

접지면에 원형 슬롯이 있는 양팔 마이크로스트립 스파이럴 안테나

Two-Arm Microstrip Spiral Antenna with a Circular Slot on the Ground Plane

오 대 영 · 김 명 기 · 박 익 모

Daeyoung Oh · Myoungki Kim · Ikmo Park

요 약

본 논문에서는 접지면에 원형 슬롯이 있는 양팔 마이크로스트립 스파이럴 안테나를 제안하였다. 제안한 안테나는 별도의 발룬(balun)회로 없이 평면 구조로 구현하였으며 하나의 안테나의 구조로부터 주빔이 안테나 평면에서 수직인 일반 스파이럴 안테나의 복사특성과 주파수 변화에 따라 주빔이 θ 와 ϕ 방향으로 일정하게 변하는 편심 스파이럴 안테나의 복사특성을 동시에 얻을 수 있다. 원형슬롯의 반지름이 23 mm일 때 2.5 GHz에서 3.3 GHz까지의 주파수 영역에서는 주빔이 안테나 평면에 대해 수직인 방향을 유지하며 그 이후 주파수가 증가함에 따라 주빔이 일정하게 기우는 편심 스파이럴 안테나의 특성을 가진다.

Abstract

In this paper a novel two-arm microstrip spiral antenna with a circular slot on the ground plane is presented. The proposed antenna structure is constructed in a planar form without a balun circuit and the radiation characteristics of conventional and eccentric spiral antennas are obtained simultaneously. The main beam direction is normal to the plane of the spiral for characteristic frequency band and the direction of the main beam moves linearly into θ and ϕ direction as the frequency increases.

Key words : spiral antenna, microstrip antenna

I. 서 론

스파이럴 안테나는 광대역 정합특성을 갖고 원형 편파(circular polarization)를 얻을 수 있으며 소형, 경량, 넓은 빔폭을 지니기 때문에 항공기, 미사일 또는 차량 등에 많이 사용되고 있고 전자전 지원책(ESM) 시스템의 방향탐지용 안테나, 레이더 시스템의 어레이(array) 소자 등으로 활용되고 있다^{[1],[2]}. 최

근에는 PCS(Personal Communication System), GPS(Global Positioning System), 무선 LAN(Wireless Local Area Network) 등의 통신분야에도 점점 활용도가 증가하고 있다^{[3],[4]}.

일반적인 스파이럴 안테나는 스파이럴 중심에 대해 대칭적인 구조를 가지며 역위상으로 급전시 진행파(traveling wave)의 형태로 진행하다가 스파이럴의 원주가 한과장이 될 때 인접한 암사이의 전류가

「이 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대신기술사업인 차세대 무선통신용 트랜시버시스템 개발의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.」

아주대학교 전자공학부(School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20020204-010

· 수정완료일자 : 2002년 3월 25일

동위상이 되어 복사가 시작되어 넓은 주파수 영역에서 안테나 평면에 수직한 방향으로 원형편파의 주빔을 가진다^[5]. 이에 비해 편심 스파이럴 안테나는 스파이럴의 중심을 바깥쪽으로 이동시켜 스파이럴의 구조가 비대칭적으로 되어 주빔이 안테나 평면에 수직하지 않고 기울어져 있다^{[6],[7]}. 이러한 기존의 스파이럴 안테나는 스파이럴 암(spiral arm) 중심 급전부분의 좁은 공간 때문에 수직한 방향으로 급전을 해야 하는데, 이로 인하여 3차원적으로 부피가 증가하게 된다. 또한 별도의 발룬(balun)회로를 필요로 하므로 복잡한 설계와 제작과정이 요구된다. 최근에는 이런 단점을 보완하기 위해서 두 개의 스파이럴 암의 바깥쪽에서 급전하는 방법^[8], 직선 마이크로스트립 선로를 이용해 하나의 스파이럴과 결합(coupling)시켜 급전하는 방법^[9], 두 스파이럴의 외부에서 연결시켜 급전하는 방법^[10] 등 스파이럴 안테나를 평면으로 구현할 수 있는 급전방법에 관해서 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서 제안한 안테나는 두 개의 스파이럴을 마이크로스트립 선로로 구현하였으며 각각의 스파이럴 암의 바깥쪽 끝부분에 연결된 급전선 간의 길이 차이는 특정주파수를 기준으로 $\lambda_g/2$ 를 갖도록 설계하였다. 일반적인 스파이럴 안테나와 달리 특정주파수에 대해서만 $\lambda_g/2$ 의 위상차를 가지므로 주파수 변화에 따라 하나의 안테나로부터 안테나 평면에 수직한 주빔과 기울어진 주빔을 동시에 얻을 수 있다. 이 안테나는 별도의 발룬(balun)회로 없이 간단하게 마이크로스트립 구조로 구현할 수 있으므로 설계가 간편할 뿐만 아니라 대량생산에 유리한 장점을 갖고 있다.

