

혼 안테나용 원형 편파 발생이 가능한 동축-도파관 변환 구조

Circularly Polarized Wave Generating Coaxial to Waveguide Transition for Horn Antenna

이광재 · 우덕제 · 이택경 · 이재욱

Kwang-Jae Lee · Duk-Jae Woo · Taek-Kyung Lee · Jae-Wook Lee

요 약

본 논문에서는 혼 안테나를 위한 원형 편파가 발생 가능한 동축-도파관 변환 구조를 제안한다. 제안된 장치는 동축 선로에서 원형 도파관으로 모드를 변환하기 위한 변환 구조와 원형 도파관에서 원형 편파를 발생시키기 위한 편파기 기능을 동시에 가진다. 제안된 구조는 동축 선로에서 원형 도파관으로 TE₁₁ 모드의 신호를 전달하기 위한 수직 동축 내심과 백숏 사이에 수직 전계를 수평 전계로 바꾸는 편파 비틀림 구조를 두어 원형 편파를 발생시킨다. 이러한 장치는 원형 편파 혼 안테나 이전에 위치해 시스템을 단순화 시킬 수 있는 장점을 가진다. 제안된 원형 편파 발생이 가능한 동축-도파관 변환 구조는 X-대역(8.0~8.5 GHz)에서 동작하게 설계하였다.

Abstract

This paper deals with a coaxial-to-waveguide transition generating circularly polarized wave to be connected with horn antennas. By combining vertical coaxial fed structure, back-short and the polarization twisting structure, the circular polarization is successfully generated in the waveguide. The designed and implemented transition shows that the present structure can significantly reduce the size of the antenna part at X-band.

Key words : Coaxial-to-Waveguide Transition, Circular Polarization, Horn Antenna

I. 서 론

위성 통신과 같은 원거리 통신을 위해서는 고 출력의 신호 전송이 필요한데, 마이크로파 시스템에서는 고 전력 전송이 용이한 도파관(waveguide)을 널리 사용한다. 하지만 일반적인 동축 선로(coaxial cable)나 마이크로스트립 선로와 같은 전송 선로들은 기본 모드로 TEM 모드로 신호가 전달되나, 구형 또는 원형 도파관에서는 TE 또는 TM 모드가 발생된다. 이러한 이종의 선로 간 모드를 변환하는 구조(transition)가 필요하게 된다^{[1]~[8]}. 또한 위성 통신에서는 송·수신 신호가 전리층을 통과할 때 편파가 회전하

는 페러데이 회전 현상을 극복하기 위해 X-대역 이하의 주파수 대역에서는 원형 편파 신호를 사용한다. 도파관 시스템에서는 혼 안테나 앞단에 원형 편파를 발생하는 편파기(polarizer)를 설계하여 구현한다. 이러한 기존의 편파기는 도파관 내에 유전체 판을 두거나 아이리스(iris) 또는 홈 구조(groove)를 이용하여 서로 수직하는 전계에 위상차를 주게 하여 원형 편파를 발생시키는 방법을 사용한다^{[9]~[12]}. 하지만 이러한 구조들은 원형 편파의 변환을 위해 어느 정도의 변환 길이(transition length)를 필요로 한다. 이 때문에 편파기가 삽입됨으로 시스템의 크기가 커지고 무게가 무거워지는 단점을 가진다.

한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(School of Electronics, Telecommunication and Computer Engineering, Korea Aerospace University)

· 논문 번호 : 20100503-055
· 교신저자 : 이택경(e-mail : tklee@kau.ac.kr)
· 수정완료일자 : 2010년 6월 18일

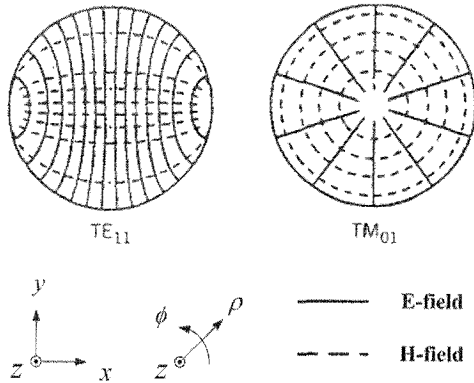


그림 1. 원형 도파관의 모드 별 전자기 분포도^[17]
 Fig. 1. Field configurations of TE and TM modes in a circular waveguide^[17].

