

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2023.23.2.87
JIIBC 2023-2-12

능동위상배열 안테나의 저피탐 특성 구현 및 검증

Implementation and Verification for the Low RCS Characteristics of Active Phased Array Antenna

주정명*, 권시원*, 채희덕*, 박종국*, 최영조**, 이형기**, 한정윤**, 전정환**

Joung-Myoung Joo*, Heeduck Chae*, Jongkuk Park*, Young-Jo Choi**,
Hyeong-Ki Lee**, Jeongyun Han**, Jeong-Hwan Jeon**

요약 최신의 무기체계 및 전자장비들은 아군의 생존성 향상을 위해 스텔스 기술에 대한 요구가 증가하고 있기 때문에, 레이다 반사 면적을 줄이는 저피탐 기술 구현이 필요하다. 이러한 스텔스 기술을 위해 형상 설계나 전파 흡수체를 적용한 저피탐 특성 구현 방법이 널리 사용되는데, 능동위상배열 안테나는 형상 설계에 구조적인 한계가 있고 전파 흡수체 적용 시 안테나의 전기적 성능이 저하되는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 X-대역에서 동작하는 능동위상배열 안테나의 저피탐 특성 구현을 위해 전파 흡수체를 적용하기에 적합한 개별 복사소자를 선정하고, 13x13 배열 안테나를 설계 및 제작하였다. 다음으로 제작된 안테나의 흡수체 유무 및 종류에 따른 상대 RCS와 전기적 성능 측정 결과 비교를 통해 저피탐 특성은 확보하면서 전기적 성능은 동등 이상의 수준으로 유지됨을 보임으로써, 본 논문에서 제안한 저피탐 특성 구현 방법이 유효함을 보이고 전파 흡수체 적용 시 안테나 성능이 저하되는 한계를 극복할 수 있음을 확인하였다.

Abstract As the latest weapon systems and electronic equipments are increasingly demanding stealth technology to improve the survivability of allies, it is necessary to implement low-observability technology that reduces the radar cross section(RCS). In order to implement this stealth technology, a method for low RCS characteristics by applying a shape design or a electromagnetic wave absorber is widely used. However, active phased array antennas have structural limitations in shape design, also when an absorber is applied to it, the performance of the antenna is degraded. Therefore, in this paper, in order to realize the low RCS characteristics of the active phased array antenna operating in the X-band, individual radiating elements suitable for applying the radio wave absorber were selected, and a 13x13 array antenna was designed and manufactured. Next, by comparing the measured results of the relative RCS and electrical performance for the manufactured antenna according to the presence and type of the absorber, it is shown that the electrical performance is maintained at an equal or higher level while obtaining the low RCS characteristics. Thereby the method proposed in this paper for implementing the low RCS characteristics was validated. Finally, it was confirmed that when the wave absorber is applied to the array antenna, the limitation of its performance deterioration can be overcome.

Key Words : Active Phased Array Antenna, Low RCS Antenna, RCS Reduction, Stealth Technology

*정회원, LIG넥스원(주)

**정회원, (주)극동통신

접수일자 2023년 3월 9일, 수정완료 2023년 3월 30일

게재확정일자 2023년 4월 7일

Received: 9 March, 2023 / Revised: 30 March, 2023 /

Accepted: 7 April, 2023

Corresponding Author: joungmyoung.joo@lignex1.com

Dept. Microwave and Antenna R&D, LIG Nex1 Co., Ltd, Korea.

I. 서 론

근래의 전장 환경에서 사용되는 무기 체계들은 전자전 상황을 대비하여 스텔스 또는 저피탐 특성에 대한 요구가 증가하고 있다. 일례로 항공기나 함정 등의 대형 구조물들은 레이더 반사 면적(RCS, Radar Cross Section)이 매우 크기 때문에, 최적의 형상 설계를 통해 적의 레이더로부터 방사된 전자파 신호를 다른 방향으로 산란시켜 탐지될 확률을 줄이게 된다^[1~2].

