

급전 스트럿을 고려한 소형 위성 SAR용 경량화 안테나 설계 및 제작

Design and Implementation of Lightweight Antenna for Small Satellite SAR with Feeder Strut

이시아 · 조승주* · 임정환 · 윤성식* · 김준영** · 이택경 · 이재욱 · 노진호**

Sia Lee · Seung-Joo Jo* · Jung-Hwan Lim · Seong-Sik Yoon* ·
Jun-Young Kim** · Taek-Kyung Lee · Jae-Wook Lee · Jin-Ho Ro**

요 약

소형 위성 SAR에 활용하기 위한 경량화 전개형 반사판 안테나를 설계하였다. 전개형 패널로 CFRP 복합소재를 사용하여 경량화 하였고, 안테나의 수납효율을 높이기 위해 넓은 빔폭을 갖는 급전기를 이용하여 deep reflector 형태의 안테나를 설계하였다. 안테나 성능에 주는 영향을 최소화할 수 있는 스트럿의 구조를 설계하고, 적합한 위치에 배치하여 급전 지지구조를 최적화하였다. 제작된 반사판 안테나의 전기적 성능을 측정하여 시뮬레이션을 통한 분석과 일치하는 결과를 얻었으며, 위성 SAR에서 요구하는 전개형 반사판 안테나의 성능을 만족하는 것을 확인하였다.

Abstract

We designed a lightweight, deployable reflector antenna for use in a small satellite SAR. The CFRP composite material was used for the deployable panel to reduce weight, and a deep reflector type antenna was designed by using a feeder with a large beam width to increase the storage efficiency of the antenna. The structure of the strut that can minimize the effect on the antenna performance was designed and placed in a suitable position to optimize the structure to support a feeder. The electrical performance of the manufactured reflector antenna was measured and the results were consistent with the analysis through simulation. It was also confirmed that the deployable reflector antenna satisfies the performance conditions required to be used in the satellite SAR system.

Key words: Feeder Strut, Deployable Reflector Antenna, Small Satellite SAR

I. 서 론

반사판 안테나는 고이득 안테나로서 장거리 전파통신

과 고분해능 레이더 응용에 적합하므로 방송 통신 또는 지구 원격 감시용 위성에서 사용되는 등 과학기술 분야에 널리 활용된다^[1]. 안테나는 위성의 탑재체에서 가장

「본 연구는 2017년도 정부의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 우주핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다(NRF-2017M1A3A3A0 2016484).」

한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

*한화시스템 위성시스템 1팀(Satellite System Team 1, Hanwha Systems)

**한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과(Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received June 04, 2020 ; Revised June 28, 2020 ; Accepted August 4, 2020. (ID No. 20200604-049)

· Corresponding Author: Taek-Kyung Lee (e-mail:tklee@kau.ac.kr)

큰 무게를 차지하는 구조 중 하나로서 넓은 부피를 차지하므로 위성체의 수납효율을 떨어뜨리고, 발사 비용이 크게 늘어나는 요인이 된다. 위성체 무게는 발사 비용과 직결되므로, 최근 위성이 대형화되면서 안테나의 전개형, 경량화 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[2],[3]}.

위성에서 활용하는 반사판 안테나는 가벼운 소재를 사용하여 무게를 줄이고, 발사 시 접힌 상태로 발사되어 우주공간에서 펼쳐지는 전개형 반사판 안테나를 사용함으로써 수납효율을 높여 발사비용을 줄일 수 있다^[3]. 전개형 반사판 안테나로는 메쉬, 인플레터블, 솔리드 등이 있다. 메쉬 안테나는 전개형 안테나의 대표적인 형태로, 반사면이 금도금된 그물로 이루어져 있으며, 40 GHz 이하의 주파수 대역에서 주로 사용된다. 인플레터블 안테나는 우주에서 팽창하며, 고온에 의한 경화를 통해 형상을 유지하게 된다. 간단한 구조로 전개 신뢰도가 높지만 형상 정확도 구현이 어렵다. 솔리드 안테나는 안정적인 전개 매커니즘과 높은 표면정확도를 가져 고기동성 우주안테나로서 적합하다. 또한 40 GHz 이상의 고주파 대역에서도 사용이 가능하며, 발사체의 크기 및 기계적 복잡성으로 인해 반경이 약 10 m로 제한되어 사용된다^[3]. 솔리드 전개형 안테나는 안테나 중앙에 고정된 원형 중앙판이 있고, 중앙판 주위에 전개형 패널이 부착되어 있는 형태이다. 전개형 패널의 고체 재료로서 복합소재인 탄소섬유 강화 플라스틱(carbon fiber reinforced plastics: CFRP)을 사용하여 안테나를 경량화 할 수 있다.

CFRP는 합금재료를 대체하기 위한 경량 재료로서 조선, 항공 우주 및 항공 장치 등의 분야에서 전기적 성능과 관련하여 주목받고 있다. CFRP는 우수한 강도 및 강성, 낮은 열팽창 계수와 부식이 일어나지 않는다는 점에서 40 GHz 이상의 주파수를 사용하거나 높은 표면 정확도를 필요로 하는 구조물에 사용될 수 있으며, 위성용 안테나에 사용하기에도 적합하다^{[4],[5]}. 본 논문에서는 X 대역을 목표주파수로 설정하여 솔리드 전개형 반사판 안테나를 설계하였다.

