

지상 레이더 성능 검증 시험을 위한 비콘 운용시설 구축 방안

Design and Implementation of Beacon Facilities for Ground Radar Performance Verification Tests

조 옹 희¹ · 정 재 엽² · 권 지 훈^{3*}

Yong-Hee Cho¹ · Jae-Yeop Jung² · Ji-Hoon Kwon^{3*}

요 약

본 논문은 지상 레이더의 성능 검증을 위한 far-field 조건을 충족하는 외부 시험환경 구축 방안으로 비콘 운용시설을 제안한다. 레이더가 원거리 표적을 탐지하기 위해, 안테나 크기의 증가도 요구됨에 따라 기존 실험실 기반 시험은 공간적 제약으로 인해 운용 성능을 정량적으로 검증하는데 한계가 존재한다. 이에 따라 직선 경로가 확보된 외부 시험시설이 요구되며, far-field 조건과 지형 클러터 영향을 고려한 후보지 선정 절차와 시설 구축 사례를 제시한다. 또한, 실제 비콘 시험을 통해 레이더 성능 검증에 정량적 지표로 활용할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This study proposes the establishment of a beacon operation facility as an external test environment that satisfies far-field conditions for the performance verification of ground radar systems. Because the detection of distant targets requires larger antenna sizes, conventional laboratory-based testing faces spatial limitations, making it difficult to quantitatively validate the operational performance. Therefore, an external test site with a secure line-of-sight (LOS) is necessary. We present candidate site selection procedures and facility construction cases that consider far-field conditions and ground-clutter effects. Furthermore, through actual beacon testing, we confirm that quantitative indicators can be effectively utilized for radar performance verification.

Key words: Beacon, Ground Radar, Far-Field, Line-of-Sight, Ground Clutter

I. 서 론

지상 레이더는 국방 분야에서 광역 탐색, 조기경보, 표적 추적 등 전략적 임무를 수행하는 핵심 센서 체계이다. 이러한 레이더는 넓은 탐지 거리와 높은 분해능을 확보하

기 위해 대형 안테나 배열을 사용하며, 이에 따라 원거리 시험 조건(far-field)을 충족하는 시험환경이 요구된다. 그러나 안테나 크기가 커질수록 필요한 프라운호퍼 거리가 수백 미터 이상으로 증가하므로, 기존 실험실 기반 시험 환경은 근접장(near-field) 영향과 공간적 제약으로 인해 실

「본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC190064CD)」
한화시스템(Hanwha Systems)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0007-3871-9597>), 2: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0006-9512-2941>), 3: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0003-0046-2304>)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised January 30, 2026 ; Accepted March 11, 2026. (ID No. 20260107-16S)

· Corresponding Author: Ji-Hoon Kwon (e-mail: imrf@naver.com)

제 운용 성능을 정량적으로 검증하는 데 한계가 있다^[1].

이러한 제약을 극복하기 위해서는 레이더 신호 송/수신 시야에 장애물이 없는 원거리 시험환경이 필수적이다. 외부 시험시설은 far-field 조건을 만족할 수 있는 충분한 거리와 직선 경로(line-of-sight)를 제공하며, 동시에 지형 클러터와 환경적 요인을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 특히 국방 분야에서 레이더의 성능을 검증하기 위해서는 반복 가능하고 정량적인 시험환경이 필수적이며, 이를 통해 신뢰성 있는 성능 평가가 가능하다^[2].

II. 본 론

2-1 비콘 운용시설 후보지 선정 기준

비콘 운용시설 후보지를 선정할 때는 ①레이더와 비콘 사이의 직선 경로를 확보하는 것이 중요하며, ②안테나 크기(D)와 파장(λ)을 고려해 계산한 프라운호퍼 거리 ($R \geq 2 D^2/\lambda$) 이상을 확보해야 far-field 조건을 충족할 수 있다. 또한, ③비콘 안테나를 일정 높이에 설치해 충분한 고각을 확보함으로써 비콘의 모의표적 신호를 안정적으로 탐지/추적할 수 있어야 한다(그림 1).

