

광대역 축비 특성의 원형 편파 안테나

Circularly Polarized Antenna with Wide Axial-Ratio Bandwidth

이광재 · 우덕제 · 이택경 · 이재욱

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

요약

본 논문에서는 저궤도 위성용 TT&C 안테나로 사용하기 위한 광대역 원형 편파 턴스타일 안테나를 제안한다. 턴스타일 안테나는 신호를 자유 공간으로 방사하기 위한 다이폴 방사부와 원형 편파 발생을 위한 서로 90도 위상차를 가지는 두 신호를 공급하는 전력분배기부로 구성된다. 다이폴 방사부는 발사 및 우주 궤도의 극한 환경에서도 견딜 수 있는 견고한 구조로 고안을 하였으며, 전력분배기부는 광대역 특성을 가지면서 주파수에 대해 평탄한 90도 위상차를 공급할 수 있도록 설계하였다. 제안된 안테나는 저궤도 위성용 TT&C 상·하향 링크를 동시에 만족할 수 있는 광대역 특성을 가지며, 전천후 임무 수행이 가능한 넓은 빔 폭과 개선된 원형 편파 축비 특성을 보인다.

Abstract

This paper deals with a TT&C circularly polarized turnstile antenna for LEO satellites. The turnstile antenna consists of radiator for radiating power to free-space and power divider for generating circularly polarized wave. we presents a radiator to tolerate in space environments and a power divider to provide flat phase difference at wide bandwidth. The bandwidth of the proposed antenna covers the frequency bands of up- and down-link. The antenna shows wide beamwidth and enhanced axial ratio for unfavorable space environments.

Key words : Turnstile Antenna, Circular Polarization, TT&C, LEO Satellite

I. 서론

우리나라는 1992년 최초의 우리나라 위성 우리별 1호를 시작으로, 2009년 8월에는 최초의 우주발사체인 나로호(KSLV-1)를 발사하였고, 최근엔 위성뿐 아니라 달 착륙선 개발 등 우주 강국으로 진입하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 이처럼 우리나라는 국가 우주 개발 중장기 기본 계획에 의해 앞으로도 많은 우주 개발 연구를 계획하고 진행하고 있다. 한편, 국내 몇몇의 연구소와 대학에서는 연구용으로 저궤도 위성이 많이 연구되고 있으며, 대표적인 위

성으로는 우주 및 지구 관측을 목적으로 하는 과학 기술위성이 있다. 본 논문에서는 이러한 저궤도 위성용 TT&C 안테나에 관해 언급한다.

TT&C는 원격 계측, 추적 및 명령계(Telemetry, Tracking and Command system)를 의미하며, 위성의 작동 상태를 확인하고, 위성의 임무를 명령, 제어하는 위성 운영에 있어 지극히 필수적이고 기본적인 시스템이다. 이 때문에 TT&C 안테나는 전기적, 기계적 성능이 안정적이어야 한다. 특히 저궤도 위성은 보통 소형 위성으로 특성상 대형 위성에 비해 상대적으로 미세한 자세 제어가 힘들기 때문에 저궤도 위

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

· 논문 번호 : 20100519-065

· 교신저자 : 이택경(e-mail : tklee@kau.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 7월 1일

성용 TT&C 안테나는 넓은 빔 폭이 요구된다^[1]. 또한 저궤도 TT&C는 보통 S-대역(2~4 GHz)에 할당되어 있는데, S-대역에서는 패러데이 회전을 극복하기 위해 원형 편파를 사용한다. 또한 원형 편파는 편파 분리성이 좋고 지상 페이딩 현상에 강해 위성용으로 선호되기도 한다. 이러한 TT&C용 안테나로는 마이크로스트립 안테나, 도파관 안테나, 코니칼 나선(conical spiral) 안테나, 턴스타일(turnstile) 안테나 구조 등이 사용된다^{[2]~[5]}. 하지만 마이크로스트립 안테나는 대역폭이 상대적으로 좁아 상, 하향 링크용으로 각각 설치해야 하며, 코니칼 나선 안테나는 제작이 까다롭고, 좋은 성능의 임피던스 정합이 어려운 단점이 있다. 이에 비해 턴스타일 안테나는 상대적으로 넓은 빔 폭 특성에 제작하기 쉬운 구조이다. 본 연구에서는 이러한 턴스타일 안테나를 극한의 우주 환경에서도 견고하며, 광대역에서 평탄하고 좋은 축비를 가지도록 고안하였다.