반사판 안테나에서 급전기는 포물면 형상의 반사판의 초점에 위치한다. 솔리드 타입의 전개형 반사판 안테나가 수납 시에 접힌 상태의 패널이 급전 안테나와 겹치지 않으려면 급전기가 반사판에 가까이 위치해야 하므로 안테

나의 초점거리가 짧아야 하며, 안테나의 설계 시 패널의 수납공간을 고려하여 급전기의 위치를 설정해야 한다^{[6],[7]}. 포물면 반사판 안테나에서는 급전 지지를 위해 원형 단면인 스트럿이 주로 사용되어 왔다^[8]. 급전을 지지하는 스트럿은 급전에서 방사되거나 반사면에서 반사되는 신호에 산란을 야기하여 안테나의 원거리장 패턴에 직접적인 영향을 주기도 한다. 이로 인해 안테나의 이득과 부엽 등의 성능이 열화되므로 스트럿이 안테나 성능에 미치는 영향을 줄이기 위해 스트럿의 구조와 배치 등을 조절해야 한다. 스트럿의 직경이 크고, 반사판 중심에 가까이 배치될수록 안테나의 성능에 대한 스트럿의 영향이 커지게 된다^{[8],[9]}. 따라서 스트럿의 구조 및 배치에 따른 안테나의 전기적 성능을 분석하여 안테나의 성능 열화를 최소화할 수 있는 급전 지지구조 설계가 필요하다.

본 논문에서는 소형 위성 SAR에 사용되는 경량화 전개형 반사판 안테나를 설계하였다. 효율적인 수납이 가능한 반사판 안테나 구조를 정하였고, 안테나 구조에 요구되는 급전기의 성능을 만족하는 급전 안테나를 설계하였다. 급전 지지구조의 최적화를 통해 안테나 성능에 대한 영향을 줄여서 요구되는 안테나 성능을 구현하였다. 안테나를 제작하여 설계한 안테나의 성능을 검증하였으며, 안테나의 수납효율 향상과 함께 위성 SAR에서 요구되는 안테나의 전기적 성능을 만족함을 확인하였다.

II. 전개형 반사판 안테나 설계

반사판 안테나의 가장 간단한 형태인 단일 반사판 구조를 사용하여 전개형 반사판 안테나를 설계하였다. 직경 1.5 m인 포물면 반사판 안테나의 사용주파수는 X 대역이며, 중앙에 직경 0.2 m인 평면형 원형 중앙판이 있고, 중앙판 주위에 30개의 균일한 전개형 패널로 포물면을 형성한다. 전개형 반사판 안테나는 그림 1과 같이 수납 및

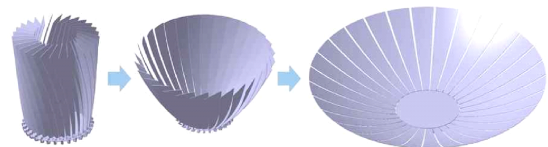


그림 1. 전개형 안테나 수납 및 전개형상

Fig. 1. Storage and deployment shape of deployable antenna.

전개가 이루어진다.

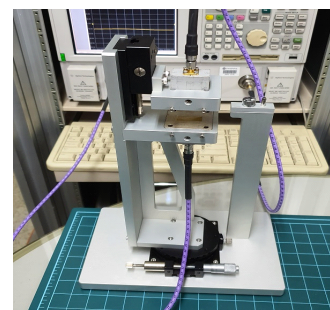
안테나의 경량화를 위해 패널의 고체 재료로 복합재료인 CFRP를 사용하였다. CFRP 복합재료는 두께나 적층 각도, 공정 기법에 따라서 상이한 전기적 특성을 지닌다^[4]. 따라서 CFRP 소재를 적용하기 위해 시편을 제작하여 전기적 특성을 분석한 후 적합한 소재로 패널을 제작하였다.

안테나의 수납공간은 $0.3 \times 0.3 \times 0.5$ m이다. 목표 수납공간에 수납하기 위해서는 초점 거리가 0.5 m 이하여야 하고, 따라서 직경 1.5 m 반사판 안테나의 F/D (focal-length-to-diameter ratio)는 0.33보다 작아야 한다. 이러한 요구를 만족하기 위해 deep reflector 형태의 안테나를 사용하였다. F/D 는 0.3으로 설정하였으며, 초점거리가 짧으므로 매우 넓은 빔폭을 갖는 급전 안테나가 요구된다. 빔폭이 넓은 급전기로서 도파관에 초크링(choke ring)이 부착된 초크 안테나(choke antenna)를 설계하였다^[7]. 반사판의 초점에 위치하는 급전기를 지지하기 위해서는 스트럿을 사용해야 한다. 추가된 스트럿에 의해 발생하는 전파 산란은 반사판 안테나에서 예상치 못한 성능 열화의 요인이 될 수 있다. 스트럿의 영향으로 인한 안테나 성능 열화를 분석하여 설계에 반영함으로써 요구되는 전기적 성능을 충족하는 안테나를 구현할 수 있다.

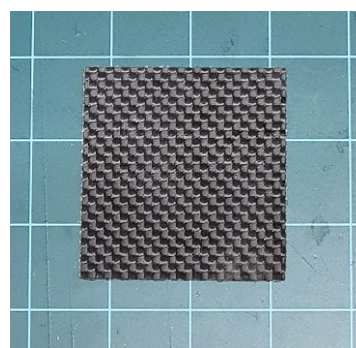
2-1 복합소재 패널의 전기적 성능 분석

반사판 안테나의 경량화를 위해 중앙판 및 패널의 고체 재료로 우븐(woven) 타입의 탄소 섬유 복합 소재인 CF3327을 사용하였다. CF3327 prepreg는 평직인 탄소 섬유들이 경사와 위사가 매번 교차하는 방식으로 제작되어 있으며, 패널 제작 시 prepreg를 동일한 방향으로 적층하였다. 반사판 재료의 전기적 특성은 안테나 성능에 영향을 미치므로 이를 복사 패턴 시뮬레이션에 반영하기 위하여 패널과 동일한 방식으로 제작된 시편의 반사특성 측정하였다. 시편은 CF3327을 2겹 또는 4겹으로 적층하여 제작하였다.

