

소형 위성 SAR용 Deep Reflector 안테나의 초크 급전기 설계

Choke Feeder Design for Deep Reflector Antenna in Small Satellite SAR

조승주 · 임정환 · 이택경 · 이재욱

Seung Joo Jo · Jung-Hwan Lim · Taek-Kyung Lee · Jae Wook Lee

요 약

본 논문에서는 소형 위성 SAR에 적합한 전개형 반사형 안테나의 급전 안테나로서 초크 안테나를 설계 및 제작하였다. 전개형 안테나의 수납효율에 유리하도록 deep reflector 안테나를 선정하였고, 개구면의 가장자리 테이퍼를 고려하여 급전 안테나가 넓은 빔폭을 갖도록 설계하기 위해서 초크 링의 개수와 부착 위치의 최적화를 수행하였다. 설계한 초크 안테나를 반사판 안테나의 급전으로 사용하였을 때의 반사판 안테나 성능을 분석하였으며, 이때의 반사판 안테나 패턴으로부터 SAR 시스템 성능을 분석하여 설계한 초크 안테나가 전개형 안테나의 급전으로써 적합함을 확인하였다.

Abstract

In this study, we designed and fabricated a choke antenna as a feeder for a deployable reflector antenna for small satellite spaceborne synthetic aperture radar(SAR). The deep reflector antenna was selected considering the storage efficiency of the deployable antenna, and the number and positions of choke rings were optimized to provide the designed feed antenna with a wide beam width and a proper edge taper of the aperture. The performance of the reflector antenna was analyzed when the designed choke antenna was employed as the feeder. By analyzing the performance of the spaceborne SAR system employing the designed antenna, it was confirmed that the designed choke antenna is suitable for the feeder of the deployable reflector.

Key words: Choke Antenna Feeder, Deep Reflector Deployable Antenna, Small Satellite SAR

I. 서 론

광학을 이용하여 영상을 획득하는 영상시스템은 날씨에 의한 영향을 많이 받는 단점이 있지만, 합성개구레이다(synthetic aperture radar: SAR)는 목표물에 전파를 보내고 반사되는 신호를 측정하여 영상을 획득하기 때문에 악천후나 구름, 먼지와 같은 날씨에 의한 영향이나 주야

간 상관없이 관측이 가능하다^{[1],[2]}. 넓은 지역을 관측하기 위하여 하나의 중대형 위성을 개발하는 것은 많은 비용을 필요로 하지만, 여러 기의 소형 위성을 띄워 군집위성을 형성하여 관측하는 방법은 저비용으로 관측할 수 있으며, 위성 수에 비례하여 관측 주기가 짧아진다는 특징이 있다. 또한 한 기의 위성이 작동하지 않더라도 전체적인 성능에 약간의 저하만을 야기하고, 쉽게 대체가 가능

「본 연구는 2017년도 정부의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 우주핵심기술개발사업의 일환으로 수행되었습니다(NRF-2017M1A3A3A02016484).」

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

· Manuscript received November 12, 2019 ; Revised December 24, 2019 ; Accepted January 6, 2020. (ID No. 20191112-009S)

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

하다는 장점이 있다^[3]. 현재 개발 중인 소형 군집위성의 예로서 핀란드 ICEYE사의 ICEYE SAR를 들 수 있다^[4].

위성용 안테나는 지표 관측을 위하여 주로 고이득을 요구하며, 대표적으로 평면형인 능동위상배열안테나와 반사판 안테나가 있다. 능동위상배열 안테나는 각 패널의 부배열마다 TRM(Transmitter/Receiver Module)을 가져 안테나의 급전 구조가 복잡하고 무거운 단점이 있다^{[5],[6]}. 하지만 반사판 안테나의 경우, 급전 구조가 비교적 간단하고 광대역에서 동작하며, 고이득을 갖기 용이하다. 또한 반사판 안테나를 전개형으로 제작할 시, 위성 탑재체의 수납효율을 높일 수 있다^{[1],[5],[6]}. 전개형 반사판 안테나의 종류로는 솔리드, 메쉬, 인플레터블 등이 있다. 솔리드 타입은 높은 표면 정확도를 가질 수 있으며, 솔리드 타입 전개형 반사판 안테나는 원형의 중앙판과 그 주위에 포물면형상의 패널이 부착되는 형태로, 중앙판을 중심으로 패널을 비틀어 접음으로써 효율적인 수납이 가능하게 할 뿐만 아니라, 탄소섬유복합재(carbon fiber reinforced polymer: CFRP)와 같은 복합재료를 이용하여 전개 패널을 제작하여 무게를 감소시킬 수 있다^{[1],[6]}.

반사판 안테나는 포물면 형상의 반사판과 급전기를 결합하여 구성하고, 급전 안테나는 포물면의 초점에 위치한다. 전개형 반사판 안테나가 접힌 상태에서 반사판의 전개 패널은 급전 안테나와 서로 겹치지 않도록 설계되어야 한다. 수납 시 급전안테나와 패널이 서로 겹치지 않도록 하기 위해서는 급전 안테나가 반사판에 가까이 위치하도록 초점거리(F)가 짧을수록 유리하다. 이 경우에 안테나 크기(D)에 비해 초점거리가 짧으므로 급전 안테나로 빔폭이 매우 넓은 안테나를 사용하여야 한다. 반사판 안테나에서 F/D (focal-length-to-diameter ratio)가 0.35 이하의 값을 갖는 경우에 deep reflector 안테나라고 한다^[7]. Deep reflector에서 사용하는 급전 안테나의 종류로는 도파관으로만 이루어진 캔모양의 캔테나(cantenna), 도파관에 초크 링(choke ring)이 부착된 초크 안테나(choke antenna) 등이 있다. 캔테나의 경우, 초크 안테나보다 넓은 빔폭을 갖지만 전후방비(front back ratio)와 이득이 낮고, 빔폭을 조절할 수 없다. 이에 비해 초크안테나는 도파관 주위에 초크 링을 달아 도파관 벽을 타고 흐르는 전류를 억제함으로써 전후방비와 이득을 개선시킬 수 있다^{[7]~[9]}.