마찬가지로, 적군의 표적을 탐지하기 위한 아군의 레이더 역시 적용 체계의 생존성 향상을 위해 레이더 반사 면적을 가능한 줄여야 한다. 하지만 일반적으로 평면형 능동위상배열 안테나가 적용되는 레이더는 이러한 안테나가 상대방의 레이더에 그대로 노출되는 형태이기 때문에 보어사이트(Boresight) 방향에서 매우 큰 레이더 반사 면적을 갖게 되고, 전파를 송수신해야 하는 임무 특성상 레이돔 등의 외부 형상 설계에 제약이 따르게 된다^[3]. 따라서 형상 설계만으로 구현하기 어려운 안테나의 저피탐 특성에 대한 한계를 극복하기 위해, 안테나에 흡수체 등을 추가하여 안테나로 입사되는 전자파를 흡수함으로써 적의 레이더로 되돌아가는 반사파를 감소시키는 스텔스 기술이 적용되기도 한다^[4]. 그러나 이와 같은 방법은 안테나 이득이나 효율 감소 등의 전기적 성능이 저하된다는 단점이 있으며, 그로 인해 레이더 최대 탐지 거리 감소 및 내부 장비 간 통신 신호 흡수 등 시스템 운용에 영향을 미칠 수 있다^[5].

따라서 본 논문에서는 X-대역에서 저피탐 특성을 갖는 능동위상배열 안테나에 적합한 복사소자와 구현 방법에 대해 제안하였다. 다음으로 제작된 안테나의 상대 RCS를 측정하여 검증하고, 전기적 성능을 비교함으로써 본 논문에서 제안한 저피탐 특성 구현 방안이 유효함을 확인하였다.

II. 본 론

1. 능동위상배열 안테나 복사소자 설계

능동위상배열 안테나의 저피탐 특성 구현을 위해 본 논문에서는 Step Flared Notch 타입의 복사소자를 선정하였다^[6]. 이와 같은 Notch 타입 복사소자는 지향성 및 교차 편파 특성이 우수하고, 금속을 가공하여 제작할 수 있으므로 구조적으로 견고한 특성을 갖는다. 따라서 큰 진동/충격 환경에서 사용되는 항공기나 함정용 능동

위상배열 레이더에 적용 가능하며 나아가 위성용 SAR(Synthetic Aperture Radar) 안테나로도 활용될 수 있다. 반면, 가공된 금속 구조물로 인해 매우 높은 레이더 반사 면적을 갖게 되는 단점이 있기 때문에 안테나의 레이더 반사 면적을 감소시킬 필요가 있다. 본 논문에서는 이와 같은 Notch 안테나의 저피탐 특성 구현을 위해 배열 사이 및 금속 그라운드면에 Foam 형태의 흡수체 또는 페라이트를 적용하였다.

설계된 개별 복사소자 및 13x13 배열 안테나 형상을 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

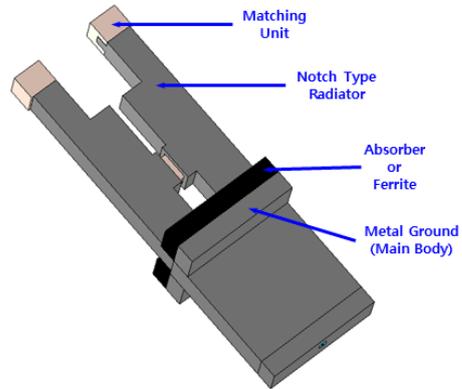


그림 1. Notch 타입 개별 복사소자 구조 및 형상
Fig. 1. Structure and Shape of designed Notch type radiator

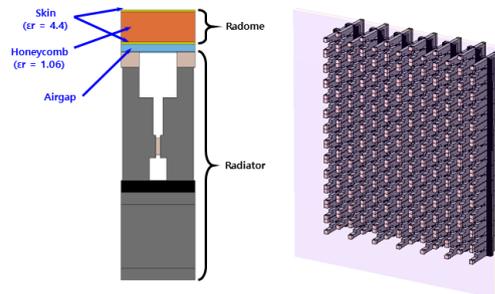


그림 2. 13x13 능동위상배열 안테나의 설계 형상
Fig. 2. Designed shape for the 13x13 active phased array antenna

최초에는 그라운드면에 흡수체를 적용하지 않고 안테나 빔 조향 범위 내에서 능동반사계수가 최소가 되도록 복사소자를 설계하였다. 다음으로 Foam 형태의 흡수체와 페라이트를 적용하고 각각의 두께와 적용 높이 등을 고려하여 그라운드 노출 시와 동등 수준의 성능을 갖도록 최적화함으로써, 적용된 흡수체에 의한 안테나의 전