2-2 Far-Field 조건 분석

후보지 분석 결과, 레이더 설치 위치로부터 주변 지형물에 의한 차폐가 없는 시야가 확보되었으며, 안테나 크기와 파장을 고려해 계산한 프라운호퍼 거리 이상을 만족하여 far-field 조건을 충족함을 확인하였다(그림 2). 동일 조건을 만족하는 다른 대안도 존재하나, 레이더 설치 위치는 시험통제소 연동 및 부지 확보 등 현실적 제약으로 변경이 불가능하다. 따라서 본 연구는 레이더의 현 배치 지점을 기준으로 비콘 운용시설 후보지를 선정하였다^[3].

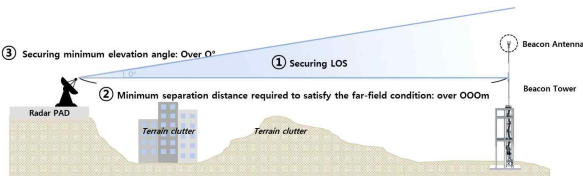


그림 1. 비콘 운용시설 위치 선정 접근법
Fig. 1. Approach to Beacon facility site selection.

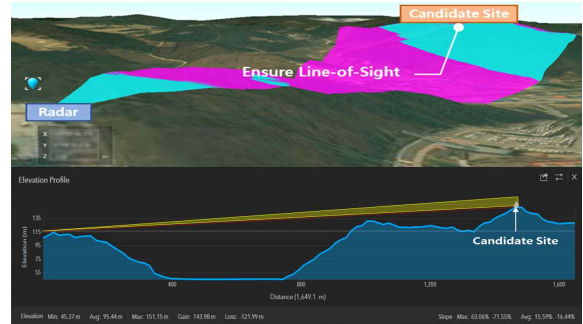


그림 2. Far-field 만족 후보지 지형분석
Fig. 2. Far-field candidate site analysis.

2-3 직선 경로 및 지형 클러터 분석

레이더 성능 검증에서 지형 클러터는 탐지 성능과 신호 품질에 직접적인 영향을 미치는 주요 요인이다. 본 절에서는 현재 레이더 위치를 기준으로 지형 특성을 반영한 분석을 수행하였으며, 이를 위해 레이더의 차폐각 및 CNR(clutter-to-noise ratio)를 검토하였다.

분석 결과, 시설 후보지 방향으로 차폐각 이상의 고각 시야가 확보되어 직선 경로 조건을 충족하였으며 이는 시험환경 구축의 기본 요건에 해당한다. 그림 3의 임계값은 CNR로, 지형 클러터 성분과 배경 잡음 성분의 비율을 나타낸다. 특정 구간에서 CNR이 증가하는 현상이 확인되었으나 전체적으로는 레이더 운용에 필요한 수치를 만족하였고, 시험환경 설계는 고각 방향에서 직선 경로 확보와 클러터 최소화 측면에서 최적화되었다^[4].

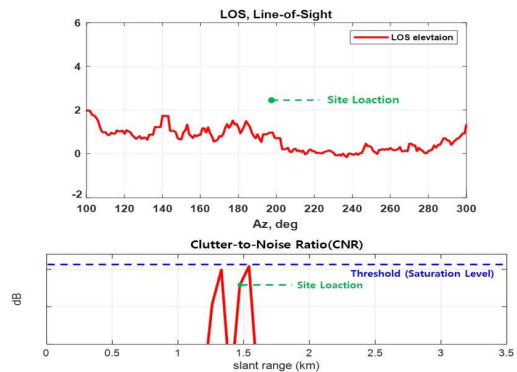


그림 3. 차폐각 및 지상 클러터 영향 분석
Fig. 3. LOS (elevation) & ground clutter analysis.

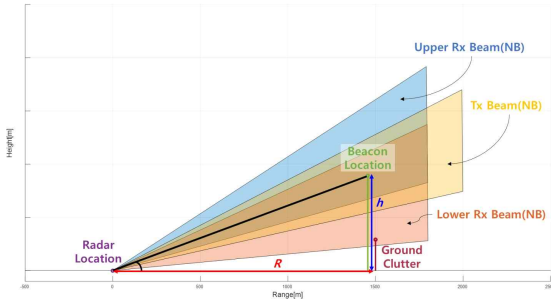


그림 4. 레이더 빔폭을 고려한 시설 높이 산정
Fig. 4. Facility height setting considering radar beamwidth.

2.4 최소 고각 확보를 위한 시설 높이 고려

레이더 성능 검증 시험에서 비콘 안테나의 설치 높이는 모의 표적 외 신호 수신을 최소화하도록 고려되어야 하며, 이를 위해 레이더 빔폭과 비콘의 설치 위치를 도식화하여 시험환경에서 빔의 공간적 분포를 분석하였다.

