

메타표면 덮개를 갖는 큐브위성 탑재용 S-Band 원형 편파 안테나 설계

안형준*, 김창성*, 박용배^o

Design of S-Band Circularly Polarized Patch Antenna with Metasurface Superstrate for Cube Satellite

Hyungjun An*, Changseong Kim*, Yong Bae Park^o

요약

본 논문에서는 S대역에서 동작하는 큐브위성 탑재용 원형 편파 메타표면 덮개 안테나를 제안하였다. 안테나의 이득을 향상시키기 위해 메타표면 덮개를 이용한 Fabry-Perot 공진 구조를 적용하였다. 상부 메타표면 덮개는 축비 향상을 위해 단위 셀이 제 2, 4 사분면 영역에서 결합된 구조를 사용했다. 측정된 S11, 이득, 대역폭은 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다. 축비 개선을 위해 메타표면을 재설계하였고, 안테나의 전체 크기는 $90 \times 90 \times 12$ mm($0.67\lambda_0 \times 0.67\lambda_0 \times 0.075\lambda_0$)이며, 동작주파수 대역은 기준 2.21~2.26 GHz(2%, <-10 dB(S11)), 안테나 최대 실현 이득은 2.24 GHz에서 7.12 dB, 축비는 2.2~2.22 GHz에서 3 dB이하 특성을 유지하였다.

Key Words : Cube satellite, satellite antenna, S-band antenna, circularly polarized patch antenna, metasurface superstrate

ABSTRACT

In this paper, we propose a S-band circularly polarized patch antenna with metasurface superstrate for cube satellite. Fabry-Perot resonator using metasurface superstrate was applied to improve antenna gain. The upper metasurface superstrate uses a structure in which the unit cells are defective in the second and fourth quadrant regions to enhance the axial ratio. The measured S11, gain and bandwidth agree well with the simulation results. The metasurface is redesigned to improve the axial ratio, and the overall size of redesigned antenna is $90 \times 90 \times 12$ mm($0.67\lambda_0 \times 0.67\lambda_0 \times 0.075\lambda_0$), the bandwidth is 2.21 ~ 2.26 GHz (2%, <-10 dB(S11)), the maximum realization gain is 7.12 dB at 2.24 GHz, and the axial ratio remained below 3 dB at 2.2 ~ 2.22 GHz.

I. 서론

소형위성은 4년 이하의 개발기간 및 1000억 원 이하의 개발비용으로 기존의 중·대형 위성에 비해 상대

적으로 적은 개발기간과 개발비용으로 위성산업에서 연구가 활발히 진행 중이다^[1]. 특히 소형위성 중 큐브위성은 1.3 kg이하의 질량과 (1U)의 크기를 가지며 1년 이하의 제작기간, 2억 원 이하의 제작비용을 갖기

* 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과(IITP-2019-2018-0-01424)로 수행되었음.

♦ First Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, anjk123@ajou.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, yong@ajou.ac.kr, 정회원

* Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, kcs1403@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 201905-083-A-RN, Received May 14, 2019; Revised June 7, 2019; Accepted June 7, 2019

때문에 최근 위성산업에서 주목받고 있다^[2]. 또한 큐브위성은 교육적 목적으로 최초 고안되었으나 위성산업의 발달 및 위성기술의 발전에 따라 편대비행을 통한 지구관측, 지진 감시, 우주탐사 등 다양한 분야에서 활용가치가 증가되고 있다^[3].

큐브위성 탑재용 안테나는 주로 낮은 두께와 상대적으로 제작이 단순한 평판형 안테나인 패치, 슬롯 안테나를 사용한다. 이러한 평판형 안테나의 낮은 이득을 해결하는 기술들에는 복사소자 배열 기술, 안테나 상부에 덮개를 얹는 Fabry-Perot 공진 구조 등이 있다. 기존 큐브위성 안테나는 주로 복사소자 배열을 이용했으며, 연구된 큐브위성 안테나 중 복사소자 배열 기법을 적용한 패치 안테나는 $1.7\lambda_0 \times 1.7\lambda_0 \times 0.1\lambda_0$ 의 크기를 가지며, 5.8 dB의 이득을 갖는다^[4]. 하지만 배열 안테나는 복잡한 급전구조를 갖기 때문에 본 논문에서는 Fabry-Perot 공진 구조를 이용한 패치 안테나를 설계, 제작했다.