SAR 시스템에서 모호성 비(ambiguity to signal ratio), 해상도, NESZ(Noise Equivalent Sigma Zero)와 같은 성능 변수들은 SAR로부터 얻어지는 영상의 품질과 연관이 있다. 이러한 SAR 시스템의 성능 변수는 안테나의 성능으로부터 많은 영향을 받는다. 따라서 설계된 SAR 안테나가 적합하다는 것을 확인하기 위해서는 SAR 성능을 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 X 밴드를 사용하는 소형 위성 SAR용 전개형 안테나의 수납 효율을 높이기 위한 deep reflector에 적합한 급전 안테나로서 초크 안테나를 설계 및 제작하였으며, 설계한 초크 안테나와 일반적인 피라미드형 혼을 급전으로 사용한 경우에 대하여 반사판 안테나의 성능을 비교 분석하였다. 또한 반사판 안테나 패턴을 활용하여 SAR 시스템의 성능을 분석함으로써 급전 안테나의 설계가 SAR 시스템의 성능에 미치는 영향을 확인하였다.

II. Deep Reflector용 급전기 설계

전개형 반사판 안테나에서 수납 공간의 확보를 위해서는 급전기가 반사판에 가까이 위치하도록 초점거리가 짧은 구조의 안테나를 설계하여야 한다. 이러한 요구를 만족하기 위해서는 F/D 가 0.35보다 작은 값을 가지는 deep reflector 형태의 안테나가 적합하다^[7]. 그림 1은 반사형 안테나의 구조로서 초점거리가 짧은 형태를 보여주고 있으며, F 는 초점거리, D 는 반사판 안테나의 직경이다.

반사판 안테나에서 안테나 이득을 최대화하기 위해서는 넘침 효율(spillover efficiency)과 개구면 테이퍼 효율(aperture taper efficiency)을 최적으로 조절하여 효율이 최대가 되도록 가장자리 테이퍼(edge taper)를 정해야 한다.

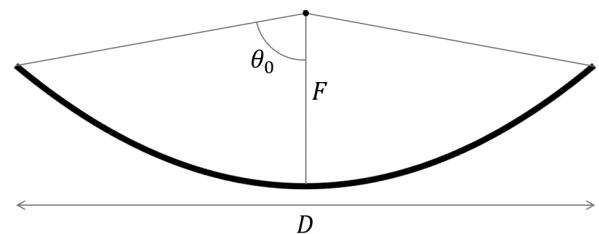


그림 1. 초점거리가 짧은 반사판 안테나
Fig. 1. Reflector antenna with short focal length.

그림 1에서 초점에 위치한 급전기의 패턴에서 반사판의 가장자리에 해당하는 θ_0 위치의 세기가 급전 테이퍼(feed taper)에 해당한다. 반사판 안테나의 구조로부터

$$\theta_0 = 2 \tan^{-1} \left(\frac{1}{4(F/D)} \right) \quad (1)$$

이며^[5], F/D 가 작을수록 θ_0 는 커진다. 가장자리 테이퍼는 급전 테이퍼와 구면확산 손실(spherical loss)을 더한 값으로, 가장자리 테이퍼가 클수록 반사판 면적효율이 감소하므로 테이퍼 효율은 감소하고, 반면 넘침 효율은 증가한다. 반사판 안테나에서 최대의 이득을 얻기 위해서는 이들 두 가지 효율을 곱한 값이 최대가 되도록 적절한 가장자리 테이퍼를 설정하여야 한다^{[5],[10]}. 안테나 패턴의 부엽 성능은 가장자리 테이퍼가 클수록 좋아진다.

F/D 가 작은 값을 가지는 deep reflector 안테나에서는 그림 1에서와 같이 급전기의 θ_0 에서 설정된 급전 테이퍼의 값을 가지도록 빔폭이 넓은 급전안테나를 설계하여야 한다. 그림 2에서는 F/D 에 따라 요구되는 θ_0 를 계산하였다. F/D 가 0.3일 때 θ_0 는 약 79.5°이다. 급전 테이퍼를 12 dB로 설정하였을 때, 급전기의 12 dB 빔폭이 $2\theta_0$ 가 되도록 급전안테나를 설계하여야 한다.

2.1 초크 급전기 설계

초점거리가 짧은 deep reflector 안테나에서 사용하기 위한 빔폭이 넓은 급전기로서 부채꼴 패턴(sectoral pattern)

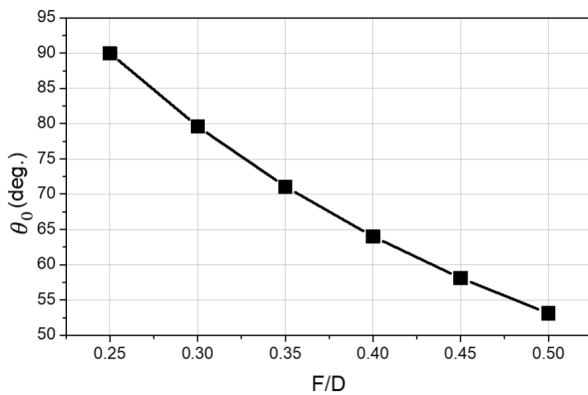


그림 2. F/D 에 따라 요구되는 θ_0

Fig. 2. Required θ_0 of the feeder.

을 가지는 급전 안테나를 설계하였다^{[11],[12]}. 방사패턴은 개구면의 전류분포와 푸리에 변환 관계를 가지므로, 급전기에 여러 개의 초크를 사용한 확장 개구면 안테나를 사용한다. 확장 개구면에서 초크의 위치에서 전류분포의 영향을 만들게 되므로, 빔폭이 넓은 부채꼴 복사패턴을 구현할 수 있다. 부채꼴 패턴을 위한 급전기 전류분포로서 대표적인 형태는

$$f(2\pi\rho/\lambda) = \frac{2J_1(2\pi\rho\sin\theta_0/\lambda)}{2\pi\rho\sin\theta_0/\lambda} \quad (2)$$

이다^[11]. 여기서 λ 는 파장, J_1 는 1차 베셀함수, ρ 는 개구면의 반지름이며, 식 (2)에서 영이 되는 위치에 초크를 설치한다.

