

# 우주 감시 레이더에 적용 가능한 능동위상배열 안테나 설계 및 제작

## Design and Implementation of Active Phased Array Antennas Applicable to Space Surveillance Radar

권시원 · 조수빈 · 주정명 · 채희덕 · 진형석 · 김동현\* · 노재우\*

Siwon Kwon · SooBean Cho · JoungMyoung Joo · Heeduck Chae ·  
Hyung-Suk Jin · DongHyun Kim\* · JaeWoo Noh\*

### 요 약

최근 증가하는 우주 쓰레기로 인해 인간의 우주활동이 위협받고 있으며, 이를 상시 감시하기 위한 우주 감시 레이더 개발이 필요하다. 본 논문에서는 모듈 단위의 확장을 통해 L-Band 우주 감시 레이더에 적용 가능한 8×8 모듈형 배열 안테나를 설계/제작하였다. 실제 우주 감시 레이더의 넓은 빔 조향 범위(off-axis±45°)를 고려하여 조향 범위 내에서 개별소자의 능동반사계수의 목표 성능을 -7 dB 이하로 설정하여 열화를 최소화하였으며, 시스템 단위 통합 후 송수신 경로의 실시간 상태 점검 및 보정이 가능하도록 복사소자에 점검경로를 적용하였다. 또한, 빔 조향 시 발생할 수 있는 이득 저하를 방지하고자 6 dB 빔 폭은 120° 이상을 만족하도록 설계하였다. 설계/제작된 안테나의 성능은 시뮬레이션 및 측정을 통해 목표 성능을 만족하였음을 확인하였다.

### Abstract

Human space activities can be threatened by the recent increase in space waste. Therefore, a space surveillance radar must be developed to continuously monitor them. In this study, an 8×8 modular active phased array antenna applicable to an L-band space surveillance radar was designed/produced through module-level expansion. Considering the actual wide beam steering range (off-axis ±45°) of the space surveillance radar, the active reflection coefficient of single elements within the steering range was minimized by setting to less than -7 dB. Additionally, the calibration path was applied to the radiation element to check and rectify the real-time state of the transmission/reception path after system-level integration. Furthermore, the design prevented gain reduction that might occur during beam steering and satisfied the 6 dB beam width of more than 120°. Simulations and measurements confirmed that the performance of the designed/produced antenna met the target performance.

Key words: Space Surveillance Radar, Phased Array Antenna, Near-Field Measurement, Active Return Coefficient

### I. 서 론

최근 우주활동의 증가에 따른 인공위성 및 인공위성

파편으로부터 발생하는 우주쓰레기를 포함한 우주물체의 수가 급증하고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 우주물체는 다른 우주물체와 충돌할 위험이 있으며, 이는 우주활동뿐 아니라

LIG 넥스원(LIG Nex1)

\*(주)엠티지(MTG)

· Manuscript received July 3, 2023 ; Revised August 6, 2023 ; Accepted December 12, 2023. (ID No. 20230703-047)

· Corresponding Author: Siwon Kwon (e-mail: siwon.kwon@lignex1.com)

지구 상의 인류를 위협하는 존재이기 때문에 국내 상공을 지나는 인공위성 및 우주쓰레기 등의 우주물체를 탐지/추적하는 우주감시체계의 필요성이 커지고 있다<sup>[2],[3]</sup>.

우주 감시를 위해 크게 광학장치와 레이더가 사용된다. 우주 감시를 위한 광학장치는 해상도가 뛰어나며, 대상의 시각적 특징을 파악할 수 있지만, 관측 시간과 기상 조건으로 인한 관측이 제한될 수 있다. 반면, 우주 감시 레이더는 광학장치보다 낮은 해상도를 가지고 시스템 구성이 복잡하며 비용이 높지만, 날씨 조건이나 시간에 관계없이 넓은 범위에서 탐지가 가능하다는 장점이 있다. 국내에서는 우주 감시를 위한 광학 시스템은 구축되어 있지만 레이더 시스템의 개발이 아직 미흡하여 상시 감시가 가능한 우주 감시 레이더 개발이 필요하다<sup>[2]</sup>.