II. 턴스타일 안테나 설계: 방사부

일반적인 반파장 다이폴 두 개를 서로 수직하게 놓고 90도의 위상차를 주게 되면 전계의 형성이 식 1과 같이 되어 원형 편파가 발생하게 된다.

$$\mathbf{E}_{turnstile} = |E^{v-dipole}| \hat{x} + |E^{h-dipole}| e^{\pm j \frac{\pi}{2}} \hat{y} \quad (1)$$

이처럼 두 다이폴을 서로 수직하게 두고 전력분배기를 통해 각 다이폴에 90도 위상차를 가지는 신호를 입력하는 구조를 턴스타일 구조라 하며, 그림 1에서 본 논문에서 제안하는 턴스타일 안테나를 보였다. 식 1에서 볼 수 있는 것처럼 턴스타일 안테나는 입력하는 순서에 따라 좌수 편파(LHCP), 우수 편파(RHCP)를 결정하게 되며, 수직 다이폴(v-dipole)과 수평 다이폴(h-dipole)의 전계 세기의 비는 축비로 나타낸다. 한편, 90도의 위상차가 아닌 다른 위상 값이 입력되면 결과적으로 수직, 수평으로 놓인 다이폴의 전계 세기가 다른 것처럼 보여 축비에 악영향을 미치게 된다. 본 논문에서 제안하는 턴스타일 안테나는 신호를 자유 공간으로 방사하기 위한 다이폴 방사부와 원형 편파 발생을 위한 서로 90도 위상차를 가지는 두 신호를 공급하는 전력분배기부로 구성된다.

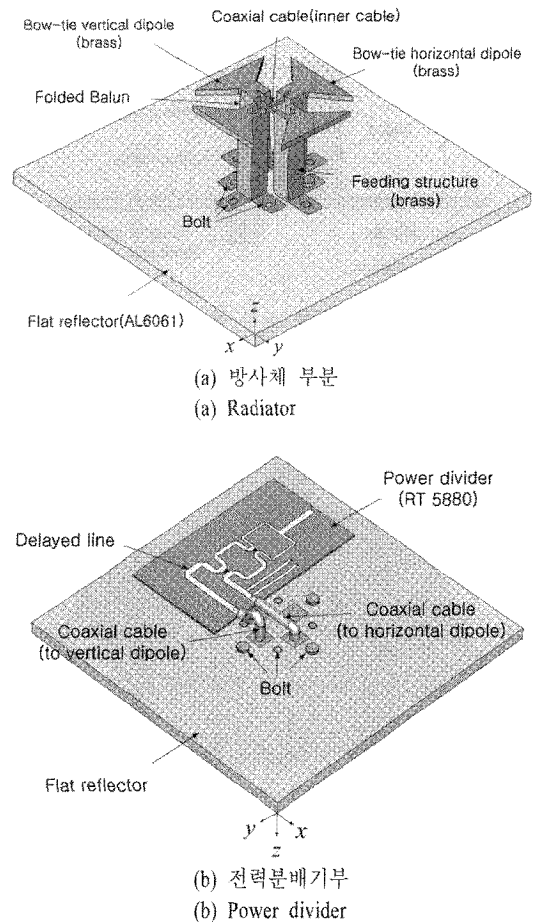


그림 1. 제안된 턴스타일 안테나
Fig. 1. Geometry of proposed turnstile antenna.

본 장에서는 방사부의 설계에 관해 논하려고 한다.