그림 3은 부채꼴 패턴을 발생하는 초크 안테나의 형태를 보여주고 있다. 원형 도파관의 확장 개구면에 2개의 초크 링을 설치하여 초크의 위치에서 식 (2)가 영이 나타나도록 하였다. 그림 3(a)는 원래의 초크 안테나 구조로서 초크 링의 끝부분이 도파관의 끝부분과 같은 위치이다. Deep reflector 안테나에서는 매우 넓은 빔폭을 가진 급전기가 요구되며, 이러한 구조에서는 부채꼴 형태의 패턴을 구현할 수는 있지만 그림 2에서와 같이 매우 넓은 빔폭을 구현하는 데는 한계가 있다.

초크 안테나에서 더욱 넓은 빔폭을 구현하기 위하여 그림 3(b)와 같이 초크 링에 비해 도파관 끝부분이 더 높은 형태의 안테나를 설계하였다. 그림 3(b)에서는 도파관 끝부분의 길이 l 에 해당하는 위치에 흐르는 외부 전류가 복사패턴에 영향을 미친다. 또한 도파관 단면의 등가 전류는 확장 단면의 전류에 비해 더 나은 부분에 위치하게 된다. 도파관 외부의 전류가 추가되고, 도파관 단면과 도

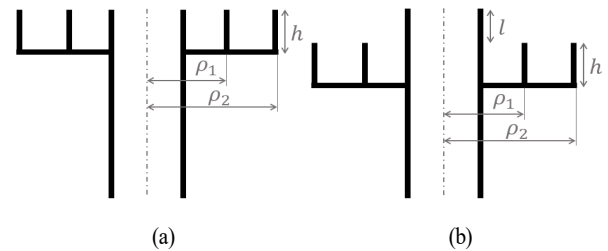


그림 3. 2개의 초크 링을 갖는 초크 안테나 구조

Fig. 3. Geometry of choke antenna with 2 choke rings.

파관 외부의 전류의 분포를 변화시킴으로써 안테나 빔폭을 더욱 증가시킬 수 있다.

식 (2)가 영이 되는 ρ 의 위치에 전류의 영을 만들기 위해 초크 링을 설치한다. 초크 링에서는 벽 가장자리의 표면 임피던스를 증가시켜 벽 측면으로 흐르는 전류를 감소시켜 표면 전류를 제거한다. 초크 링의 높이(h)는 $0.25\lambda \leq h \leq 0.5\lambda$ 의 범위에서 정한다^{[8],[13],[14]}. h 를 정하기 위하여 상용 프로그램 Feko의 MLFMM(Multilevel Fast Multipole Method)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 초크 안테나 중심의 도파관 부분은 본 논문에서 목표로 하는 X 밴드 표준 규격을 사용하였다. 그림 3(a)의 형태에서 초크링의 개수를 2개로 가정하고, $\rho_1=19.456$ mm, $\rho_2=35.425$ mm로 설정하였다. 주파수는 9.6 GHz로 설정하였고, h 를 $0.25\lambda \sim 0.5\lambda$ 로 변화시켜가며 얻은 근거리장의 분포를 정규화시켜 그림 4에 나타내었다. 그림 4로부터 비교한 모든 경우의 h 에서 초크 링의 위치에 근거리장의 크기가 0에 가까운 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 전개형 안테나의 수납공간에 들어갈 초크 급전기의 높이를 고려하여 h 는 0.25λ 로 설정하였다.

급전 안테나로서 요구되는 빔폭과 이득을 충족하기 위해서는 적절한 초크 링의 수와 도파관 돌출된 길이 l 를 설정하여야 한다. Feko의 MLFMM을 이용한 시뮬레이션을 통하여 이들 조건에 대한 영향을 분석하였다.

그림 5는 X 밴드 표준 원형 도파관에 초크 링이 없는

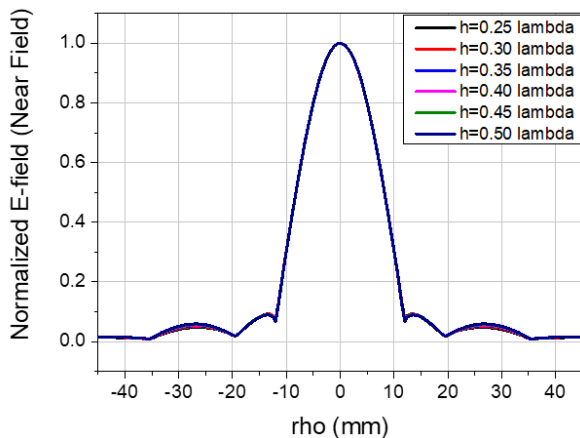


그림 4. h 에 따른 개구면에서의 근거리장(E-field)
Fig. 4. Near field(E-field) at aperture depending on h .

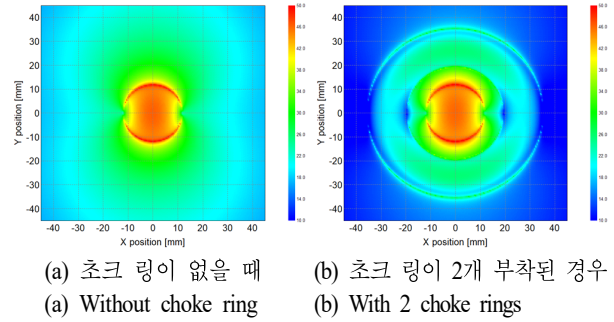


그림 5. 개구면에서의 근거리 전장
Fig. 5. Near field pattern at aperture plane (E-field).