그림 2와 같이 시편의 S -parameter를 측정하기 위한 장치를 구성하였으며, 목표 주파수인 9.6 GHz에서 표면 임피던스 방법을 사용하여 각 시편의 전기전도도를 도출하였다^{[4][5]}. 패널이 중앙판에 부착되는 위치에 따라 급전 편



(a) 측정기 형상
(a) Configuration of measurement



(b) 측정용 CF3327 시편
(b) CF3327 specimens for measurement

그림 2. 복합재 시편의 반사특성 측정

Fig. 2. Measurement of reflection characteristics of composite specimens.

파에 대한 회전 각도가 달라지므로 이에 따른 시편의 특성 차이를 반영하기 위하여 회전 각도별로 S -parameter를 측정하였다. 그림 3은 CF3327 2겹과 4겹으로 제작한 두 가지 시편의 전기전도도를 측정한 결과이다. 측정 결과, 두 시편의 전기전도도는 $1,000 \sim 3,000$ S/m이며, 우븐 타입의 시편을 사용하였으므로 회전 각도에 따른 차이가 크지 않다. 전기전도도에 대한 시편 두께의 영향은 크지 않으며, 패널의 무게를 고려하면 얇은 것이 유리하다. 따라서 CF3327 2겹에 대한 전기전도도를 안테나의 각 패널에 적용하여 안테나 성능을 분석하였다. 그림 4는 FEKO 시뮬레이션 툴을 통해 얻은 안테나의 복사패턴이다. 패널의 소재가 PEC(perfect electric conductor)인 경우와 비교하였을 때, CF3327을 사용한 경우, 이득이 약 0.25 dB 감소하였으나 요구 성능을 만족하므로 CFRP 복합소재가 안테나 반사판의 재료로 적합하다는 것을 확인하였다.

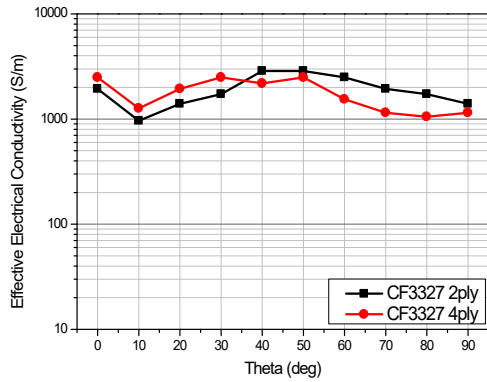


그림 3. 시편 회전각도에 따른 CF3327 2겹과 4겹의 전기전도도

Fig. 3. Electrical conductivity of CF3327 2-ply and 4-ply vs. rotation angle of specimen.

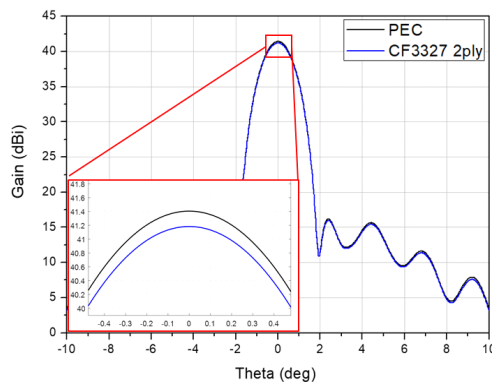


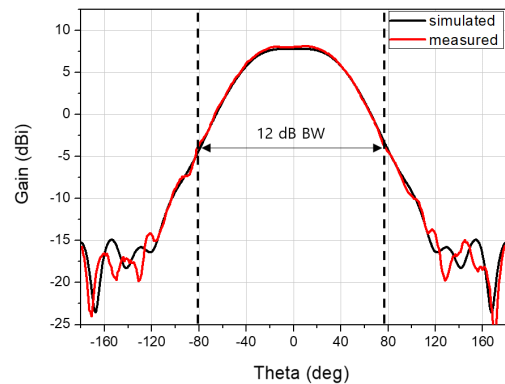
그림 4. 측정된 전기전도도 적용된 반사판 안테나의 E-평면 복사패턴

Fig. 4. E-plane radiation pattern of reflector antenna with measured electrical conductivity.

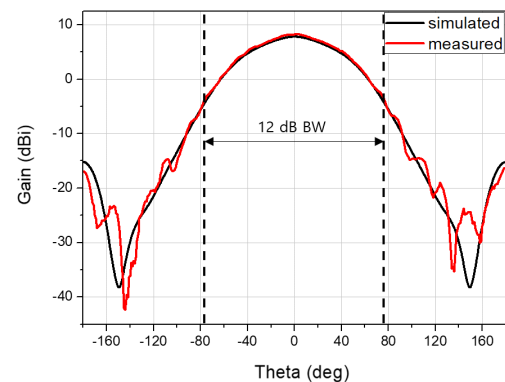
2.2 급전기 설계

Deep reflector 안테나에서 사용하기 적합한 넓은 빔폭을 갖는 급전기로 선형편파를 갖는 초크 안테나 구조를 선택하였다. 초크 안테나는 원형 도파관과 초크 링으로 구성되며, 도파관 끝부분이 초크링보다 높아지도록 도파관이 돌출된 구조로 설계하였다. 이러한 구조에서는 돌출된 도파관 외부의 전류분포로 인해 급전기에서 더욱 넓은 빔폭의 복사패턴을 얻을 수 있다. 초크 안테나가 급전기로 사용될 때 초크링의 개수가 많으면 급전기가 차지

하는 면적이 증가하여 급전차폐가 커지게 된다. 급전 차폐에 의한 안테나 성능 열화를 피하려면 급전기의 직경이 2 파장 이내가 되어야 하므로, 초크링의 개수는 두 개 이하로 하였다. 직경 1.5 m 반사판 안테나에서 F/D 가 0.3 일 때 반사판 영역에 포함되는 급전 패턴의 빔폭은 159° 이다. 안테나의 넘침효율(spillover efficiency)과 가장자리 테이퍼 효율(aperture taper efficiency)을 최적으로 조절하기 위해 급전 안테나를 설계하였다. FEKO의 MLFMM 방법을 이용하여 주파수 9.6 GHz에서의 초크 링과 도파관의 돌출 길이에 따른 안테나 성능 변화를 계산하였다. 두 개의 초크링을 부착하고 도파관의 돌출 길이가 0.25λ 일 때 넓은 빔폭의 급전 패턴을 구현하였으며, 이득은 7.79 dB 이상이다. 그림 5는 시뮬레이션을 통해 얻은 급전기의



(a) E-평면 패턴
(a) E-plane pattern



(b) H-평면 패턴
(b) H-plane pattern

그림 5. 초크 급전기 복사패턴

Fig. 5. Radiation pattern of the choke feeder.

