

분할된 원추형 빔 형성을 위한 안테나 급전 구조

A Novel Feed Network for a Sectoral Conical Beam

김 재 희 · 박 위 상

Jae Hee Kim · Wee Sang Park

요 약

본 논문에서는 2×2 배열 안테나에 적용하여 분할된 원추형 빔 형성이 가능한 새로운 급전 구조를 제안한다. 제안된 급전 구조에는 네 개의 90° 하이브리드, 한 개의 크로스오버, 네 개의 90° 지연선을 사용하며, 이들은 서로 대칭적인 구조를 갖는다. 급전 구조의 성능을 검증하기 위하여 중심 주파수 2.57 GHz에서 동작하는 마이크로스트립 형태의 2×2 배열 안테나와 급전 구조를 제작하였고, 방사 패턴을 측정하였다. 측정된 안테나의 주 빔 방향은 입력 포트의 선택에 따라 고도 방향으로 45°에서, 방위각 방향으로 45°, 135°, 225°, 315°에서 최대지향성을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

We propose a novel feed network for a 2×2 array antenna to form a sectoral conical beam. The proposed feed network, which is a symmetrical structure, consists of four 90° hybrids, a crossover, and four 90° delay lines. To verify the performance of the feed network a 2×2 array antenna and the feed network are fabricated on a microstrip structure, and the radiation patterns are measured at the center frequency of 2.57 GHz. The maximum radiation is measured at the 45° elevation angle and at the 45°, 135°, 225°, and 315° azimuth angles depending on the choice of the input port of the feed network.

Key words : Beam Forming Network, Conical Beam, Branch Line Coupler, Phase Shifter

1. 서 론

위성 통신은 위성으로부터 신호를 직접 받아 사용자에게 원하는 정보를 제공해 주는 기술로 지상파 통신과는 달리 기지국을 설치하기 힘든 오지에서도 사용 가능한 이점을 가진다. 하지만 위성의 위치를 정확하게 알아야 하고, 이득이 높은 안테나를 사용해야 한다는 단점을 가진다. 최근 이러한 위성 신호를 이용한 위성 Digital Multimedia Broadcasting(DMB)가 많이 사용되고 있다. 위성 DMB는 2.63~2.655 GHz의 주파수 대역을 사용하며, 좌수 편파(Left-Hand Circular Polarization: LHCP)를 이용하여 지구로 송신을

한다. 그리고 고도 45°의 정지 궤도 상에 위치한다. 따라서 최대한 위성 신호를 잘 수신하기 위해서는 45°의 고도에 원형 편파로 방사하는 안테나를 사용해야 한다. 위성 신호를 수신할 경우, 선형 편파를 사용할 수 있으며 이 경우 원형 편파로 수신할 때보다 반 전력을 수신하기 때문에 3 dB 좋은 이득 특성을 필요로 한다.

자동차나 기차와 같은 고속 이동 물체는 이동함에 따라 위치가 바뀌기 때문에 한 방향에 지향성을 가지는 안테나를 사용하기는 힘든 단점이 있다. 따라서 고속 이동 물체에서 위성 신호를 수신하기 위해서는 위성의 위치를 찾아 빔을 형성할 수 있는 기능

「본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH)

· 논문 번호 : 20090106-003

· 수정완료일자 : 2009년 4월 6일

이 필요하다. 이러한 빔 형성 안테나는 배열 안테나에서 안테나의 배열 간격과 각 안테나에 여기되는 신호의 크기와 위상을 조절함으로써 만들 수 있다^[1]. 안테나의 위상을 조절하기 위한 방법으로는 배열 안테나의 각 급전 선로에 위상변위기를 사용하거나^[2], 스위치를 이용하여 이미 만들어진 빔을 선택하는 방법이 있다^{[3],[4]}. 위상변위기를 사용하면 장비의 가격이 비싸지고 손실이 있는 단점이 있고, 스위칭 소자를 사용하면 정해진 방향으로 밖에 빔을 형성할 수 없는 단점이 있다. 그러나 스위칭 소자를 사용하면 위상변위기를 사용하는 것보다 구조가 간단하고 제작이 용이한 장점을 가지기 때문에 최근 빔 형성 안테나로 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 위성 DMB 신호를 수신하기 위한 고도 45°에 최대 지향성을 가지는 분할된 원추형 빔을 형성하는 급전 구조를 제안한다. 제안하는 급전 구조는 스위칭 소자를 이용하여 빔을 선택하고 2차원 2×2 배열 안테나에 적용할 수 있다. 급전 구조는 90° 하이브리드와 크로스 오버를 사용한 마이크로스트립 형태로 구현되었으며, 원추형(conical) 빔을 4등분하여 각 방향에 지향성을 가지도록 빔을 형성하여 위성이 지평선과 약 45° 위치에 존재하는 신호를 수신하기에 적합한 구조이다. 그리고 평면형 구조이기 때문에 고속 이동 물체의 천장에 집적할 수 있는 구조이다. II장에서는 빔 형성 급전 구조 및 각 안테나에 여기되는 위상에 따른 방사 패턴을 살펴보도록 한다. III장에서는 단일 안테나 설계를 하며, IV장에서는 배열 안테나와 급전 구조를 이용한 빔 형성에 대해 살펴본다. 그리고 V장에서 결론을 내리도록 한다.