경우와 초크 링이 2개 부착된 경우에 대한 개구면장의 분포를 보여주고 있다. 그림 5(b)에서 초크 링이 부착된 경우에 초크 링이 위치한 지점에서 전장의 세기가 영에 가까워지는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 구조를 이용하여 초크 링이 있는 영역에 대해 식 (2)의 전장 분포를 구현할 수 있다.

개구면에서 식 (2)의 전장 분포를 구현하기 위해서는 가급적 많은 수의 초크 링을 사용할수록 유리하다. 여러 개의 초크 링을 사용할 경우, 넓은 범위에 걸쳐 식 (2)에 근사한 형태의 개구면 전장분포를 얻을 수 있으므로 넓은 빔폭의 안테나 방사패턴이 얻어진다. 표 1에서는 초크 링의 개수에 따른 12 dB 빔폭을 정리하였다. 목표주파수 9.6 GHz에서 Feko의 MLFMM을 이용하여 계산하였으며, 원형 도파관의 기본 모드(fundamental mode)인 TE₁₁ 모드를 도파관에 인가하였다. 개구면 크기를 넓혀서 초크 링의 개수를 증가시킬수록 빔폭이 증가할 뿐만 아니라, 안테나 이득도 증가한다.

반사형 안테나에서 초크 안테나를 급전기로 사용할 때

표 1. 초크 링 개수에 따른 안테나 성능 변화
Table 1. Variation of antenna performance by the number of choke rings.

Number of choke rings	Gain [dB]	12 dB beamwidth [deg.]	
		$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$
2	9.01	134.00	139.82
4	9.13	133.17	143.31
6	9.42	133.52	147.69

는 급전기에 의한 급전 차폐에 의한 안테나의 성능 저하를 고려하여야 한다. 초크 급전안테나에서 초크 링의 숫자를 증가시키면 급전기가 차지하는 면적이 넓어지므로 급전차폐가 커지는 문제가 있다. 또한 전개형 안테나에서는 위성 발사 시 전개 패널을 접었을 때 급전기가 차지하는 위치와 서로 겹치지 않도록 설계하여야 한다. 반사형 안테나에서 급전 차폐에 의한 성능 저하를 피하기 위해 급전기가 차지하는 면적의 직경은 1~2 파장 범위를 만족하도록 설계한다^[8]. 급전기의 직경이 2파장 이내로 되도록 하기 위하여 초크 링은 2개 이하로 설계한다.

설계하고자 하는 deep reflector 안테나에서 F/D 가 0.3인 경우에 2개의 초크 링을 사용한 안테나로서는 요구되는 θ_0 를 충족시키는 데 매우 부족하다. 이를 해결하기 위하여 그림 3(b)의 구조를 이용하여 빔폭을 증가시켰다. 초크 링과 도파관 끝의 높이 차이에 해당하는 l 을 조절하여 원하는 빔폭을 나타내는 안테나를 설계하였다.

초크 링이 2개인 경우에 l 의 변화에 따라 나타나는 초크 안테나의 성능의 변화를 목표주파수 9.6 GHz에서 Feko의 MLFMM을 이용하여 계산하였으며, 표 2에 정리하였다. l 이 증가할수록 이득은 감소하지만 빔폭은 증가한다. 12 dB 빔폭은 l 이 0일 때 139.96°이며, $l=0.25\lambda$ 일 때 155.71°로 증가하여 개선된 구조에서 넓은 빔폭을 얻을 수 있다. 따라서 원하는 θ_0 에 해당하는 deep reflector 안테나를 구현할 수 있다. 전후방비는 $l=0.25\lambda$ 일 때 23.8 dB로서 l 이 0인 경우(26.67 dB)보다 약 3 dB 감소하였지만, 20 dB 이상으로서 요구되는 성능을 만족한다.

표 2. l 에 따른 초크 급전기 성능

Table 2. Performance of choke feeder depending on l .

l [λ]	Gain [dB]	12 dB beamwidth [deg.]	
		$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$
0	9.01	134.12	139.96
0.05	9.13	137.03	134.76
0.1	9.02	140.11	134.71
0.15	8.89	143.35	137.87
0.2	8.57	147.17	144.45
0.25	8.02	152.20	155.71
0.3	7.33	158.80	172.07

2-2 초크 급전기 제작 및 측정 결과

본 절에서는 X 밴드 deep reflector 안테나용 초크 급전기 제작을 위한 안테나의 형상을 결정하였으며, 제작된 초크 급전기의 성능 측정 결과를 상용 프로그램 Feko의 시뮬레이션 결과와 비교를 수행하였다.

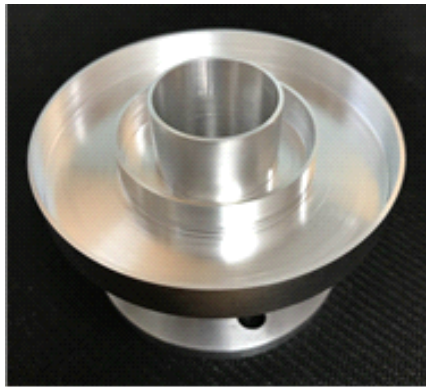
급전 차폐로 인한 전기적 성능 저하를 피하고, 전개형 안테나에서 패널을 접었을 때 급전기와 겹치지 않기 위해서는 급전 안테나의 크기가 제한되므로 초크 링은 2개로 설정하였으며, 목표 주파수 9.6 GHz에서 Feko의 MLFMM을 이용하여 초크 링 부착 위치에 대한 최적화를 진행하였다. 이 경우에는 l 이 0.25λ 일 때, 목표로 하는 빔폭을 얻을 수 있다. 제안된 초크 급전기를 제작하기 위해 ρ_1 , ρ_2 의 길이는 제작에 용이하도록 소수점 둘째자리에서 반올림한 19.5 mm, 35.4 mm로 설계하였으며, 1 mm 두께를 적용하였다. 그림 6(a)는 제작한 초크 급전기의 모습이며, 그림 6(b)는 제작한 급전기의 $|S_{11}|$ 을 측정하는 모습이다. 제작한 초크 급전기를 시뮬레이션하여 얻은 전기적 성능과 실제 측정한 결과를 비교하였다.

