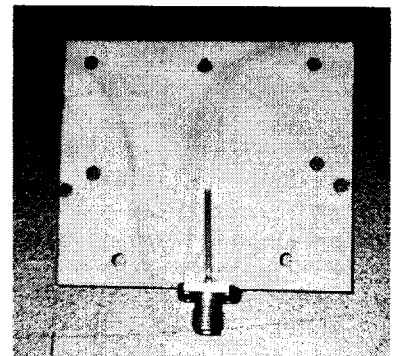


(b) Axial ratio

그림 13. 급전 선로의 offset에 의한 안테나 특성
Fig. 13. Characteristics for different feedline offset.



(a) ring radiator



(b) feedline

그림 14. 제작된 원형 편파 마이크로스트립 환 구조 안테나

Fig. 14. Fabricated circularly polarized microstrip ring antenna.

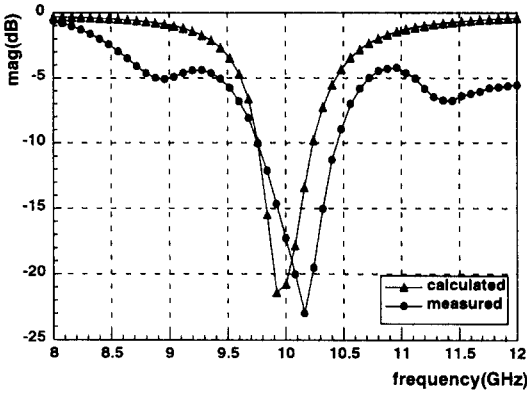


그림 15. 환 구조 안테나의 반사 손실
Fig. 15. Return loss of ring antenna.

에서 반사 손실은 -22.97 dB이다. 이는 이론치인 9.92 GHz의 중심 주파수에 대해 2.4% 정도의 오차를 보이고 있다. 그림 16에서는 설계된 안테나의 주파수에 따른 axial ratio의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

9.89 GHz에서 1.57 dB 정도의 최소 axial ratio를 가진다. Axial ratio 대역폭(3 dB 기준)은 9.8 GHz ~ 10 GHz로 약 2% 정도로 앞서 기술한 마이크로스트립 개구면-패치 안테나의 10%에 비해 작은

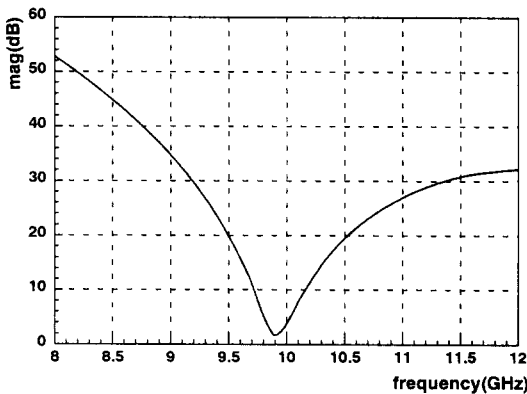


그림 16. 설계된 환 구조 안테나의 axial ratio 시뮬레이션 결과
Fig. 16. Simulation result for the axial ratio of the designed ring antenna.

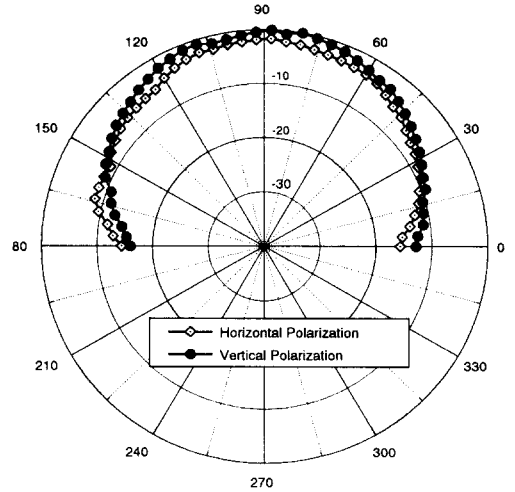


그림 17. 환 구조 안테나의 방사 패턴 측정결과(9.9 GHz, yz-plane)
Fig. 17. Radiation pattern of ring antenna(9.9 GHz, yz-plane)

값을 갖는다. 그림 17은 Compact Range에서 측정된 9.9 GHz에서의 방사 패턴이다. 측정방법은 2-3 절의 개구면-패치 안테나에서와 동일하다. 그림 17에서 boresight의 axial ratio는 1.6 dB를 나타내고 있으며, 그림 16의 시뮬레이션 결과와 비슷한 값을 보이고 있다.

