

## 위성 SAR용 광대역 이중편파 복사소자 설계 및 제작

# Design and Implementation of Wideband Dual-Polarization Radiator for Satellite Synthetic Aperture Radar Applications

박종민 · 김성주 · 유제우 · 채희덕 · 박종국

Jongmin Park · Seong-Ju Kim · Je-Woo Yu · Heeduck Chae · Jongkuk Park

### 요 약

본 논문에서는 위성 SAR용 광대역 이중편파 복사소자 개발 내용을 소개한다. 능동위상배열 형태의 위성 SAR용 안테나에 적용을 고려하여 광대역, 고지향성 특성의 이중편파 복사소자를 설계하였다. 전기적 빔조향 기능을 고려하여 고각방향 배열 간격을 설계하고, 설계된 배열 간격 내에서 이중편파 복사소자를 설계하였다. 또한 복사소자를 방열구조로 적용이 가능하도록 금속소재 및 화이트페인트를 적용하였다. 우주환경을 고려하여 복사소자 제작 시 소재, 부품, 공정에 대한 관리를 수행하였다. 마지막으로 능동반사손실 및 근접전계시험을 통하여 전기적인 성능을 검증하였다. 제작된 복사소자조립체는 대역폭 12.2 % 이상, 이중편파, 중심주파수에서 지향성 00.0 dBi 이상, 빔폭 0.00° ± 0.00°, 부엽레벨 -00 dB 이하, 교차 편파 레벨 -00 dB 이하, 고각방향 빔 조향 범위 ±00°로 개발목표가 만족됨을 확인하였다.

### Abstract

This paper describes the development of a wideband dual-polarization radiator for satellite synthetic aperture radar (SAR). A dual-polarization radiator with wideband and high-directivity characteristics was designed for application in an active phased-array antenna for satellite SAR. The elevation array spacing was designed by considering the electrical beam steering function, and the dual-polarization radiator was designed within the elevation array spacing. In addition, metallic materials and white paint were applied so that the radiator can be used as a heat-dissipating structure. The space environment, materials, parts, and manufacturing processes were considered. Finally, the electrical performance was verified via active return loss and near field tests. It was confirmed that the developed radiator assembly satisfies the development requirements of a bandwidth of 12.2 % or more, dual polarization, directivity of 00.0 dBi or more, beamwidth of 0.00° ± 0.00°, side lobe level of -00 dB or less, cross polarization level of -00 dB or less, and elevation beam steering range of ±00°.

Key words: (Synthetic Aperture Radar) SAR, Satellite, Dual-Polarization Radiator

### I. 서 론

위성 SAR(synthetic aperture radar)는 궤도상에서 방사된

전자기파가 표적을 통해서 반사된 신호를 수신하여 영상을 생성하는 시스템이다. 광학위성과 다르게 전자기파를 이용하여 표적의 정보를 획득하여 대기 중의 수증기나

「이 연구는 2021년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-21-029).」

LIG넥스원(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received July 10, 2025 ; Revised July 25, 2025 ; Accepted August 12, 2025. (ID No. 20250710-065)

· Corresponding Author: Jongmin Park (e-mail: jongmin.park2@lignex1.com)

구름, 먼지, 강우 등의 기상상태와 밤낮에 관계없이 영상을 얻을 수 있어서 군사용 및 과학, 상업용으로 널리 사용된다.

현재 위성 SAR는 높은 해상도와 넓은 관측영역을 요구하는 고품질화가 요구되는 추세이다. 독일에서 개발된 TSX(TerraSAR-X) 및 TDX(TanDEM-X)의 경우, 최대 해상도는 1 m 수준이며, 후속 위성인 SAR-Lupe의 경우 최대 해상도는 0.5 m 수준이다<sup>[1]</sup>. 국내에서 개발된 위성 SAR인 다목적실용위성 5호의 경우, 최대 해상도 1 m 수준이며, 발사가 예정된 후속 위성인 다목적실용위성 6호의 경우는 더 향상된 해상도의 영상을 획득 가능하도록 개발되었다<sup>[2]</sup>. 그리고 다양한 운용모드를 고려하여 전기적 빔조향 기능이 요구된다.

