

탄소 섬유 강화 실리콘(CFRS)을 이용한 위성용 반사판 안테나의 설계 및 제작

Design and Fabrication of an Reflector Antenna for Satellites Using Carbon Fiber Reinforced-Silicon (CFRS)

박기태¹ · 강동석^{*2} · 정화영^{**3} · 유제우^{**4} · 조수빈^{**5} · 김재현^{**6} · 이재욱⁷ · 노진호^{*8}

Kitae Park¹ · Dong-Seok Kang^{*2} · Hwa-Young Jung^{**3} · Je-Woo Yu^{**4} · Soo-Bean Cho^{**5} ·
Jae-Hyun Kim^{**6} · Jae-Wook Lee⁷ · Jin-Ho Ro^{*8}

요 약

본 논문은 CFRS(carbon fiber reinforced silicone) 소재를 활용한 위성용 반사판 안테나의 설계, 제작 및 성능 검증을 수행하였다. 제작된 CFRS 시편의 전기적 특성을 측정한 결과, Sylgard 사의 실리콘을 도포한 시편이 Wacker 사의 시편보다 높은 전기전도도와 안정적인 특성을 보였다. 낮은 대역에서는 두 시편이 유사한 등가전기전도도를 보였으나, 주파수가 증가함에 따라 Sylgard 시편의 성능이 우수함이 확인되었다. 제작된 CFRS 반사판 안테나의 측정된 최대 이득은 약 30 dBi로, 시뮬레이션 결과와 근사하였으며, 3 dB 빔폭 또한 측정과 시뮬레이션 간 유사성을 보여 제작된 안테나가 적절하게 동작함을 확인하였다.

Abstract

This paper presents the design, fabrication, and performance verification of a satellite reflector antenna made of carbon fiber-reinforced silicon (CFRS) material. Electrical measurements of the fabricated CFRS specimens revealed that those coated with Sylgard silicone exhibited higher conductivities and more stable characteristics than those coated with Wacker silicone. At lower frequencies, both coatings exhibited similar conductivities; however, Sylgard's superiority became evident at higher frequencies. The measured maximum gain of the fabricated CFRS reflector antenna was approximately 30 dBi, closely aligning with simulation results. In addition, the 3 dB beamwidths from measurements and simulations matched, confirming the proper operation of the antenna.

Key words: Carbon Fiber Reinforced Silicone (CFRS), Reflector Antenna, Satellite Antenna

「이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

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

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

**LIG 넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

1:박사과정(<https://orcid.org/0009-0003-4548-8599>), 2:석사과정(<https://orcid.org/0009-0004-6942-4917>),

3:수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-5366-4527>), 4: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0003-1204-074X>),

5: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-1675-8065>), 6: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-7403-7135>),

7: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-2903-5904>), 8: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-4496-1490>)

· Manuscript received 30 December 2024 ; Revised 27 February, 2025 ; Accepted 17 March, 2025. (ID No. 20241230-006S)

· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

I. 서 론

최근 민간 주도의 우주 개발이 주목받으며 위성 산업의 발전이 가속되고 있다. 민간 주도의 우주 개발은 비용의 절감 및 이를 통한 사업성 확보로 실현된다. 때문에 발사 비용 저감을 위해 높은 수납성과 낮은 무게를 가지는 안테나가 주목받고, 연구되고 있는 상황이다. 대표적인 예시로는 전개형 반사판 안테나를 꼽을 수 있다^[1]. 위성용 반사판 안테나는 반사판의 표면 형상이 이상적인 포물면에 가까울수록 성능이 우수하며, 이를 구현하기 위하여 안테나의 무게, 크기 그리고 구조적 복잡성 등에 대한 타협이 필요하다^[2]. 기존의 반사판의 표면에 사용되는 소재는 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP, carbon fiber reinforced plastic), 직/편조 매쉬 등이다^{[1]~[3]}. 기존 소재는 높은 등가전기전도도를 가지기에 반사손실이 낮아 전기적으로 좋은 성능을 가진다. 하지만, 매우 낮거나 높은 굽힘 강성을 가진다. 때문에, 포물면 형상을 유지하기 위한 구조물의 복잡성이 높아지는 한계를 가진다. 반면, CFRS 소재는 적절한 값의 굽힘 강성을 가지면서도 낮은 인장 변형률을 가져 이를 응용한 반사판 안테나가 반사판의 포물면 형상을 비교적 간단하게 구현될 수 있는 이점을 가진다^[4]. 그럼에도 불구하고, 국내의 CFRS 기반의 반사판 안테나 기술의 연구는 기초적인 수준에 그친다. 따라서 본 논문은 CFRS 소재를 반사판 안테나에 적용하기 위한 초석으로서 CFRS 소재의 전기적 성능을 소재 단위에서 분석하고, CFRS 소재를 기반으로 간단한 반사판 안테나를 설계, 제작 및 측정하여 본 소재의 반사판으로서의 적합성을 검증한다.