전기적 성능과 제작한 급전기의 성능 측정 결과이다^[7]. 반사판의 가장자리에 해당하는 $\theta = 79.5^\circ$ (빔폭 159°)에서 가장자리 테이퍼(edge taper)는 12 dB이다. 넘침효율은

$$\epsilon_s = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} |F_f(\theta_f, \phi')|^2 \sin \theta_f d\theta_f d\phi'}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |F_f(\theta_f, \phi')|^2 \sin \theta_f d\theta_f d\phi'} \quad (1)$$

을 이용하여 구할 수 있으며^[1], 시뮬레이션 패턴으로부터 계산한 넘침효율은 0.82이다.

2.3 급전 스트럿 설계

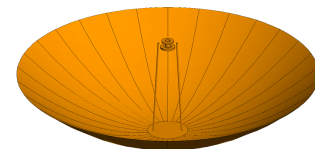
급전기를 지지하기 위해 네 개의 스트럿을 사용하였으며, 각각의 스트럿은 원형단면을 갖는다. 안테나 동작 시 급전 신호는 반사판 뒤쪽에 위치한 급전단자에 공급되므로, 급전단자로부터 반사판 초점에 위치한 급전안테나로 케이블을 통해 신호가 공급되어야 한다. 신호 케이블이 외부에 노출되면 안테나 성능에 영향을 줄 수 있으므로 스트럿 중 한 개를 파이프 형태로 하여 스트럿 내부로 케이블이 통과하도록 하였다. 스트럿의 직경은 작을수록 안테나 성능에 미치는 영향이 낮아지므로, 급전기를 지지하고 신호케이블이 통과할 수 있는 최소의 직경을 설정한다. 스트럿 재료로 알루미늄을 사용하였으며, 변형을 일으키지 않으면서 급전안테나를 지지하기 위해 파이프 관의 최소 두께를 1 mm로 설정하고, 내부 직경은 통과하는 케이블 굵기를 고려하여 6 mm로 하였다. 네 개의 스트럿의 직경은 8 mm이다.

반사판의 초점에 위치하는 급전안테나를 지지하기 위한 스트럿에 의한 안테나 성능의 영향을 최소화하기 위하여 스트럿의 위치와 구조에 따른 성능을 계산하였다. 먼저 전개형 안테나 수납 시 패널이 접힌 상태에서 급전안테나와 패널 사이의 공간을 고려하여 스트럿이 중앙판과 이루는 각도를 정하였다. 접힌 상태에서 스트럿이 전개 패널 및 급전안테나와 겹치지 않도록 하는 적절한 형상은 중앙판과 87° 의 각도를 이루는 것으로 산출되었다. 스트럿의 위치는 급전안테나의 편파에 따른 영향을 분석하여 설계하였다.

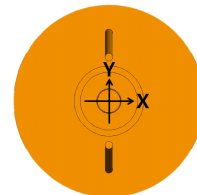
설계하는 안테나는 수직 선형편파를 사용하므로 선형

편파에 대한 영향을 분석하였다. 스트럿의 위치와 편파의 상호 관계에 대한 영향을 분석하기 위해 그림 6(a)와 같이 마주보는 두 개의 스트럿만으로 구성되는 형태를 가정하였다. 그림 6(b)와 그림 6(c)에서 급전 편파는 y 방향이다. 그림 6(b)는 두 개의 스트럿이 y-z 평면에 놓인 경우이며, 그림 6(c)는 스트럿이 x-z 평면에 놓여 있다. 두 가지 경우에 대해 9.6 GHz의 사용주파수에서 FEKO 시뮬레이션 툴을 사용하여 안테나 복사 특성을 계산하였다.

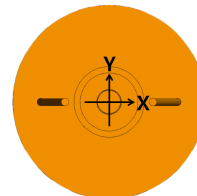
그림 7은 그림 6(b)와 그림 6(c)의 두 가지 경우에 대해 계산한 복사패턴을 보여주고 있다. 급전 편파는 y 편파이므로 그림 6(b)는 스트럿이 급전 편파와 동일한 평면(평행평면)에 놓여 있고, 그림 6(c)는 스트럿이 급전편파와 직교하는 평면(직교평면)에 놓여 있다. 그림 7의 계산결



(a) 반사판 형상
(a) Reflector shape



(b) y-z 평면(평행평면) 상의 스트럿
(b) Struts on the y-z plane (parallel plane)

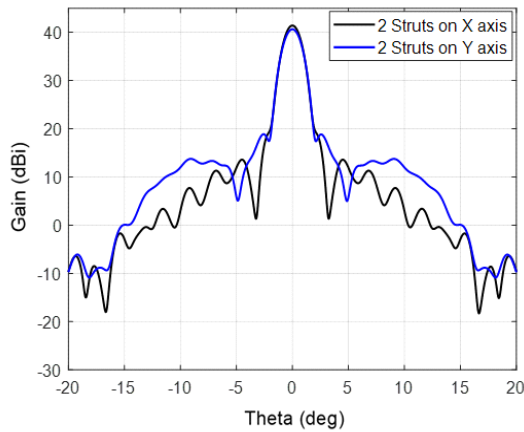


(c) x-z 평면(직교평면) 상의 스트럿
(c) Struts on the x-z plane (orthogonal plane)

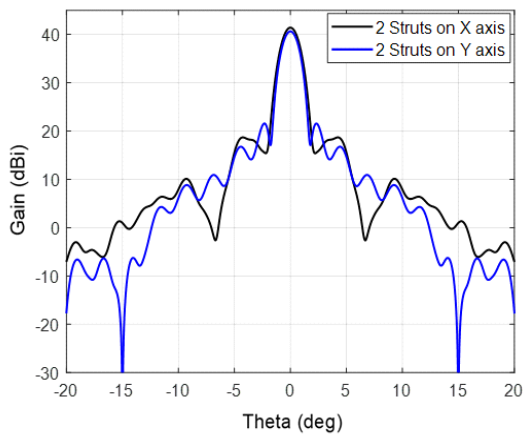
그림 6. 스트럿이 평행평면 및 직교평면에 놓였을 때의 중앙판

Fig. 6. Central dish when struts lie on parallel and orthogonal plane.