Fabry-Perot 공진 안테나는 안테나 상부덮개와 접지면 사이에 2차원 공진기를 구성하게 되어 안테나의 이득 및 지향성을 향상시키므로, 추가적인 복사소자 배열 없이 이득을 향상시켜준다^[5-6]. 이전에는 단순 유전체 상부덮개를 사용했으나, 최근에는 상부덮개로 메타표면 혹은 주파수 선택 표면(Frequency Selective Surface)의 위상 변화 특성을 이용하여 이득 및 지향성을 향상된 연구가 있다^[7-9]. 최근 발표된 메타표면을 사용한 큐브위성용 슬롯 안테나는 S대역에서 최대이득 5.96 dB를 갖는다^[9].

본 논문에서 제시된 안테나는 메타표면을 사용한 큐브위성용 슬롯 안테나에 비해 이득이 1.04 dB 향상된 최대이득 7.02 dB를 가지며, $90 \times 90 \times 12 \text{mm}^3$ ($0.67\lambda_0 \times 0.67\lambda_0 \times 0.75\lambda_0$)의 크기를 갖는다^[9]. 축비 개선을 위해 안테나를 재설계하였고, 개선된 안테나의 축비대역폭은 2.2~2.22 GHz에서 3 dB이하 특성을 가지며 주파수 대역폭, 이득, 방사패턴은 기존 설계와 유사하다.

II. 안테나 설계

2.1 Fabry-Perot 공진 안테나

Fabry-Perot 공진 안테나는 그림 1에서와 같이 상부덮개와 하부 안테나의 접지면 사이에서 다중반사가 일어나며, 상부덮개를 투과한 전력 밀도는 식 (1)과 같다.

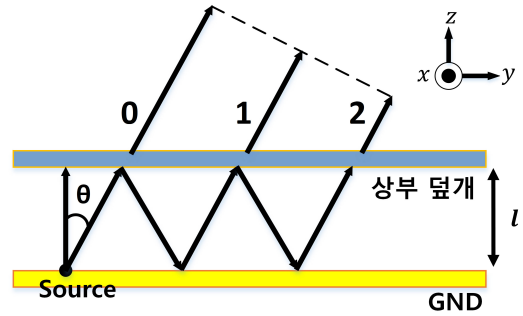


그림 1. 다중 반사를 이용한 Fabry-Perot 공진 안테나 설계 방법
Fig. 1. Design method of Fabry-Perot resonator antenna using multiple reflections

$$S = \frac{1 - |\Gamma|^2}{1 + |\Gamma|^2 - 2|\Gamma| \cos(\phi_{UP} + \phi_{GND} - \frac{4\pi}{\lambda} l \cos(\theta))} f^2(\theta) \quad (1)$$

$f(\theta)$ 는 안테나의 요소 복사 패턴, Γ 는 상부덮개의 반사계수, ϕ_{UP} 와 ϕ_{GND} 는 각각 덮개부와 접지면의 반사위상, l 은 덮개와 접지면 사이의 거리이다.

수직방향($\theta = 0^\circ$)에서 전력의 값이 최대가 되기 위해서는 분모의 \cos 항 값이 2π 의 정수배가 되어야 하며, 이를 정리하면 다음과 같다^[6].

$$l = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\phi_{UP} + \phi_{GND}}{2\pi} + N \right), N = \dots, 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

2.2 메타표면

메타물질은 임의의 도체 형상으로 인공적인 유전율과 투자율을 형성한다. 메타물질을 주기적으로 배열하여 이루어진 구조가 메타표면이며, 메타표면은 진행파의 진폭, 편파, 위상, 주파수 특성을 바꿔주는 기능을 가진다. 이러한 메타표면과 안테나를 결합한 구조 연구는 꾸준히 진행 중이며, 기본구조인 인공자기도체 구조를 활용한 안테나도 연구되었다^[9,10].