II. 빔 형성 급전 구조

2×2 배열 안테나의 방사 패턴은 각 안테나 단에 여기되는 신호의 크기와 위상에 의존한다. 평면형 배열 안테나 구조에서 안테나를 직사각형 격자 모양으로 배치를 한다면 Array Factor(AF)는 다음과 같이 표현할 수 있다^[1].

$$AF = S_{xm} S_{ym} \quad (1)$$

$$S_{xm} = \sum_{m=1}^M I_{m1} e^{j(m-1)(kd_x \sin \theta \cos \phi + \beta_x)} \quad (2)$$

$$S_{ym} = \sum_{n=1}^N I_{1n} e^{j(n-1)(kd_y \sin \theta \sin \phi + \beta_y)} \quad (3)$$

여기서 M 은 x 방향으로 배열된 안테나의 개수, N 은 y 방향으로 배열된 안테나의 개수, d_x , d_y 는 각 x 방향 및 y 방향으로 안테나가 떨어진 간격, I_{m1} , I_{1n} 는 각 방향으로 여기되는 신호의 크기에 해당한다. β_x 와 β_y 는 x와 y 방향으로의 증가되는 위상 값(progressive phase)을 의미한다.

식 (1)에 의해 동일한 크기를 가지며, x 방향과 y 방향으로 다른 위상 값을 가지는 신호를 여기하게 되면 원하는 방향으로 최대 지향성을 가지는 방사 패턴을 얻을 수 있다. 그림 1(a)와 같이 x 방향과 y 방향으로 각각 반 파장씩 떨어진 2×2 배열 안테나 구조에서 안테나 1(Ant. 1)에는 위상이 0°, 안테나 2와 3에는 위상이 90°, 안테나 4에는 위상이 180°인 신호를 여기하게 되면, 그림 1(b)와 같이 최대 지향성을 가지는 지점은 x 축을 기준으로 하였을 때 $\phi=225^\circ$ 이고, z축으로 하였을 때 z 축으로부터 $\theta=45^\circ$ 기울어진 지점이 된다. 부엽은 $\phi=0^\circ$ 인 지점과 $\phi=90^\circ$ 인 지점에서 생긴다. 만약 안테나에 위상을 순차적으로 90°씩 돌아가면서 여기를 한다면(case 1: Ant 3=0°, Ant 1, 4=90°, Ant 2=180°, case 2: Ant 4=0°, Ant 2, 3=90°, Ant 1=180°, case 3: Ant. 2=0°, Ant 1, 4=90°, Ant 3=180°), 최대 지향성을 가지는 각도 $\phi=135^\circ$ (case 1), 45° (case 2), -45° (case 3)가 되어 $\theta=45^\circ$ 인 모든 영역을 포함하게 된다.

2×2 배열 안테나를 여기할 수 있는 급전 구조를 그림 2에 제시하였다. 제안하는 급전 구조는 4개의 90° 하이브리드(hybrid)와 하나의 크로스오버(crossover), 그리고 4개의 90° 지연선(delay line)으로 구성이 된다. 크로스오버는 입력된 신호가 교차하여 반대 출력으로 나오게 하는 역할을 한다. 각 포트(port)에 신호가 여기되면 인근 주변의 포트는 고립된 포트이기 때문에 신호가 전달되지 않고, 출력(out)으로 균등하게 분배되어 각기 다른 위상을 가지며 나오게 된다. 각 입력 포트에 따른 출력 위상은 표 1에 나타내었다. 포트 1에 신호를 인가하게 되면 급전 구조를 통하여 출력 1과 출력 2는 서로 180°의 위상차를 가지게 되고, 출력 3과 4는 서로 같은 위상을 가지며 출력 1과는 -90°의 위상차를 가진다. 포트 2에 신호를 여기하면 포트 1에 신호를 여기했을 경우와 동일하며,