위성 SAR용 안테나는 복사소자의 형태에 따라 반사판 안테나와 능동위상배열 안테나 형태로 개발되는 추세이다. 반사판 안테나는 발사체의 탑재를 고려하여 전개형의 경량화 특성을 가진다. 또한 읍셋 피드 또는 배열 급전을 통하여 제한적인 빔조향 기능이 가능하다<sup>[3]</sup>. 반대로 능동 위상배열 안테나는 적층형 패치배열 또는 도파관 슬롯배열 형태로 개발되고 있다<sup>[4]</sup>. 능동위상배열 채널의 가중치 설계를 통하여 전기적 빔조향 및 빔성형이 가능한 특성이 있다. 또한 채널의 일부가 고장이 나도 점진적으로 성능이 저하되며 운용이 가능한 장점이 있다. 다만 비용 및 무게가 크게 증가되는 단점이 있다.

본 논문에서는 반사판 안테나의 배열급전기 또는 능동 위상배열 안테나의 부배열로 적용이 가능한 이중 편파 복사소자조립체 설계 및 제작에 관하여 서술하였다. 기존에 개발된 위성보다 해상도 성능 개선을 고려하여 광대역 특성의 복사소자를 개발하였다.

## II. 복사소자 설계

### 2-1 복사소자조립체 기능 및 구성

그림 1과 같이 위성 SAR용 복사소자조립체는 이중 편파 구현을 위해 편파별로 단위배열 복사소자를 주기적으로 배치하였다. 수직편파 복사소자는 도파관 슬롯배열을 적용하였고, 수평편파 복사소자는 stepped notch 배열복사



(a) 복사소자조립체  
(a) Radiator assembly



(b) 복사소자, 수직편파  
(b) Radiator, V-pol.



(c) 복사소자, 수평편파  
(c) Radiator, H-pol.

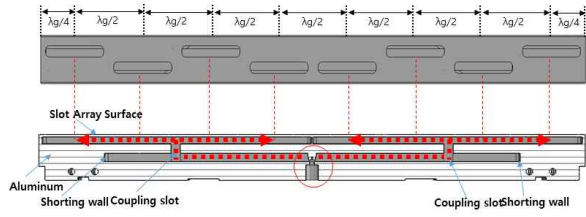
그림 1. 복사소자조립체 형상

Fig. 1. Configuration of radiator assembly.

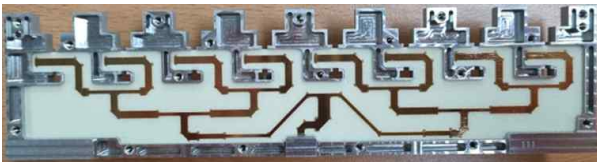
소자를 적용하였다. 외부 열 특성을 고려하여 화이트 페인트를 적용하고, 브레이징 공정을 통해 경량화 구조를 적용하였다. SAR의 고해상도 성능을 고려하여 광대역 대역폭 특성을 가지도록 설계하였다. 그림 2와 같이 수직편파 복사소자는 넓은면 오프셋 슬롯 배열구조로 균일 분포를 위한 급전 구조를 적용하였다. 도파관 고각 방향 크기 축소를 위한 릿지 구조를 적용하였다. 수평편파 복사소자는 광대역 특성을 가지는 stepped notch 형태의 복사소자를 배열하여 설계하였다. 광대역 특성을 가지도록 급전구조는 1×8 분배기를 적용하였다.

### 2-2 복사소자 요구규격 및 설계

본 논문에서 제시한 복사소자조립체는 표 1과 같이 성능 요구 규격을 만족하도록 설계를 수행하였다. 우선 광대역 특성의 요구사항을 고려하여 단위배열 복사소자를



(a) 수직편파 급전구조  
(a) V-pol. feeder structure



(b) 수평편파 급전구조  
(b) H-pol. feeder structure

그림 2. 단위배열 복사소자 급전구조  
Fig. 2. Configuration of radiator feeder.

표 1. 복사소자조립체 요구 규격  
Table 1. Radiator assembly requirements.