III. 안테나 구조 및 특성 분석

3.1 급전 안테나 구조 및 특성

2.24 GHz에서 공진하는 마이크로스트립 패치 안테나를 설계한 뒤 메타표면 덮개를 이용하여 최종 안테나를 설계하였다. 그림 2 (a)는 원형편파 마이크로스트립 패치 안테나를 나타낸다. 기판은 Taco-nic사의 RF-35($\epsilon_r = 3.5$)로 두께는 1.52 mm이다. 마이크로스트립 패치 안테나의 크기는 $35 \times 35 \text{mm}^2$, 기판의 크기

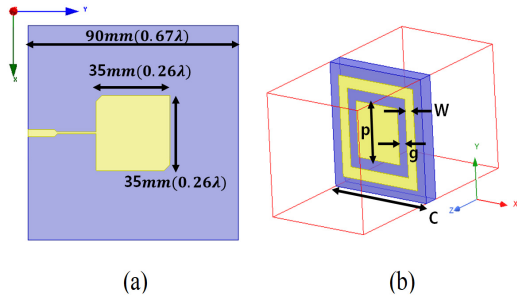


그림 2. (a) 원형편파 마이크로스트립 패치 안테나, (b) 메타표면의 단위 셀
 Fig. 2. (a) Circularly polarized microstrip patch antenna, (b) Unit cell

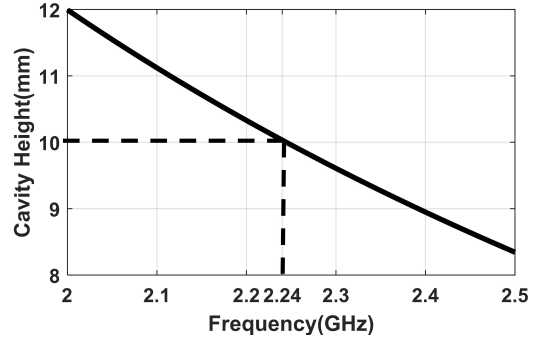


그림 5. 주파수에 따른 메타표면 덮개의 높이
 Fig. 5. Height of metasurface superstrate with frequency

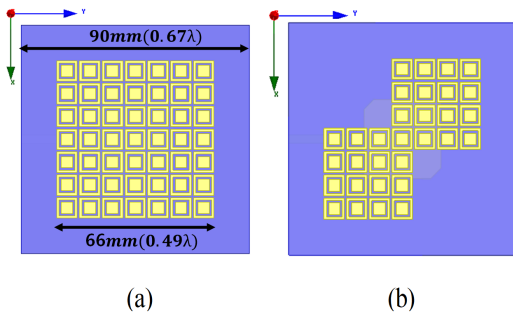


그림 3. (a) 7×7 셀을 갖는 메타표면 덮개, (b) 결함구조를 갖는 메타표면 덮개
 Fig. 3. (a) Metasurface superstrate with 7×7 multi-cell, (b) Metasurface superstrate with defected structure

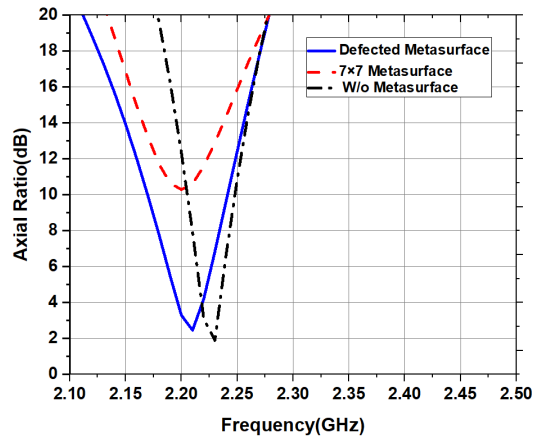


그림 6. 7×7 배열의 메타표면과 결함구조의 축비 비교
 Fig. 6. Axial ratio comparison of 7×7 metasurface and defected metasurface

는 90×90 mm²이다. 원형편파 발생을 위해 2, 4 사분면의 대각선 모서리 2.7 mm를 제거하였다^[11]. 급전은 50 Ohms SMA 커넥터를 이용하였으며, 급전부와 안테나의 임피던스 매칭을 위해 1/4 변환기를 사용하였

다. 안테나의 동작주파수 대역폭 2.22 ~ 2.27 GHz에서 최대 이득은 5.7 dB로 그림 4와 같다. 또한 패치 안테나의 축비는 2.22~2.235 GHz사이에서 3 dB 이하의 특성을 가지며 그림 6과 같다.