기적 성능 저하가 없도록 하였다. 여기서 설정한 안테나의 빔 조향 범위는 고각 방향으로 안테나를 20° 기울인 상태에서 방위각 -50° ~ 50°, 고각 -12° ~ 82°이며, 외부 스킨(유전율 4.4 복합재)과 내부 코어(유전율 1.06 Honeycomb)로 구성된 A-Sandwich 구조의 레이돔을 적용하였다. 13x13 배열 안테나에서 중심 소자에 대한 빔 조향 범위 내 최대 능동반사계수 설계 결과를 그림 3에 나타내었으며, 흡수체는 두께 3mm, 페라이트는 두께 2mm를 적용하였다.

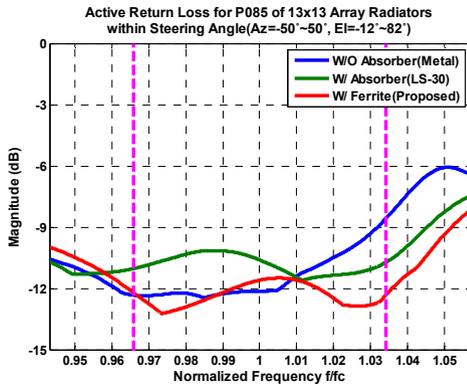


그림 3. 흡수체 유무 및 종류에 따른 능동반사계수 설계 결과
 Fig. 3. M&S results for the active reflection coefficient according to the type of absorber

2. 흡수체에 따른 안테나 상대 RCS 측정 결과

앞서 설계된 Notch 타입 13x13 배열 안테나의 제작 형상은 그림 4와 같고, 금속 그라운드면에 흡수체를 적용한 예이다.

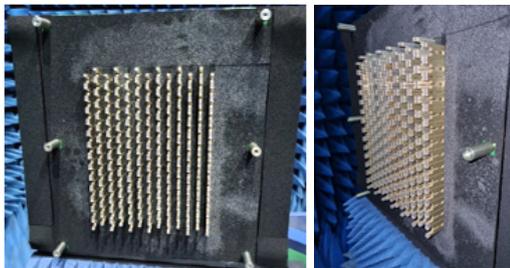


그림 4. 흡수체가 적용된 Notch 타입 13x13 배열 안테나 제작 형상
 Fig. 4. Fabricated notch type 13x13 array antenna with absorber on metal ground

제작된 배열 안테나의 저피탐 특성 검증을 위해 안테나의 금속 그라운드면에 노출된 경우, 그라운드면에 Foam 형태의 흡수체를 적용한 경우 및 페라이트를 적용한 경우에 대해 각각 안테나의 RCS를 측정하여 상대값을 비교하였다. 시험 구성은 그림 5와 같고, 송수신 안테나로 혼 안테나를 사용하여 송수신 안테나의 편파가 수직/수평 편파일 때, 배열 안테나의 방위각($\Phi=0^\circ$)/고각($\Phi=90^\circ$) 방향에 대한 상대 RCS를 X-대역에서 각각 측정하였다.

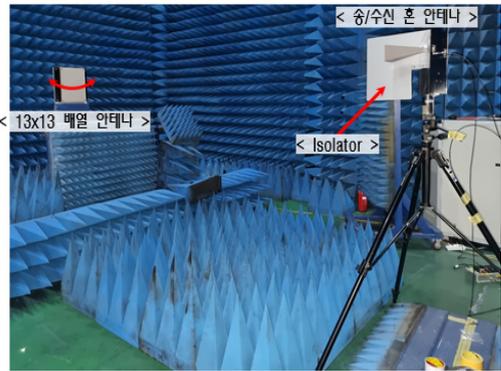
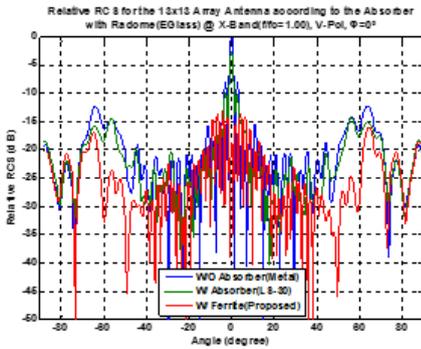
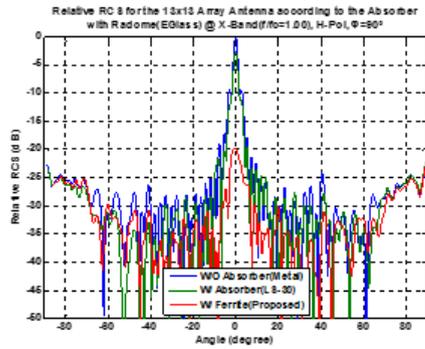