그림 4와 같이 레이더의 송/수신 빔은 특정 고각 범위 내에서 안정적으로 형성되며, 비콘이 해당 빔 영역에 위치할 때 신호가 최적화된다. 따라서 비콘 안테나는 지형 반사 및 저고도 클러터의 영향을 최소화하면서도 레이더의 넓은 빔폭 내에 안정적으로 포함될 수 있는 높이에 설치되어야 한다. 일반적으로 레이더 빔폭은 안테나 개구 길이와 파장에 의해 결정되며, 빔폭은 $\theta_{3dB} \approx \lambda/D$ 와 같이 근사된다. 또한, 레이더와 시설과의 거리 R 에서 필요한 비콘 안테나의 설치 높이 h 는 레이더 빔의 중심 고각 θ 를 고려하여 $h \approx R \times \tan(\theta)$ 로 계산할 수 있다. 이러한 관계식을 통해 비콘 안테나가 레이더 빔폭 내에 안정적으로 포함될 수 있는 최적 높이를 산정할 수 있다^[5].

2.5 비콘 운용시설 설계 및 구축

비콘 운용시설은 외부 시험환경 요소로서, 구조적 안정성과 시험 기능을 동시에 만족해야 한다. 본 절에서는 비콘 안테나의 설치 높이 확보, 비콘 운용/보관, 통신 연동, 안전 확보 등을 고려하여 그림 5와 같이 시설 설계 방안을 도출하였다.

비콘 안테나는 송/수신 빔의 교차 영역에 안정적으로 위치해야 하므로, 마스트를 활용하여 충분한 높이를 확보

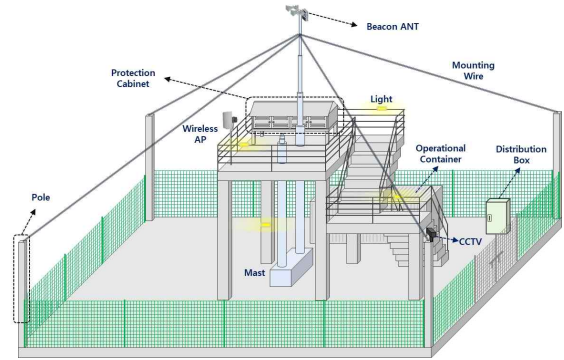


그림 5. 비콘 운용시설 설계 개념도
Fig. 5. Conceptual design of beacon operation facility.

해야 한다. 이를 위해 구조적 특성에 따른 지선 결박 방식을 채택하여 별도 지지 구조물을 설계하였다. 또한, 장비 운반을 위한 화물 리프트와 비콘 보관용 캐비닛을 설치하여 외부 환경과 편의성을 고려하였다.

전원은 장비의 안정적 운용을 위해 상전 분전함을 통해 구성하였으며, 낙뢰 및 전기적 서지로부터 장비를 보호하기 위해 접지 및 피뢰 설비를 포함하였다. 통신은 내부 네트워크를 포함해 레이더 통제소와의 원거리 통신을 지원하는 무선 이더넷 단말기를 설치하였다. 안전 측면에서는 고소 작업을 위한 펜스 설치 및 화재 대응을 위한 소화기를 배치하고, 야간 운용 시를 대비한 항공장애등도 설치하였으며, 실제 시설 구축 사례는 그림 6과 같다.

2.6 비콘 운용을 통한 성능 검증

비콘은 거리, 속도, RCS 성분 등을 구현하여 레이더의

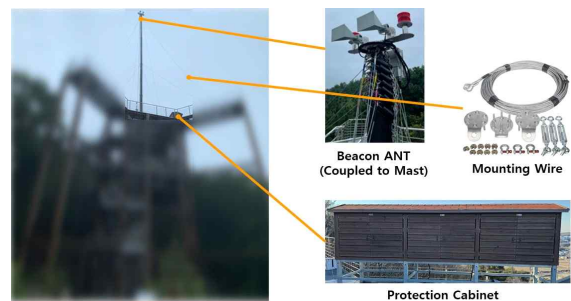


그림 6. 비콘 운용시설 구축 사례
Fig. 6. Beacon operation facility implementation case.