그림 1(a)에서는 본 연구에서 제안하는 턴스타일 안테나의 다이폴 방사부를 나타내고 있다. 같은 모양의 다이폴을 서로 수직하게 했고, 그 아래에 반사판을 두어 높은 이득의 전방 방향(+z축) 방사를 하게 하였다^[6]. 다이폴은 보우-타이(bow-tie) 형태로 안테나가 반사판을 가져도 적절한 임피던스 정합이 이루어지게 하였다. 또한 보우-타이 형태로 인해 반파장(75 mm)보다 짧은 길이(43 mm)에서 다이폴이 동작하게 하였다. 또한 그림 2처럼 폴디드 밸런을 적용하여 누설 전류를 차단하면서 다이폴을 지지하였다^{[6][7]}. 또한 우주 환경에서도 구조적으로 견고하게 하기 위해 다이폴은 두께 2 mm, 급전과 밸런은 두께 7 mm의 황동소자로 고안하였다. 다이폴의 급전은

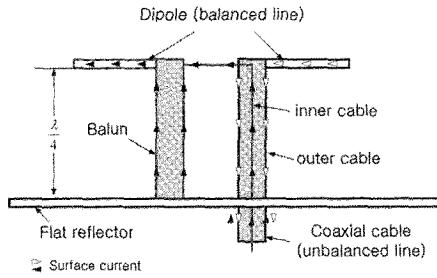
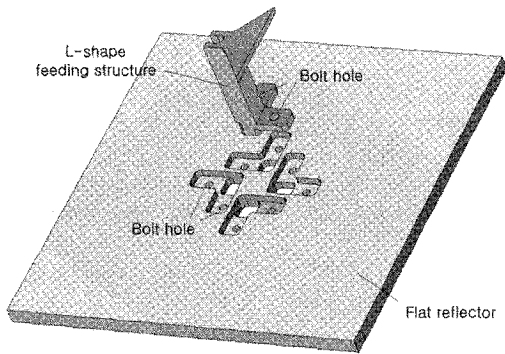
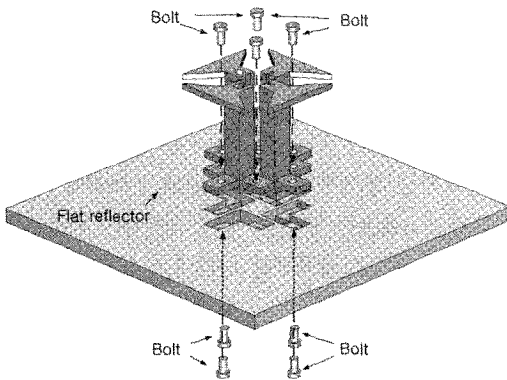


그림 2. 제안된 안테나를 위한 폴디드 밸런
Fig. 2. The folded balun for proposed antenna.



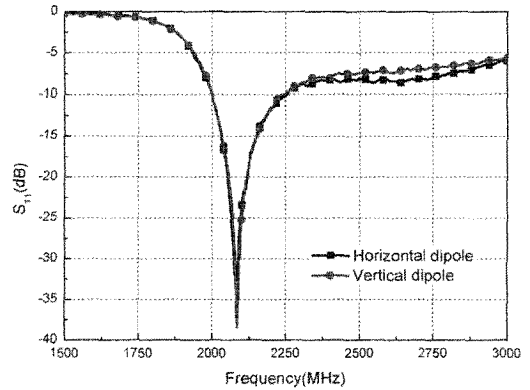
(a) 방위각 진동 극복 구조
(a) Anti-vibration structure on azimuth



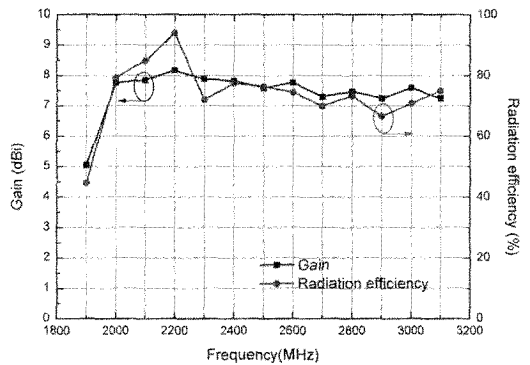
(b) 수직축 진동 극복 구조
(b) Anti-vibration structure on z-axis

그림 3. 진동 극복을 위한 고안 구조
Fig. 3. Geometry of proposed structure for anti-vibration.