II. CFRS 소재의 전기적 특성

컴퓨터의 계산 성능이 지속적으로 개선됨에 따라 3-D 수치해석 시뮬레이션을 활용한 성능 검증이 안테나의 설계 과정에 보편적으로 포함되게 되었다. 이때 수치해석 시뮬레이션 결과의 정확한 도출을 위해서는 설계에 포함된 소재의 복소 유전율, 전기전도도 등의 매질 특성 정보가 정확하게 반영되어야 한다. 본 연구에 사용되는 CFRS는 탄소 섬유 편조물로 이루어진 골조 층과 실리콘으로

이루어진 유전체 층 등으로 설계되어 구조적, 전기적으로 복잡한 성질을 가진다. 또한, 탄소 섬유 층의 미세한 편조 오차, 실리콘 층 표면의 평탄도, 거칠기, 굽힘 등이 존재한다. 때문에 실제 CFRS 소재의 전기적 특성에 대한 해석적 해는 획득에 한계가 있다. 따라서 제작된 시편의 등가 전기전도도를 실제 측정을 통해 획득하고 전기적 특성을 분석하여 적절한 시편을 선정하고자 한다. 등가 전기전도도는 매질의 표면 임피던스와 반비례하여 값이 클수록 반사계수가 증가한다. CFRS와 같은 판형 매질의 등가 전기전도도는 도파관의 열린 끝부분에 시편을 접촉시킨 상황을 전송선로법으로 해석하여 얻어질 수 있다^[1]. 해당 상황에서는 입사된 전기장과 반사되는 전기장의 비율인 산란계수 S_{11} 을 측정할 수 있다. 이 때 등가 전기전도도 σ 와 측정된 산란계수 S_{11} 은 식 (1)과 같은 관계를 가진다. μ_0 는 절대투자율, Z_w 는 도파관의 전파임피던스이다. 등가 전기전도도의 단위는 S/m로 임피던스 단위의 역수와 같다.

$$\sigma = 4\pi\mu_0 f \frac{(1 - |S_{11}|^2)^2}{Z_w^2 ((1 + |S_{11}|^2) - \sqrt{-|S_{11}|^4 + 6|S_{11}|^2 - 1})^2} \quad (1)$$

그림 1은 측정에 사용된 장비이다. Copper Mountain 사의 벡터네트워크분석기 S5243이 사용되었고, WR-340, WR-159, WR-90, WR-62, WR-51 규격의 도파관과 TRL(Thru-Reflect-Line) 교정 표준이 사용되었다. 측정은 마주보는 두 도파관 사이에 시편을 위치시켜 수행되었다^[1].