II. 안테나 구조

그림 1은 제안한 안테나의 구조이다. 접지면에는 반지름 r_0 인 원형 슬롯이 있고, 반대쪽 면에는 스파이럴 형태의 마이크로스트립 선로가 위치한다. 스파이럴이 원형 슬롯이 없이 마이크로스트립 구조에 구현이 되면 진행파(traveling wave)의 전류가 진행하다가 스파이럴에서 충분한 복사가 일어나지 않고 잔여전류가 반사파를 만들어 정재파(standing wave)가 형성되어서 나쁜 정합특성을 가지게 되고 또한

라인사이의 커플링(coupling)이 증가해서 축비도 나빠지게 된다^[9]. 그림 1(b)는 기존에 제안되었던 하나의 스파이럴로 구현된 안테나의 평면구조이다^[11]. 이 구조는 원형 슬롯과 스파이럴사이의 비대칭성에 의해 주빔이 수직하지 않고 기울어진 편심 스파이럴 안테나의 특성을 갖는다. 본 논문에서는 그림 1(c)와 같이 그림 1(b) 구조의 비대칭성을 보상한 구조를 제안하였다. 50 Ω 급전선으로 부터 전력분배기를 통하여 나누어진 두 100 Ω 급전선이 각각의 스파이럴 암의 바깥쪽 끝부분으로 연결된 형태이다. 두 100 Ω 급전선 길이의 차이는 특정 주파수에 대하여 $\lambda_g/2$ 를 갖도록 설계하였다. 앞으로 본 논문에서 언급하는 특정 주파수는 두 100 Ω 급전선 길이의 차이가 $\lambda_g/2$ 를 갖는 주파수를 나타내고 이를 f_0 로 정의하였다. 본 논문에서 제안한 구조는 별도의 발룬(balun)회로를 사용하지 않고 마이크로스트립 선로를 이용하여 평면급전으로 구현한 스파이

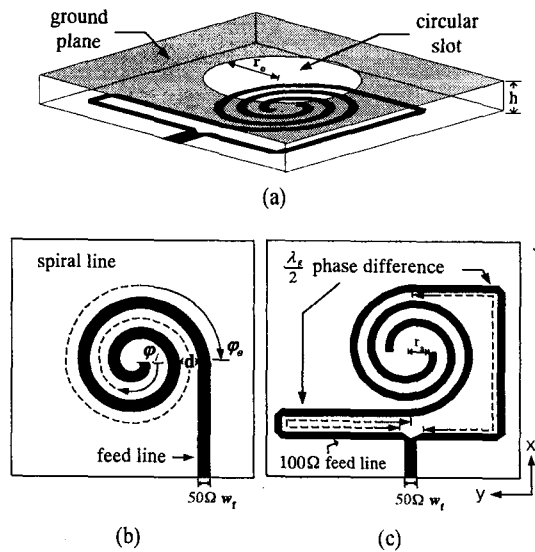


그림 1. 제안한 안테나 구조

(a) 3차원 안테나 구조, (b) 하나의 스파이럴을 이용한 구조, (c) 두 개의 스파이럴을 이용한 구조

Fig. 1. A proposed antenna structure.