Item	Requirement
Bandwidth	>12.2 %
Polarization	dual polarization
Directivity	>00.0 dBi @ center frequency
Beam width	elevation: 0.0°±0.0° @ center frequency azimuth: 0.0°±0.0° @ center frequency
Sidelobe level	<-00 dB @ center frequency
Beam steering	±00°, elevation
Cross polarization	<-00 dB @ center frequency, in beam width

설계하였다. 수직편파의 경우, 복사소자 중심에서 커넥터 센터핀으로 급전되는 구조이다. 광대역 특성을 고려하여 병렬로 분기되는 구조를 적용하고, 커플링 슬롯을 이용하여 배열 슬롯면에 전파를 유기하였다. 수평편파의 경우, 광대역 특성의 stepped notch 형태의 복사소자를 배열하고 급전구조를 1×8 병렬 분배기를 적용하여 광대역 특성으로 설계하였다. 이중편파 요구사항을 고려하여 빔 조향범위가 고려된 배열간격 내에 수직 및 수평편파가 구현되도록 설계하였다. 수직편파의 경우, 리지구조를 적용하여 고각방향 크기를 축소 설계하였다. 수평편파의 경

우, 고각방향 좁은 간격에 구현을 고려하여 stepped notch 형태를 적용하고, stripline 구조로 분배기를 설계하였다.

분배기의 위치를 고정하기 위해 우주환경에서 적용 가능한 foam을 적용하였다. 빔패턴 성능인 지향성, 빔폭, 부엽레벨을 고려하여 복사소자조립체의 방위각 및 고각 크기를 결정하였다.

$$\text{지향성 (dBi)} = 10 \log \left( \frac{4\pi A}{\lambda^2} \right) \quad (1)$$

$$\text{빔폭 (deg)} \approx \frac{50\lambda}{D} \quad (2)$$

A는 안테나 면적, λ는 파장, D는 안테나 길이를 나타낸다. 빔 조향범위 및 최대 운용주파수를 고려하여 배열 간격을 설계하였다. 그림 3과 같이 빔조향 시 그레이팅로브가 발생하지 않도록 배열 간격을 설계하였다.

그리고 교차 편파 요구사항을 고려하여 편파별로 격리된 형태로 설계하였다. 또한 그림 4와 같이 별도의 방열 구조 없이 복사소자를 열전도체 및 방열판으로 활용하기 위해서 표면 방사율을 고려한 화이트포인트 도장을 적용하였다. 이를 통하여 TR모듈 및 전원모듈 등에서 운용간

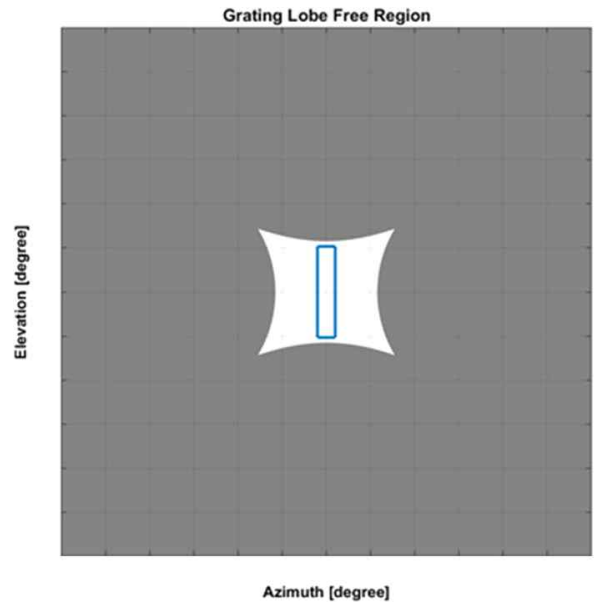


그림 3. 배열 간격에 따른 그레이팅로브 영역  
Fig. 3. GratingLobe according to array spacing.