본 논문에서는 동축-도파관 변환 구조 내에 편파 비틀 구조(polarization twister)^{[13],[14]}를 삽입하여 기존의 동축-도파관 변환 구조와 편파기의 조합에 비해 단순화 하여 그 크기를 개선시킨 원형 편파 발생이 가능한 동축-도파관 변환 구조를 제안한다^{[15],[16]}. 제안 구조는 X-대역(8.0~8.5 GHz)에서 설계되었으며, 제작된 시제품은 끝단이 개방된(open-ended) 원형 개구면 안테나(circular aperture antenna)에 적용하여 제안 구조의 성능을 측정하였다.

II. 원형 편파가 발생하는 동축-도파관 변환 구조

본 논문에서는 보다 좋은 축비(axial ratio)의 원형 편파를 얻기 위해 원형 도파관(circular waveguide)을 적용해 설계하려고 한다. 원형 도파관에서는 기본 모드로 TE₁₁ 모드가, 그 다음 모드로 TM₀₁ 모드가 발생한다. 원형 도파관 내에서 발생하는 모드별 전자기 분포도는 그림 1과 같다^[17].

이러한 원형 도파관의 기본 모드인 TE₁₁ 모드를 인가하기 위해 그림 2와 같이 동축 내심이 같은 전계 방향을 가지도록 y축 방향으로 도파관 내 삽입하여 설계한다^{[11]~[5]}. 동축 내심이 도파관 내부로 삽입이 되면 전류는 내심을 타고 흐르며, 도파관 내로 전파된다. 이때 도파관 내에서는 ±z 방향으로 전파되며, 보통은 한쪽 방향을 단락(short)하여 전 반사(total reflection)를 시킨다. 이러한 부분은 백숏(back-short)이라 한다. 백숏은 동작 주파수 대역에서 동축

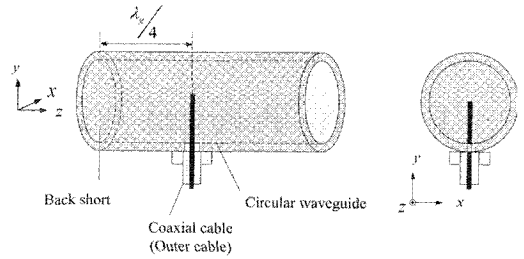


그림 2. 동축-원형 도파관 변환 구조
 Fig. 2. Coax to circular waveguide transition.

내심과 $\lambda_g/4$ 의 간격을 가지게 하여 정재파(standing wave)가 발생하지 않게 설계한다. 또한 도파관에 삽입된 동축 내심의 높이는 적절히 조절하여 임피던스 정합한다^{[11]~[7]}. 이러한 변환 구조는 TE₁₁ 모드에서 안정적으로 동작한다. TM₀₁ 모드가 발생하는 TM₀₁ 모드 차단 주파수 이후에서는 원치 않는 동작 특성을 보일 수 있다.

도파관 내에서 원형 편파를 발생시키기 위해 서로 수직인 전계에 90도 위상 차를 준다. 즉, 원형 도파관의 기본 모드인 TE₁₁ 모드를 서로 수직인 전계로 각기 나누고, 90도 위상을 주는 구조로 편파기를 구현한다^{[9]~[12]}. 본 논문에서는 동축-도파관 변환 구조에 편파 비틀 구조^{[13],[14]}를 조합하여 원형 편파 발생이 가능한 동축-도파관 변환 구조를 제안한다.