(a) 3-dimensional antenna structure, (b) One-arm spiral antenna structure, (c) Two-arm spiral antenna structure.

럴 안테나이다. 하지만 기존의 스파이럴 안테나와 달리 특정 주파수 f_0 에 대해서만 $\lambda_g/2$ 의 위상차가 생기도록 하였기 때문에 f_0 근처에서는 주빔이 안테나 평면에 수직인 방향을 향하고 그 이후 주파수가 증가할수록 두 스파이럴 암사이 전류의 위상이 점점 비대칭적으로 형성이 되어 편심 스파이럴 안테나의 특성을 갖는다.

두 개의 스파이럴 선로는 Archimedean spiral의 형태를 취하며 다음과 같은 수식으로 구현된다.

$$r_1(\varphi_1) = (d + w_f) \frac{\varphi_1}{360^\circ} + r_a, \quad (1)$$

$(\varphi_i \leq \varphi_1 \leq \varphi_e)$

$$r_2(\varphi_2) = (d + w_f) \frac{(\varphi_2 - 180^\circ)}{360^\circ} + r_a. \quad (2)$$

$(\varphi_i + 180^\circ \leq \varphi_2 \leq \varphi_e + 180^\circ)$

여기서 $r(\varphi)$ 는 스파이럴의 중심점으로부터 스파이럴 암까지의 거리이며, 스파이럴의 중심점과 접지면에 위치한 원형 슬롯의 중심점은 동일하다. $r_2(\varphi_2)$ 는 $r_1(\varphi_1)$ 을 중심점에 대하여 180° 회전시켜 얻은 대칭구조이다. r_a 는 스파이럴의 안쪽 시작위치와 중심점 사이의 거리이며 스파이럴의 증가율은 스파이럴이 1회전하였을 때의 암 사이의 간격 d 와 스파이럴의 선폭 w_f 에 의해 결정된다. 본 논문에서는 스파이럴 암의 바깥쪽에서 급전이 되므로 원형 슬롯이 위치한 방향으로 오른손 원형편파(RHCP)를 얻기 위해서 φ 값을 중심으로부터 시계방향으로 회전하면서 증가하는 값으로 결정하였다.

전형적인 스파이럴 안테나는 밴드 이론(band theory)으로부터 최외각 스파이럴 암의 1회전 원주 길이가 한 파장이 되는 주파수에서 복사가 일어나기 시작한다^[5]. 제안한 구조에서는 전계가 스파이럴에서 원형슬롯으로 천이가 되어 복사가 일어나기 때문에 우선 슬롯의 반지름 r_0 를 결정해야 한다. 반지름 r_0 는 원하는 주파수 대역에서 가장 낮은 주파수 파장의 1/4이 되도록 결정해야 하는데 이는 원형 슬롯의 지름이 대략 $\lambda_g/2$ 정도일 때 공진이 일어나기 때문이다^[12]. 슬롯의 반지름 r_0 를 결정한 후 각각의 설계변수를 통하여 하나의 스파이럴 암을 만들고 그 스파이럴 암을 중심점에 대해 180° 만큼 회전 이동시켜 대칭적인 또 하나의 스파이럴 암으

로 구현한다. 두 스파이럴 암이 결정된 후 두 100 Ω 급전선 간의 길이 차이가 $\lambda_g/2$ 를 갖도록 하는 특정 주파수 f_0 는 원형 슬롯의 첫 번째 공진이 일어나는 주파수 근처로 선택해야 한다. 이것은 원형 슬롯의 첫 번째 공진 모드 근처에서 대칭적으로 전계가 분포되므로 주빔이 넓은 주파수 구간에서 수직하게 유지될 수 있기 때문이다.