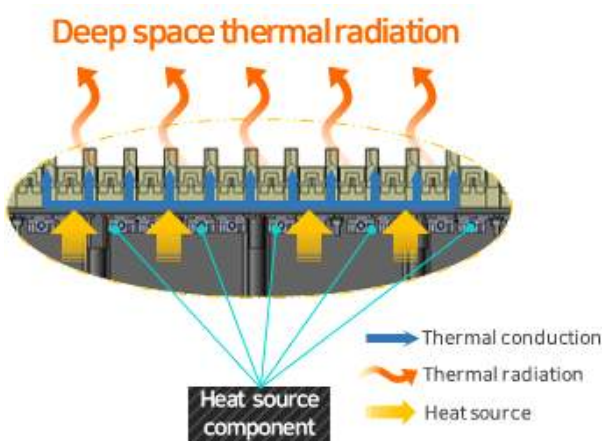


그림 4. 복사소자 방열설계  
Fig. 4. Heat dissipation design of radiator.

발생된 열을 방출하기 위하여 복사소자를 열전도 경로를 활용하고 화이트페인트를 통하여 심우주로 방열되는 방열 설계를 적용하였다.

### Ⅲ. 복사소자조립체 제작

그림 5와 같이 복사소자조립체는 편파별로 단위배열복사소자 형태로 제작 및 검증한 후 조립 및 통합하여 복사소자조립체 형태에서 성능을 검증하였다.

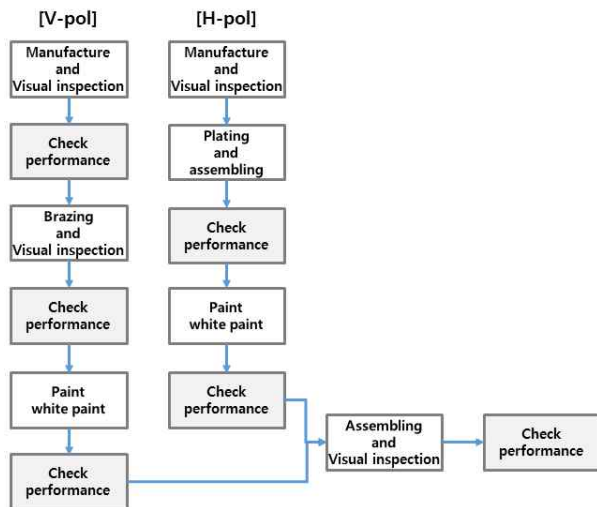


그림 5. 복사소자 제작 절차  
Fig. 5. Radiator manufacturing procedure.

수직편과 복사소자는 도파관 슬롯배열 형태로 내부 구조를 고려하여 분리 가공 및 브레이징 공정을 적용하였다. 수평편과 복사소자는 stepped notch 배열 형태로 내부 구조를 분리 가공 후 조립하였다. 각 단위배열 별 화이트 페인트 도장 후 마지막으로 통합조립하여 복사소자조립체를 제작하였다. 각 제작 단계별 제작성 확인을 위하여 간략화된 성능 검증을 수행하였다.

위성용 복사소자를 제작할 경우 우주환경의 특수성을 고려하여 부품, 소재 및 공정에 대한 관리가 요구된다. 표 2와 같이 제작에 적용된 부품, 소재 및 공정에 대하여 우주환경에서 사용이 인증 여부를 관리하고 미인증된 공정에 대해서는 개발 간 공정 인증을 수행하였다. 브레이징과 화이트 페인트 도장과 같이 미 인증된 공정에 대해서는 공정 절차 및 시험 규격을 ECSS 및 KSPC 공정 심사 문서 기반으로 정의하여 인증을 수행하였다.

### Ⅳ. 복사소자조립체 시험

표 3과 같이 요구사항별 검증방안 수립 및 그림 6과 같이 시험을 구성하여 성능을 검증하였다. 대역폭 항목은 운용주파수 및 빔조향 범위 내에서 능동반사손실의 성능으로 검증하였고, 나머지 빔패턴 성능의 경우는 근접전계 시험을 수행하여 검증하였다. 그림 7은 편파별 능동반사손실 측정 결과이다. 운용주파수 및 빔조향 범위 내에서 능동반사손실 성능이  $-10$  dB 이하로 대역폭 목표 성능을 검증하였다. 그림에서 빨간색 점선이 요구사항 기준을

표 2. 복사소자 부품, 소재 및 공정 관리

Table 2. Radiator components, materials and process management.