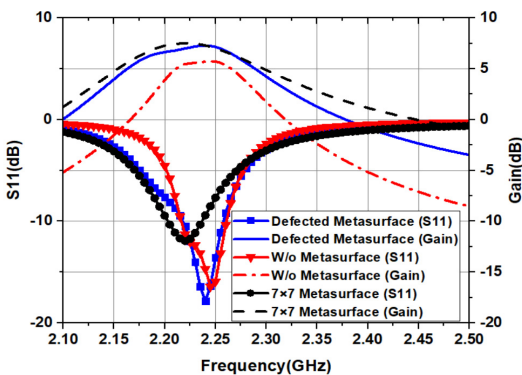


그림 4. 단일 패치 안테나, 7×7 배열의 메타표면 덮개 안테나, 결합된 메타표면 덮개 안테나의 S11 및 이득 비교
 Fig. 4. S11 and gain comparison of single patch antenna, 7×7 metasurface superstrate antenna and defected metasurface superstrate antenna

3.2 메타표면 덮개 적용 안테나 구조 및 특성

본 논문에서 사용한 단위 셀은 반사배열 안테나에서 위상 보정을 위해 사용된 형태로 그림 2 (b)에 나타내었다^[12]. 제시된 단위 셀의 파라미터 변수의 값은 다음과 같고, mm 단위를 사용한다. ($p=5, g=1, W=1, C=11$) 유전체는 Taconic사의 RF-35($\epsilon_r=3.5$)로, 두께는 1.52 mm이다.

그림 3의 (a)는 단위 셀을 7×7로 배열한 구조이다. 식 (2)에 따라 주파수에 따른 수직방향에서 전력이 최대가 되는 메타표면 덮개의 높이는 그림 5와 같다. 2.24 GHz에서 메타표면 덮개의 높이는 10 mm이다. 이를 7×7 배열 덮개에 적용한 안테나의 S11이 -10

dB일 때의 이득은 약 7.53 dB로 그림 4와 같다. 그러나 7×7 배열의 메타표면 덮개 안테나는 그림 6에서와 같이 축비가 10 dB 이상으로 원형편파 특성이 나타나지 않았다. 그림 7은 메타표면 덮개의 위상별 전류 분포이다. 표시된 부분에서 표면전류 발생으로 인해 원형편파 특성이 나타나지 않는 것을 확인하였고, 이를 제거하였다. 그림 8은 결합 구조의 위상별 표면전류분포를 나타냈으며 결합되기 이전의 구조에 비해 원형편파가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 그림 6에는 결합된 메타표면의 축비를 나타냈으며 2.2~2.3 GHz에

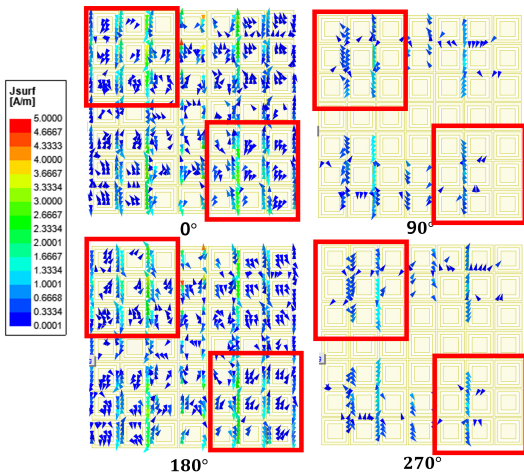


그림 7. 위상별 7×7배열 메타표면의 전류분포
Fig. 7. Surface current distribution of 7×7 array metasurface at each phase