III. 안테나 설계 및 특성

본 논문에서 제안한 안테나는 접지면에 슬롯이 있는 구조이므로 안테나 평면을 기준으로 양방향으로 방사가 이루어지는데 본 논문에서는 원형 슬롯이 위치한 방향으로 복사가 되는 주빔만을 고려하여 특성을 살펴보았다. 안테나 설계를 위한 EM 시레이션은 Zeland사의 IE3D로 하였으며 비유전율

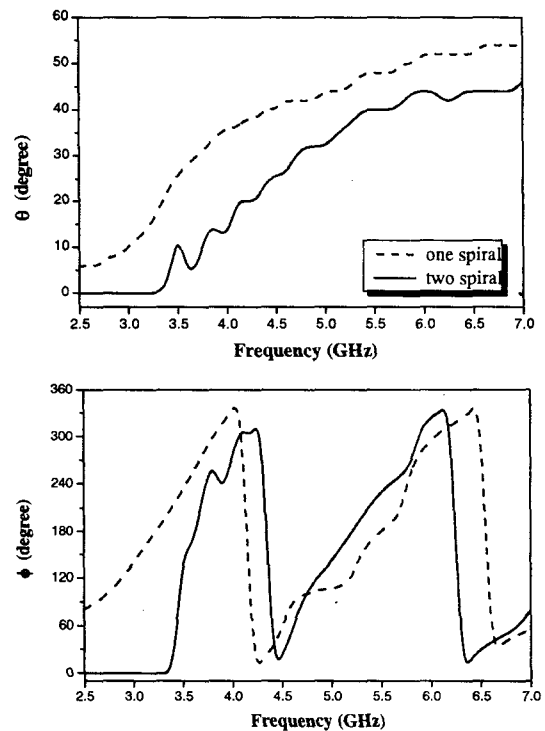


그림 2. 주파수 변화에 따른 안테나의 주빔 방향
(a) θ 방향, (b) ϕ 방향
Fig. 2. The main beam direction as a function of frequency. (a) Main beam θ dependence, (b) Main beam ϕ dependence.

$\epsilon_r=2.2$ 이며, 두께 $h=0.7874$ mm 인 RT Duroid 5880 기판을 사용하였다. 위 구조는 $\varphi_i=0^\circ$, $\varphi_e=1265^\circ$, $r_o=23$ mm, $r_a=0.5$ mm이고 100 Ω 선로인 스파이럴 선폭 w_l 는 0.7 mm, 50 Ω 선폭은 2.4 mm이며 암 사이 간격 d 는 5.6 mm로 설계하였다^[12]. 제안한 안테나의 특성을 관찰하기 위해서 특정 주파수 f_0 를 3.2 GHz로 하고 두 100 Ω 급전선의 길이 차이가 $\lambda_g/2$ 를 갖도록 설계하였다. 그림 2에는 하나의 스파이럴 암을 사용한 경우와 특정 주파수 f_0 를 3.2 GHz 기준으로 두 100 Ω 급전선 간의 길이 차이가 $\lambda_g/2$ 를 갖도록 하였을 경우의 안테나 주빔 방향을 θ 와 ϕ 값으로 나타내어 비교하였다. 그림 2(a)에서 하나의 스파이럴을 사용한 기존의 구조의 경우, 3.2 GHz에서 주빔 방향의 θ 값이 14° 를 나타내고 주파수가 증가함에 따라서 주빔이 선형적으로 기울어지는 것을 확인할 수 있다. 이에 비하여 본 논문에서 제안한 구조의 경우에는 주빔 방향의 θ 값이 2.5 GHz에서 3.3 GHz까지 0° 를 나타낸다. 즉, 특정 주파수 f_0 근처 대역에서 주빔이 수직방향을 향하게 됨을 확인할 수 있으며 주빔의 방향이 수직한 구간을 지나서 주파수가 증가함에 따라 θ 방향으로 주빔이 선형적으로 기울어진다. 그림 2(b)에서는 주파수 변화에 따른 주빔의 ϕ 방향의 변화를 나타내었다. 주빔이 수직한 방향을 향하고 있는 주파수 대역을 제외하고 하나의 스파이럴을 사용한 구조와 같이 본 논문에서 제안한 구조도 역시 주파수의 변화에 따라 ϕ 방향으로 일정하게 빔이 회전함을 알 수 있다. 이런 특성을 종합해 보면 제안한 안테나는 역위상으로 급전되는 주파수 근처에서는 주빔이 안테나 평면에 수직한 일반적인 스파이럴 안테나의 복사특성과 또 그 이후에는 주파수가 증가함에 따라 주빔이 수직한 방향에서 서서히 기울어지는 편심 스파이럴 안테나의 복사특성을 동시에 얻을 수 있다. 이로써 하나의 스파이럴 안테나 구조를 이용하여 두 가지 스파이럴 안테나 특성을 만족하는 안테나를 구현할 수 있음을 알 수 있다.