Item	Parts, Materials, Processes
Connector	R232561050
Aluminum	A6061-T651
Copper	C10200
Foam	RF-3720
Brazing	Brazing process certification
White paint	White paint process certification
Coating	Already certified process

표 3. 복사소자조립체 검증 방안  
Table 3. Radiator verification method.

Item	Verification
Bandwidth	Active return loss test
Polarization	Near field test
Directivity	
Beam width	
Sidelobe level	
Beam steering	
Cross polarization	

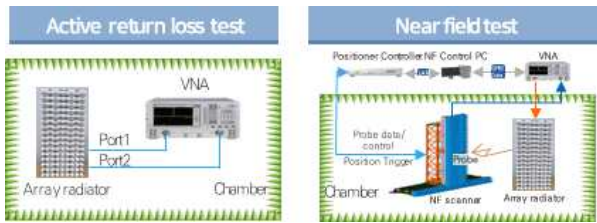


그림 6. 시험 구성  
Fig. 6. Test set-up.

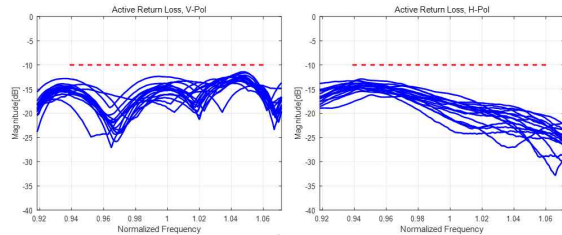
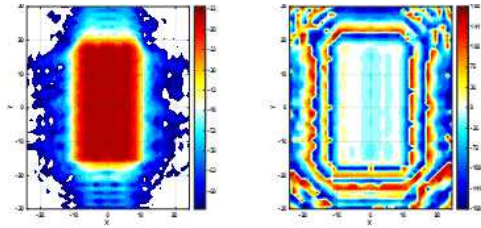


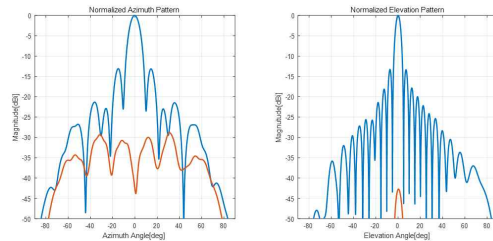
그림 7. 능동반사손실 측정 결과  
Fig. 7. Active return loss measured results.

나타 내고 있다. 수직 및 수평 편파 모두 약 16 % 이상으로 요구 대역폭을 초과하여 만족함을 확인하였다. 또한 근접전계 시험 결과를 통해서 빔패턴 성능을 검증하였다. 그림 8 및 그림 9는 각각 수직편파와 수평편파의 근접전계 시험 결과이다. 그림 8(a)는 측정결과의 back projection 된 크기 및 위상 분포로 수직 및 수평편파 모두 균일함을 확인하였다.

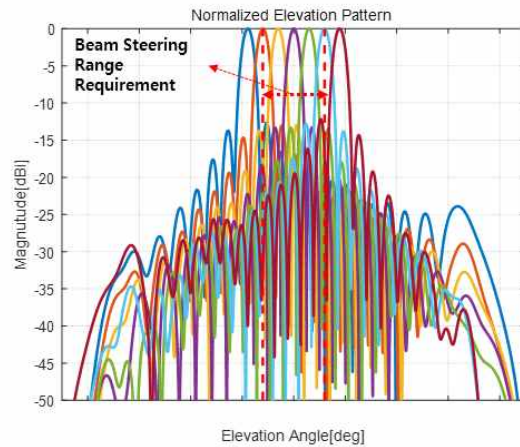
그림 8(b)는 방위각 및 고각방향 원전계 패턴결과로 패턴이 정상적으로 형성된 것을 확인할 수 있다. 중심주파