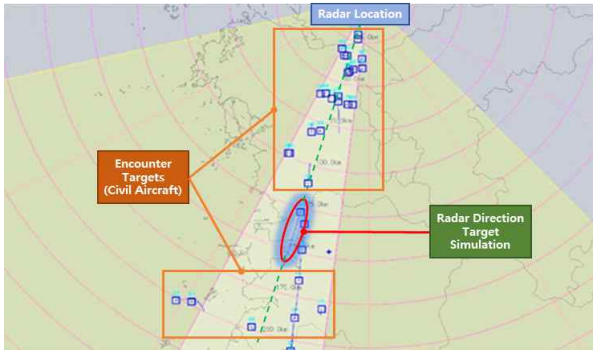


그림 7. 비콘 모의표적 탐지/추적 결과
Fig. 7. Beacon-based simulated target detection and tracking.

탐지/추적 성능을 검증하는 데 활용된다. 비콘은 방위각 (Az) 및 고각(EI) 측면에서 고정되므로, 레이더의 방위각을 비콘 설치 위치와 정렬해 시험을 수행하였다.

그림 7은 실제 항공기 조우 상황을 포함해 약 160 km 거리에서 접근하는 표적을 모의한 시험환경을 나타내며 속도와 RCS 조건을 단계적으로 조정하여 레이더의 수신 감도와 추적 정확도 등 성능을 정량적으로 검증할 수 있음을 확인하였다. 기존 레이더 성능 검증은 ADS-B 기반 상용 앱과 간접 비교, 고정밀 GPS를 탑재한 항공기 탐지/추적을 통한 비행 기록 비교 등에 의존하였다. 반면 본 연구의 비콘 기반 실외 시험환경은 운용자가 원격으로 모의표적 시나리오를 정밀하게 제어하고, 레이더와 비콘 간 실시간 송/수신 데이터 비교를 통해 레이더의 성능을 보다 신속하고 체계적으로 검증할 수 있음을 보여준다⁶⁾.

III. 결 론

본 논문에서는 지상 레이더의 성능 검증을 위한 비콘 운용시설의 설계와 구축 방안을 제시하였다. 이와 동시에 실제 비콘 운용을 통한 레이더의 탐지 성능과 추적 정확성을 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

향후 다양한 레이더의 성능 검증 시험을 위해 주파수

대역과 안테나 형상에 따른 빔폭과 고각 특성을 분석하여 비콘 설치 높이와 위치 최적화 기준을 마련할 필요가 있다. 시설 설계 단계에서는 운용 인력의 안전과 작업 효율성을 우선 고려하여, 장비 운용 과정을 분석 후 안전 설비 및 작업 절차를 강화하는 것도 중요 과제이다.

비콘은 기능을 확장하여 다양한 위협 시나리오와 다중 표적 환경에서도 레이더 성능을 검증할 수 있어야 한다. 여기에 재밍 기능과 통신 시험을 지원하는 장비를 추가하여 전자전 환경과 데이터링크 운용 조건에서도 성능을 확인할 수 있도록 해야 한다. 또한, 시험 데이터의 자동 수집과 분석 체계를 도입해 결과를 실시간으로 평가하고 피드백할 수 있는 방법론을 개발하는 것도 필요할 것이다.

References

- [1] S. Cho, Y. Kwak, H. Oh, H. Ju, and H. Park, "Progressive test and evaluation strategy for verification of KF-X AESA radar development," *Journal of the Korean Military Science and Technology Society*, vol. 27, no. 3, pp. 387-394, Jun. 2024.
- [2] J. Kim, S. Y. Hong, "Radar performance verification method using satellite tracking for ground based long range radar," *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 125-134, Apr. 2025.
- [3] J. B. Billingsley, *Low-Angle Radar Land Chutters*, Edison, NJ, IET, 2002.
- [4] S. K. Park, K. Y. Jung, G. Y. Lee, and J. W. Park, "Design of the algorithm forming the screen angle using MFR performance analysis tool," in *2018 Fall Conference of the KIMST*, Nov. 2018, pp. 118-119.
- [5] J. Eaves, E. Reedy, *Principles of Modern Radar*, Berlin, Springer, 2012.
- [6] S. B. Choi, "Generation method of deceptive jamming in radar target simulation equipment," in *Annual Conference of Korea Navigation Institute*, Nov. 2019, pp. 35-37.