황동소자 안을 뚫고 삽입시켜 구조적으로 보완하였다. 한편, 반사판은 두께 5 mm의 알루미늄 합금 소자를 사용하였다. 위성 발사 시 있을 진동을 고려하여 그림 3과 같이 방사체 하단을 “L” 모양을 내고 반사



(a) 안테나 반사 손실
(a) Antenna return loss



(b) 이득 및 방사 효율
(b) Gain and radiation efficiency

그림 4. 제안된 안테나 방사부 특성
Fig. 4. Measured results of a proposed radiator.

판에 홈을 낸 구조를 고안하여 방위각에 있을 진동을 극복하게 하였다. 또한 그림 3과 같이 나사 체결 시 각 방사 소자에 각각 위, 아래에서 실시하여 수직 진동을 극복하게 고안하였다. 또한 열팽창 계수가 매우 작은 금속 소자를 사용하였기 때문에 저궤도에서의 태양 복사열에 의한 급격한 온도 변화에 둔감한 특성을 보일 것으로 예상된다^[8]. 그림 4에서는 제안된 안테나의 방사체 부만의 전기적 특성 결과를 보였다. 방사체 부의 안테나 반사 손실 특성은 수직과 수평 다이폴이 거의 유사한 특성을 보였으며, 중심 주파수 2.1 GHz에 260 MHz의 대역폭을 얻었다. 또한 안테나 이득은 중심 주파수 근방에서 최대 8 dBi, 방사 효율 95 %의 특성을 보였다. 한편, 기본 공진일 발생한 중심 주파수 이후에는 이득 7.5 dBi,

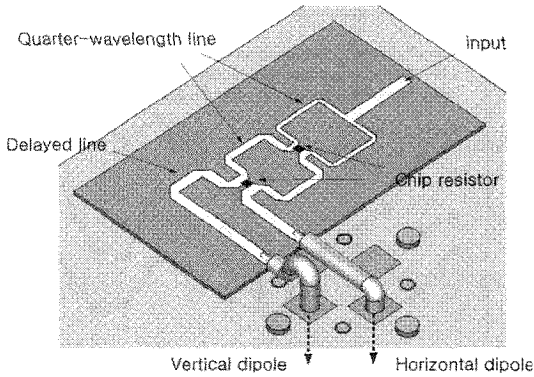
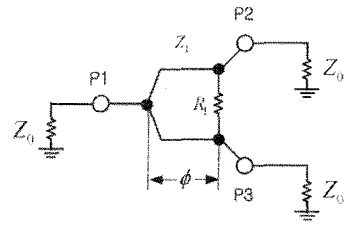


그림 5. 원형 편파 발생을 위한 90도 위상 차 전력분배기
 Fig. 5. The 90° phase divider for generating circularly polarized wave.

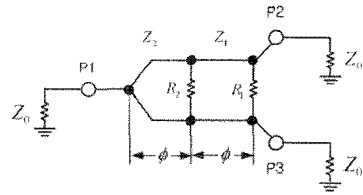
방사 효율 70 % 이상의 좋은 방사 특성을 계속 유지함을 알 수 있다. 만약 해당 주파수 대역에서 정재파비(VSWR)가 3 정도의 임피던스 부정합을 해결할 수 있다면 안테나의 대역폭을 상당히 개선할 수 있을 것이다.