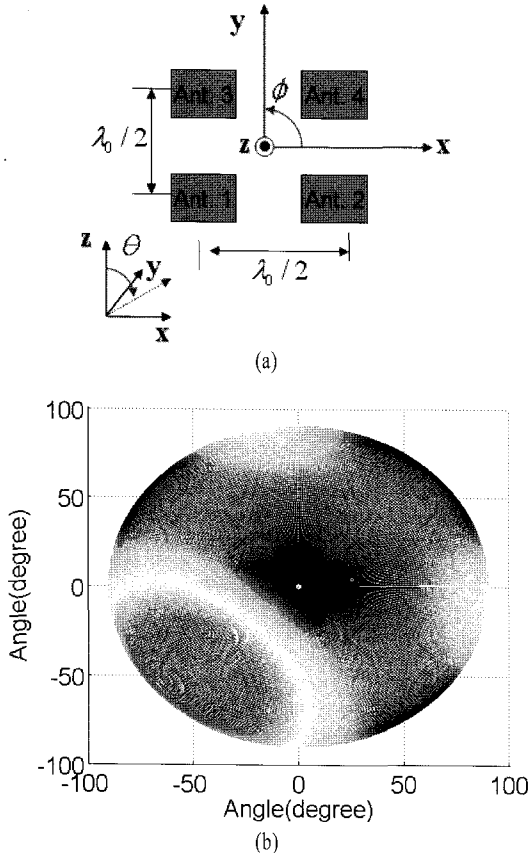


그림 1. 2x2 (a) 배열 안테나의 구조도와 (b) 안테나간 x, y 방향으로 90°의 위상차를 가질 때 array factor
 Fig. 1. (a) Geometry of a 2x2 array antenna and (b) array factor with the 90° progressive phases for the x, y direction.

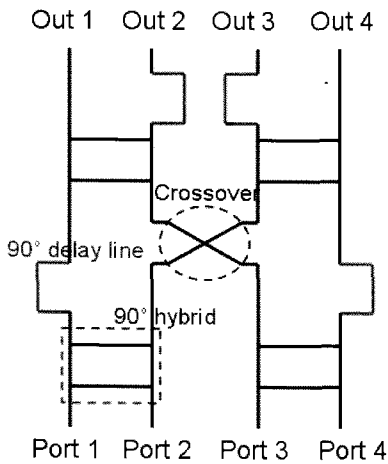


그림 2. 원추형 빔 형성을 위한 제안하는 급전 구조
 Fig. 2. Proposed feed network for a conical beam forming.

표 1. 제안하는 급전 구조의 출력 위상

Table 1. Output phases for the proposed feed network.

Phase	Out 1 (Ant. 1)	Out 2 (Ant. 4)	Out 3 (Ant. 2)	Out 4 (Ant. 3)
Port 1	180°	0°	90°	90°
Port 2	0°	180°	90°	90°
Port 3	90°	90°	180°	0°
Port 4	90°	90°	0°	180°

차이점은 출력 3과 4의 위상이 출력 1과 비교하였을 때 +90°의 위상차를 가진다는 점이다. 포트 3과 4는 포트 1과 2의 정확히 대칭되는 구조이다. 그림 1(a)에서 180° 위상차가 나는 안테나는 서로 대각선에 위치하므로 급전 구조의 출력은 Out 1=Ant 1, Out 2=Ant 4, Out 3=Ant 2, Out 4=Ant 3 에 연결이 되어야 한다.

III. 단일 안테나

제안하는 급전 구조의 성능을 평가하기 위하여 안테나를 설계하였다. 단일 안테나의 구조는 그림 3에 도시하였다. 원형 패치 안테나의 가운데 동축 선로를 이용하여 프루브(probe) 급전을 하였다. 그리고 급전주위에 2개의 비아(via)를 삽입하였다^[5]. 안테나는 두께가 0.4 mm인 FR4 기판(비유전율 4.5, 손실 탄젠트

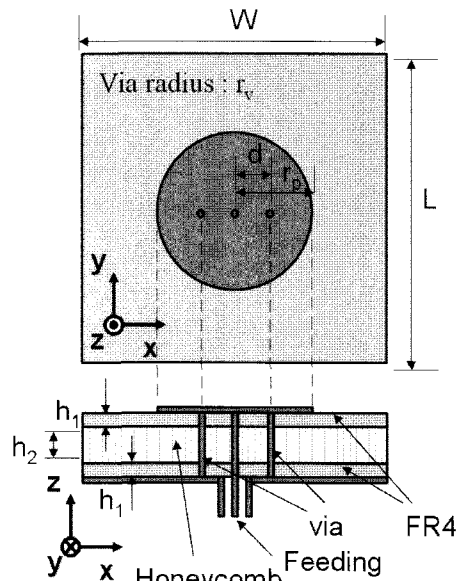


그림 3. 제안하는 단일 안테나 구조
 Fig. 3. Geometry of the proposed antenna element.

표 2. 제안된 단일 안테나의 최적 설계 값
Table 2. Optimized values for the geometric parameters of the proposed antenna.