우주 감시 레이더 시스템에는 주로 반사판 안테나와 능동위상배열 안테나가 사용된다. 반사판 안테나는 대형 반사판을 사용하여 높은 이득을 가질 수 있어 탐지거리가 긴 우주에서 정밀도가 높지만, 빔 방향을 바꾸기 위해서는 구동장치를 통해 기계적으로 움직여야 한다는 단점이 있다<sup>[2]</sup>. 반면, 능동위상배열 안테나는 개별 복사소자의 위상을 조정하여 빔 방향과 형태를 제어할 수 있어 넓은 영역을 빠르게 탐지할 수 있다는 장점이 있다<sup>[4]</sup>.

지상에서 우주물체를 탐지하기 위한 우주 감시 레이더에는 일반적으로 매우 높은 이득의 안테나가 요구되므로, 본 논문에서는 모듈 단위 확장을 통해 초대형 안테나 구성이 가능하도록 8×8 모듈형 배열 안테나를 설계/제작하였다. 이와 같은 방법으로 안테나를 구성하면 모듈 단위 성능 최적화를 통해 다양한 크기 및 형상으로 변경이 용이하다. 또한, 안테나 제작 중 불량 및 운용 중 파손/고장 등의 문제가 발생한 경우 안테나 전체를 재제작하지 않아도 모듈 단위의 교체를 통해 해결할 수 있다. 배열 안테나는 전자기장 해석 툴인 CST MWS를 이용하여 설계했고, 점검경로/능동반사계수 측정 및 근접전계 시험을 통해 각각의 성능을 검증하였다.

## II. 배열 안테나 설계 결과

우주 감시 임무 수행을 위해 레이더의 탐지거리에 유리한 L-Band 주파수 대역에서 설계하였다<sup>[1],[5]</sup>. 또한, 넓게

분포되어 있는 우주물체를 탐지하기 위해 빔 조향 범위는  $\text{off-axis} \pm 45^\circ$ 로 넓은 범위를 설정하였다<sup>[1]</sup>.

그림 1과 같이 광폭의 빔 형성을 위해 다이폴(dipole) 안테나를 설계하였다<sup>[6]</sup>. 다이폴 앞에 디렉터(director)를 두어 지향성을 향상시켰으며, 격리기(isolator)를 통해 인접 복사소자 간 상호 결합량을 최소화하였다. 또한, 안테나의 방사방향과 반대로 방사되는 신호를 전면으로 방사하기 위해 반사판(reflector)을 추가하였다. 마지막으로 레이더 운용 중 송수신 경로 내 능동소자가 시간 및 온도 등에 따라 변화하는 특성을 보정하여 최적의 빔 패턴 상태를 유지하기 위해 점검경로를 설계하였다. 점검경로는 주경로의 신호를 결합시켜 매우 낮은 레벨의 신호를 사용하기 때문에 신호가 왜곡될 가능성이 크므로 안정적인 보정 신호 제공을 위한 방향성 결합기를 적용하였다. 그림 1의 설계된 복사소자 파라미터는 표 1에 나타내었다. 유전율 3, 두께 1.52 mm인 Taconic 사의 RF-30 기판을 사용하였으며, 2장을 적층하여 설계하였다.

그림 2는 제안된 능동위상배열 안테나의 배열 구조이다. 중앙의 8×8 배열소자가 유효 복사소자이며, 유효 복사소자의 상하좌우에 더미소자를 2배열씩 추가하였다. 더미소자를 추가하여 외곽소자의 빔 패턴 왜곡 및 능동 반사계수 열화를 방지함으로써 배열 내에서의 복사소자 성능을 확인할 수 있도록 하였다. 이를 통해 실제 모듈 단위 확장 시, 전체 안테나에 대한 성능을 예측할 수 있다. 또한, 삼각 배열 구조를 적용하여 빔 조향 범위 내 그레이팅 로브의 발생을 방지하였다<sup>[7]</sup>. 배열 간 x축 간격은 0.49

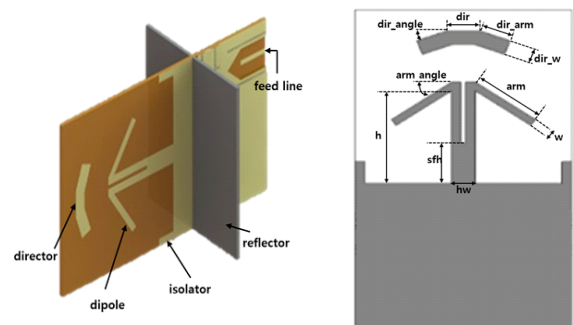


그림 1. 개별 복사소자 형상 및 파라미터  
Fig. 1. Configuration and parameters of single radiator element.