그림 3에 제안한 안테나의 전압 정재파비(V-SWR)와 주빔방향에 대한 축비(axial ratio)의 결과를 나타내었다. $VSWR < 2$ 를 기준으로 정합특성을 만족하는 주파수 구간은 2.5 GHz에서 9.5 GHz

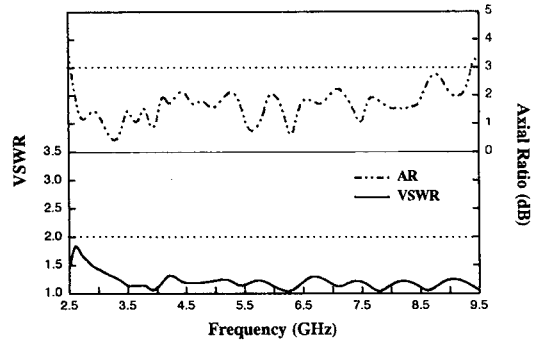


그림 3. 제안한 안테나의 전압 정재파비와 주빔방향에 대한 축비

Fig. 3. VSWR and axial ratio in the direction of the main beam.

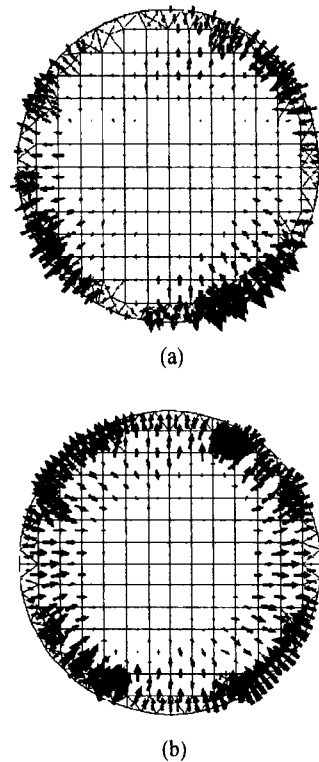


그림 4. 원형 슬롯내의 전기 분포 (3.2 GHz)

- (a) 하나의 스파이럴을 사용한 경우,
- (b) 두 개의 스파이럴을 사용한 경우

Fig. 4. Electric field distribution on the circular slot. (3.2 GHz)

- (a) One-arm spiral antenna,
- (b) Two-arm spiral antenna.

까지 약 1.9 옥타브 (octave)의 광대역 정합특성을 가진다. 이는 스파이럴 안테나가 갖는 광대역 정합 특성을 본 논문에서 제안한 안테나도 만족함을 알 수 있다. 주빔방향에 대한 축비의 특성을 살펴보면 2.5 GHz에서 9.4 GHz까지의 주파수 영역에서 축비가 3 dB 이하로 유지된다. 따라서 넓은 주파수 대역에서 주빔의 방향으로 원형편파를 얻을 수 있음을