그림 3은 제안된 구조의 원형 편파 발생 원리를 보여주고 있다. 제안된 구조는 수직 방향(y축에 대해 누워 있는 방향, E_y)의 전계를 수평 방향(x축에 대해 누워 있는 방향, E_x)의 전계로 바꾸어주는 편파 비틀 구조를 동축 내심과 백숏 사이에 둔다. 여기서 편파 비틀 구조는 45도 각도를 가지고 기운 형태의 도체로 되어 있는 선 반사기(wire reflector)와 전 반사기(solid reflector)를 $\lambda_g/4$ 간격을 두어 구현하는데, 이는 카세그레인 반사경 안테나(Cassegrain reflector antenna)의 가림 효과(blockage effect)를 극복하기 위한 구조로 이용된다^{[13],[14]}. 이전에서 언급한 바와 같이 원형 도파관 내에서는 동축 선로에서 전달된 신호는 동축 내심을 타고 도파관 내 수직 방향으로 공급되며, TE₁₁ 모드를 여기서킨다. TE₁₁ 모드(수직 성분의 전계 방향만 가진다고 가정한다.)는 동축 내심을 기준으로 ±z 방향으로 전파된다. 이때 -z 방향

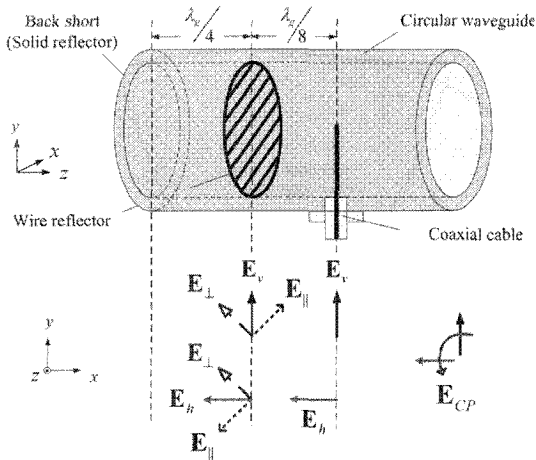


그림 3. 제안된 구조의 원형 편파 발생 원리
Fig. 3. Principle of circularly polarized wave generating for a proposed transition.

으로 전파된 수직 전계는 도체로 이루어진 45도 기울은 선 반사기(wire reflector)를 거치게 된다. 이때 동축 내심에 대해 수직한 전계(E_{\perp})는 선 반사기에 수직 방향의 전계(E_{\perp})와 선 반사기에 수평 방향의 전계(E_{\parallel})의 합으로 이루어지며, 선 반사기에 의해 수평 전계(E_{\parallel})는 반대 위상을 가지며, 반사되고 수직한 전계(E_{\perp})는 통과한다. 통과된 수평 전계(E_{\perp})는 $\lambda_g/4$ 의 길이를 가지고 위치되어 있는 백색(solid reflector)에 반사되어 동위상의 반사파가 되어 반대 위상이 된 수평 전계(E_{\perp})와 합쳐진다. 이는 결과적으로 동축 내심에 대해 수평 방향의 전계(E_{\parallel})로 바뀌어 $+z$ 방향으로 전파된다. 이때 동축 내심과 선 반사기와의 간격을 $\lambda_g/8$ 로 두어 파가 왕복하면서 90도 위상차를 가지게 하면 원형 편파가 발생된다. 또한 선 반사기가 가지는 ± 45 도 값에 따라 좌수 편파와 우수 편파가 결정된다.

III. 제안된 구조의 모의실험

본 논문에서는 제안 구조의 성능을 검증하기 위해 원형 도파관의 끝단 개방을 한 원형 개구면 안테나를 부착해 안테나 반사 손실과 축비 특성 등의 전기적 성능을 확인하였다.

그림 4는 제안된 구조의 성능을 실험하기 위한 구조이다. 제안 구조는 이전에서 언급한 바와 같이 X-대역(8 GHz)에서 동작하게 설계하였다. 또한 도파관

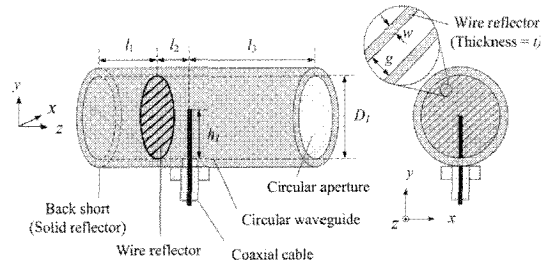


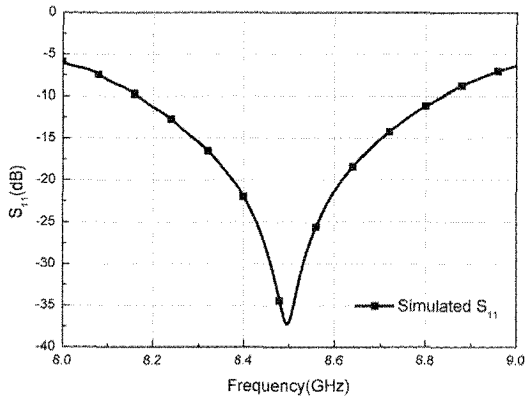
그림 4. 모의실험을 위한 원형 편파 안테나의 구조
Fig. 4. Geometry of proposed antenna for simulations.