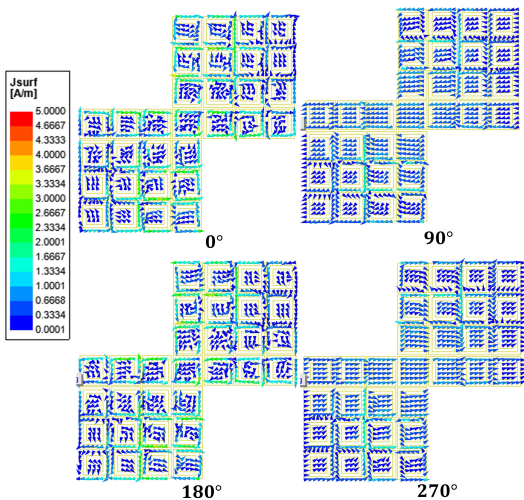


그림 8. 위상별 결합된 메타표면의 전류분포
Fig. 8. Surface current distribution of defected metasurface at each phase

서 3 dB이하 특성을 나타낸다.

이러한 결합 구조를 사용한 메타표면 덮개 안테나의 대역폭은 2.22 ~ 2.26 GHz, 이득은 약 7.28 dB로 단일 패치 안테나의 이득인 5.7 dB에 비해 약 1.58 dB 상승하였으며, 그림 4와 같다.

IV. 안테나 제작 및 측정

그림 9의 (a)는 실제 제작한 안테나의 모습이며, (b)는 인천 송도 정보통신 산업진흥원의 원역장 무반향실 사진이다. 안테나의 전체 크기는 90×90 ×12 mm³(0.67λ₀×0.67λ₀×0.075λ₀)로 λ₀는 2.24 GHz에서의 파장이다.

그림 10은 시뮬레이션과 측정 결과의 S₁₁이다. 시뮬레이션의 대역폭에 비해 측정된 안테나의 대역폭은 2.22~2.25 GHz로 중심주파수가 약 10 MHz 낮아졌으며, 중심주파수에서 -30 dB이하 특성을 나타낸다.

그림 11은 시뮬레이션과 측정 결과의 이득이다. 전반적으로 측정 주파수대역에서 결과가 유사하게 나타났으며 측정결과 최대 7.02 dB의 이득을 갖는다. 그림

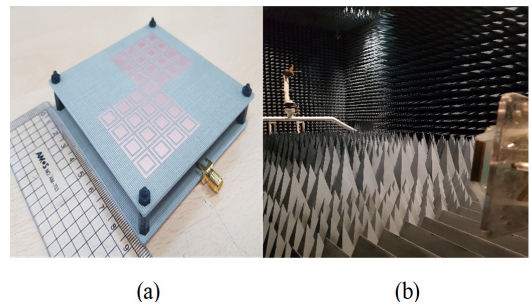


그림 9. (a) 제작한 안테나, (b) 원역장 무반향실
Fig. 9. (a) Manufactured antenna, (b) Far-field anechoic chamber

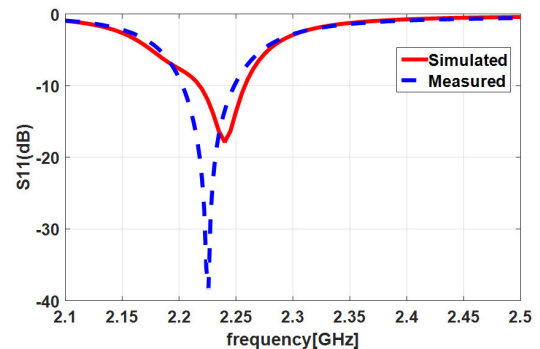


그림 10. 시뮬레이션 및 측정된 안테나의 S₁₁
Fig. 10. Simulated and measured S₁₁ of antenna

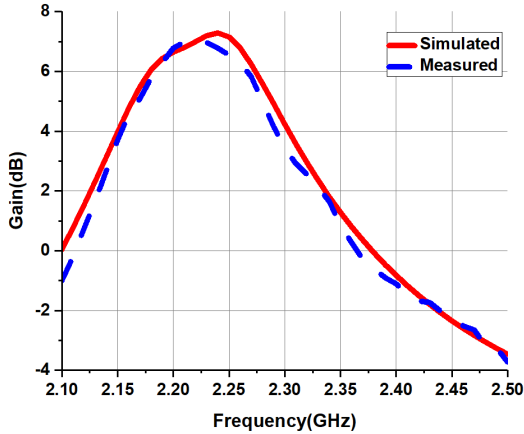


그림 11. 시뮬레이션 및 측정된 안테나의 이득
Fig. 11. Simulated and measured antenna gain

12는 시뮬레이션과 측정 결과의 축비 비교이다. 2.2~2.23 GHz에서 시뮬레이션 값과 측정값의 결과가 유사하게 나타났으나 3 dB이하의 축비 요구조건을 만족하지 못하였다.