그림 5. 배열 안테나 상대 RCS 측정 시험 구성
 Fig. 5. Test configuration for the relative RCS measurement of the array antenna

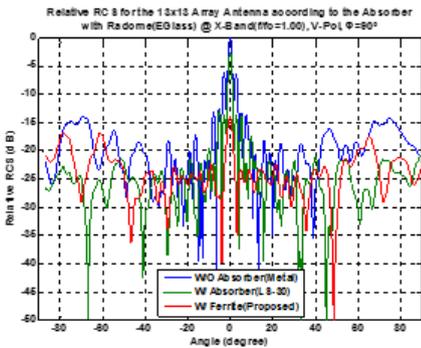
송수신 혼 안테나가 수직 편파일 때, 흡수체 유무 및 종류에 따른 배열 안테나의 상대 RCS 측정 결과는 그림 6과 같다. 마찬가지로 송수신 혼 안테나가 수평 편파일 때의 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 다음으로 각각의 경우에서 측정된 상대 RCS의 최대값과 그라운드면에 흡수체를 적용하지 않은 경우 대비 상대 RCS 값 차이를 비교하여 그림 8 및 그림 9에 각각 제시하였다. 그림 6 ~ 그림 9에 제시한 흡수체 유무 및 종류에 따른 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과로부터, Notch 타입 복사소자의 그라운드면에 흡수체 또는 페라이트 적용 시 편파 및 측정 방향에 따라 RCS 값 차이는 있으나 전반적으로 저피탐 특성에 효과가 있음을 알 수 있다. 특히 페라이트 적용 시 보어사이트 방향에서 RCS 값이 크게 줄어들면서 탁월한 저피탐 특성을 보였다. 세부적으로는 흡수체를 적용한 경우 측정 대역 내에서 상대 RCS 최대값이 평균 약 2.61dB ~ 약 5.58dB 감소하였고, 페라이트를 적용한 경우에는 약 10.98dB ~ 약 16.91dB 감소함을 확인하였다.



(a) 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과 @ 방위각($\Phi=0^\circ$)
 (a) Measured results for the relative RCS of the array antenna @ azimuth($\Phi=0^\circ$)



(b) 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과 @ 고각($\Phi=90^\circ$)
 (b) Measured results for the relative RCS of the array antenna @ elevation($\Phi=90^\circ$)



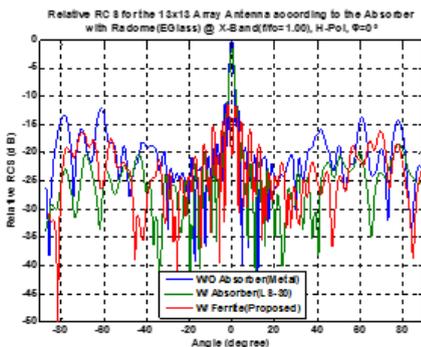
(b) 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과 @ 고각($\Phi=90^\circ$)
 (b) Measured results for the relative RCS of the array antenna @ elevation($\Phi=90^\circ$)

그림 7. 흡수체 유무 및 종류에 따른 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과 @ 수평 편파

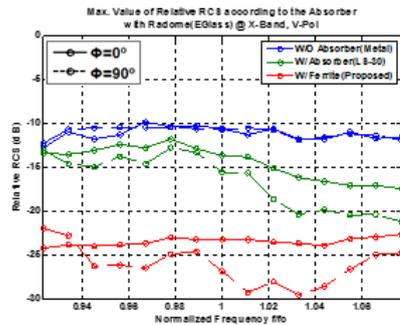
Fig. 7. Measured results for the relative RCS of the array antenna according to the type of absorber @ H-Pol.