표 1. 제안된 원형 편파 안테나의 설계 값(mm)
Table 1. Design values of proposed CP antenna(mm).

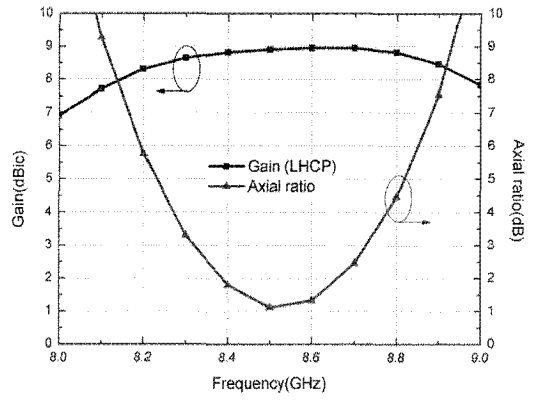
Parameters	Values	Parameters	Values
D	23.84	h	9.0
l_1	18.0	g	2.0
l_2	8	w	1.0
l_3	28.8	t	1.0

은 WC-94 표준형 원형 도파관에 맞게 설계하였고, 선 반사기는 추후 시제품 제작을 위해 금속 가공이 가능한 수치를 가지도록 하였다. 표 1은 X-대역에서 동작하는 원형 편파 안테나의 설계 변수와 그 값이다. 모의실험은 3D 전자기 시뮬레이션 프로그램인 CST MWS를 사용하여 수행하였다.

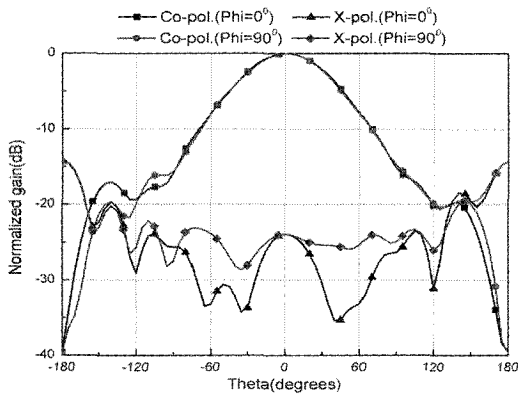
그림 5는 표 1의 설계 값으로 모의실험된 제안된 원형 편파 안테나의 실험 결과이다. 제안된 안테나는 길이 54.3 mm로 중심 주파수 대비 $0.76 \lambda_g$ 의 크기를 가졌으며, VSWR<1.5 이하 대역폭 200 MHz (8.5~8.7 GHz), 최고 이득 9.0 dBic, 축비 3.0 dB 이하, 최소 1 dB이며, 반전력 빔 폭 70도, 교차 편파비(Co-/X-pol. ratio) -23.8 dB, 축비 빔 폭(<3 dB) 140도의 결과를 얻었다. 그림 6은 원형 개구면에서 방사되는 원형 편파의 전계 분포도이다. 위상이 변함에 따라 좌수 방향으로 회전함(LHCP)을 알 수 있다. 또한 설계 이론에 맞게 목표 주파수의 변경 실험을 하였다. 표 2는 설계 주파수에 따른 원형 편파 안테나의 설계 값이다. 이전 장에서 언급한 바와 같이 3개의 안테나에서 l_1 값은 $0.25 \lambda_g$ 에 가까운 값을 가진다. 한편, l_2 값은 설계 주파수가 높아질수록 $0.125 \lambda_g$ 보다 약간 작은 값을 가지는데, 이는 최적 특성