그림 13의 (a)는 $\phi=0^\circ$, (b)는 $\phi=90^\circ$ 에서 시뮬레이션과 측정의 안테나 방사패턴이다. 전반적으로 시뮬레이션과 측정 안테나의 패턴은 유사하게 나타났다.

축비 측정 결과 3 dB이하의 요구조건을 만족하지 못해, 축비 개선을 위한 메타표면을 재설계하였다. 메타표면의 형태는 그림 14에서 표시한 부분을 제거하여 구성하였다. 그림 14를 통해 표면전류의 위상별 분포에 따라 원형편파가 나타나는 것을 확인하였다.

그림 15는 이를 통해 개선된 축비 그래프로 축비 대역폭 2.2~2.22 GHz에서 3 dB이하 특성을 갖는다.

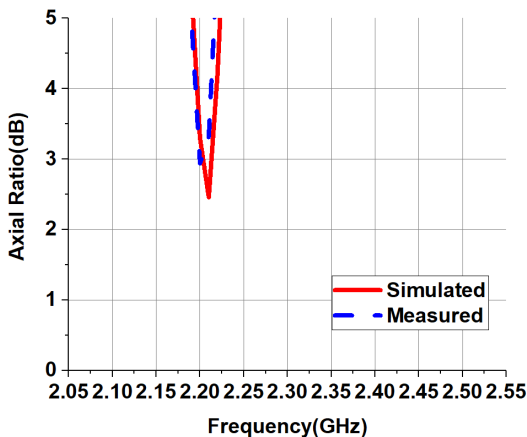


그림 12. 시뮬레이션 및 측정된 안테나의 축비
Fig. 12. Simulated and measured axial ratio of antenna

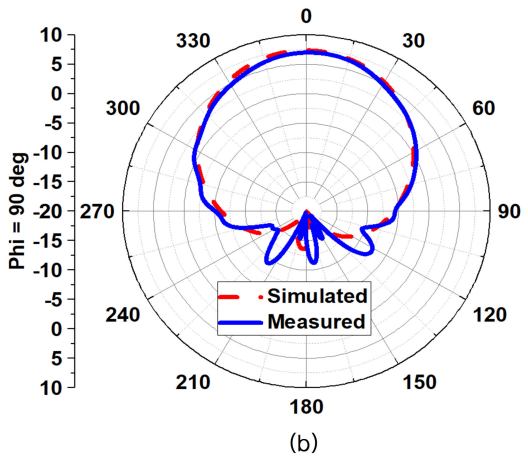
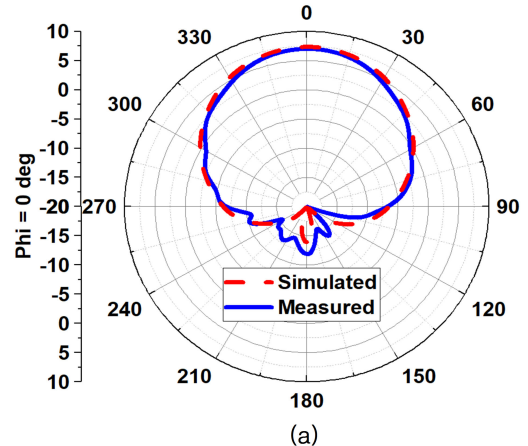


그림 13. (a) $\phi=0^\circ$ 에서의 방사패턴, (b) $\phi=90^\circ$ 에서의 방사패턴
Fig. 13. (a) Radiation pattern of $\phi=0^\circ$, (b) Radiation pattern of $\phi=90^\circ$