표 1. 개별 복사소자 파라미터  
Table 1. Parameters of single radiator element.

Parameters	Value
dir	$0.089 \lambda_0$
dir_arm	$0.086 \lambda_0$
dir_w	$0.041 \lambda_0$
dir_angle	$20^\circ$
arm_angle	$35^\circ$
arm	$0.195 \lambda_0$
h	$0.258 \lambda_0$
sfh	$0.191 \lambda_0$
hw	$0.064 \lambda_0$
w	$0.023 \lambda_0$

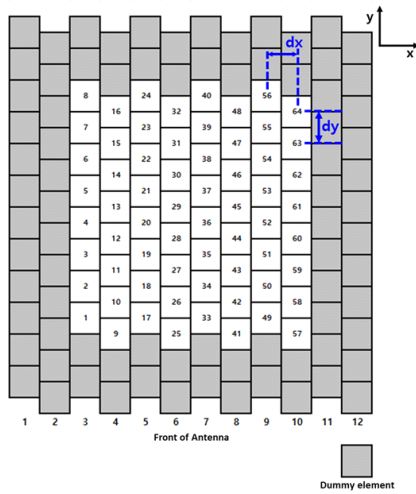


그림 2. 능동위상배열 안테나 배열 형상  
Fig. 2. Array configuration of the active phased array antenna.

$\lambda_0$ , y축 간격은  $0.58 \lambda_0$ 로 설계하였다.

그림 3은 설계된 점검경로 한 열의 결합량 시뮬레이션 결과값이다. 결합량은 모두  $-39 \pm 1$  dB 이내인 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 주요 소자의 자기반사계수 시뮬레이션 결과이다. 설계 주파수 대역 내에서 복사소자의 자기반사계수는  $-10$  dB 이하를 만족하도록 설계하였다.

그림 5는 빔 조향 범위를 고려하여 능동반사계수의 최댓값을 계산한 시뮬레이션 결과이다. 안테나 뒷단에 연결

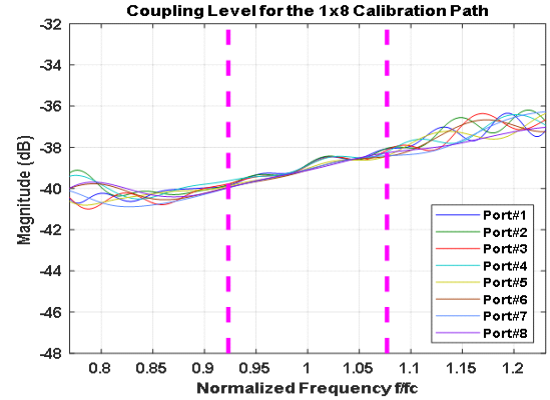


그림 3. 점검경로 결합량 시뮬레이션 결과  
Fig. 3. Simulation result of calibration path coupling level.

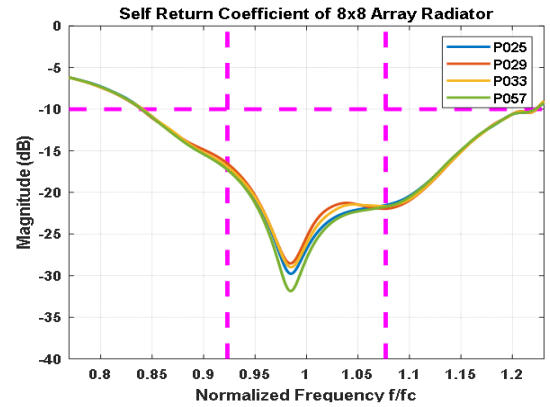


그림 4. 자기반사계수 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulation result of self reflection coefficient.