그림 6. 흡수체 유무 및 종류에 따른 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과 @ 수직 편파

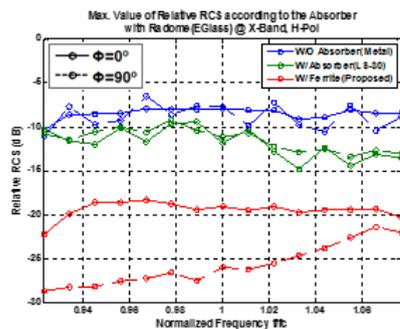
Fig. 6. Measured results for the relative RCS of the array antenna according to the type of absorber @ V-Pol.



(a) 배열 안테나 상대 RCS 측정 결과 @ 방위각($\Phi=0^\circ$)
 (a) Measured results for the relative RCS of the array antenna @ azimuth($\Phi=0^\circ$)



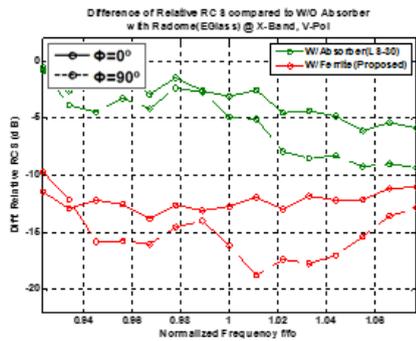
(a) 측정된 상대 RCS 최대값 비교 @ 수직 편파
 (a) Max. value for measured relative RCS @ V-Pol.



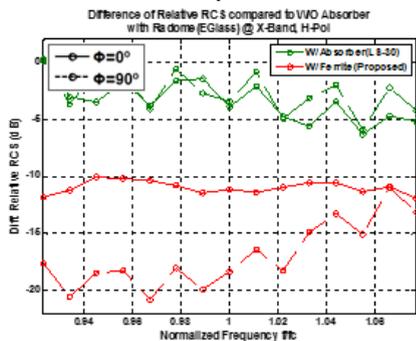
(b) 측정된 상대 RCS 최대값 비교 @ 수평 편파
 (b) Max. value for measured relative RCS @ H-Pol.

그림 8. 흡수체 유무 및 종류에 따른 배열 안테나 상대 RCS 최대값 비교 결과

Fig. 8. Comparison results for max. value of relative RCS according to the type of absorber



(a) 흡수체 미적용 대비 상대 RCS 차이 @ 수직 편파
 (a) Difference of relative RCS compared to W/O absorber @ V-Pol.



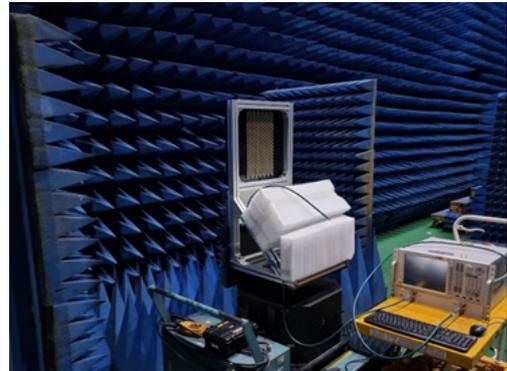
(b) 흡수체 미적용 대비 상대 RCS 차이 @ 수평 편파
 (b) Difference of relative RCS compared to W/O absorber @ H-Pol.

그림 9. 흡수체 미적용 대비 배열 안테나 상대 RCS 최대값 차이
 Fig. 9. Difference for max. value of relative RCS compared to W/O absorber

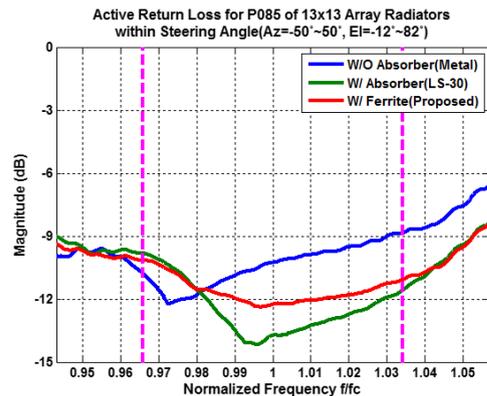
3. 흡수체에 따른 안테나 전기적 성능 측정 결과

본 논문에서 제안한 복사소자 및 저피탐 특성 구현 방안을 적용하여 배열 안테나의 RCS가 저감되는 것을 확인하였다. 다음으로는 안테나의 전기적 성능 측정을 통해 저피탐 특성은 확보하면서 그 외 성능은 유지됨을 보이고자 한다.