III. 턴스타일 안테나 설계: 전력분배기부

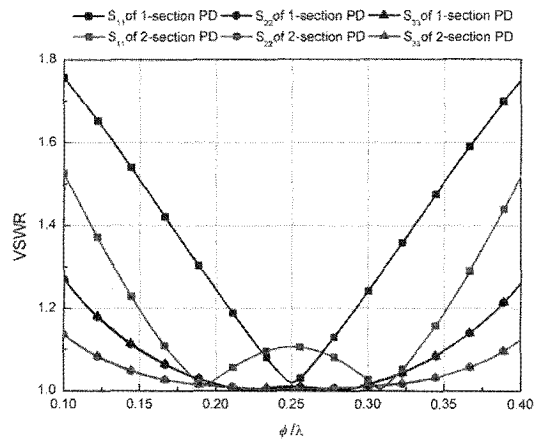
이전에서 언급한 바와 같이 턴스타일 안테나가 원형 편파를 발생하기 위해서 수직된 방사체에 서로 90도의 위상 차 신호를 입력해야 한다. 본 연구에서는 윌킨슨 전력분배기(Wilkinson power divider)^{[9],[10]}와 위상 지연 선로(phase delayed line)를 이용해 그림 5처럼 구현하였다. 일반적으로 윌킨슨 전력분배기를 사용하여 안테나의 배열 망(antenna array network)을 구현하게 되면 전체 안테나의 대역폭이 확장되는 현상이 생긴다(턴스타일 구조도 원형 편파 발생을 위한 일종의 2 소자 배열이다). 이는 전력분배기의 격리도(isolation)를 위한 저항과 포트 간 다반사(multiple reflection)에 의해 생기는 현상이다. 이는 다이폴의 기본 공진 이후에서 어느 정도 정합이 되어 대역폭이 확장되는 것인데, II장 마지막에서 언급한 문제를 해결하는 것이다. 또한 윌킨슨 전력분배기를 다단으로 설계하면 주파수 대역폭을 확장할 수 있는데, 그림 6과 표 1에서 보인 것처럼 전력분배기를 다단(multi-section)으로 설계할 수 있다^[10]. 위에서 언급한 바와 같이 원형 편파를 발생시키기 위한 위상 차



(a) 단일 전력 분배기
 (a) 1-section power divider



(b) 2단 전력 분배기
 (b) 2-section power divider



(c) 분배기별 주파수 응답 특성
 (c) Frequency responses

그림 6. 윌킨슨 전력분배기의 주파수 응답 특성
 Fig. 6. Frequency responses of Wilkinson power dividers.

표 1. 윌킨슨 전력분배기 설계 변수

Table 1. Parameters of the Wilkinson power dividers.

N-section	1-section	2-section	
f_{upper}/f_{lower}	1.2	2	
Z_0	1	1	50 Ω
Z_1	1.414	1.2197	61 Ω
Z_2	·	1.6398	82 Ω
R_1	2	4.8204	240 Ω
R_2	·	1.9602	100 Ω
ϕ	$\lambda/4$	$\lambda/4$	·

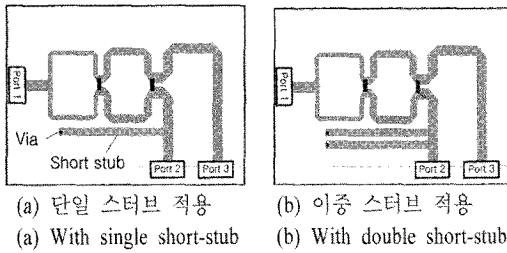


그림 7. 단락 스텐브를 적용한 다단 전력분배기
Fig. 7. Multi-section Wilkinson power dividers with short-stub.

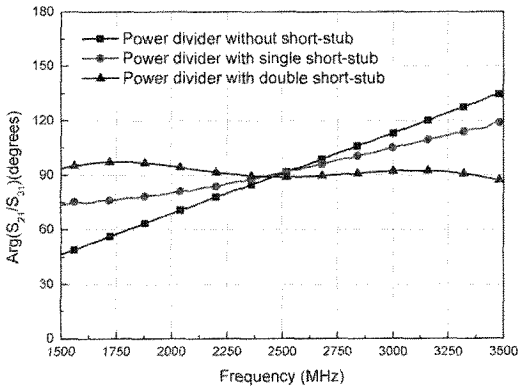


그림 8. 제안된 전력분배기의 출력 위상 차 비교
Fig. 8. Output phase difference of proposed power dividers.