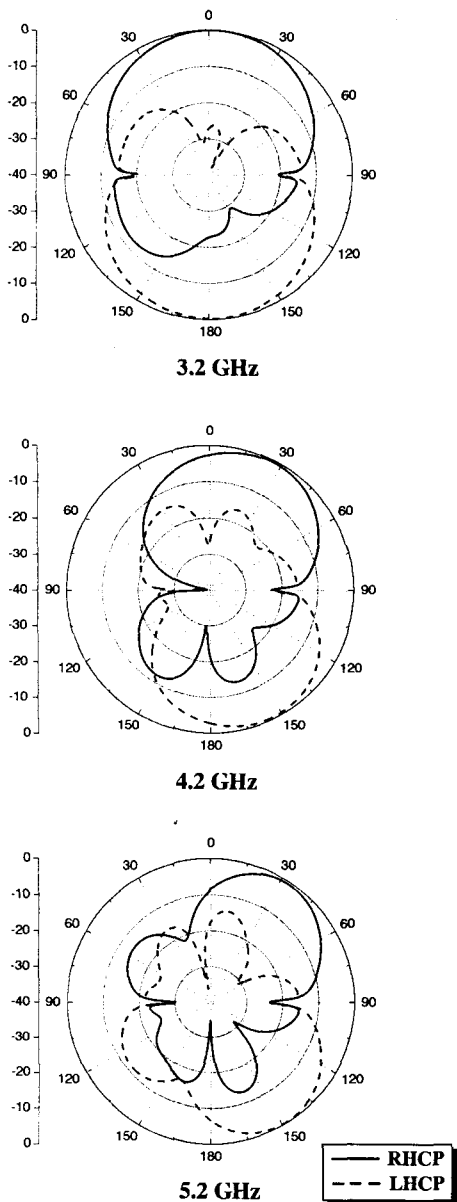


그림 5. 계산된 복사패턴
Fig. 5. Computed radiation patterns.

알 수 있다.

그림 4에 3.2 GHz에서 하나의 스파이럴과 두 개의 스파이럴을 사용한 경우 원형 슬롯안에서 나타나는 전계분포의 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그림 4 (a)는 기존에 제시되었던 하나의 스파이럴을 이용한 안테나의 경우로서 원형 슬롯내에서 비대칭적인 전계분포로 인하여 주빔이 기울어지는 특성을 갖는다. 그림 4(b)는 본 논문에서 제안한 구조의 전계 분포이다. 슬롯내에서 원의 중심점을 기준으로 대칭적으로 전계가 분포됨을 알 수 있다. 실제 전계의 크기는 대칭적으로 나타나며 방향은 특정주파수에 대해 역 위상 ($\lambda_g/2$)의 전류가 급전이 되므로 정 반대 방향을 갖게 된다. 이런 대칭적인 분포로 인해 안테나 평면에 수직인 복사패턴을 얻을 수 있을 것이다. 하지만 일반적인 스파이럴 안테나와 달리 특정 주파수 f_0 근처에서만 스파이럴 암사이의 위상이 $\lambda_g/2$ 차이를 갖게 되므로 주파수가 점점 증가함에 따라서 두 스파이럴 암에 분포하는 전계분포가 서로 비대칭적으로 나타나기 때문에 주빔이 점점 기울어지는 현상이 일어난다.

그림 5에서는 f_0 를 3.2 GHz 기준으로 했을 때 주빔의 θ 방향에 대하여 수직하게 절단한 복사패턴의 단면도를 나타내었다. 특정 주파수 f_0 근처에서는 주빔이 수직한 방향을 유지하고 있다가 주파수가 증가할수록 주빔이 θ 방향으로 점점 기울어지는 것을 확인할 수 있다.