먼저, 무반향 챔버 내에서 벡터 네트워크 분석기를 이용해 13x13 배열 안테나의 중심 소자에 대한 자기반사계수와 인접 소자 간 상호결합 특성을 측정하고 이로부터 빔 조향 범위 내 최대 능동반사계수를 도출하였다. 중심 소자의 S-Parameter 측정을 위한 시험 구성 및 흡수체 유무 및 종류에 대해 측정된 능동반사계수 결과는 그림 10과 같다. 흡수체 미적용, 흡수체 적용 및 페라이트 적용 시 안테나 운용 주파수 내에서 능동반사계수의 최대값은 각각 약 -8.86dB, -9.82dB, -10.16dB 였고, 흡수체 적용 후에도 전반적으로 동등 이상의 성능이 나타남을 확인하였다.



(a) 개별 소자의 S-Parameter 측정 시험 구성
 (a) Test configuration to measure the S-Parameters at the element radiator



(b) 흡수체 유무 및 종류에 따른 능동반사계수 측정 결과
 (b) Measured results for the active reflection coefficient according to the type of absorber

그림 10. 13x13 배열 안테나 내 중심 소자에 대한 S-Parameter 시험 구성 및 능동반사계수 측정 결과
 Fig. 10. Test configuration for S-Parameters and measured results for the active reflection coefficient at center radiator within 13x13 array antenna

마지막으로 13x13 배열 안테나에서 중심 영역의 3x3 배열 소자에 대해 각각의 능동 소자 패턴을 측정하고, 9개 소자의 평균 패턴을 통해 개별 복사소자 특성을 검토하였다. 배열 안테나의 개별 소자들은 인접 소자 간 상호결합 영향으로 인해 빔 패턴에 리플(Ripple)이 발생하기 때문에 하나의 능동 소자 패턴으로는 전기적 성능을 확인하기 어렵다. 따라서 몇 개 소자의 능동 소자 패턴을 평균함으로써 무작위하게 발생한 리플 영향성을 줄인 후 빔 패턴을 비교하였다. 여기서는 근접전계 측정 방법을 통해 개별 소자에 대한 원전계 빔 패턴을 확인하였으며 그림 11에 시험 구성을 나타내었다.

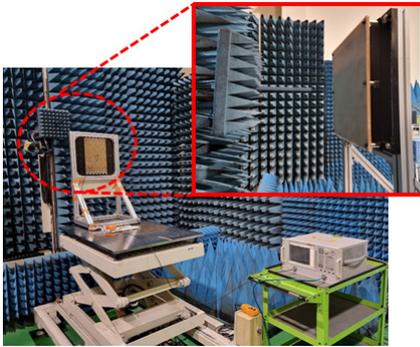
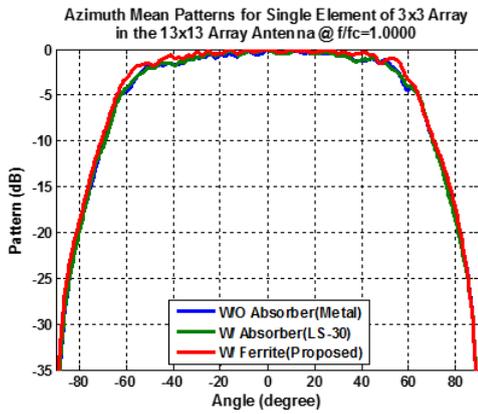
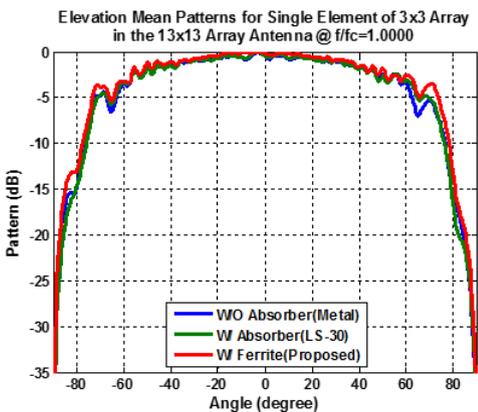