변수	값(mm)	변수	값(mm)
W	100	r_v	0.3
L	100	r_p	14
h_1	0.4	d	5
h_2	2.61		

0.02) 2개와 두께가 2.61 mm 허니콤 구조를 이용하여 설계되었다. 허니콤 구조는 일정 두께를 가지며 별집 모양과 같이 생긴 구멍이 뚫려 있는 구조체이다. 이는 유전율이 1에 가까워 공기와 같은 특성을 가지며 안테나의 지지도를 높여 기계적 강도를 키우게 된다. 허니콤을 이용한 샌드위치 구조의 기계적 강도 실험 및 표면 일체형 안테나 구조는 이미 보고된 바가 있다^{[6]-[8]}. 위성 DMB(2.63 GHz)에 동작하도록 최적화된 설계 값은 표 2에 도시하였다. 원형 패치의 직경은 28 mm로 약 파장/4의 크기에 해당한다. 안테나의 가운데에 급전을 하였으므로 원추형 빔을 형성하는 안테나가 되며, 비아를 통하여 안테나의 공진 주파수 및 매칭 정도를 결정할 수 있다. 단일 안테나를 그림 1과 같이 디자인하게 되면, 안테나의 높이를 낮게 하면서 방사 패턴을 원추형 빔과 같이 만들 수 있어 기존의 모노폴 안테나 타입에서 수직으로 튀어나오는 부분을 제거할 수 있어 평면형 안테나로 적합한 구조가 된다.

안테나의 최적 설계를 위하여 비아의 반경 및 위치가 안테나의 공진 주파수에 미치는 영향을 살펴보았다. 시뮬레이션은 CST사의 MWS를 사용하였다. 비아 반경에 반사 손실(S_{11})의 변화를 그림 4에 도시하였다. 비아 반경이 커질수록 안테나의 공진 주파수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 비아 반경이 커지면 입력단의 임피던스가 증가하게 된다. 안테나의 급전 선로와 비아 사이의 간격(d)를 바꿔가면서 반사 손실의 변화를 그림 5에 나타내었다. 비아가 급전선로부터 멀어지게 되면 공진 주파수가 증가하게 된다. 그리고 입력 단에서의 임피던스는 낮아지게 된다. 따라서 비아의 위치와 비아의 반경으로부터 안테나를 매칭할 수 있게 된다. 제안된 구조에서의 최적의 비아 반경은 0.3 mm이고, 비아 간

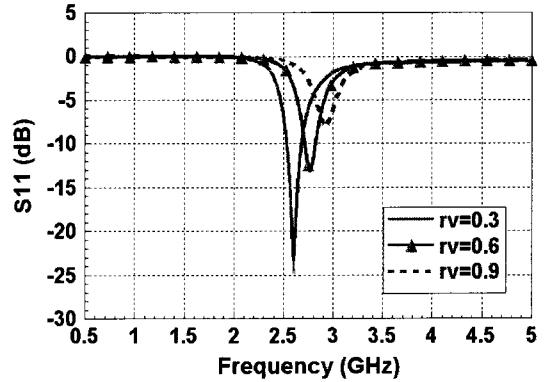


그림 4. 비아 반경(r_v)에 따른 안테나의 반사계수(S_{11})의 변화

Fig. 4. Simulated S_{11} of the proposed antenna at the different via radius($r_v=0.3, 0.6, \text{ and } 0.9$).

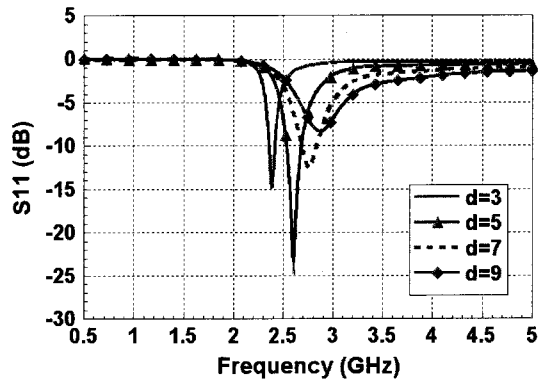


그림 5. 급전과 비아 사이의 거리(d)에 따른 안테나의 반사계수(S_{11})의 변화

Fig. 5. Simulated S_{11} of the proposed antenna at the different distance between via and feed line($d=3, 5, 7, \text{ and } 9$).

격은 5 mm이다.