입력을 위해 위상 지연 선로를 사용하였다. 본 연구에서는 우수 편파(RHCP)를 위해 수직 다이폴과 연결될 포트 3에 위상 지연 선로를 부설하였지만, 좌수 편파(LHCP) 발생을 위해 수평다이폴과 연결될 포트 2에 위상 지연 선로를 뒤 이를 해결할 수 있다. 한편, 위상 지연 선로는 동작 주파수를 벗어남에 따라 다른 위상을 보인다. 이 때문에 90도 전력 분배가 협대역 특성을 가진다. 이는 결국 원형 편파 안테나의 축비에 문제를 가져오게 된다. 본 연구에서는 그림 7과 같이 위상 지연 선로를 두지 않은 다른 포트에 $\lambda/4$ 단락 스텐브를 두어 이러한 문제를 해결하였다^[11]. 그림 8은 단락 스텐브를 포함하는 전력분배기의 출력 위상 차 특성을 보였다. 그림 8을 보면 단락 스텐브를 포함하지 않는 전력분배기의 출력 위상 차는 설계 주파수인 2,500 MHz를 벗어남에 따라 다른 출력 위상 차를 가지나, 단일 스텐브, 이중 스텐브를 적용한 전력분배기의 경우 설계 주파수를 벗어나

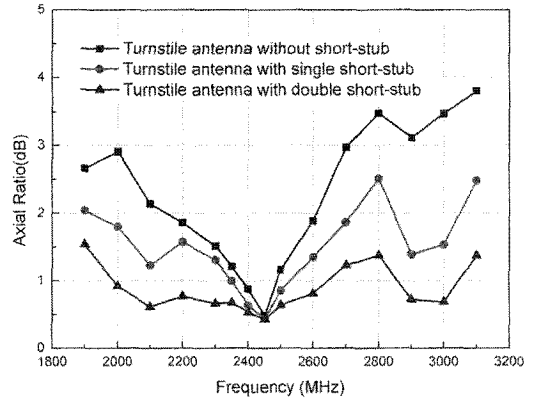


그림 9. 제안된 전력분배기를 적용한 안테나의 축비 특성
Fig. 9. Axial-ratio of turnstile antennas with proposed power dividers.

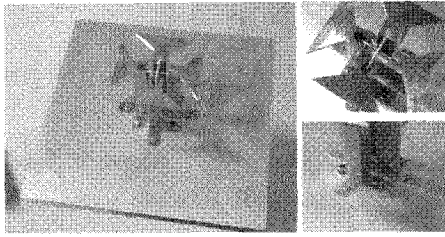
도 90도에 근접한 출력 위상 차 값을 보인다. 단락 스텐브는 전송 선로 이론에 의하면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$Z_{\text{short-stub}} = jZ_0 \tan(\beta l) \tag{2}$$

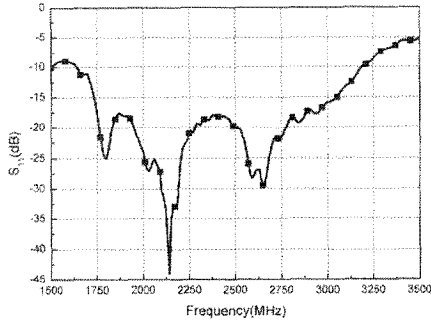
여기서 Z_0 는 단락 스텐브의 특성 임피던스이며, βl 은 그 전파상수와 길이의 곱이다. 식 (2)에 의해 단락 스텐브가 병렬로 연결되면, 단락 스텐브가 $\lambda/4$ 의 길이를 가지는 주파수를 기준으로 하여 용량성과 유도성 성분이 바뀌며 생기게 된다. 이는 결과적으로 위상 지연 선로와 위상 변화 기울기를 맞추게 된다. 또한 단락 스텐브를 전력분배기 동작 주파수의 $\lambda/4$ 의 길이로 두면, 단락 스텐브는 ∞ 의 임피던스 값을 가지게 되어, 병렬 개방 회로가 되고, 포트 2의 본 선로의 임피던스에는 영향을 주지 않게 된다. 한편, 이러한 전력분배기의 출력 위상 차 결과는 단일 단락 스텐브보다는 이중 단락 스텐브의 결과가 더욱 평탄한 90도를 가지게 하고 있다. 그림 9는 이러한 단락 스텐브를 부설한 전력분배기를 적용한 안테나의 축비 특성을 보였다. 앞의 결과에서 예상할 수 있는 것처럼 본래의 전력분배기보다 단일 스텐브를 적용하였을 때, 또한 이보다는 이중 단락 스텐브를 적용하였을 때 더욱 좋은 축비 결과를 얻을 수 있다.