IV. 제작 및 측정결과

안테나는 유전상수 $\epsilon_r=2.2$ 이고 두께 $h=0.7874$ mm인 RT Duroid 5880 기판을 사용해서 140 mm × 140 mm의 유한 접지면(finite ground)상에 제작하였다. 설계변수는 원형 슬롯의 반지름 $r_0=23$ mm, $r_a=0.5$ mm, 100 Ω 선로인 스파이럴의 선폭 $w_f=0.7$ mm, 50 Ω 선폭은 2.4 mm이며 $d=5.6$ mm, $\phi_i=0^\circ$, $\phi_e=1265^\circ$ 이다. 두 급전선 간의 길이 차이는 3.2 GHz 기준으로 $\lambda_g/2$ 를 갖도록 하였으며 모든 설계 변수는 전압 정재파비와 축비를 고려하여 최적화된 값으로 정하였다.

그림 6에는 제안한 안테나의 반사손실(return

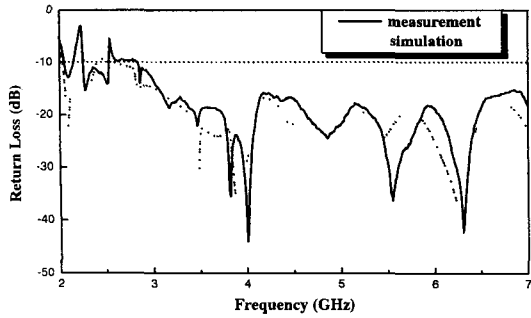


그림 6. 제안한 안테나의 반사손실 계산값과 측정값
Fig. 6. Measured and computed return loss.

loss)을 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 두 가지 결과가 매우 유사함을 확인할 수 있다. 주파수에 따라 미소한 차이가 나타나는 것은 시뮬레이션 상에서는 무한 접지면을 사용했지만 실제로는 유한 접지면으로 제작을 하였기 때문에 발생한 오차로 사료된다.

그림 7에 주파수별로 측정된 복사패턴을 도시하

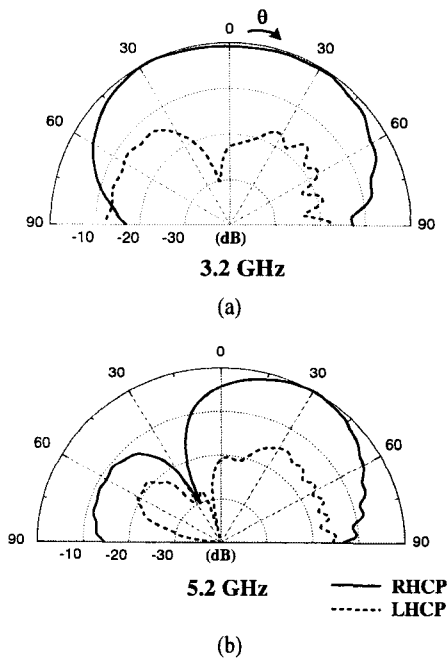


그림 7. 측정된 복사패턴
(a) 3.2 GHz, (b) 5.2 GHz
Fig. 7. Measured radiation patterns.
(a) 3.2 GHz, (b) 5.2 GHz.