안테나의 성능을 평가하기 위하여 안테나를 제작하고 반사 손실을 측정하였다. 그리고 방향에 따른 방사 패턴을 측정하였다. 반사 손실 측정값은 그림 6에 도시하였다. 시뮬레이션과 측정 결과는 상당히 유사한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있고, 위성 DMB 대역에서 공진이 잘 형성된다. $S_{11} < -10$ dB를 기준으로 하였을 때 시뮬레이션에서는 150 MHz (2.535~2.685 GHz) 대역폭을 가지는 것을 확인할 수 있고, 측정에서는 143 MHz(2.505~2.648 GHz)의 대역폭을 가짐을 확인하였다. 제안된 안테나의 방사 패턴을 최대 매칭을 가지는 주파수 2.57 GHz에서 시

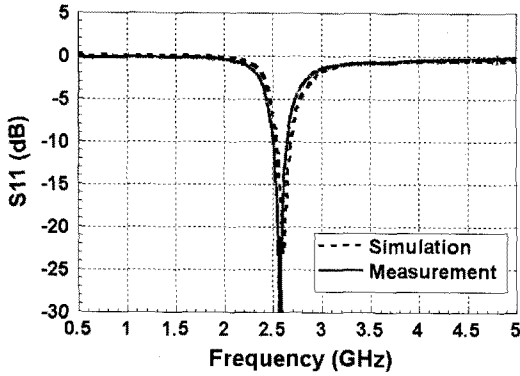
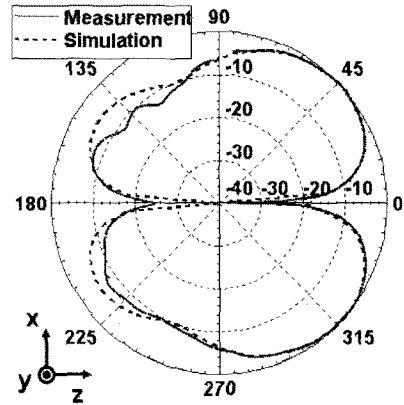


그림 6. 제안된 단일 안테나의 시뮬레이션과 측정된 반사계수
 Fig. 6. Simulated and measured S_{11} of the proposed antenna element.

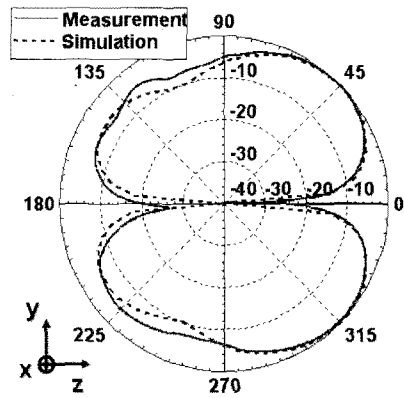
물레이션 및 측정을 하여 그림 7에 도시하였다. 방사 패턴은 x-z 평면과 y-z 평면에 대해서 나타내었으며, 시뮬레이션과 측정은 상당히 유사한 경향을 보이고 있다. z축을 기준으로 하였을 때 45° 방향에 최대지향성을 가지는 원추형 빔이 형성되는 것을 확인할 수 있으며, 시뮬레이션된 안테나의 이득은 3.9 dBi이다. 안테나의 편파는 주 편파만 측정된 것이며, x-y 평면을 접지면으로 한 모노폴 안테나와 동일한 선형 편파 특성을 가진다. 정지 궤도에 있는 위성 DMB 신호를 수신하기에 적합한 방사 패턴이지만, 추가적으로 안테나의 이득 특성을 좋게 할 필요성이 있다.

IV. 급전 구조를 포함한 배열 안테나

단일 안테나 설계를 바탕으로 2x2 배열 안테나를 제작하고, 급전 구조를 설계 및 제작하였다. 각 안테나 사이에 간격은 x방향과 y방향 각각 60 mm로 하였다. 이는 2.6 GHz에서 약 반 파장에 해당하는 거리이다. 급전 구조의 경우, 마이크로스트립을 이용하여 설계하고 제작하였다. 설계에 사용한 기판은 유전율 6.5, 두께 25 mil을 갖는 기판이다. 설계 주파수는 2.6 GHz로 하였다. 90° 하이브리드는 입력 포트 방향으로는 고립되며, 2개의 출력 포트로는 동일한 크기를 가지며 위상이 90° 차이가 나는 브랜치 라인 커플러(branch-line coupler)를 사용하였다⁹⁾. 브랜치 라인 커플러의 50 Ω 선로의 폭은 0.928 mm로 하였으며, 35.36 Ω 선로 폭은 1.64 mm로 두었다. 크로스오버