과에 의하면 스트럿이 평행평면에 놓여 있으면(그림 6(b)) 직교평면에 놓인 경우(그림 6(c))에 비해 이득이 1 dB 정도 낮아진다. 스트럿이 평행평면에 있는 경우에 E-평면 패턴에서 부엽레벨은 전반적으로 높게 나타나며, 최대 SLL은 6 dB 높으며, H-평면 패턴에서도 최대 SLL은 4 dB 높게 나타난다. 이 결과로부터 스트럿이 급전편파와 평행평면에 가까이 놓일수록 안테나 성능의 열화가 커진다는 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 이용하여 급전안테나를



(a) E-평면 패턴
(a) E-plane pattern



(b) H-평면 패턴
(b) H-plane pattern

그림 7. 스트럿이 평행평면 및 직교평면에 놓였을 때의 복사패턴

Fig. 7. Radiation pattern when struts lie on parallel and orthogonal plane.

지지하기 위한 스트럿의 위치를 결정한다.

설계하는 전개형 안테나에서는 네 개의 스트럿을 사용한다. 그림 8은 네 개의 스트럿의 위치를 보여주고 있다. 스트럿은 x-z 평면과 y-z 평면에 대칭이 되도록 배치하였으며, ψ 는 x-z 평면으로부터 회전한 스트럿 평면의 각도이다. 스트럿의 위치가 급전편파와 평행평면에 있을 경우에 안테나 성능 열화가 커지므로 가급적 직교평면에 가까이 위치하도록 설계하는 것이 유리하다. 제작된 안테나의 성능 시험이 지상에서 이루어지므로 중력 작용에 의한 스트럿의 기울어짐이 발생하지 않도록 스트럿 간의 간격을 유지해야 한다. 스트럿은 급전안테나를 지지해야 하므로 위치 설정 시 기계적인 분석을 병행해야 한다.

최적의 스트럿 위치를 구하기 위해 그림 7의 결과에 따라 스트럿의 위치를 $\psi=45^\circ$ 부터 직교평면에 가까운 방향으로 이동하면서 $\psi=15^\circ$ 까지의 안테나의 전기적 특성을 계산하였다. 그림 9는 E-평면과 H-평면의 복사패턴을 보여주고 있다. 스트럿 위치가 직교평면과 가까워질수록 이득이 높고 부엽레벨은 전반적으로 낮다. 각 경우의 안테나 성능은 표 1에서 확인할 수 있다. 이득은 스트럿이 직교평면에 가까울수록 높으며, 스트럿 위치에 따른 이득의 변화는 1 dB 이내로 이득에 대한 영향은 적다. SLL의 경우 H-평면에서는 스트럿 위치가 직교평면과 가까워질수록 SLL이 낮지만 E-평면에서는 그 반대의 경향을 보인다. 부엽의 경우, 그림 9와 같이 첫 번째 부엽이 낮더라도 전반적인 부엽이 높게 나타나기도 하므로 정확한 성능 분석을 위해서는 전체 부엽의 평균치를 고려할 필요가 있다.

평균값 계산을 위한 부엽의 범위는 안테나의 복사패턴을 기반으로 하는 SAR 성능 분석에 주요한 영향을 미치는 복사패턴 영역을 기준으로 정하였으며, 주빔을 제외한 $|\theta| \leq 20^\circ$ 범위의 부엽의 평균값을 계산하여 비교하였다.

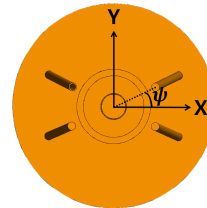


그림 8. 스트럿 배치

Fig. 8. Strut placement.

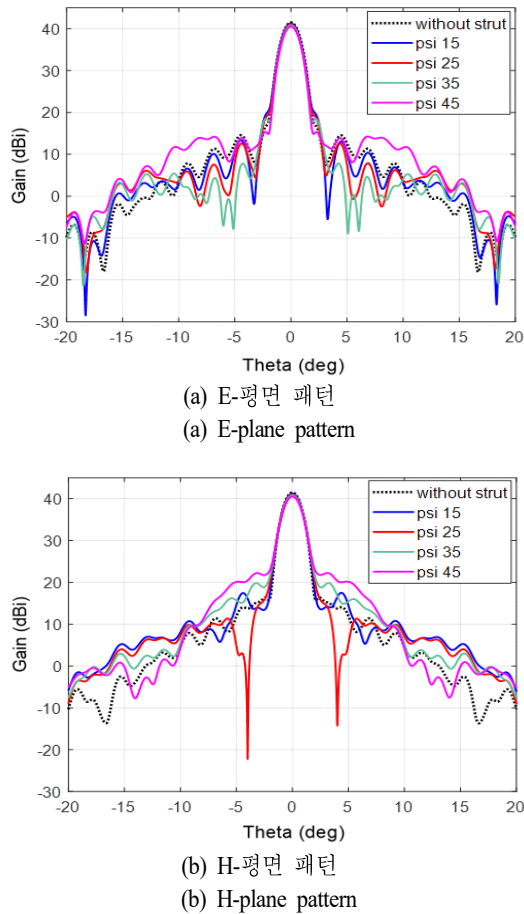


그림 9. 스트럿 배치에 따른 반사판 안테나 복사패턴
Fig. 9. Radiation pattern of reflector antenna depending on strut arrangement.