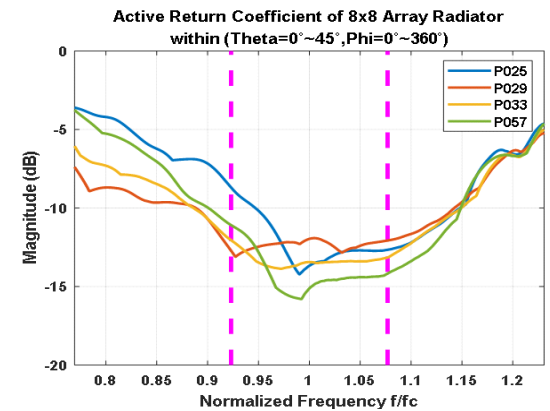


그림 5. 능동반사계수 시뮬레이션 결과  
Fig. 5. Simulation result of active reflection coefficient.

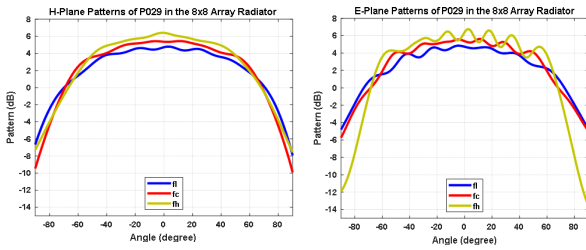


그림 6. 중심소자의 빔 패턴 설계 결과(방위각/고각)  
Fig. 6. Measurement result of medium element's beam pattern (azimuth/elevation).

하는 송수신모듈의 고장과 빔 조향 시의 시스템 성능 저하를 최소화하기 위해 개별 복사소자의 능동반사계수는  $-7$  dB 이하를 만족하도록 설계하였다. 개별 복사소자의 위치에 따른 경향성 파락을 위해 중심소자(P029), 외곽소자(P025, P033)와 최외곽소자(P057)의 시뮬레이션 결과를 확인하였고, 외곽소자인 P033에서  $-8.68$  dB로 최대 능동반사계수를 가지는 것을 확인하였다.

그림 6은 설계된  $8 \times 8$  배열 안테나에서 중심소자에 대한 빔 패턴 시뮬레이션 결과이다. 빔 조향으로 인한 이득 저하 현상을 최소화하기 위해 광폭을 갖는 빔 패턴을 설계하였다. 따라서,  $6$  dB 빔 폭  $120^\circ$  이상을 목표로 설정하였고, 설계 후 시뮬레이션 결과는 중심주파수에서  $141.59^\circ$  (방위각)/ $143.85^\circ$  (고각)로 확인하였다.

### Ⅲ. 배열 안테나 제작 및 시험 결과

앞의 설계 결과를 바탕으로, 더미소자를 포함한  $12 \times 12$  배열 안테나를 제작하여 무반향 챔버 내에서 점검경로 결합량/능동반사계수 측정 및 근접전계 시험을 진행하였다.

그림 7은 점검경로 결합량 및 능동반사계수 측정 시험 구성이며, 그림 8은 제작된 안테나의 근접전계 시험 구성이다. 각 시험 구성 시, 시험 치구의 영향으로 인한 측정 정확도 저하를 방지하기 위해 시험 치구에 흡수체를 부착하였다.

그림 9는 모든 개별소자의 자기반사계수 측정 결과이다. 제작된 모든 개별소자는 설계 주파수 대역 내에서 자기반사계수가 모두  $-10$  dB 이하임을 확인하였다.

그림 10은 점검경로의 결합량을 측정한 결과이다. 점검경로 결합량은 모두  $-40 \pm 2$  dB 이내로 각 개별소자의

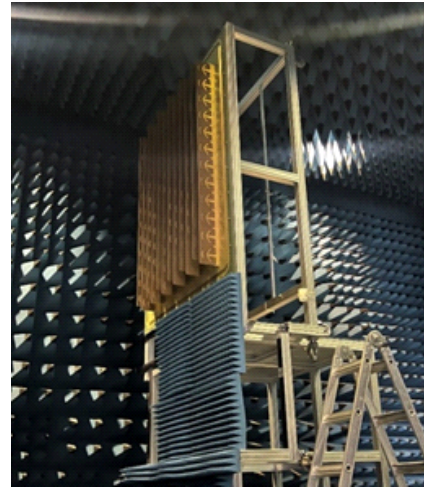


그림 7. 점검경로 결합량 및 능동반사계수 측정 구성  
Fig. 7. Set-up configuration of calibration coupling level and active return coefficient measurement.