(a) 측정된 크기 및 위상분포  
(a) Measured magnitude and phase distribution



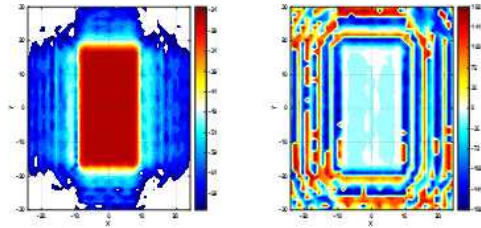
(b) 방위각 및 고각 교차편파 패턴  
(b) Azimuth and elevation Co/Cx-pol. pattern



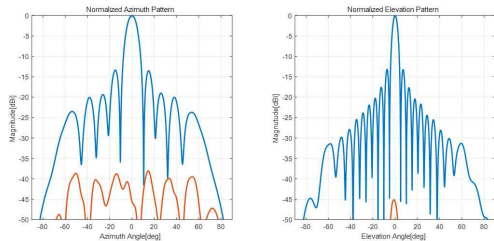
(c) 고각 빔조향 패턴  
(c) Elevation beamsteering pattern

그림 8. 수직편파 패턴 성능 측정 결과(@ 중심주파수)  
Fig. 8. V-pol. pattern performance measured results (@ center frequency).

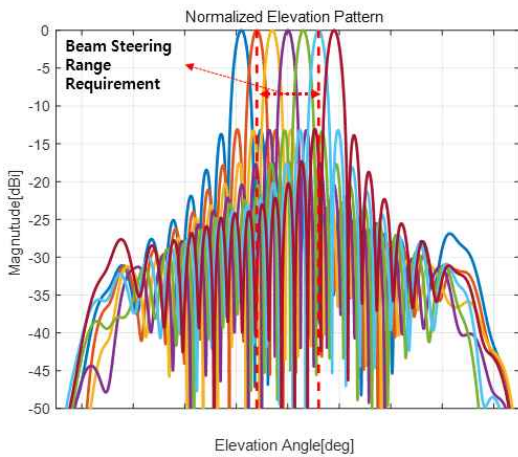
수에서 지향성은 목표성능보다 약 1.5 dB 이상, 빔폭은 목표 성능 만족, 부엽레벨은 목표성능보다 약 1.5 dB 이상 추가 억제, 또한 빔폭 내 교차 편파 레벨도 -30 dB 이하로 목표성능을 이상의 성능을 확인하였다. 또한 그림 8(c)는 고각 방향 전기적 빔조향 패턴 측정결과로 목표 빔



(a) 측정된 크기 및 위상분포  
(a) Measured magnitude and phase distribution



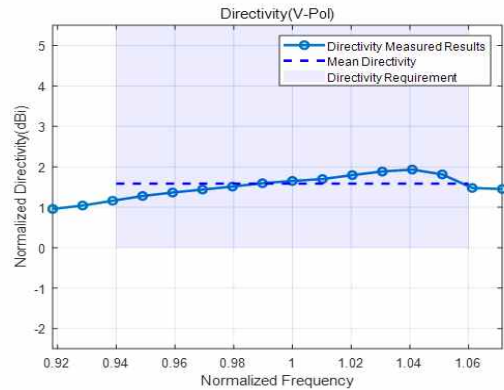
(b) 방위각 및 고각 교차편파 패턴  
(b) Azimuth and elevation Co/Cx-pol. pattern



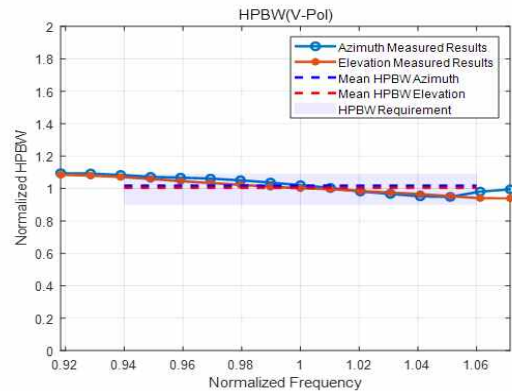
(c) 고각 빔조향 패턴  
(c) Elevation beamsteering pattern

그림 9. 수평편파 패턴 성능 측정 결과(@ 중심주파수)  
Fig. 9. H-pol. pattern performance measured results (@ center frequency).