표 1. 스트럿 배치에 따른 반사판 안테나 전기적 성능변화
Table 1. Variation of electrical performance of reflector antenna depending on strut arrangement.

ψ [deg.]	Gain [dB]	Side-lobe level [dB]		Average side-lobe level [dB]	
		E-plane	H-plane	E-plane ($2.02^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$)	H-plane ($2.5^\circ \leq \theta \leq 20^\circ$)
Without strut	41.49	-24.44	-25.10	-39.71	-39.30
15	41.26	-21.38	-23.74	-39.62	-34.86
25	41.02	-21.40	-25.93	-38.77	-36.42
35	40.83	-22.31	-20.98	-40.31	-34.67
45	40.52	-25.13	-18.26	-34.23	-34.70

E-평면에서 $2.02^\circ \leq |\theta| \leq 20^\circ$ 범위의 평균부엽은 표 1의 결과에서 스트럿 위치가 직교평면과 가까울수록 낮았으며, H-평면에서 $2.5^\circ \leq |\theta| \leq 20^\circ$ 범위의 평균부엽은 스트럿 위치에 따른 변화가 크지는 않지만 직교평면과 가까울수록 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이득과 부엽의 평균값을 고려하였을 때 $\psi=25^\circ$ 인 경우, 이득이 41 dB 이상이고, 평균부엽이 비교적 낮으므로 스트럿 위치를 $\psi=25^\circ$ 로 정하였으며, 중력의 영향에 대한 기계적 분석을 진행하였다. 기계적인 분석 결과, 스트럿의 기울어짐에 의한 중력 방향으로의 피드 혼의 이동은 1 mm 이하였으며, 시뮬레이션 결과, 안테나에 미치는 영향은 주빔이 0.08° 기울어지고, 이득 0.1 dB, 평균부엽이 0.04 dB 저하되었다. 중력 작용에 의해 안테나 성능이 저하되지만, 이는 미소한 영향이며 위성 SAR용 안테나에 요구되는 성능을 만족하므로, 안테나 성능 열화를 최소화하기 위한 스트럿 위치로서 $\psi=25^\circ$ 가 적합함을 확인하였다. 전기적 및 기계적 조건을 함께 고려한 스트럿 구조설계와 배치를 통해, 안테나 전개 시에 안정적인 급전 지지 및 최적의 안테나 성능 유지를 위한 스트럿의 조건을 도출하였다.

그림 10은 급전기를 고정하기 위한 스트럿 상부 구조물의 구조를 보여주고 있다. 상부구조물을 설계함으로써 스트럿과 급전기의 위치 변형을 최소화하고 단단히 고정될 수 있도록 하였다. 안테나 성능에 대해 상부구조물에 의한 영향은 아주 미소한 것을 확인하여 최종적으로 반사판 안테나 및 상부구조물을 포함한 급전 지지구조를 제작하였다.

III. 반사판 안테나 제작 및 측정

반사판 안테나의 성능 실험을 위해 안테나를 제작하여

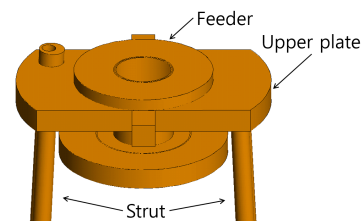
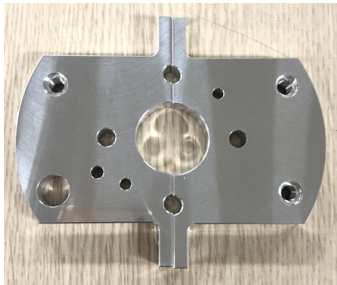


그림 10. 급전기와 급전기 지지구조
Fig. 10. Feeder and feeder support structure.

측정을 진행하였다. CFRP 복합소재를 사용하여 패널과 중앙판을 제작하였으며, 중력의 영향을 받는 지상에서의 측정 환경을 고려하여 패널을 지지하기 위한 알루미늄 재질의 리브(rib)를 부착하여 반사판이 포물면 형상을 유지하도록 하였다. 그림 11(a)는 급전과 스트럿 고정을 위해 설계한 상부 구조물이며, 그림 11(b)는 원통형 스트럿과 파이프형 스트럿이다. 세 개의 원통형 스트럿은 양 끝에 볼트의 형태로 나사산을 가공하여 상부 구조물과 중앙판에 고정이 용이하도록 하였다. 케이블이 통과되는 파이프형 스트럿은 상부 구조물을 통과하여야 하므로 나사산을 만드는 것이 불가능하여 스트럿 양 끝에 지지구조물을 부착하여 지지구조물을 통해 고정되도록 하였다. 급전과 스트럿을 포함한 급전 지지구조물은 알루미늄 재질로 제작하여 중앙판과 상부 급전 지지구조물에 고정하였다. 그림 12는 급전과 스트럿 및 상부 구조물이 결합된 형태이며, 파이프형 스트럿을 통과하는 케이블은 측정 시에



(a) 급전 스트럿 고정용 구조물
(a) Fixing structure for feeder struts



(b) 스트럿
(b) Struts

그림 11. 제작된 급전 지지 구조
Fig. 11. Manufactured feeder support structure.

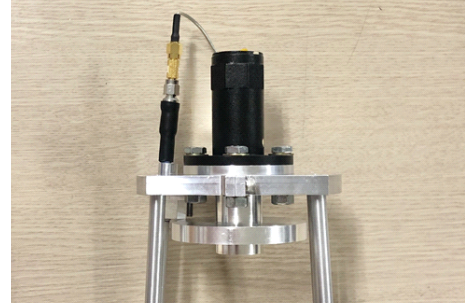


그림 12. 급전기와 급전 지지 구조
Fig. 12. Feeder and feeder support structure.