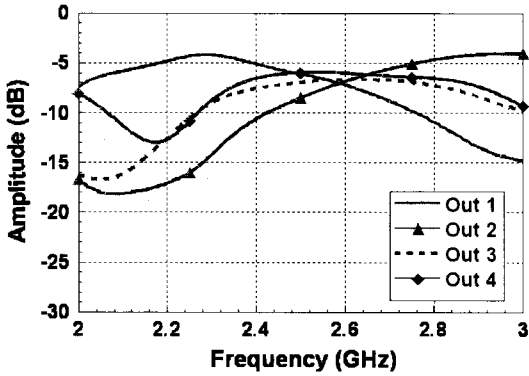
(a) x-z 평면
(a) x-z plane



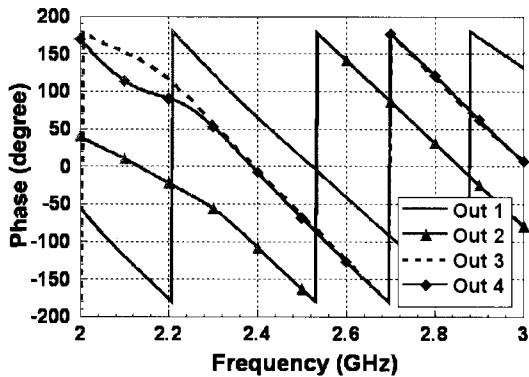
(b) y-z 평면
(b) y-z plane

그림 7. 2.57 GHz에서 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴
 Fig. 7. Simulated and measured radiation patterns at 2.57 GHz.

는 50 Ω 선로를 이용하여 사다리 모양으로 파장/4의 간격으로 배열한 구조를 사용하였다¹⁰⁾. 파장/4에 해당하는 길이는 90° 지연선의 길이와 동일하며, 이에 해당하는 값은 13.06 mm이다. 90° 지연선은 급전 선로 선로의 길이를 다르게 하여 위상지연의 효과를 얻었다. 급전 선로 설계 시 위상 특성이나 급전 선로에서 반사 특성을 좋게 하기 위하여 각 포트에서 여기되는 신호가 출력 포트로 갈 때 선로에서 꺾이는 횟수를 모두 동일하게 하였다. 제작된 급전 구조의 성능을 평가하기 위하여 신호를 입력 포트 1과 2에 각각 연결하였을 때 출력되는 신호의 크기와 위상을 측정하였다. 그림 8에서는 신호를 입력 포트 1에 인



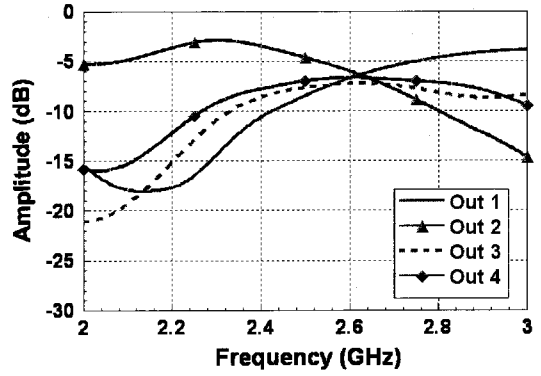
(a) 출력 신호 크기
(a) Output amplitudes



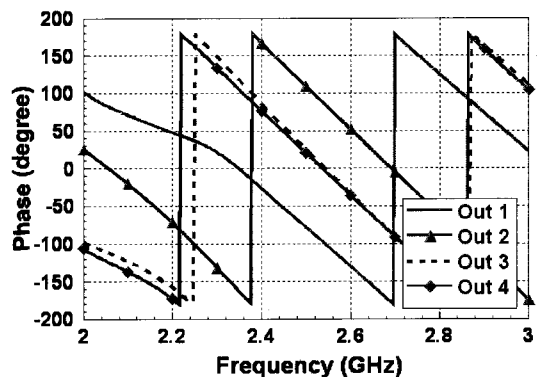
(b) 출력 신호 위상
(b) Output phases

그림 8. 신호를 포트 1에 인가하였을 때 출력 포트의 특성
Fig. 8. Output characteristics when a signal is applied at the port 1.

가하였을 때 출력 신호의 크기와 위상을 주파수에 따라 나타낸 것이다. 설계 주파수인 2.6 GHz에서는 출력 신호의 크기가 출력 포트 1에서 4로 감에 따라 각각 -7.2, -6.87, -6.7, -6.04 dB의 값을 가지는 것을 확인하였고, 상대적인 출력 위상은 각각 177.2°, 0°, 95°, 91°의 값을 가졌다. 포트 2에 신호를 인가하였을 때(그림 9)는, 2.6 GHz에서는 출력 신호의 크기가 각각 -6.66, -6.23, -7.22, -6.69 dB의 값이 되었고, 상대적인 출력 위상은 각각 0°, 181.3°, 96.6°, 93.3°의 값을 가졌다. 이상적인 경우, 전력이 4 곳으로 분배가 되면 각 포트별 -6 dB의 값을 가져야 하나, 급전 구조의 손실로 인하여 상대적으로 -6 dB보다는 낮은 값을 가지게 된다. 그리고, 표 1의 출



(a) 출력 신호 크기
(a) Output amplitudes



(b) 출력 신호 위상
(b) Output phases

그림 9. 신호를 포트 2에 인가하였을 때 출력 포트의 특성
Fig. 9. Output characteristics when a signal is applied at the port 1.