그림 11. 개별 복사소자 근접전계 측정 시험 구성
 Fig. 11. Test configuration for the near-field measurement of the single radiation element

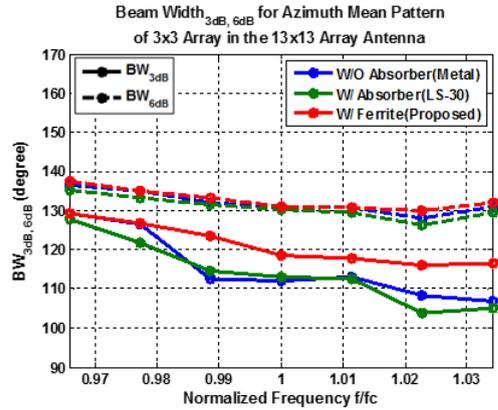


(a) 3x3 배열의 방위각 방향 평균 패턴
 (a) Azimuth average patterns for 3x3 array

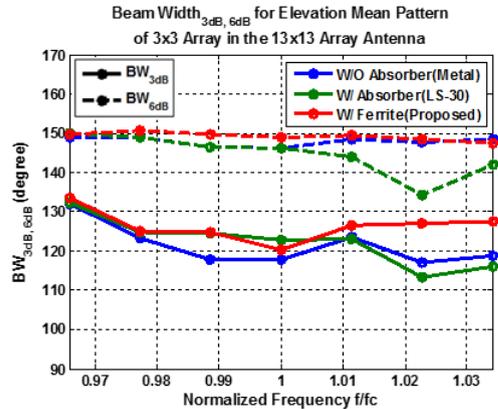


(b) 3x3 배열의 고각 방향 평균 패턴
 (b) Elevation average patterns for 3x3 array

그림 12. 3x3 배열 능동 소자 패턴의 평균 패턴 비교
 Fig. 12. Comparison of average patterns for active element patterns with 3x3 array



(a) 3x3 배열 평균 패턴의 방위각 빔폭3dB,6dB
 (a) Azimuth beam width 3dB,6dB for average patterns of 3x3 array



(b) 3x3 배열 평균 패턴의 고각 빔폭3dB,6dB
 (b) Elevation beam width 3dB,6dB for average patterns of 3x3 array

그림 13. 흡수체 유무 및 종류에 따른 3x3 배열 능동 소자 패턴의 평균 패턴에 대한 빔폭 비교 결과

Fig. 13. Beam width 3dB,6dB comparison results of average patterns for active element patterns with 3x3 array according to the type of absorber

배열 안테나 중심 영역의 3x3 배열(9개 소자)에 대해, 측정된 능동 소자 패턴의 평균 패턴을 그림 12에 비교하였으며 각각의 평균 패턴으로부터 계산된 3dB 및 6dB 빔폭은 그림 13과 같다. 보이는 것과 같이 흡수체 유무 및 종류에 따른 3x3 배열의 평균 패턴 형상과 방위각/고각 방향에 대한 3dB 및 6dB 빔폭 성능이 거의 유사함을 알 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 X-대역에서 동작하는 능동위상배열 안테나 및 저피탐 특성 구현 방법에 대해 제안하고, 흡수체 유무 및 종류에 따른 상대 RCS와 안테나 성능 측정 결과를 통해 제안한 방법이 유효함을 검증하였다.

먼저, 저피탐 특성을 구현하기 위해 Foam 형태의 흡수체나 페라이트 적용이 용이한 Notch 타입 복사소자를 제안하고 13x13 배열 안테나를 설계하였다. 다음으로 설계된 배열 안테나를 제작하고, 안테나의 금속 그라운드면이 노출되었을 때와 흡수체 및 페라이트를 적용했을 때 편파별/방향별 안테나의 상대 RCS를 각각 측정하였다. 그 결과 배열 안테나의 금속 그라운드면에 페라이트를 적용한 경우가 그라운드면이 노출된 경우와 비교하여 약 11dB 이상의 RCS 저감 효과가 나타남을 확인하였다.