그림 6(c)는 초크 급전기의 $|S_{11}|$ 을 나타낸 그래프로, 9.15 GHz 이상부터 -20 dB 이하의 반사손실을 보인다. 그림 7은 설계한 초크 급전기의 방사 패턴을 나타내며, 충분히 넓은 빔폭을 갖는 부채꼴 모양의 패턴을 확인할 수 있다. 표 3은 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 7.79 dB 이상의 이득과, 그림 2에서 F/D 가 0.3일 때 요구되는 급전의 빔폭 $2\theta_0=159^\circ$ 를 만족하는 것을 확인할 수 있다.

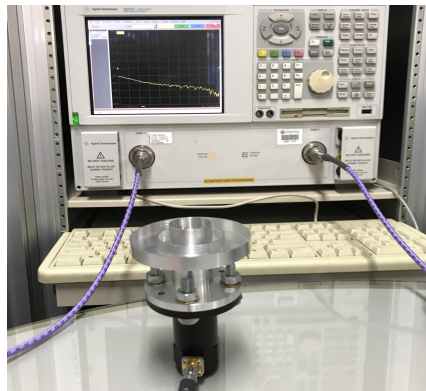
2-3 반사판 안테나 성능

F/D 가 0.3인 deep reflector 안테나의 급전기는 급전테이퍼를 -12 dB로 하였을 때, 12 dB 빔폭이 159° 를 만족해야 한다. 본 절에서 반사판 안테나의 목표주파수는 급전기와 동일하게 9.6 GHz로 설정하였으며, 상용 시뮬레이션 Feko의 MLFMM을 이용하여 시뮬레이션하였다.

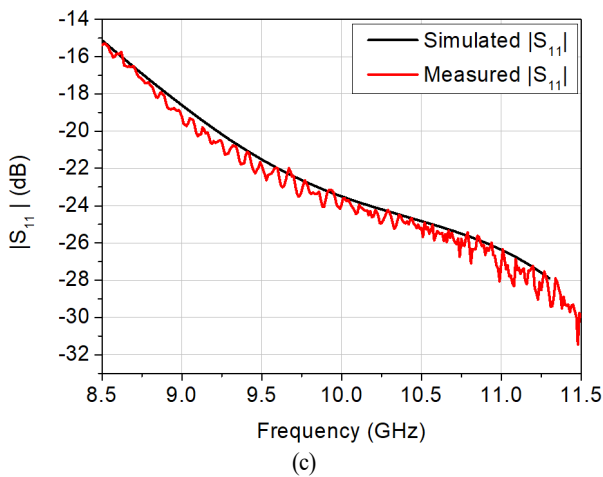
본 논문에서 제작된 초크 급전기가 deep reflector 안테나에 초크 급전기가 적합함을 확인하기 위하여, 초크 급전기를 사용한 경우와 피라미드형 급전기를 사용한 경우의 반사판 안테나 성능을 비교하였다. 피라미드형 급전기



(a)

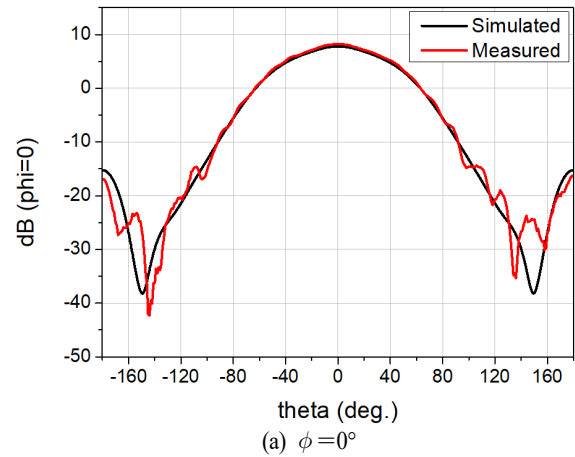


(b)

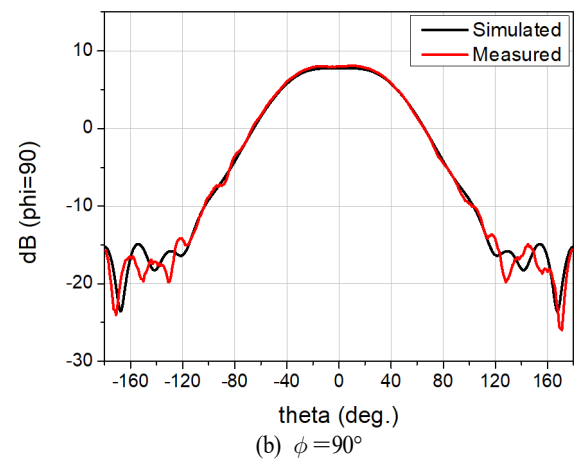


(c)

그림 6. (a) 제작한 초크 급전기의 모습, (b) 초크 급전기의 $|S_{11}|$ 측정 모습, (c) 초크 급전기의 반사손실
Fig. 6. (a) Manufactured the choke feeder, (b) Measurement setup of choke feeder, (c) Return loss of the choke feeder.



(a) $\phi = 0^\circ$



(b) $\phi = 90^\circ$

그림 7. 초크 급전기 방사패턴

Fig. 7. Radiation pattern of the choke feeder.

표 3. 설계한 초크 급전기의 시뮬레이션 결과와 측정 결과
Table 3. Simulated and measured result of designed choke feeder.

	Gain [dB]	12 dB beamwidth [deg.]		Front back ratio [dB]
		$\phi = 0^\circ$	$\phi = 90^\circ$	
Simulated	7.79	152.31	159.94	-23.02
Measured	7.99	153.00	159.00	-23.69

로는 SAGE사의 피라미드형 혼 안테나(SAR-1248-90-S3, 개구면 47 mm×37 mm)를 사용하였다^[15]. 해당 혼 안테나를 목표 주파수에서 시뮬레이션 해본 결과, 이득 12.25 dB, 12 dB 빔폭 93.93°를 갖는다.