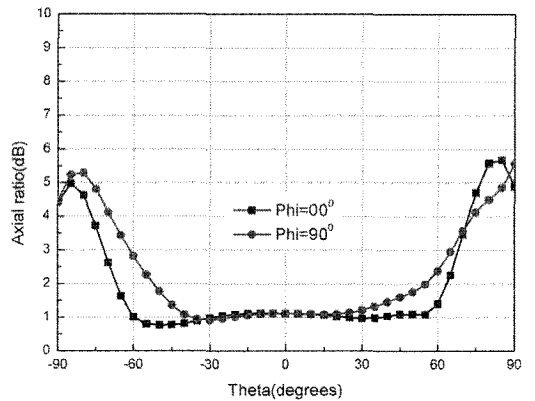
(a) 안테나 반사 손실
(a) Antenna return loss



(b) 이득, 축비
(b) Gain, axial ratio

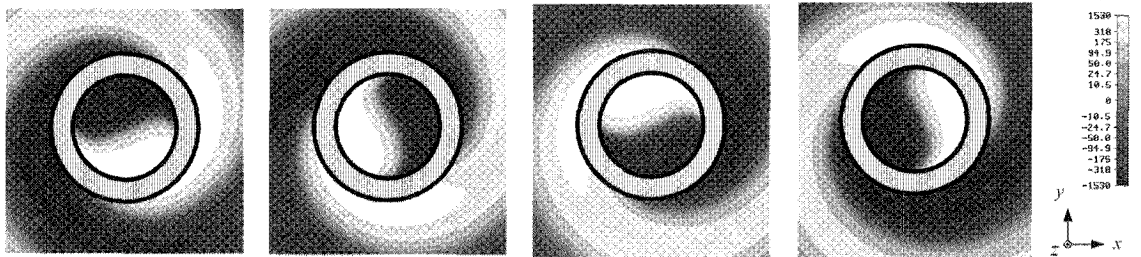


(c) 방사 패턴(8.5 GHz)
(c) Radiation patterns at 8.5 GHz



(d) 축비 패턴(8.5 GHz)
(d) Axial ratio patterns at 8.5 GHz

그림 5. 제안된 원형 편파 안테나의 모의실험 결과
Fig. 5. Simulated results of proposed CP antenna.



(a) 0° at 8.5 GHz (b) 90° at 8.5 GHz (c) 180° at 8.5 GHz (d) 270° at 8.5 GHz

그림 6. 위상에 따른 제안된 안테나의 원형 편파 전계 분포

Fig. 6. E-field distributions for circular polarization generation according to the phase variations by proposed antenna.

결과를 가지는 변수를 실험 선택하였기 때문이다. l_3 값은 대략 $0.37 \sim 0.4 \lambda_g$ 의 값을 가지는데, 이 값은 개구면 안테나에 의해 결정되는 값이다.

그림 7에서는 설계 주파수에 따른 축비의 비교 그래프이다. 이를 바탕으로 목표 주파수에 맞는 설계가 가능하다.

표 2. 설계 값에 따른 동작 주파수

Table 2. The operating frequencies for various physical lengths.

Type	Parameter	Physical length(mm)	Electrical length(λ_g)	Operating frequency (GHz)
1	l_1	22.3	0.267	8.2
	l_2	10.5	0.126	
	l_3	30.5	0.365	
2	l_1	18.0	0.254	8.5
	l_2	8.0	0.113	
	l_3	28.8	0.406	
3	l_1	15.5	0.248	8.8
	l_2	7.0	0.112	
	l_3	23.5	0.377	

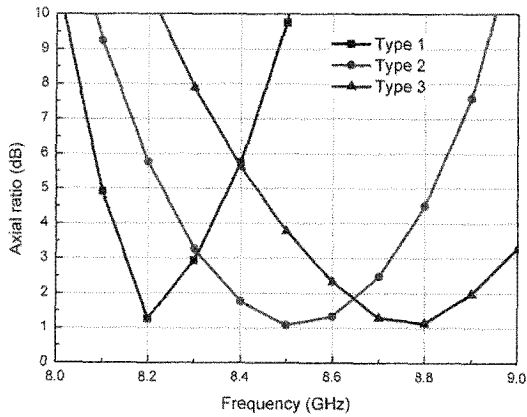


그림 7. 안테나 설계 값에 따른 축비 특성 비교
Fig. 7. The frequency responses of the axial ratio for three types of dimensions.