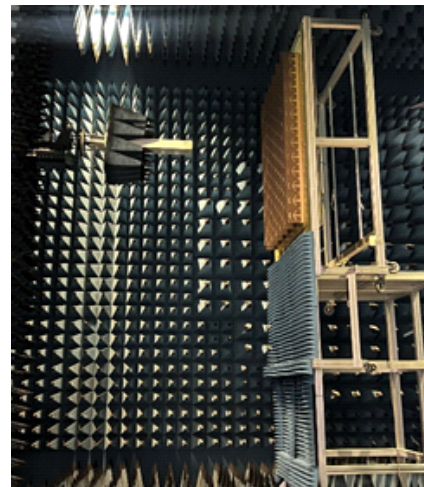


그림 8. 근접전계 시험 구성  
Fig. 8. Set-up configuration of near-field test.

경향성과 크기 수준이 유사함을 확인하였다. 동일한 점검경로가 한 열씩 설계되었으나, 실제 제작된 안테나는 제작 오차와 같은 제작 특성을 띄기 때문에 모든 소자의 점검경로 결합량을 측정하여 결과를 확인하였다. 설계 결과 ( $-39 \pm 1$  dB)와의 결합량 차이는 M&S 및 제작 시 사용된 실제 기관의 손실 탄젠트 차이 및 제작 오차가 원인일 것으로 예측된다.

그림 11은 배열 안테나의 개별소자들 간 상호결합량을

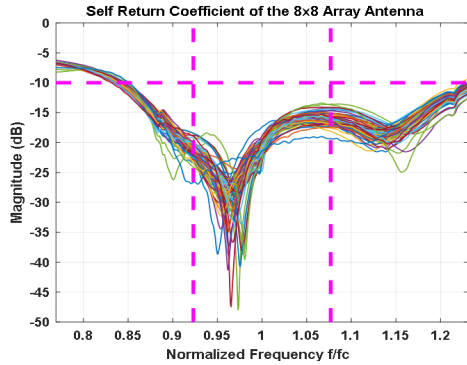


그림 9. 개별소자의 자기반사계수 측정 결과  
Fig. 9. Measurement result of self reflection coefficient.

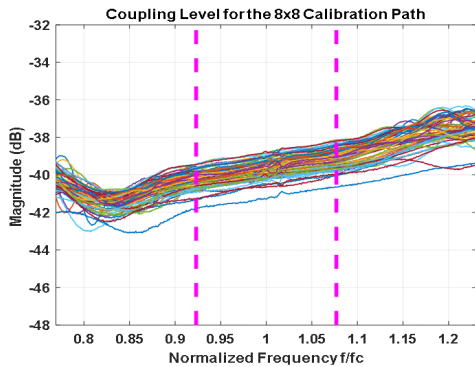


그림 10. 점검경로 결합량 측정 결과  
Fig. 10. Measurement result of calibration path coupling level.

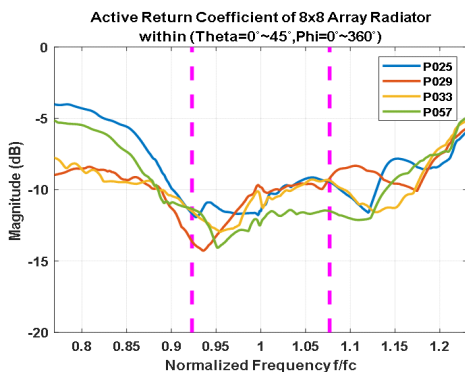


그림 11. 능동반사계수 측정 결과  
Fig. 11. Measurement result of active reflection coefficient.

측정하여 빔 조향 범위 내 최대 능동반사계수를 계산한 결과값이다. 설계 주파수 대역 내에서 능동반사계수의 최

대값은 외곽소자(P025)에서  $-9.14$  dB이다. 이는 설계한 시뮬레이션 결과값과 유사하며 최외곽소자의 능동반사계수는 중심소자의 수준과 크게 다르지 않음을 확인하였다.