IV. 제안된 안테나의 제작 및 측정

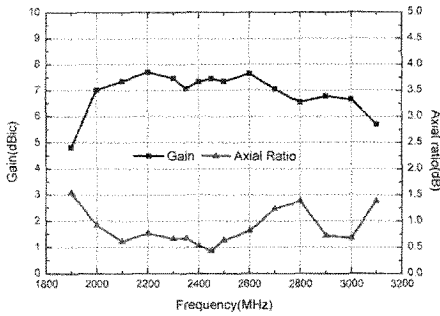
그림 10(a)은 최종 제안된 안테나의 시제품이다.



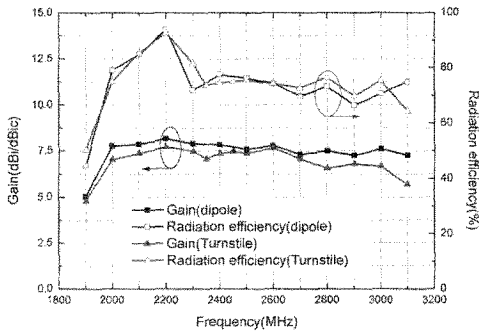
(a) 제작된 시제품
(a) Fabrication prototype



(b) 안테나 반사 손실
(b) Antenna return loss

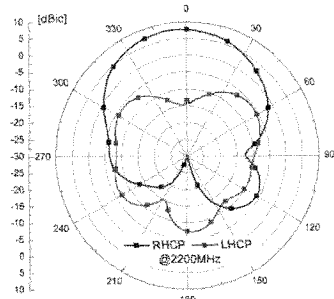


(c) 안테나 이득 및 축비
(c) Antenna gain and axial ratio

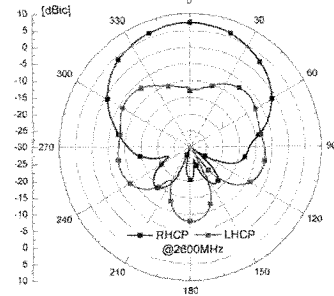


(d) 방사 효율
(d) Radiation efficiency

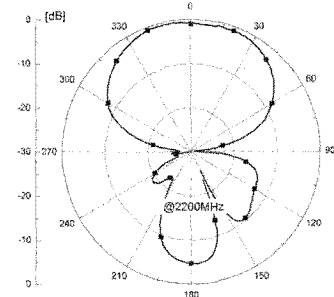
그림 10. 제안된 안테나의 성능
Fig. 10. Measured results of proposed antenna.



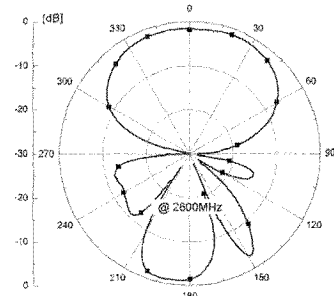
(a) 2,200 MHz 방사 패턴
(a) Radiation patterns at 2,200 MHz



(b) 2,600 MHz 방사 패턴
(b) Radiation patterns at 2,600 MHz



(c) 2,200 MHz 축비 패턴
(c) Axial-ratio patterns at 2,200 MHz



(d) 2,600 MHz 축비 패턴
(d) Axial-ratio patterns at 2,600 MHz

그림 11. 제안된 안테나의 주파수별 방사 특성
Fig. 11. Measured radiation performances.