력 위상과 비교해 보았을 때 실제 측정된 급전 구조는 약 5° 이내의 위상 오차를 가지는 것을 알 수 있다. 이의 값은 실제 배열 안테나에 적용되었을 때 원하는 방사 패턴에서 크게 벗어나지 않는 성능이다. 급전 구조와 안테나 사이의 연결은 길이가 모두 동일한 동축 선로를 이용하여 각 출력 포트에서 안테나 입력단으로 연결을 하였다. 제작된 배열 안테나와 급전 구조를 그림 10에 도시하였다. 제작된 안테나를 기반으로 입력 포트 1과 2에 신호를 여기하였을 때 방사 패턴을 각각 시뮬레이션 하고 측정을 하였다. 포트 1에 신호를 여기하게 되면 최대 지향성이 그림 1(a)의 $\phi=45^\circ$ 에서 형성이 된다. 포트 2에 신호를 여기하게 되면 $\phi=225^\circ$ 에서 최대 지향성이 생기게

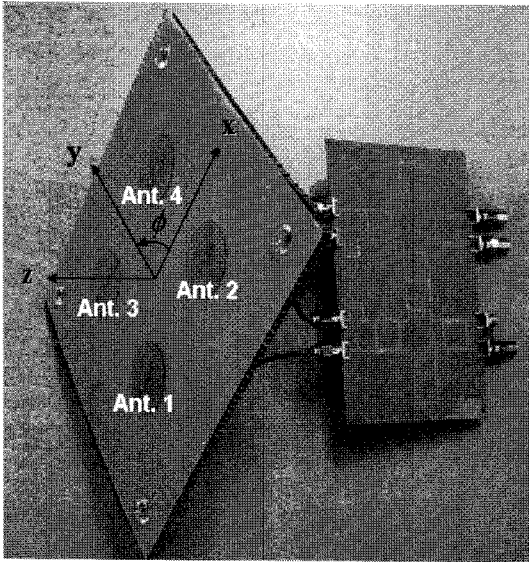


그림 10. 제작된 원추형 빔 형성 급전 구조와 2×2 배열 안테나
 Fig. 10. A fabricated conical beam forming feed network and 2×2 array antenna.

되며, 포트 3과 4는 포트 1과 2의 정확히 대칭되는 구조이므로 최대 지향성이 각각 $\phi=135^\circ$, $\phi=315^\circ$ 에서 생기게 된다. 중심 주파수 2.57 GHz에서 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴은 그림 11에 나타내었다. 방사 패턴은 $\phi=45^\circ$ 축과 z축을 포함하는 평면으로 자른 패턴이다. 그림 11(a)는 포트 1에 신호를 여기 하였을 때의 방사 패턴이다. 세로축은 $\phi=225^\circ$ 를 가리키는 축이 된다. 따라서 그림에서 최대 지향성은 x축과 y축의 중심이 되는 $\phi=45^\circ$ 와 z축을 기준으로 하였을 때 $\theta=45^\circ$ 에서 발생한다. 포트 2에 신호를 여기하게 되면 $\phi=225^\circ$ 와 $\theta=45^\circ$ 에서 최대 지향성을 가지게 된다. 시뮬레이션과 측정된 방사 패턴은 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 포트 3과 4에 신호를 여기하였을 때의 방사 패턴 급전 구조의 대칭성에 의해 $\phi=135^\circ$ 와 z축을 포함하는 평면에 대해서 자르면 그림 9와 동일한 방사 패턴을 가지게 된다. 그림 9의 이득은 그림 7의 단일 안테나의 이득과 비교하였을 때 약 4 dB가 향상이 된다. 측정에서는 단일 안테나에 비하여 이득이 4 dB가 향상이 되었으며, 시뮬레이션에서는 이득이 4.6 dB가 향상이 되었다. 측정과 시뮬레이션의 차이는 급전 구조의 손실에 의한 영향이다.

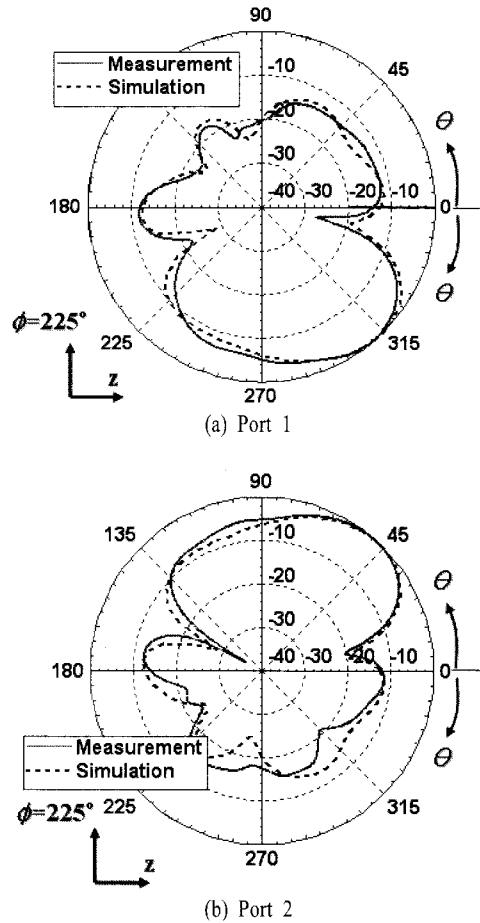


그림 11. 2.57 GHz에서 급전 구조를 포함한 2×2 배열 안테나의 시뮬레이션 및 측정된 방사 패턴 (a) 포트 1에 신호를 여기한 경우, (b) 포트 2에 신호를 여기한 경우