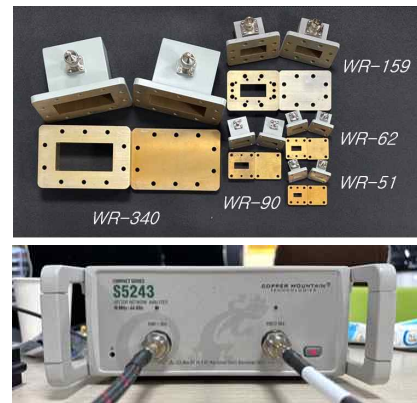


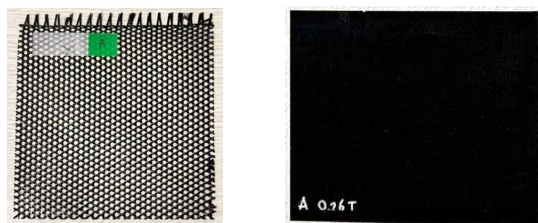
그림 1. 측정용 장비 및 부품

Fig. 1. Equipment and components for measurement.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 CFRS 소재의 시편이다. 시편의 골조로는 탄소 섬유 기반의 3-방향 직물을 사용한다. 3-방향 직물은 섬유가 형성하는 개구의 형상이 정육각형으로 편파에 따른 특성의 차이가 적을 것으로 예상하여 사용하였다. 그림 2(a)는 선정된 탄소 섬유에 Sylgard 사의 실리콘을 도포한 시편이고, 그림 2(b)는 Wacker 사의 실리콘을 도포한 시편이다. 측정의 결과는 그림 3과 같다. 그림 3(a)와 그림 3(b)는 각각 Sylgard 사와 Wacker 사 실리콘을 도포한 시편의 측정 결과이다. 측정은 각 시편에 대하여 수직, 수평 편파와 앞, 뒷면을 고려하여 4회 수행되었다. 시제품 시편의 측정 결과 시편의 특성은 각도에 따른 편파 영향이 매우 적은 것으로 판단된다. 또한, 앞면과 뒷면의 차이도 영향이 적은 것으로 확인되었다. 전반적으로 Sylgard 사의 실리콘이 사용된 경우가 Wacker 사의 실리콘을 사용할 경우와 비교하여 더 높은 등가전기전도도를 가졌다. 낮은 대역에서는 두 시편이 모두 1,000 S/m 수준으로 확인되었고, 20 GHz로 대역이 높아짐에 따라 Sylgard 시편의 경우는 400 S/m, Wacker 시편의 경우는 200 S/m 수준까지 낮아졌다. 결과적으로 Sylgard 사의 실리콘을 도포한 시편이 더 안정적이고, 우수한 특성을 가짐을 확인하였다.

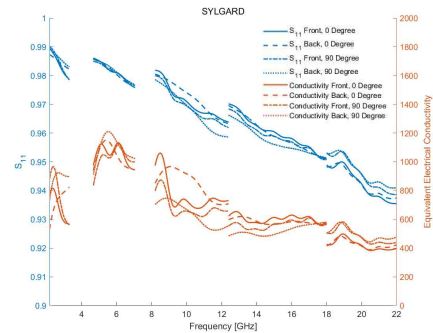
III. 안테나의 설계 및 제작

그림 4(a)는 본 논문에서 제안한 탄소 섬유 기반 3-방향 직물과 Sylgard 사의 실리콘을 결합한 CFRS 소재로 제작된 반사판을 보여준다. 해당 반사판의 직경은 600 mm, 초점거리는 200 mm로 설계되었다. 제작된 반사판은 복잡한

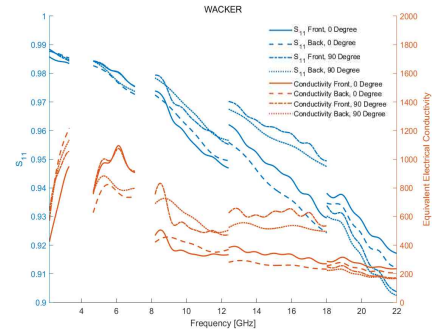


(a) Sylgard 사 실리콘 도포 시편 (a) Specimen(Sylgard)
(b) Wacker 사 실리콘 도포 시편 (b) Specimen(Wacker)

그림 2. 제작된 CFRS 시편
Fig. 2. Fabricated CFRS specimens.



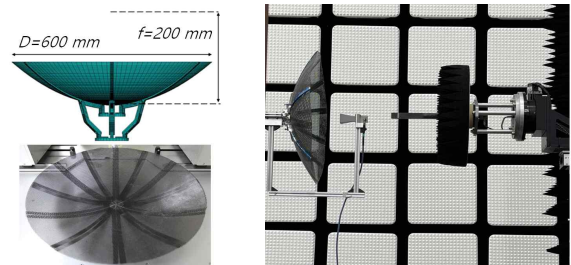
(a) Sylgard 사 실리콘 도포 시편의 등가전기전도도 측정 결과
(a) Equivalent electrical conductivity of specimen (Sylgard)



(b) Wacker 사 실리콘 도포 시편의 등가전기전도도 측정 결과
(b) Equivalent electrical conductivity of specimen (Wacker)

그림 3. 제작된 CFRS 시편의 등가전기전도도 측정 결과
Fig. 3. Measurement results of the equivalent electrical conductivity of the fabricated CFRS specimens.

구조물 없이 포물면 형상을 안정적으로 유지하여 예상된 기계적 성질을 가지는 것을 확인하였다. 그림 4(b)는 제작된 반사판 안테나가 성능 측정을 위해 근접 전계 측정 장치에 부착된 모습을 보여준다. 반사판 안테나는 그림 4(a)의 반사판 초점에 피드 혼 안테나를 배치하여 제작되었



(a) 설계 및 제작된 반사판 (b) 제작된 반사판 안테나의 측정 환경
(a) Design and fabricated reflector (b) Test setup for fabricated antenna.

그림 4. CFRS 소재로 설계 및 제작된 반사판 안테나
Fig. 4. Reflector antenna designed and fabricated with CFRS.