방사 소자는 항동소자를 사용하였고, 반사판은 알루미늄 소자를 사용하였다. 그림 10 (a)에서 볼 수 있는 것처럼 다이폴의 급전은 동축 케이블로 이루어져 있으며, 이는 급전 부분 안에 삽입되어 있다. 또한 급전 및 벨런 구조는 "L" 모양으로, 반사판은 그에 맞는 홈으로 되어 있어 나사로 고정되게 하였다. 나사 체결은 반사판 양면에서 실시하였다. 전력분배기는 RT/duroid 5880 라미네이트 기판을 사용하여 SMA 커넥터를 이용해 급전할 수 있게 제작하였다. 그림 10, 11에서는 안테나의 측정 결과를 보였다. 측정 결과, 시제품은 VSWR<1.4 이하 2,000~3,000 MHz의 대역폭을 얻었다. 또한 방사 특성 측정은 무반향실에서 실시하였고, 측정된 측비는 동작 전 대역에서 최대 1.5 dB 이하, 평균 0.8 dB의 특성을 얻었다. 주파수별 방사 특성을 보면 최고 이득 7.5 dBic(RHCP), 빔폭(>0 dBic) 평균 120도의 결과를 얻었다. 한편, 측정된 턴스타일의 방사 효율은 다이폴 방사체의 방사 효율과 비교 시 동작 주파수 전 대역에서 비슷하게 유지하는 것을 알 수 있다. 다만 턴스타일 안테나 이득의 감소는 다이폴의 빔 폭 향상과 측비 부정합에 따른 감소라 생각할 수 있다. 지금까지의 측정된 결과는 위성 TT&C의 상·하향 링크를 모두 포함할 수 있는 특성이며, 저궤도 임무를 수행하기 충분한 성능이다.

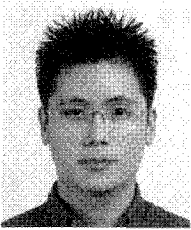
V. 결 론

본 연구에서는 극한의 우주 환경에서 견고하고 안정적인 특성을 얻기 위해 저궤도 위성용 TT&C 안테나로 광대역 원형 편파 턴스타일 안테나를 제안하였다. 보다 견고한 구조적인 특성을 얻기 위해 안테나를 금속 형태와 진동을 극복하기 위한 구조를 제안하여, 열적, 진동 및 충격 환경에서 안정적인 임무를 수행할 수 있게 하였다. 또한 안정적인 원형 편파를 구현하기 위해 단락 스티브를 가지는 전력분배기를 사용하여 광대역에서 평탄하고 좋은 측비를 가지게 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] 장영근, 이동호, 인공위성 시스템 설계 공학, 경문사, 1997년.
- [2] F. Ferrero, C. Luxey, G. Jacquemod, R. Staraj and C. Luxey, "Dual-band circularly polarized microstrip antenna for satellite applications", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 4, pp. 13-15, 2005.
- [3] Eu-An Lee, "A low cross-polarization circularly polarized spacecraft TC&R antenna", *Dig. 1994 IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp.*, Seattle, WA, vol. 2, pp. 914-917, Jun. 1994.
- [4] 고한용, 리준문, 유재택, 김세연, 안병철, 박동희, "위성용 TT&C 원형 나선 안테나 설계", 한국전자과학회논문지, 17(1), pp. 24-38, 2006년 1월.
- [5] 이정수, 오치욱, 서규제, 오승환, "기생 모노폴을 이용한 S-band Turnstile 안테나 설계", 한국전자과학회논문지, 17(11), pp. 1082-1088, 2006년 11월.
- [6] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, Wiley, pp. 197-204, pp. 538-541, 2005.
- [7] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Wiley, pp. 183-187, 1998.
- [8] 이광재, 우덕제, 전경진, 김보라, 이택경, "견고한 구조의 원형 편파 턴스타일 안테나", 대한민국 특허청 10-2009-0016912, 2009년.
- [9] E. J. Wilkinson, "An N-way hybrid power divider", *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-8, pp. 116-118, Jan. 1960.
- [10] Cohn. S. B, "A class of broadband three-port TEM-mode hybrid", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-16, no. 2, pp. 110-116, Feb. 1968.
- [11] 이광재, 우덕제, 이택경, "광대역 원형 편파 턴스타일 안테나", 대한민국 특허청, 10-2009-00-16912, 2009년 2월.

이 광 재



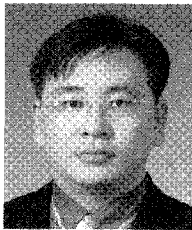
2007년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학사)
2010년 2월: 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학석사)
2010년 4월~현재: 한국항공대학교 항공전자연구소 연구원
[주 관심분야] 전자파, 마이크로파 능·수동 회로, 안테나 해석 및 설계

이 태 경



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

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] 주기 구조의 모델링 및 회로 응용, 능·수동 소자 모델링, 안테나

이 재 욱



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