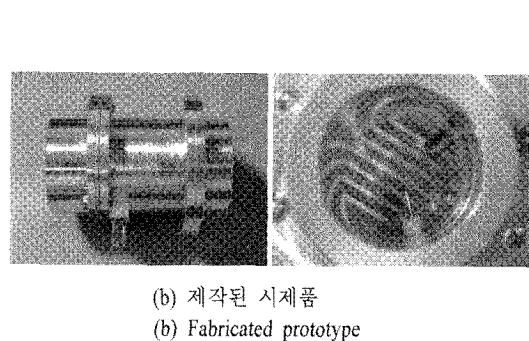
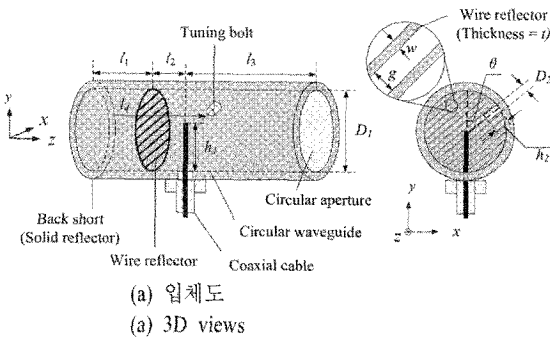


그림 8. 최종 제안된 안테나의 구조
Fig. 8. Geometry of proposed CP antenna.

IV. 제안된 구조의 제작 및 측정

이전 장에서 제안된 구조의 모의실험의 결과를 살펴보았다. 본 장에서는 제안 구조를 실제 도파관으로 구현하여 최적화된 설계 값을 제시하고, 이를 바탕으로 시제품을 제작하여 성능을 검증한다. 그림 8은 제작된 시제품의 구조를, 표 3에서는 설계 값을 보여주고 있다. 시제품은 백샷부, 선반사기부, 급전부, 방사부의 총 4부분으로 나눠 설계하였으며, 각 부분을 도파관 프랜지(waveguide flange)로 연결하였다. 또한 방사부는 용도에 따라 혼 안테나 등 다른 형태의 방사부와 연결이 용이하게 설계하였다.

한편, 개구면 안테나와 임피던스 정합의 개선을 위해 동축 내심 근방에 튜닝 나사를 두었다. 제안된 안테나는 길이 67.0 mm로 중심 주파수 대비 $0.8 \lambda_g$ 의 값을 가졌으며, 그림 9에서 볼 수 있는 것처럼 $VSWR < 1.5$ 이하 500 MHz(7.95~8.45 GHz)의 대역폭을 가졌으며, 최고 이득 8.6 dBic, 축비 2.0 dB 이하, 최소 0.8 dB이며, 반전력 빔 폭 54도, 교차 편파 비(Co-/X-pol. ratio) -26.7 dB, 축비 빔 폭(<3 dB) 132도의 결과를 얻었다.

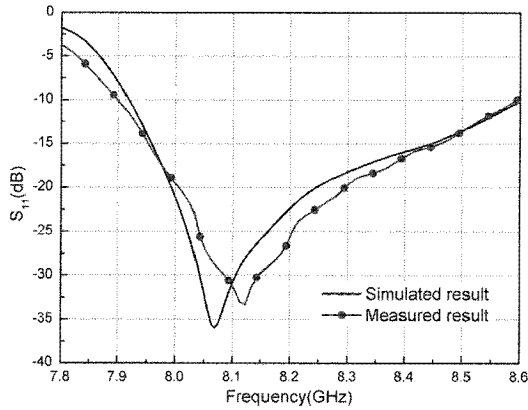
V. 결론

본 논문에서는 도파관 시스템에서 사용되는 원형 편파 발생이 가능한 동축-도파관 변환 구조를 제안하였다. 제안하는 구조는 원형 편파 혼 안테나에서 사용하는 일반적인 동축-도파관 변환 구조와 편파기를 동시에 구현한 구조이다. 이를 이용하여 원형 편