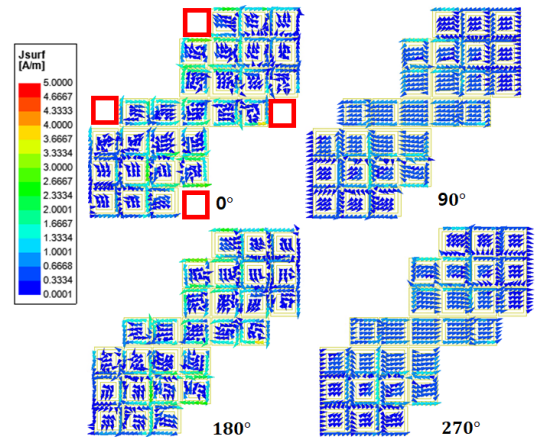


그림 14. 개선된 메타표면의 위상별 표면전류 분포 특성
Fig. 14. Surface current distribution characteristics of improved structures by phase

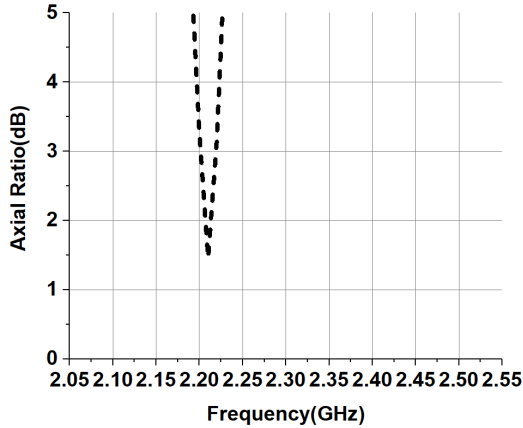


그림 15. 개선된 안테나의 축비
Fig. 15. Axial ratio of improved antenna

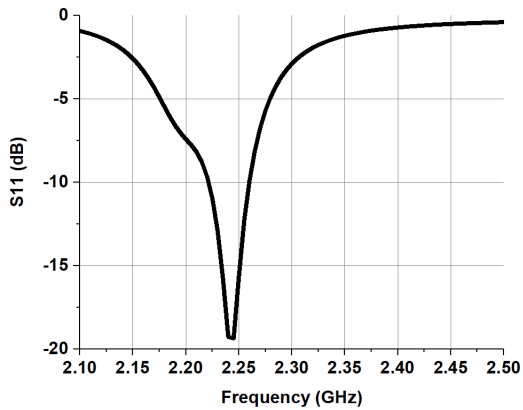


그림 16. 개선된 안테나의 S11
Fig. 16. S11 of improved antenna

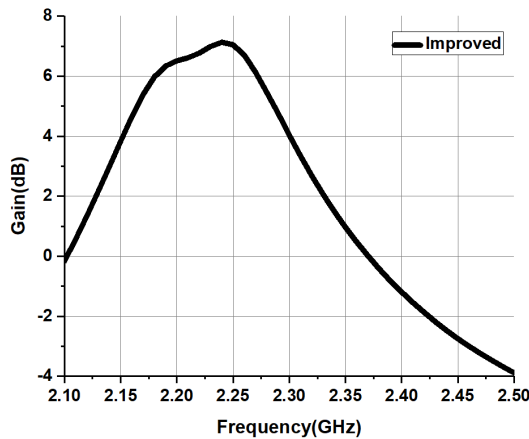


그림 17. 개선된 안테나의 이득
Fig. 17. Gain of improved antenna

대역폭은 2.21~2.26 GHz, 최대이득은 7.12 dB로 이전 설계에 비해 크게 다르지 않으며, 그림 16과 그림 17에 나타났다.

V. 결론

본 논문에서는 S대역에서 동작하는 큐브위성 탑재용 메타표면 덮개 안테나를 설계하였다. 이득을 향상시키기 위해 Fabry-Perot 공진 구조를 사용했으며, 축비 향상을 위해 결합된 구조를 이용하였다. 안테나의 전체 크기는 $90 \times 90 \times 12 \text{ mm}^3 (0.67 \lambda_0 \times 0.67 \lambda_0 \times 0.075 \lambda_0)$ 이고, 측정된 안테나의 대역폭은 2.2~ 2.25 GHz(2%, <-10 dB(S11)), 공진 대역에서 최대이득은 7.02 dB로 측정결과와 시뮬레이션 결과가 잘 일치하였다. 하지만 실제 측정결과 축비 요구조건을 만족하지 못하여, 추가적인 연구를 수행하였다. 추가 연구 수행 결과 2.2~2.22 GHz로 축비 대역폭(<3 dB)을 확보했으며, 안테나의 크기는 $90 \times 90 \times 12 \text{ mm}^3 (0.67 \lambda_0 \times 0.67 \lambda_0 \times 0.075 \lambda_0)$, 대역폭 2.21~2.26 GHz(2%, <-10 dB(S11)), 공진 대역에서 최대이득은 7.12 dB이다. 축비 대역폭이 안테나 동작 주파수 대역폭에 비해 좁기 때문에, 축비와 축비 대역폭의 향상이 필요하다. 이를 위해서 메타표면 단위 셀의 구조 및 패치 안테나의 최적 설계에 대한 연구를 추가적으로 수행할 계획이다.