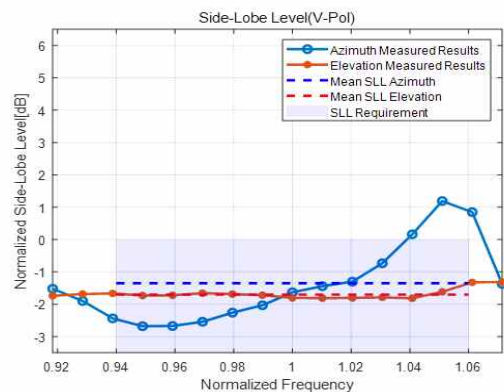
조향 범위 이상까지 정상적으로 빔이 조향되는 것을 확인하였다. 그림 10 및 그림 11은 주파수에 따른 빔패턴 성능을 보여준다. SAR 성능은 운용주파수 전체의 빔패턴 성능에 영향을 받는다. 따라서 목표규격뿐만 아니라 운용 대역폭 전체의 빔패턴 성능을 측정하여 검증하였다.



(a) 주파수에 따른 지향성 측정 결과  
(a) Directivity measured results according to frequency

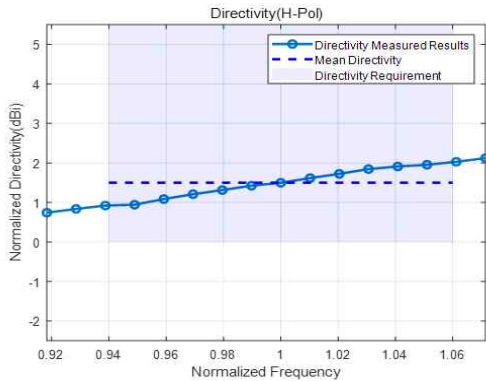


(b) 주파수에 따른 빔폭 측정 결과  
(b) HPBW measured results according to frequency

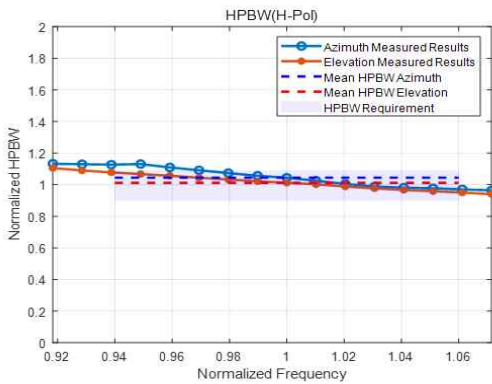


(c) 주파수에 따른 부엽레벨 측정 결과  
(c) SLL measured results according to frequency

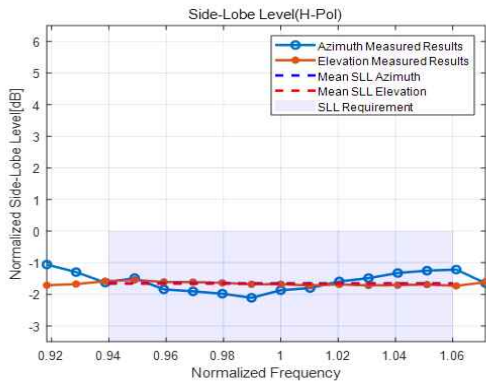
그림 10. 주파수에 따른 수직편파 패턴 성능 측정 결과  
Fig. 10. V-pol. pattern performance measured results according to frequency.



(a) 주파수에 따른 지향성 측정 결과  
(a) Directivity measured results according to frequency



(b) 주파수에 따른 빔폭 측정 결과  
(b) HPBW measured results according to frequency



(c) 주파수에 따른 부엽레벨 측정 결과  
(c) SLL measured results according to frequency

그림 11. 주파수에 따른 수평편파 패턴 성능 측정 결과  
Fig. 11. H-pol. pattern performance measured results according to frequency.

지향성은 식 (1)과 같이 안테나의 전기적 면적에 비례한다. 수평편파의 경우와 같이 주파수가 커질수록 지향성 성능이 증가하는 특성을 가진다.