였다. 각각의 주파수별로 주빔의 방향에서 E_θ 와 E_ϕ 를 측정 후 원형편파의 RHCP와 LHCP로 변환하였다^[1]. 측정된 복사패턴에서도 역시 주빔이 수직인 방향을 향하고 있다가 점점 기울어지는 현상을 알 수 있다. 3.2 GHz에서 주빔의 방향으로 0.52 dB의 낮은 축비를 얻을 수 있으며 5.2 GHz에서 측정된 값은 축비가 2.8 dB로 다소 높지만 모두 3 dB 이하의 축비를 유지하였다. 측정된 주파수에서 모두 비교적 좋은 원형편파의 특성을 얻을 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 접지면에 원형 슬롯이 있고 두 스파이럴을 사용한 마이크로스트립 스파이럴 안테나를 제안하였다. 특정 주파수 근처에서 주빔이 안테나 평면에 수직인 방향을 향하고 있으며 두 스파이럴 암사이 위상차를 3.2 GHz 기준으로 $\lambda_g/2$ 의 차이를 주었을 때 넓은 주파수 구간에서 주빔이 수직인 방향을 유지하고 있다. 그 이후의 주파수 영역에서는 주빔이 θ 방향으로로는 1 GHz 증가시 약 18° 정도씩 선형적으로 기울어지며 ϕ 방향으로로는 비교적 일정하게 회전함을 확인할 수 있었다. 제안한 안테나는 주빔이 수직인 방향을 향하는 복사패턴과 주빔이 수직하지 않고 기울어진 복사패턴을 동시에 얻을 수 있어 단일 안테나로서 두 가지 안테나의 특성을 얻을 수 있는 장점이 있다. 시뮬레이션을 통해 최적화 시킨 구조의 이득은 2.5 GHz에서 9.4 GHz까지의 영역에서 모두 2.3 dBic 이상을 가졌고 5 GHz에서 최고 4.98 dBic를 얻을 수 있었다. 3 dB 이하의 축비와 $VSWR < 2$ 를 기준으로 정합특성을 만족하는 주파수구간은 2.5 GHz에서 9.4 GHz까지 약 1.9 옥타브(octave)의 광대역 특성을 가진다. 이 구조는 설계에 따라서 주빔이 수직인 주파수 구간을 이용할 수 있고 또 다른 주파수 구간에서는 빔 제어 회로를 사용하여 원하는 방향으로 빔을 제어할 수 있는 안테나로 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] W. L. Curtis, "Spiral antenna", *IRE Trans. Antenna Propagat.*, pp. 298-306, May 1960.

- [2] T. E. Morgan, "Spiral antennas for ESM", *IEEE Proc. Part H*, vol. 132, no. 4, pp. 245-251, July 1985.
- [3] V. H. Rumsey, "Frequency independent antenna", *IRE National Convention Record*, pt. 1, pp. 114-118, 1957.
- [4] J. J. H. Wang, J. K. Tillery and M. A. Acree, "Multioctave-wideband mode operation of spiral mode microstrip antenna", *IEEE AP-S Int. Symp. Digest*, Montreal, Canada, pp. 1860-1863, July 1997.
- [5] J. A. Kaiser, "The archimedean two-wire spiral antenna", *IRE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. 8, pp. 312-323, May 1960.
- [6] K. Hirose and H. Nakano, "An eccentric spiral antenna printed on a dielectric substrate", *IEEE AP-S Int. Symp. Digest*, Newport Beach, CA, pp. 190-193, June 1995.
- [7] R. T. Gloutak and N. G. Alexopoulos, "Two-arm eccentric spiral antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 45, no. 4, pp. 723-730, Apr. 1997.
- [8] E. Gschwendtner, D. Loffler, and W. Wiesbeck "Spiral antenna with external feeding for planar application", *IEEE Proc. 5th Africon Conf.* vol. 2, pp. 1011-1014, Sept. 1999.
- [9] R. R. Rameez and N. G. Alexopoulos, "Single feed proximity coupled circularly polarized microstrip monofilar archimedean spiral antenna array", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 2, pp. 406-407, Feb. 1999.
- [10] E. Gschwendtner and W. Wiesbeck, "Frequency-independent antenna concepts for the use in vehicles", *MTT International Crimean Conf.* pp. 39-42, Sept. 2000.
- [11] 김명기, 박익모, "스파이럴 라인을 이용한 마이크로스트립 원형 슬롯 안테나", *대한전자공학회 논문지*, vol. 38, no. 5, pp. 182-188, 2001년 5월.
- [12] W. C. Chew, "A broad-band annular-ring microstrip antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 5, pp. 918-922, Sept. 1982.
- [13] G. E. Evans, *Antenna Measurement Technique*, Artech House, pp. 77-80, 1990.

오 대 영



2001년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2001년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, 수치해석

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과 (공학사)
 1989년: 일리노이 대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 1994년: 일리노이 대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1994년~1996년: LG전자기술원

선임연구원
 1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 부교수
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 수치해석

김 명 기



1999년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, 수치해석