그림과 같이 도파관 어댑터에 연결되어 사용된다.

안테나 성능 측정에 앞서 파이프형 스트럿을 통과하여 급전 혼 안테나와 송수신기의 연결을 위한 케이블의 성능 확인을 위해 케이블의 S -parameter를 측정하였다. 안테나 성능 측정 시에 측정용 케이블과의 연결을 위한 커넥터가 사용되므로 커넥터를 결합한 결과도 함께 고려하여 비교하였다. 그림 13은 케이블 성능 측정 결과이다. 주파수 9.6 GHz에서 커넥터가 연결되지 않은 케이블의 $|S_{21}|$ 은 -0.67 dB이고, 커넥터가 연결된 케이블의 $|S_{21}|$ 은 -1.16 dB으로 커넥터에 의해 케이블 성능이 약 0.5 dB 저하되는 것을 확인하였다.

그림 14(a)는 복합소재 CF3327을 이용하여 제작한 안테나 모습이다. 안테나 측정은 그림 14(b)와 같이 무반사실에서 진행하였다. 직경 1.5 m인 반사판 안테나의 원거리장 패턴의 측정이 어려우므로 프로브 안테나를 이용하여 개구면에서의 근거리장을 측정 후, 이를 푸리에 변

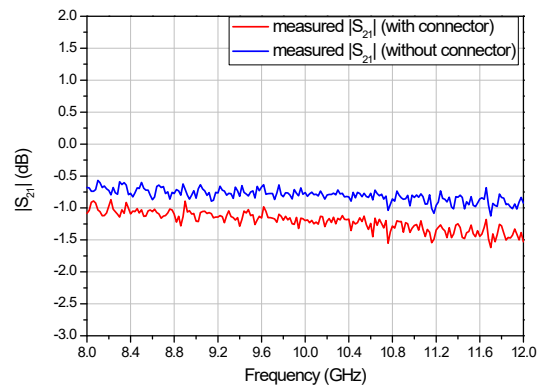
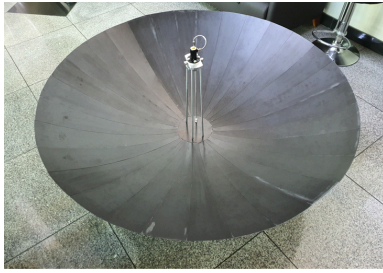
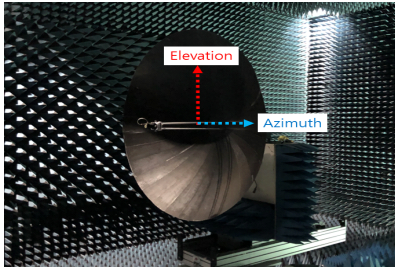


그림 13. 측정용 케이블의 $|S_{21}|$
Fig. 13. $|S_{21}|$ of measurement cable.



(a) 반사판 안테나
(a) Reflector antenna



(b) 반사판 안테나 근거리장 측정
(b) Near-field measurement of reflector antenna

그림 14. 제작한 반사판 안테나 전기적 성능 측정
Fig. 14. Measurement of electrical performance of the manufactured reflector antenna.

환하여 원거리장을 계산하였다. 그림 15는 제작한 반사판 안테나의 $|S_{11}|$ 측정결과이다. 반사손실은 목표주파수인 9.6 GHz에서 -20 dB 이하를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 안테나 패턴 측정 결과이며, 제한된 근거리장으로부터 원거리장을 계산하였으므로 $|\theta| \leq 30^\circ$ 범위에서 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 시뮬레이션을 통해 얻은 주 평면에서의 안테나 이득은 40.99 dB이고, 측정된 이득은 39.64 dB로 약 1 dB의 이득손실이 발생하였으며, SLL은 시뮬레이션 결과에 비해 측정 결과에서 2 dB 저하되었다. 이러한 안테나 성능 저하 요인으로는 측정 시 케이블에 연결되는 커넥터에 의한 손실과, 패널 제작 시에 발생 가능한 패널 표면의 불균일성 또는 패널 곡률의 오차 등을 들 수 있다. 또한 안테나 조립과정에서 급전이 정확히 초점거리에 위치하지 않아 측정 시에 복사패턴의 주빔이 E-평면에서 0.3° , H-평면에서 0.1° 만큼 기울여졌는데, 이 또한 안테나 성능열화를 유발할 수 있다. 따라서 안테나 성능저하의

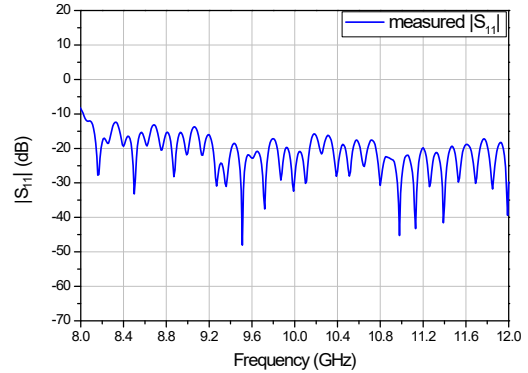
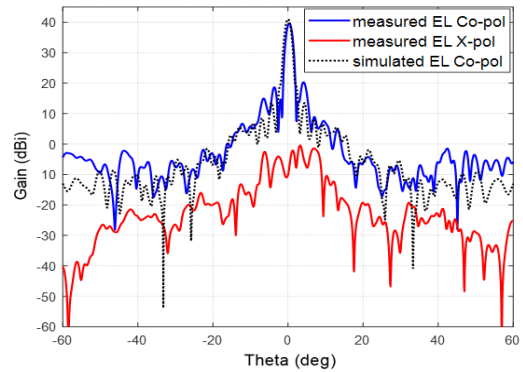
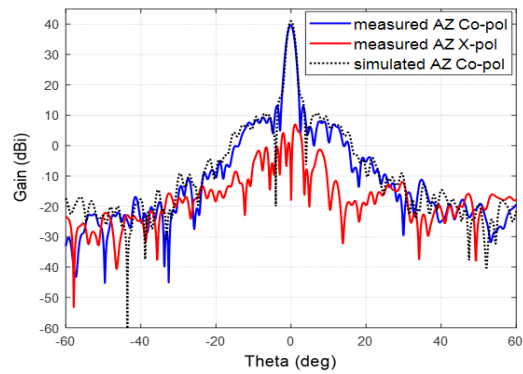


그림 15. 제작한 반사판 안테나의 $|S_{11}|$
Fig. 15. $|S_{11}|$ of manufactured reflector antenna.