시뮬레이션을 위한 반사판의 형상은 $F/D=0.3$, 직경 1.5 m로 설정하였다. 그림 8에서 급전기에 따른 반사판 안테나의 방사패턴을 확인할 수 있으며, 이에 대한 수치를 표 4에 비교하여 나타내었다. 본 논문에서 설계한 초크 안테나를 급전기로 사용하였을 때, 반사판 안테나의 이득과 더불어 전체적인 부엽이 상당히 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 초크 급전기의 테이퍼 효율이 피라미드형 급전기보다 충분히 높기 때문에 나타난 결과로 볼 수 있다. 초크 급전기를 사용한 경우, 피라미드형 급전기보다 약 3 dB 정도 높은 이득을 가지며, 부엽의 크

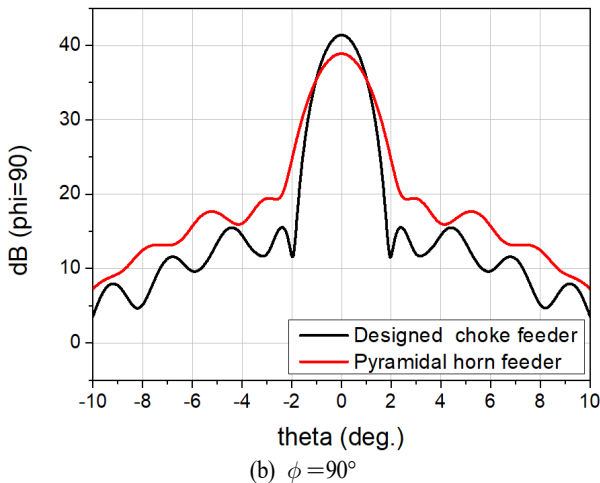
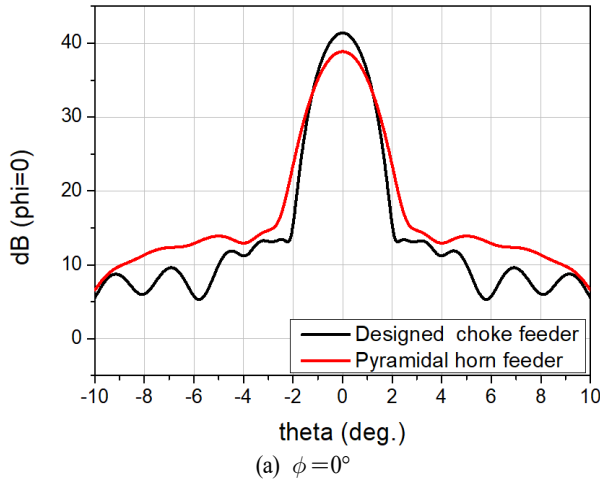


그림 8. 급전기에 따른 반사판 안테나 방사패턴

Fig. 8. Radiation pattern of reflector antenna depending on feeder type.

표 4. 급전기에 따른 반사판 안테나 전기적 성능

Table 4. Electrical performance of reflector antenna depending on feeder.

Feeder type	Gain [dB]	Side lobe level [dB]		3 dB BW [deg.]	
		$\phi = 90^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 90^\circ$	$\phi = 90^\circ$
Pyramidal feeder	38.88	24.98	19.42	1.79	1.88
Designed choke feeder	41.40	27.96	25.85	1.52	1.47

기와 3 dB 빔폭이 각각 3~6 dB, 0.27~0.41°만큼 개선된 것을 확인할 수 있다.

III. 위성 SAR 시스템 성능 분석

모호성 비, 해상도, NESZ와 같은 SAR 시스템 성능은 SAR 영상의 품질을 좌우하며, 안테나 성능에 많은 영향을 받는다. 따라서 본 논문에서 설계한 초크 급전기가 deep reflector 안테나에 적합함을 확인하기 위하여 2장의 반사판 안테나 패턴 시뮬레이션 결과를 바탕으로 위성 SAR 시스템에 대한 성능을 분석하였다.

3-1 SAR 시스템의 성능 변수

모호성 비는 SAR가 관측하고자 하는 영역 밖으로부터 모호성 신호가 들어오는 정도를 나타내며, 거리 방향 모호성 비(range ambiguity ratio: RAR)와 방위 방향 모호성 비(azimuth ambiguity ratio: AAR)로 나눌 수 있다. RAR과 AAR은 송·수신 안테나 패턴, 위성과 관측 영역 사이의 거리, 관측 영역에 대한 전파의 입사각 등의 변수들을 바탕으로 계산된다^{[2],[16],[17]}.

NESZ는 SAR 시스템의 민감도(sensitivity)를 나타내며, SAR에서의 SNR(signal to noise ratio) 식에서 SNR이 0 dB가 되도록 하는 후방산란계수 σ_0 가 NESZ가 된다. NESZ는 송신 출력, 주파수, 송신 펄스 폭, 펄스 반복 주기 PRF(pulse repetition frequency), 노이즈 신호 세기, 시스템 손실 등을 바탕으로 계산된다^{[1],[18]}.

해상도는 관측 대상들을 분리하여 파악할 수 있는 정도를 나타내며, 거리 방향에 대한 해상도와 방위방향에

대한 해상도로 나눌 수 있다. 거리 방향 해상도는 송신 펄스의 FM 비(frequency modulation ratio)에 의존적이며, 방위방향 해상도는 위성의 속도, 도플러 신호처리 대역폭(Doppler processing bandwidth, PB)을 바탕으로 결정된다^[19].

모호성 비, NESZ 등의 SAR 시스템 성능 지표들에 대한 분석은 이전에 저자들이 발표한 논문들^{[1],[2],[17]}에서 이루어졌으며, 동일한 방법을 사용하여 본 논문의 안테나를 활용한 소형 위성 SAR 시스템의 성능을 분석하였다.