그림 12는 근접전계 시험을 통해  $8 \times 8$  배열 안테나에서 중심소자(P029)의 빔 패턴을 측정된 결과이다. 그림 13은 측정된 빔 패턴을 바탕으로 중심소자의 6 dB 빔 폭을 계산한 결과이다. 중심주파수에서 6 dB 빔 폭은 방위각  $129.05^\circ$ , 고각  $128.90^\circ$ 로 측정되었다.

점검경로 결합량은 시뮬레이션과 측정 결과 모두  $-40 \pm 3$  dB 이내임을 확인하였다. 개별 복사소자의 자기반사계수는  $-10$  dB 이하, 능동반사계수는  $-7$  dB 이하로 측정 소자 모두 목표 성능을 만족하였으며, 6 dB 빔 폭 또한 목표한 성능을 만족하였다.

그림 14는 보어사이트(boresight)에서 시뮬레이션 및 측정된  $8 \times 8$  모듈형 배열 안테나의 최종 빔 패턴(방위각/고각) 결과이다. 시뮬레이션을 통한 안테나 이득은  $23.15$  dB(@ fc), 측정된 안테나 이득은 약  $22.92$  dB(@ fc)임을 확인하였다. 표 2에는  $8 \times 8$  모듈형 배열 안테나에 대한 시

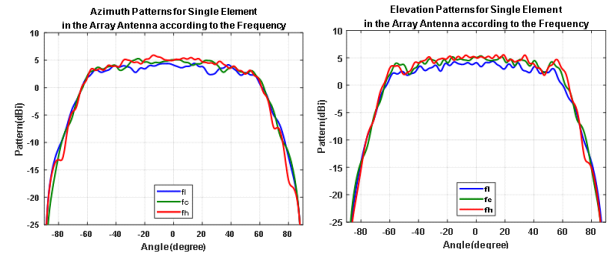


그림 12. 중심 소자의 빔 패턴 측정 결과(방위각/고각)  
Fig. 12. Measurement result of medium element's beam pattern (azimuth/elevation).

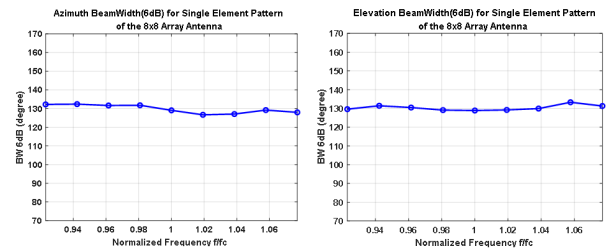


그림 13. 중심 소자의 6 dB 빔 폭 측정 결과(방위각/고각)  
Fig. 13. Measurement result of medium element's 6 dB beamwidth (azimuth/elevation).



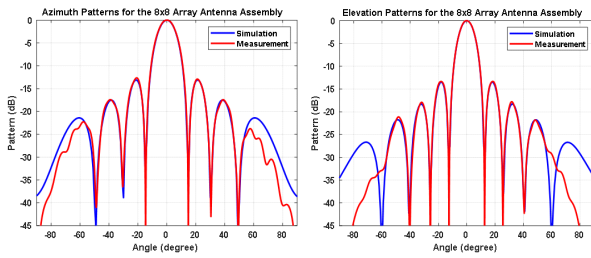


그림 14. 8×8 모듈형 배열 안테나의 시뮬레이션/측정 빔 패턴(방위각/고각)

Fig. 14. Simulation/measured antenna beam pattern of 8×8 modular array antenna (azimuth/elevation).

표 2. 시뮬레이션 및 측정 결과 비교

Table 2. Comparison of simulation and measurement result.