(a) E-평면 패턴
(a) E-plane pattern



(b) H-평면 패턴
(b) H-plane pattern

그림 16. 제작한 반사판 안테나의 시뮬레이션 결과와 측정결과
Fig. 16. Simulated and measured results of manufactured reflector antenna.

요인들로 인한 오차 값을 측정결과에 보상하여 준다면 안테나의 목표성능을 만족할 수 있다.

IV. 결 론

위성 SAR용 전개형 반사판 안테나는 높은 수납효율 및 경량화가 중요하며, 전기적으로 높은 이득, 낮은 부엽 등의 특성이 필수적이다. 본 논문에서는 목표 주파수 9.6 GHz인 반사판 안테나를 설계하고, CFRP 복합소재를 적용하여 경량화 하였다. Deep reflector 형태의 안테나에 최적화된 급전기 및 급전기를 지지하기 위한 스트럿을 설계하였다. 급전기 지지를 위해 사용한 스트럿이 안테나의 전기적 성능에 미치는 영향을 최소화하기 위한 스트럿의 직경과 두께 및 배치 조건을 정하였다. 시뮬레이션 결과, 설계된 급전 지지구조물의 영향은 이득 0.5 dB, 부엽레벨이 3 dB 이하로, 안테나 성능에 미치는 영향이 충분히 억제 되었다. 제작된 안테나의 성능 측정결과는 시뮬레이션 결과와 일치하였으며 안테나가 위성 SAR에서 요구하는 성능을 만족하는 것을 확인하였다. 본 논문에서 수행된 급전 지지구조에 의한 영향을 고려한 안테나의 전기적 및 기계적 성능 분석과정을 통해 실제에 가까운 우주용 안테나의 설계가 가능하다.

References

- [1] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 391-416, 2012.
- [2] T. K. Lee, "Lightweight antennas for satellite SAR," *Aerospace and Aviation Electronics Research Center Newsletter*, vol. 11, pp. 3-7, Nov. 2017.
- [3] T. K. Lee, "Design of deployable lightweight antenna for satellite SAR," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 11, pp. 1104-1112, Nov. 2014.
- [4] S. S. Yoon, J. W. Lee, T. Lee, and J. H. Roh, "Insensitivity characteristics in the dual polarization of deployable CFRP reflector antennas for SAR," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 88-95, Jan. 2018.
- [5] H. Rmili, J. L. Miane, H. Zangar, and T. E. Olinga, "Microwave conductivity measurements of high conductive polyaniline films," *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 29, no. 1, pp. 65-72, Jan. 2005.
- [6] A. A. Kishk, "Simple primary focus feeds for deep reflectors," *IEE Proc. H - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 136, no. 2, pp. 169-171, Apr. 1989.
- [7] S. J. Jo, J. H. Lim, T. K. Lee, and J. W. Lee, "Choke feeder design for deep reflector antenna in small satellite SAR," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 1, pp. 1-11, Jan. 2020.
- [8] P. Kildal, E. Olsen, and J. A. Aas, "Losses, sidelobes, and cross polarization caused by feed-support struts in reflector antennas: Design curves," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 36, no. 2, pp. 182-190, Feb. 1988.
- [9] T. H. Lee, W. D. Burnside, "Analysis of scattering from tapered and non-circular cross section struts for reflector antennas," in *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, San Antonio, TX, Jun. 2002, vol. 4, pp. 128-131.

이 시 아 [한국항공대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-7914-7480>



2019년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
2019년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 위성탐재/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템

윤 성 식 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5764-5403>



2010년 8월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2013년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)
2018년 3월~현재: 한화시스템 전문연구

원

[주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템

조 승 주 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8999-6796>



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
2020년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2020년 3월~현재: 한화시스템 연구원
[주 관심분야] 위성탐재/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템

김 준 영 [한국항공대학교/석사]

<https://orcid.org/0000-0002-5992-1985>



2018년 2월: 호원대학교 항공기술정비학과 (공학사)
2020년 8월: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 (공학석사)
[주 관심분야] 복합재료, 구조

임 정 환 [한국항공대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-0325-2775>



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)
2020년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2020년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템, EMI/EMC

이 택 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-2577-2037>



1983년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1990년 5월~1991년 4월: University of

Texas at Austin, Post-Doctoral Fellow

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

2001년 7월~2002년 7월: University of Illinois at Urbana-Champaign, 방문 교수

2014년: 한국전자과학회 회장

1992년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파, 안테나, 전자파해석, 레이더/SAR

이 재 욱 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2903-5904>



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 항공전자정보공학부 교수
[주 관심분야] EMI/C 대책 기술, 고출력 전자파 펄스 방호 대책 및 측정·평가 기술, 고출력증폭기 설계 및 제작, 위성SAR 성능분석, 위성응용복합재료 안테나, 전자장 수치해석

노 진 호 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-4496-1490>



2000년 2월: 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)

2002년 2월: 서울대학교 항공우주공학과 (공학석사)

2006년 2월: 한국과학기술원 항공우주공학과 (공학박사)

2008년 9월~현재: 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수

[주 관심분야] Deployment Structures, Composite Structures, Smart Materials 등