다음으로 배열 안테나의 S-Parameter와 근접전계 측정을 통해, 빔 조향 범위 내 최대 능동반사계수와 개별 복사소자의 빔 패턴 성능을 흡수체 유무 및 종류에 따른 3가지 경우에 대해 각각 비교하였다. 본 연구에서 제시한 결과들로부터 안테나의 저피탐 특성은 확보하면서 동시에 전기적 성능은 동등 수준 이상으로 유지됨을 확인할 수 있었다. 이와 같이 구조적으로는 견고하면서 저피탐 특성을 보이는 능동위상배열 안테나는 항공기 및 함정용 레이더 뿐만 아니라 탐색기, 전자전 등 다양한 분야에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Won-Jun Lee, Sang-Min Baek, Kwang-Sik Choi, Young-Sik Joo "A Study on RAS application for stealth aircraft", The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, KSAS 2016 Spring Conference, pp. 130-131, Apr 2016.
- [2] Se-Ha Im, Seung-Jae Lee, In-Sik Choi, Tae-Seung Lee, "A Study on Calculation and Comparison for VHF, UHF, L-Band RCS", Journal of Korean Institute of Information Technology, Vol. 14, No. 5, pp. 59-66, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2016.14.5.59>
- [3] D. C. Evenden, "The RCS of antennas on a missile-like body", IEE Colloquium on Antenna Radar Cross-Section, pp. 6/1-6/5, May 1991.
- [4] Joong-Soo Lim, Min-Nyun Kim, Gyoo-Soo Chae, "A Study on the Dipole Chaff RCS for Aircraft", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 9, No. 3, pp. 690-694, Jun 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1109/AFRCON.1996.562980>

- [5] C. B. Wilsen, D. B. Davidson, "The radar cross section reduction of microstrip patches", Proceedings of IEEE AFRICON 4th, Vol. 2, pp. 730-733, Sep 1996.
DOI: <https://doi.org/10.1109/AFRCON.1996.562980>
- [6] Young-Wan Kim, Hee-Duck Chae, Se-Hwan An, Ji-Han Joo, "Radiator Design Method considering Wide-Angle Beam Steering Characteristics of AESA Radar", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 22, No. 5, pp. 87-92, Oct 2022.
DOI: <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2022.22.5.87>

저 자 소개

주 정 명(정회원)



- 2011년 2월 : 홍익대학교 전자전기공학부(공학사)
- 2013년 3월 : 홍익대학교 전자정보통신공학부(공학석사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : LIG넥스원 선임연구원

• 주 관심분야 : 수동 및 능동 위상배열 안테나, 디지털 레이더 시스템, 다기능 레이더 시스템

권 시 원(정회원)



- 2022년 2월 : 한양대학교 전자공학부(공학사)
- 2022년 01월 ~ 현재 : LIG넥스원 연구원
- 주 관심분야 : 복사소자 설계, 능동위상배열 안테나, 완전 디지털 레이더 시스템, 우주감시 레이더 시스템

채 희 덕(정회원)



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

• 주 관심분야 : 디지털 및 다기능 레이더 시스템, 안테나 구조 및 빔 패턴 최적화, 위성용 능동위상배열 안테나 시스템, 전자파 수치 해석

박 종 국(정회원)



- 1995년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부(공학박사)
- 2001년 11월 ~ 현재 : LIG넥스원 수석연구원

• 주 관심분야 : 능동위상배열 안테나 시스템, 디지털 및 다기능 레이다 시스템, 적응형 빔 형성, 전자파 수치 해석

전 정 환(정회원)



- 2015년 8월 : 서울디지털대학교 컴퓨터정보통신학과(공학사)
- 2007년 11월 ~ 현재 : 극동통신 수석연구원
- 주 관심분야 : 기계구조

최 영 조(정회원)



- 1996년 2월 : 동서대학교 전자통신과(공학사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 극동통신 이사
- 주 관심분야 : 능동위상배열 안테나, 위상 변위기

이 형 기(정회원)



- 2002년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2002년 3월 ~ 2014년 9월 : 하이게인 안테나 수석연구원
- 2014년 10월 ~ 현재 : 극동통신 수석연구원

• 주 관심분야 : 능동위상배열 안테나, 추적 안테나 시스템

한 정 윤(정회원)



- 2021년 2월 : 충남대학교 전기공학과 (공학사)
- 2022년 2월 ~ 현재 : 극동통신 연구원
- 주 관심분야 : 능동위상배열 안테나