IV. 결론

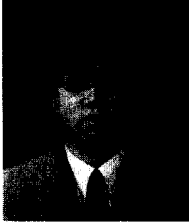
본 논문에서는 원형 편파 특성을 갖는 단일 급전 마이크로스트립 패치 안테나를 구현하기 위하여, 개구면-패치 안테나와 환 구조 안테나를 설계 제작하여 특성을 실험하였다. 안테나의 설계는 공진기 모델을 사용하여 개구면과 환의 크기를 결정하는 초기 설계 단계와 개구면 내의 금속 패치 및 환 내부의 스테브 크기를 결정하는 최적화 단계로 이루어진다. 마이크로스트립 개구면-패치 안테나의 경우에는 metal strip의 길이와 폭, 그리고 방향이 원형편파 발생에 중요한 파라미터로 작용한다. 그

리고 환 구조 안테나에서는 환 내부의 스테브 크기가 원형편파 구현에 중요한 설계 요소였으며, 급전선로의 offset line 길이는 반사손실에 많은 영향을 주었다. 본 논문에서는 이런 설계 요소들의 영향을 Ensemble 소프트웨어 시뮬레이션으로 분석하였으며, 시뮬레이션 결과와 측정결과를 비교 분석하였다. 두 종류의 안테나를 제작 실험한 결과 개구면-패치 안테나는 25%의 VSWR 대역폭(3dB 기준)과 1.2dB의 최소 축비를 가지며, 환 구조 안테나는 6.7%의 VSWR 대역폭과 1.6dB의 최소 축비를 가진다.

참 고 문 헌

- [1] Balanis, *Antenna theory*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [3] Hai Fong Lee, Wei Chen, *Advance in microstrip and printed antennas*, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [4] Jean-Francois Zürcher and Fred E. Gardiol, *Broadband Patch Antennas*, Artech House, Inc. 1995.
- [5] J-F Zürcher and Ph. Gary-Balmaz, "Dual Polarized, Single and Double-Layer Strip-Slot-Foam Inverted Patch(SSFIP) Antennas.," *MOTL*, vol. 7, no. 9, pp. 406-410, June, 1994.
- [6] Stephen D. Targonski and David M. Pozar, "Design of Wide Circularly Polarized Aperture-Coupled Microstrip Antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 2, pp. 214-220, February, 1993.
- [7] Eli Aloni and Raphael Kastner, "Analysis of a Dual Circularly Polarized Microstrip Antenna Fed by Crossed Slots," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 8, pp. 1053-1058, August, 1994.
- [8] I. J. Bahl and P. Bhartia, *Microstrip Antennas*, Artech House, Inc. 1982.
- [9] The Nan Chang and Chung-Pei Wu, "Microstripline-fed Circularly Aperture Antenna," *IEEE Antenna Propagat., Soc. Int. Symp. Dig.*, pp. 1372-1375, 1998.
- [10] J. R. James & P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, Peter Peregrinus Ltd, 1989.
- [11] Okoshi, T. and Miyoshi, T., "The Planar circuits-An approach to microwave integrated circuitry," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 20, pp. 245-252, 1972.
- [12] Raul R. Ramirez and Nicolaos G. Alexopoulos, "Single Feed Circularly Polarized Microstrip Ring Antenna and Arrays," *IEEE Antenna Propagat., Soc. Int. Symp. Dig.*, pp. 1364-1367, 1998.
- [13] V. Palanisamy and Ramesh Garg, "Analysis of Arbitrarily Shaped Microstrip Patch Antennas Using Segmentation Technique and Cavity Model," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. AP-34, no. 10, pp. 1208-1213, October, 1986.
- [14] Kompa, G. and R. Mehran, "Planar Waveguide Model for Calculating Microstrip Components," *Electron. Lett.*, vol. 11, pp. 459-460, 1975.

오 세 창



1974년 생
1996년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
1999년 3월~현재: LG 정밀 연구소

[주 관심분야] 안테나 공학, 마이크로파 공학, SAW 필터 설계

전 중 창



1961년 생
1984년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
1995년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)

1995년 3월~1997년 2월: 한국통신 연구개발본부 무선통신연구소 선임연구원

1997년 3월~현재: 위덕대학교 정보통신공학과 조교수
[주 관심분야] 마이크로파 공학, 안테나 공학, 마이크로파소자 수치해석, 마이크로파 계측시스템, 무선이동통신

박 위 상



1952년 생
1974년: 서울대학교 전자공학과(공학사)
1982년: University of Wisconsin-Madison 전기공학과(공학석사)
1986년: University of Wisconsin-Madison 전기공학과(공학박사)

1986년~1988년: Wichita State University 객원조교수
1988년~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 조교수, 부교수, 정교수

1997년: Utah 대학교 Gandhi 교수의 Bioelectromagnetics 연구실 방문교수

1995년~현재: MARC(국방부 및 국방과학연구소 지정 전자파특화연구센터) 안테나 연구실 실장

[주 관심분야] 마이크로파 공학, 안테나 공학, 마이크로스트립 위상배열 안테나, 초고주파 대역 물질상수 측정, 휴대폰 전파 SAR 계산 및 측정.