Parameters	Value	
	Simulation	Measurement
Frequency	L-band	
Number of antenna elements	64	
Steering Angle	off-axis±45°	
BW <sub>6</sub> dB (@ single medium element)	141.59°/143.85°	129.05°/128.90°
Self reflection coefficient	<−10 dB	<−10 dB
Active reflection coefficient	<−8.68 dB	<−9.14 dB
Calibration path coupling coefficient	<−39±1 dB	<−40±2dB
Gain of 8×8 Array Antenna	23.15 dB	22.92 dB

시뮬레이션 및 측정 결과를 비교하여 나타내었고, 개별소자 및 배열 안테나 성능이 유사한 수준임을 확인하였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 우주 감시 레이다용 초대형 능동위상배열 안테나 구현을 위해 모듈 단위 확장 방식을 제안하고, 그에 대한 초기 연구로서 더미소자를 포함한 12×12 배열 안테나를 설계 및 제작하였다. 다음으로 배열 안테나의 개별 복사소자의 전기적 성능을 측정하여 시뮬레이션 결과와 유사함을 보이고 목표 성능을 모두 만족함을 확인하였다.

다만, 본 논문에서 설계/제작한 배열 안테나는 모듈형

배열 안테나를 위한 전기적 성능만 검토하였기 때문에 모듈 단위 확장을 위한 세부적인 기구적 요구사항은 추가 연구를 통해 검토 및 개선해야 될 필요가 있다. 본 연구를 바탕으로 추후 기구적 형상까지 반영하여 모듈형 배열 안테나를 개발할 수 있을 것으로 기대하며, 최종적으로 개발된 모듈형 배열 안테나를 확장하여 우주 감시 레이다에 적용함으로써 우주 감시 체계 발전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

- [1] J. H. Lee, E. J. Cho, H. W. Moon, J. T. Park, S. Cho, and Y. J. Choi, et al., "Design of L-band-phased array radar system for space situational awareness," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 3, p. 214-224, Mar. 2018.
- [2] J. H. Kim, "Proposals for mid-long term development of space surveillance technology in South Korea," KISTEP, Eumseong, Issue Paper 2012-05, May 2012.
- [3] MSIT, "The 4<sup>th</sup> basic plan for promotion of space development," Ministry of Science and ICT, Sejong, Dec. 2022.
- [4] S. K. Cho, "Utilization and technology development of radar for space situational awareness," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 2, pp. 12-19, Mar. 2017.
- [5] H. W. Moon, E. J. Choi, J. H. Lee, J. M. Yeum, S. W. Kwon, and S. M. Hong, et al., "A study on the effect of atmosphere on the space surveillance radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 8, pp. 648-659, Aug. 2018.
- [6] E. Amakawa, E. Amagawa, M. Tsuchizawa, and K. Tozawa, "Dipole antenna and dipole array antenna," Japan Patent, 19291590, May 28, 2009.
- [7] S. M. Chon, H. G. Na, S. B. Kim, J. W. Lee, D. Y. Kim, and S. J. Kim, et al., "Development of planar active array antenna system for radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 12, pp. 1340-1350, Dec. 2009.

권 시 원 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-4926-3452>



2022년 2월: 한양대학교 ERICA 전자공학부 (공학사)  
2022년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

진 형 석 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>



2000년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)  
2000년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원  
[주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, 능동 위상 배열 레이더, 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계

조 수 빈 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1675-8065>



2016년 2월: 세종대학교 전자공학과 (공학사)  
2019년 2월: 세종대학교 전자공학과 (공학석사)  
2022년 10월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] 반사배열안테나, 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

김 동 현 [엠티지/선임연구원]

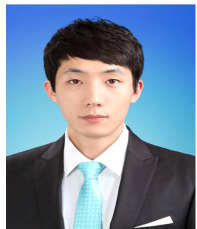
<https://orcid.org/0009-0004-7953-9582>



2015년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2017년 2월: 충북대학교 전파통신공학과 (공학석사)  
2022년 5월~현재: 엠티지 선임연구원  
[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더, SAR 안테나

주 정 명 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8210-1758>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)  
2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)  
2013년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원  
[주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 디지털 레이더 시스템, 다기능 레

이다 시스템

노 재 우 [엠티지/주임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-6371-4096>



2015년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)  
2017년 2월: 충북대학교 전파통신공학과 (공학석사)  
2022년 11월~현재: 엠티지 주임연구원  
[주 관심분야] 안테나 설계

채 희 덕 [LIG넥스원/수석연구원]

<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 수석연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 안테나 구조 및 빔 패턴 최적화, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자파 수치 해석