References

- [1] P. Fortescue, J. Stark, and G. Swinerd, *Spacecraft Systems Engineering*, 3rd Ed., New York, NY, USA: Wiley, 2011
- [2] Y. Rahmat-Samii, V. Manohar, and J. M. Kovitz, "For satellites, think small, dream big: A review of recent antenna developments for CubeSats," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 59, no. 2, pp. 22-30, Apr. 2017.
- [3] S. W. Kang, S. H. Han, H. C. Gong, and G. H. Choi, "Current state of CubeSat development in Korea," *Current Ind. and Technol. Trends in Aerospace*, vol. 11, no. 2, pp. 172-178, Dec. 2013.
- [4] S-L. Ma, C. J. Shih, and J-S. Row, "Four-element microstrip array with polarization diversity," *Microwave and Optical*

Technol. Lett., vol. 55, pp. 1653-1657, Jul. 2013.

[5] S.-R. Lee, "Analysis of the effects by multi-stacking of superstrates on circular-polarized patch antenna," *J. Inst. Electron. and Inf. Eng.*, vol. 51, no. 3, pp. 202-209, Mar. 2014.

[6] D. H. Kim, S. M. Lee, and I. J. Nam, "Fabry-perot resonator antenna design method and technology trend using partial reflective surface (PRS)," in *Proc. Korea Electromag. Eng. Soc.*, vol. 29, no. 2, pp. 42-55, Mar. 2018.

[7] M. T. Islam, M. H. Ullah, M. J. Singh, and M. R. I. Faruque, "A new metasurface superstrate structure antenna performance enhancement," *Materials*, vol. 6, no. 8, pp. 3226-3240, Jul. 2013.

[8] F. Tubbal, R. Raad, K-W. Chin, L. Matekovits, B. Butters, and G. Dassano, "A high gain S-band slot antenna with MSS for CubeSat" *Annals of Telecommun.*, vol. 74, no. 3-4, pp. 223-237, Apr. 2017.

[9] A. P. Feresidis, G. Goussetis, S. Wang, and J. C. Vardaxoglou, "Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low profile high-gain planar antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 209-215, Jan. 2005.

[10] L. Zhou, H. Li, Y. Qin, Z. Wei, and C. T. Chan, "Directive emissions from subwavelength metamaterial-based cavities," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, pp. 101101-1 - 101101-3, Feb. 2005.

[11] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York, NY, USA: Wiley, 1997.

[12] Q. Y. Li, Y. C. Jiao, and G. Zhao, "A novel microstrip rectangular-patch/ring combination reflect array element and its application," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1119-1122, Oct. 2009.

안 형 준 (Hyungjun An)



2018년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업
 2018년 2월~현재 : 아주대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 위성 통신 안테나, 마이크로스트립 패치 안테나

[ORCID:0000-0002-4480-249X]

김 창 성 (Changseong Kim)



2015년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업
 2015년 8월~현재 : 아주대학교 전자공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 위성 통신 안테나, 우주 전파 해석

[ORCID:0000-0003-3069-662X]

박 용 배 (Yong Bae Park)



1998년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업
 2000년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업
 2003년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업
 2003년 2월~2006년 8월 : KT인프라연구소 선임 연구원

2006년 9월~현재 : 아주대학교 전자공학과 교수
 <관심분야> 안테나, 전자장 해석, EMI/EMC
 [ORCID:0000-0002-7095-4614]