3-2 SAR 시스템 성능 분석 결과

소형 위성 SAR 시스템의 성능 분석을 수행하기 위하여 표 5와 같은 시스템 변수들을 선정하였다. 위성의 고도는 500 km이며, 가장 기본적인 동작 방식인 스트립맵(stripmap) 모드로 동작하는 것을 가정하였다. SAR 시스템의 PRF는 입사각과 함께 모호성 성능 및 해상도와 연관이 있으며^{[17],[19]}, SAR 시스템은 안테나의 방위방향 길이에 의존적인 도플러 대역폭을 가지므로 이러한 영향을 고려한 PRF 선정이 필요하다. 특히 본 논문에서 설계된 소형 안테나를 사용하게 되면 AAR 성능을 보장하기 위해서는 나이퀴스트 율(Nyquist rate)을 고려한 충분히 높은 PRF가 필요하다. PB 또한 모호성 성능과 해상도와 연관이 있으므로 그 영향을 고려해야 한다^{[2],[20]}. 최종적으로 PRF와 관측 폭(swath width) 및 입사각은 블라인드 거리(blind range), 연직 하강방향 수신 신호(nadir return)를 고

표 5. 소형 위성 SAR 시스템의 시스템 변수

Table 5. System parameters of the small spaceborne SAR system.

Parameter	Value
Satellite altitude	500 km
Satellite velocity	7,613 m/s
Incidence angle	29.7 ~ 30.5°
Carrier frequency	9.6 GHz
PRF	14,050 Hz
RF transmitted power	1 kW
Resolution	< 5 m
NESZ	< -20 dB
RAR, AAR	< -20 dB

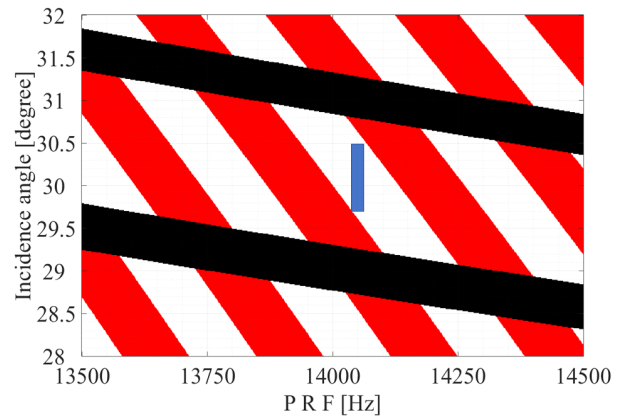


그림 9. 소형 위성 SAR 시스템의 타이밍 다이어그램

Fig. 9. Timing diagram of the small spaceborne SAR system.

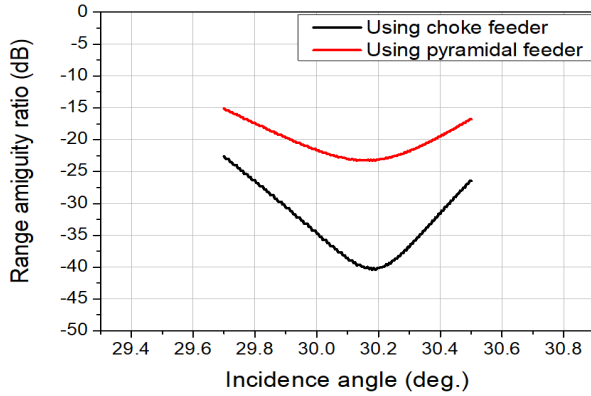
려한 그림 9와 같은 타이밍 다이어그램을 바탕으로 선정하였다.

표 5의 시스템 변수 및 앞 장에서 설계된 반사판 안테나의 패턴으로 RAR, AAR, NESZ를 분석한 결과는 그림 10 및 그림 11과 같다. 그림 10 및 그림 11에서는 초크 안테나를 급전기로 사용한 경우와 함께 피라미드형 혼 안테나를 사용한 결과를 함께 표시하였으며, 비교를 위하여 안테나 패턴 외에는 표 5와 동일한 조건을 사용하였다.

그림 10 및 그림 11로부터 본 논문에서 설계된 안테나와 표 5의 시스템 변수를 사용한다면 소형 위성 SAR 시스템은 모호성 비와 NESZ가 -20 dB 이하의 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 반면에 피라미드형 혼 안테나를 사용할 경우, 초크 안테나를 사용했을 때보다 전반적으로 부엽 레벨이 높기 때문에 모호성 성능이 좋지 않으며, 피드의 빔폭이 좁은 만큼 반사판 안테나의 효율이 떨어지므로 안테나 이득이 낮기 때문에 NESZ 성능도 좋지 않다. 따라서 수납 효율을 고려한 deep reflector 반사판 안테나에서는 초크 안테나를 급전기로 사용하는 것이 SAR 시스템 성능 측면에서 적합한 선택이 된다.

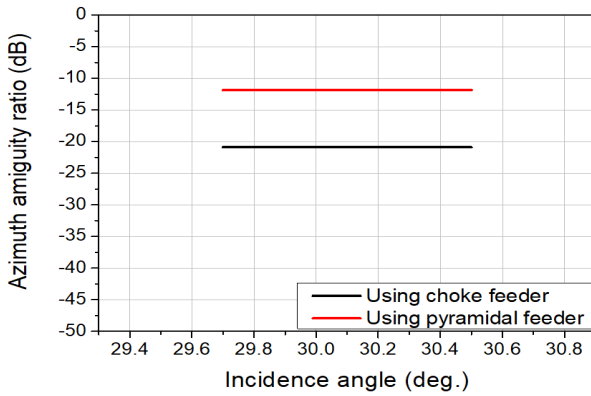
IV. 결 론

본 논문에서는 수납 효율을 고려한 소형 위성용 전개형 반사판 안테나의 급전용 초크 안테나를 설계하고, 반사판 안테나 패턴을 확인하였으며, 이를 바탕으로 SAR



(a) 거리 방향

(a) Range direction



(b) 방위방향

(b) Azimuth direction

그림 10. 모호성 성능의 비교 결과

Fig. 10. Comparison result of ambiguity performance.