으며, 피드 혼 안테나는 WR-90 규격의 10 dB 표준 이득 안테나(A-info, LB-90-10-C-SF)를 사용하였다. 근접 전계 측정 장치의 검출기로는 WR-90 규격의 개방형 검출기가 사용되었다. 측정은 피드 안테나로부터 10 cm 떨어진 지점의 65×65 cm 평면에 대하여 수행되었다.

그림 5는 본 논문에서 제작한 반사판 안테나의 성능 측정 결과와 시뮬레이션으로 계산된 반사판 안테나의 성능 예측 결과를 비교한다. 제작된 반사판 안테나의 측정된 최대 이득은 대략 30 dBi로 시뮬레이션으로 예측된 결과인 31.2 dBi에 근사한 점을 확인하였다. 또한, 3 dB 빔폭은 측정 시 H-Plane과 E-Plane에서 각각 5° , 4° 이고, 시뮬레이션 시 H-Plane과 E-Plane에서 각각 4° , 6° 로 유사함을 확인하였다. 따라서 제작된 반사판이 적절하게 동작함을 확인하였다. 측정의 결과는 피드 혼과 피드 혼을 고정하기 위한 알루미늄 프로파일의 산란 영향, 알루미늄 프로파일의 무게에 의해 피드 혼의 방향이 처지는 등의 영향이 포함되었을 것으로 판단된다. 오차 영향을 고려하였을 때 CFRS 소재로 제작된 반사판 안테나의 측정된 성능은 시뮬레이션으로 예측된 성능과 근사하여 제안된 소재가 반사판으로서 적절히 동작하는 것으로 판단된다.

IV. 결론

본 논문에서는 CFRS 소재를 활용하여 위성용 반사판 안테나를 설계, 제작 및 성능 검증을 수행하였다. 제작된

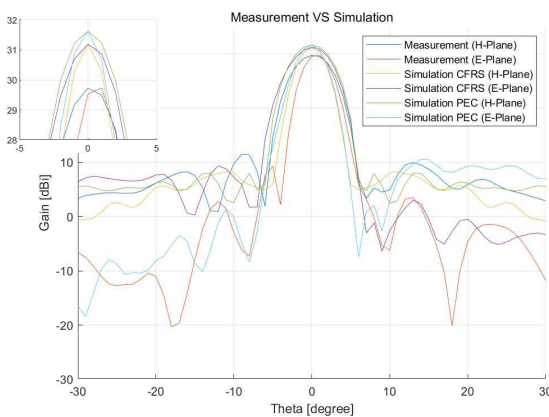


그림 5. 제작된 반사판 안테나의 성능 측정 및 시뮬레이션 비교 검증

Fig. 5. Performance measurement and simulation comparison verification of the fabricated reflector antenna.

CFRS 시편의 등가 전기전도도를 측정한 결과, Sylgard 사의 실리콘을 사용한 시편이 Wacker 사의 실리콘 시편에 비해 더 높은 전기전도도와 안정적인 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 낮은 주파수 대역에서는 두 시편 모두 약 1,000 S/m 수준의 전도도를 보였으나, 주파수가 증가함에 따라 Sylgard 시편이 Wacker 시편에 비해 더 우수한 특성을 보였다. 또한, CFRS 소재를 기반으로 반사판 안테나를 제작하여 성능을 측정한 결과, 최대 이득은 약 30 dBi로 시뮬레이션 결과와 근사하였다. 3 dB 빔폭 역시 측정과 시뮬레이션 결과가 유사하게 나타나, 설계된 안테나가 안정적으로 동작함을 확인하였다. 제안된 CFRS 소재는 기존 소재보다 간단한 구조로도 안정적인 포물면 형성이 가능하여, 본 연구를 기반으로 향후 높은 성능의 반사판 안테나를 낮은 비용으로 설계할 수 있는 잠재적 가치가 크다고 판단된다. 이를 위해 피드 혼의 위치 최적화를 포함한 추가적인 개선 연구가 진행될 필요가 있다.

References

- [1] S. S. Yoon, J. W. Lee, T. K. 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.
- [2] G. Tibert, "Deployable tensegrity structures for space applications," Ph.D. dissertation, Sweden's largest technical university, Stockholm, Sweden, 2002.
- [3] J. H. Kim, S. A. Lee, T. Y. Park, H. S. Choi, H. R. Kim, and B. G. Chae, et al., "Analysis of radio frequency(RF) characteristics and effectiveness according to the number of gores of mesh antenna," *Journal of Space Technology and Application*, vol. 1, no. 3, pp. 364-374, Nov. 2021.
- [4] L. Datashvili, H. Baier "Membranes and thin shells for space reflectors," in *10th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments and Second NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration*, League City, TX, Mar. 2006.