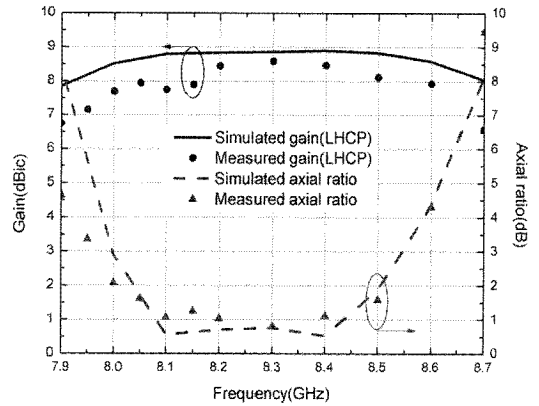
표 3. 최종 제안된 안테나의 설계 값(mm)

Table 3. Design values of proposed CP antenna(mm).

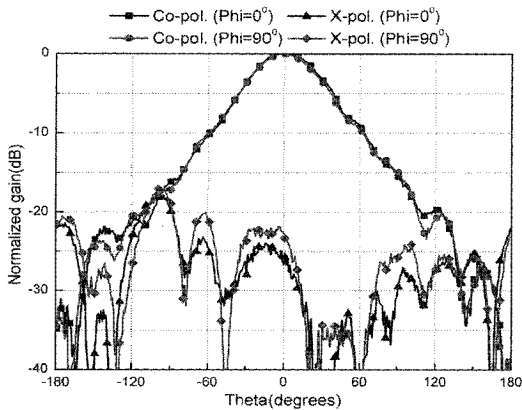
Parameters	D_1	D_2	l_1	l_2	l_3	l_4	h_1	h_2	g	w	t	θ
Values	23.84	3.5	22.0	7.0	38.0	26.0	9.2	5.0	2.0	1.0	1.0	60(°)



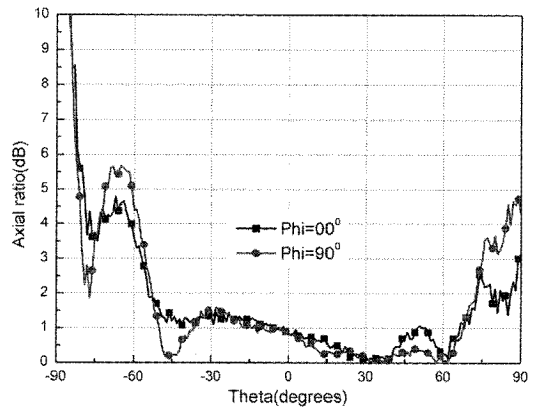
(a) 안테나 반사 손실
(a) Antenna return loss



(b) 이득, 축비
(b) Gain, axial ratio



(c) 방사 패턴(8.3 GHz)
(c) Radiation patterns at 8.3 GHz



(d) 축비 패턴(8.3 GHz)
(d) Axial ratio patterns at 8.3 GHz

그림 9. 제작된 시제품의 측정 결과
Fig. 9. Measured results of proposed prototype.

과 혼 안테나를 사용하는 시스템을 단순화 하여 짧은 길이와 가벼운 무게로 설계가 가능한 장점을 가진다. 본 논문에서는 제안하는 구조를 원형 개구면 안테나로 그 성능을 보였으며, 이를 바탕으로 혼 안테나, 코러게이션 혼 안테나, 코러게이션 초크 안테나, 반사경 안테나의 급전 안테나 등으로 적용이 가능하다. 또한 본 논문의 설계 원리를 이용하면 X-대역 이외의 다른 주파수 대역에서도 확장하여 적용할

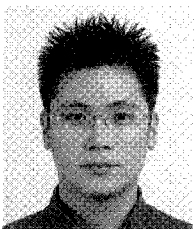
수 있다.

참고 문헌

[1] M. D. Deshpande, B. N. Das, "Input impedance of coaxial line to circular waveguide feed", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 25, no. 11, pp. 954-957, Nov. 1977.