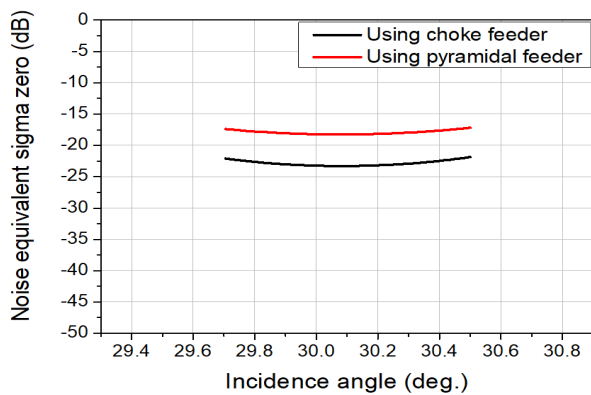


그림 11. NESZ 비교 결과

Fig. 11. Comparison result of NESZ.

시스템의 성능을 확인하였다. Deep reflector용 급전기로 선정된 초크 안테나의 빔 패턴은 초크 링의 개수 및 부착 위치에 영향을 받기 때문에 이에 대한 분석 및 설계 최적화가 이루어졌다. 이를 바탕으로 설계된 초크 안테나를 사용하였을 시 일반적인 피라미드형 혼 안테나를 사용했을 때보다 좋은 테이퍼 효율을 갖기 때문에 더 좋은 반사판 안테나의 성능을 얻을 수 있어, SAR 시스템 성능이 더 향상되었다. 이로부터 본 논문에서 설계한 초크 급전기가 deep reflector 안테나에 적합함을 확인하였다.

References

- [1] 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.
- [2] J. H. Lim, S. S. Yoon, J. W. Lee, T. K. Lee, S. B. Ryu, and H. C. Lee, et al., "Performance analysis of quad-pol SAR system for wide-swath operation mode," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 2, pp. 141-151, Feb. 2019.
- [3] R. Sandau, "Status and trends of small satellite missions for earth observation," *Acta Astronautica*, vol. 66, no. 1-2, pp. 1-12, Jan.-Feb. 2010.
- [4] ICEYE, "A SAR satellite constellation to help improve your decision making," 2019. Available: <https://www.iceye.com/resources/satellite-missions>
- [5] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 3rd ed., Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.
- [6] T. K. Lee, "Lightweight antennas for satellite SAR," *Aerospace and Aviation Electronics Research Center Newsletter*, vol. 11 Fall, pp. 3-7, Nov. 2017.
- [7] A. A. Kishk, "Simple primary focus feeds for deep reflectors," in *IEE Proceedings H - Microwaves, Antennas and Propagation*, Apr. 1989, vol. 136, no. 2, pp. 169-171.
- [8] S. Rao, S. K. Sharma, and L. Shafai, *Handbook of Reflector Antennas and Feed Systems*, Boston, MA, Artech House, vol. 2, 2013.

- [9] R. Wohlleben, H. Mattes, and O. Lochner, "Simple small primary feed for large opening angles and high aperture efficiency," *Electronics Letters*, vol. 8, no. 19, pp. 474-476, Sep. 1972.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2005.
- [11] P. Brachat, "Sectoral pattern synthesis with primary feeds," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 4, pp. 484-491, Apr. 1994.
- [12] J. M. Lim, J. K. Son, T. K. Lee, J. W. Lee, and W. K. Lee, "Design of secant pattern radiator with septum circular polarizer," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 1, pp. 32-38, Jan. 2014.
- [13] M. A. Stuchly, S. S. Stuchly, and G. Kantor, "Diathermy applicators with circular aperture and corrugated flange," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 28, no. 3, pp. 267-271, Mar. 1980.
- [14] F. S. Scire-Scaozzo, S. N. Makarov, "A low-multipath wideband GPS antenna with cutoff or non-cutoff corrugated ground plane," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 1, pp. 33-46, Jan. 2009.
- [15] SAGE Millimeter, Inc., "12 dBi Gain, 8.2 to 12.4 GHz, WR-90 waveguide, X band rectangular horn antenna." Available: <https://www.sagemillimeter.com/12-dbi-gain-8-2-to-12-4-ghz-wr-90-waveguide-x-band-rectangular-horn-antenna/>
- [16] W. A. Imbriale, *Spaceborne Antennas for Planetary Exploration*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 305-317, 2006.
- [17] S. S. Yoon, J. W. Lee, T. K. Lee, and D. W. Yi, "Parameter selection procedure for parabolic reflector antenna for the optimum synthetic aperture radar performance," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 13, no. 4, pp. 251-258, Dec. 2013.
- [18] S. Y. Kim, N. H. Myung, and M. J. Kang, "Antenna mask design for SAR performance optimization," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 443-447, Jul. 2009.
- [19] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Boston, MA, Artech House, pp. 113-157, 2005.
- [20] H. M. Braun, "A new SAR sensor designed for microsatellites," in *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, HI, Jul. 2010, pp. 213-215.

조 승 주 [한국항공대학교/석사과정]

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



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)

2018년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정

[주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나 설계 및 분석, 위성 SAR 시스템

임 정 환 [한국항공대학교/석사과정]

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



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학사)

2018년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 석사과정

[주 관심분야] 위성 통신/레이다 안테나, 위성 SAR 시스템, EMI/EMC

이택경 [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, 방문교수

2014년: 한국전자과학회 회장

1992년 3월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
[주 관심분야] 마이크로파, 안테나, 전자파해석, 레이더 및 SAR, 위성탐재안테나

이재욱 [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] 마이크로파 및 밀리미터파 능, 수동 소자 해석 및 설계, EMI/EMC 대책 기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테나 설계, 위성 통신 안테나, 전자장 수치 해석