수직편파의 경우 주파수가 커질수록 증가하는 경향은 보이나 외각 주파수에서 성능이 열화되는 경향을 보인다. 이는 슬롯배열 복사소자 급전 특성으로 외각주파수에서 슬롯에 균일급전 특성이 열화되어 발생된 현상이다. 성능은 열화되어도 전체적인 목표성능보다 약 1 dB 이상으로 고지향성 특성을 가진다. 빔폭도 식 (2)와 같이 안테나의 전기적 길이에 따라 반비례한 특성이 있다. 주파수에 따른 수직편파의 방위각 빔폭이 최대주파수에서 넓어지는 특성을 보인다. 이 또한 최대주파수에서 균일급전특성이 열화되어 빔패턴이 넓어져서 발생된 현상이다. 단 운용 주파수 영역에서 평균 패턴을 고려 시 평균 빔폭에는 큰 영향이 없어 광대역 SAR에 적합한 특성을 확인하였다. 부엽레벨도 동일하게 전체 운용 주파수 영역에서 평균적인 성능이 목표 성능을 만족하는 특성을 보여준다.

## V. 결 론

본 논문에서는 위성 SAR용 안테나에 적용할 광대역 이중편파 복사소자에 대한 설계 및 측정, 검증에 대하여 다루었다. 광대역특성을 위한 복사소자 설계 내용 및 방열설계에 대하여 설명하였다. 그리고 위성용 복사소자 제작 시 고려사항에 대하여 제시하였다. 마지막으로 능동반사손실 및 근접전계시험을 통하여 복사소자의 성능 검증 내용을 제시하였다. 검증결과 모두 요구사항을 초과하는 성능을 확인하였다. 확장성을 고려하여 모듈화 설계를 적용하여 향후 반사판 안테나의 급전기뿐만 아니라 능동위상배열안테나의 부배열 복사소자로 적용이 가능하다.

## References

[1] U. Ko, I. Seo, J. Lee, and H. Jeong, "Current trends of the synthetic aperture radar(SAR) satellite development and future strategy for the high resolution wide swath(HRWS) SAR satellite development," *Journal of Space Technology and Applications*, vol. 1, no. 3, pp. 337-355, Nov. 2021.

[2] A. Suriani, P. Capece, and G. Mannocchi, "Developments in SAR active phased array antennas in Thales Alenia Space," in *2019 IEEE International Symposium on Phased Array System & Technology(PAST)*, Waltham, MA, Oct. 2019.

[3] J. M. Lee, J. W. Yu, H. Chae, J. K. Park, H. Y. Jung, and J. D. Lee, et al., "Design and manufacturing of a phased array feeder to verify dual reflectors for satellite synthetic aperture radar applications," *The Journal of Korean Institute*

*of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 10, pp. 784-789, Oct. 2022.

[4] J. Y. Park, H. J. Yang, S. Y. Kim, G. G. Khang, Y. R. Lee, and J. P. Kim, "Design and implementation of X-band transmit/receive module assembly engineering model for satellite SAR applications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 11, pp. 834-843, Nov. 2023.

박 종 민 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-1961-8340>



2006년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)  
 2008년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
 2014년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
 2014년 9월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 영상레이다 및 초고주파시스템 등

채 희 덕 [LIG넥스원/팀장]

<https://orcid.org/0000-0003-4609-1764>



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)  
 2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)  
 2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
 2007년 3월~현재: LIG넥스원 팀장

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

김 성 주 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6117-8799>



2021년 2월: 세종대학교 전자정보통신공학과 (공학사)  
 2023년 2월: 세종대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2023년 2월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
 [주 관심분야] 영상레이다 및 초고주파시스템 등

박 종 국 [LIG넥스원/소장]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)  
 2001년 11월~현재: LIG넥스원 소장

[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 레이더 시스템, 초고주파 수동 회로 설계 및 전자파 수치 해석

유 제 우 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1204-074X>



2005년 8월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)  
 2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2008년 2월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
 [주 관심분야] 레이더 및 영상레이다 초고주파 시스템 등