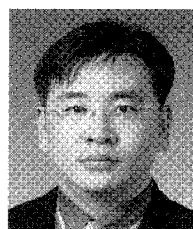
- [2] W. W. S. Lee, E. K. N. Yung, "The input impedance of a coaxial line fed probe in a cylindrical waveguide", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 42, no. 8, pp. 1468-1473, Aug. 1994.
- [3] Q. C. Zhu, A. G. Williamson, and M. J. Neve, "Reactance of posts in circular waveguide", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 55, no. 8, pp. 1685-1688, Aug. 2007.
- [4] R. E. Collin, *Field Theory of Guided Waves*, New York: McGraw Hill, pp. 258-271, 1960.
- [5] N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, McGraw-Hill, 1951.
- [6] M. J. Al-Hakkak, "Experimental investigation of the input-impedance characteristics of an antenna in a rectangular waveguide", *Electron. Lett.*, vol. 5, no. 21, pp. 513-514, Oct. 1969.
- [7] R. B. Keam, A. G. Williamson, "Analysis of coaxial-line/rectangular waveguide junction with dielectrically sheathed probe", *Electron. Lett.*, vol. 528, no. 3, pp. 240-241, Jan. 1992.
- [8] R. B. Keam, A. G. Williamson, "Broadband design of coaxial line/rectangular waveguide probe transition", *IEE Proc. Antennas Propag.*, vol. 141, no. 1, pp. 53-58. 1994.
- [9] W. P. Ayres, "Broad-band quarter-wave plates", *IRE Trans. on Microw. Theory Tech.*, vol. 5, pp. 258-261, Oct. 1957.
- [10] B. Subbarao, V. F. Fusco, "Compact coaxial-fed CP polarizer", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 3, pp. 145-147, Mar. 2004.
- [11] A. J. Simmons, "Phase shift by periodic loading of waveguide and its applications to broad-band circular polarization", *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 3, pp. 18-21, Dec. 1955.
- [12] N. Yoneda, M. Miyazaki, H. Matsumura, and M. Yamato, "A design of novel grooved circular waveguide polarizers", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 48, no. 12, pp. 2446-2452, Dec. 2000.
- [13] P. W. Hannan, "Microwave antennas derived from the cassegrain telescope", *IRE Trans. Antennas Propag.*, vol. 9, pp. 140-153, Mar. 1961.
- [14] J. Hanfling, G. Jerinic, and L. Lewis, "Twist reflector design using E-type and H-type modes", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 9, pp. 140-153, Mar. 1961.
- [15] 이광재, 우덕제, 이택경, "원형 편파 발생이 가능한 도파관 어댑터", 대한민국 특허청, 10-2009-0007483, 2009년 1월.
- [16] K. J. Lee, D. J. Woo, and T. K. Lee, "Waveguide adapter able to generate circularly polarized wave", U.S. patent 12 669 086, Jan. 2010.
- [17] C. S. Lee, S. W. Lee, and S. L. Chuang, "Plot of modal field distribution in rectangular and circular waveguides", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 33, pp. 271-274, Mar. 1985.

이 광 재



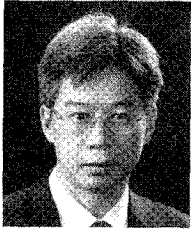
2007년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학사)
 2010년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학석사)
 2010년 4월~현재: 한국항공대학교 항공전자연구소 연구원
 [주 관심분야] 전자파, 마이크로파 능·수동 회로, 안테나 해석 및 설계

우 덕 제



2002년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학사)
 2005년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학석사)
 2010년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학박사)
 2010년 4월~현재: 한국항공대학교 항공전자연구소 연구원
 [주 관심분야] 주기구조의 모델링 및 회로 응용, 능·수동 소자 모델링, 안테나

이택경



1983년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1990년 5월~1991년 4월: Univ. of Texas at Austin, Post-Doctoral Fellow

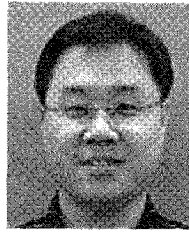
1991년 9월~1992년 2월: 한국과학기술원 정보전자연구소 연구원

2001년 7월~2002년 7월: Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, Associate Visiting Research Professor

1992년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파, 안테나, 전자파 해석, 레이더

이재욱



1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~2004년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부, 전자 및 항공전자 전공, 부교수

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 능·수동 소자 해석 및 설계, EMI/EMC 대책 기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테나 설계