Fig. 11. Simulated and measured radiation patterns of the 2×2 array antenna with the feed network at 2.57 GHz when the signal was inserted (a) at port 1 and (b) at port 2.

V. 결 론

본 논문에서는 분할된 원추형 빔 형성을 위한 새로운 급전 구조를 제안하였다. 제안된 급전 구조는 2×2 배열 안테나에 적용할 수 있는 구조로 최대 지향성이 z축을 기준으로 45° 기울어진 방향에 형성이 되며, 위성 DBM 응용에 적합한 구조이다. 급전 구조는 90° 하이브리드 4개와 하나의 크로스오버, 4개의 90° 지연선으로 설계가 가능하며 스위치를 이용하여 각 입력 포트를 선택함으로써 원하는 패턴을

선택할 수 있다. 각 포트에 따른 빔 형성을 검증하기 위하여 안테나를 설계하였으며, 안테나는 원형 패치에 비아를 이용하여 원추형 빔을 갖는 구조이다. 중심 주파수 2.6 GHz에 안테나와 급전 구조를 마이크로스트립 형태로 제작을 하였으며, 급전 구조와 배열 안테나를 연결하여 방사 패턴을 측정하였다. 측정된 패턴은 시뮬레이션과 일치하였고, 최대 지향성은 입력 포트에 따라 $\theta=45^\circ$ 와 $\phi=45^\circ$, $\phi=225^\circ$, $\phi=135^\circ$, $\phi=315^\circ$ 에서 형성이 되었다.

제안된 급전 구조 및 안테나는 위성 신호를 수신하는 고속 이동 물체의 천장에 집적화할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] Constantine A. Balanis, *Antenna Theory*, 3rd Ed., Wiley, 2005.
 [2] Robert J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, 2nd Ed., Artech House, 2005.
 [3] J. Butler, R. Lowe, "Beam-forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas", *Electron. Des.*, vol. 9, pp. 170-173, Apr. 1961.
 [4] M. A. Hiranandani, A. A. Kishk, "Widening butler matrix bandwidth within the X-band", in *Proc. IEEE Antennas Propagat. Soc. Int. Symp.*, vol. 4A, pp.

321-324, Jul. 2005.

[5] F. Zavosh, J. T. Aberie, "Analysis of post-tuned cavity-backed circular microstrip patch antennas", *IEE Proc. Microwaves, Antennas and Propagat.*, vol. 143, no. 1, pp. 18-24, Feb. 1996.
 [6] C. K. Kim, L. M. Lee, H. C. Park, W. Hwang, and W. S. Park, "Impact damage and antenna performance of conformal load-bearing antenna structures", *Smart Materials and Structures*, vol. 12, pp. 672-679, 2003.
 [7] J. H. Jeon, W. Hwang, H. C. Park, and W. S. Park, "Buckling characteristics of smart skin structures", *Composite Structures*, vol. 63, pp. 427-437, 2004.
 [8] D. H. Kim, W. Hwang, H. C. Park, and W. S. Park, "Fatigue characteristics of a surface antenna structure designed for satellite communication", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 24, pp. 35-51, 2005.
 [9] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd Ed., Wiley, 2005.
 [10] J. Reed, G. J. Wheeler, "A method of analysis of symmetrical four-port networks", *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 4, no. 4, pp. 246-252, Oct. 1956.

김 재 희



김재희

2004년 8월: 고려대학교 전기전자 전파공학부 (공학사)
 2005년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석□박사 통합과정
 [주 관심분야] 밀리미터파 빔 형성 안테나, 소형안테나, Metamaterials

박 위 상



박위상

1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 6월: University of Wisconsin Madison 전자공학과 (공학석사)
 1986년 8월: University of Wisconsin Madison 전자공학과 (공학박사)
 1976년 7월~1978년 11월: 삼성전자 공업주식회사

1984년 1월~1986년 8월: University of Wisconsin-Madison, TA 및 RA

1986년 8월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
 [주 관심분야] Design of Microstrip Antennas, Full-Wave Analysis of Microstrip Structures, Design of Passive Microstrip Devices by Network Modeling, Measurement and Simulation of EMI/EMC for Cellular Phones