THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2026 March; 37(3), 235～240.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2026.37.3.235
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

항공기 비행시험 기반 레이다 추적 성능 검증 연구

Research on Verification of Radar Tracking Performance Based on Flight Test via Aircraft

박 두 연 · 윤 범 식 · 김 호 준*

Doo-Yean Park · Buem-Sik Yoon · Ho-Jun Kim*

요 약

본 논문은 항공기를 활용한 비행시험을 통해 지상 레이다의 추적 성능을 검증하는 방안을 제안한다. 지상 레이다의 추적 성능에 대한 지표는 거리 오차와 각도 오차로 나타나며 이는 레이다 장비 내부의 RF 지연, 신호처리 지연, 빔 조향 오차, 기구적 오차 등에 의해 발생한다. 항공기를 활용한 비행시험을 통해 이러한 오차들을 계측할 수 있으며, 추적 오차 분석을 통해 보정 값까지 도출할 수 있다. 또한 실제 운용 환경까지 고려되기에 추적 오차 분석을 통한 보정 값까지 도출할 수 있는 필수적 시험 요건에 해당한다. 본 논문에서는 먼저 비행 가능 영역, 레이다 배치 조건, 항공기 성능에 기반한 비행 시나리오 수립 방안을 제안한다. 다음으로 설정된 비행 시나리오에 따라 레이다 탐지/추적 데이터를 획득하고, 항공기에 탑재된 DGPS(differential global positioning system) 시험 장비와 비교 분석하는 방법을 제안하였고, 분석 결과에 PTP(precision time protocol) 보정을 적용하여 시간 동기화를 통해 추적 오차가 거리는 약 95 %, 방위각은 약 32 %, 고각은 약 14 % 이상 개선됨을 기술하였다.

Abstract

This paper presents a method for verifying the tracking performance of ground radars through flight tests using an aircraft as the target. The tracking performance metrics of a ground radar are typically represented by range and angular errors, which are caused by factors such as internal RF and signal processing delays, and beam steering and mechanical errors. These errors can be measured through aircraft-based flight tests, and correction values can be derived through tracking error analysis. As flight tests inherently reflect actual operational environments, they constitute an essential test method for deriving correction values based on tracking error analysis. In this study, a flight scenario design methodology is proposed based on the available flight area, radar deployment conditions, and aircraft performance constraints. Next, radar detection/tracking data are acquired according to the defined flight scenarios and compared with the reference data obtained from the DGPS-equipped test aircraft. By applying PTP-based correction and time synchronization to the analysis results, tracking error reductions of approximately 95 % in the range, 32 % in the azimuth, and 14 % in the elevation are achieved.

Key words: Ground-Radar, Tracking Performance, Flight Test, Comprehensive Methodology, PTP

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

한화시스템(Hanwha system)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 7, 2026 ; Revised January 29, 2026 ; Accepted February 26, 2026. (ID No. 20260107-14S)

· Corresponding Author: Ho Jun Kim (e-mail: hojun-kim@add.re.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

지상 레이다는 표적을 탐지/추적하여 거리, 방위각 및 고각 정보를 제공하는 핵심 장비로서, 추적 성능은 표적의 위치를 정확하게 추정하는 능력과 직결된다. 따라서 레이다 추적 성능에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 검증 절차가 필수적이다[1]. 레이다 추적 성능에 대한 오차는 열잡음 오차, 빔 조향 오차, 기구적 정렬 오차 등과 같은 요인에 의해 발생한다. 이러한 오차는 단계적으로 편평도 측정, 빔조향 측정 등으로 보정을 수행하고, 시뮬레이션이나 제한된 공간에서 비콘과 같은 시험 장비를 활용하여 추적 성능에 대한 검증 시험을 수행한다. 하지만 시험만으로 실제 운용 환경에서의 추적 성능을 충분히 검증하는 데 한계가 있다. 이에 따라 실제 조건을 반영할 수 있는 항공기 비행시험의 필요성이 제기된다.

항공기 비행시험에서는 비행 가능 영역, 레이다의 배치 위치, 항공기 성능 등을 고려한 비행 시나리오 설정이 필요하고 PPS(pulse per second) 기반의 고정밀 DGPS(differential global positioning system) 수신기를 항공기에 탑재하여 위성 기반 보정 시스템인 SBAS(satellite based argumentation system)의 보정을 받은 항공기 궤적 데이터를 확보할 수 있다[2].

본 논문에서는 항공기를 활용한 비행시험을 기반으로 레이다 추적 성능을 검증하기 위한 방법론을 제안한다. 비행 시나리오 설정, 레이다 탐지/추적 데이터와 DGPS 기반 항공기 위치 데이터의 비교 방법 및 레이다에 PTP(precisi- on time protocol) 적용 후의 정확도를 비교하며, 이를 통해 실제 운용 환경에서의 거리, 방위각, 고각에 대한 레이다 추적 성능을 검증할 수 있음을 보이고자 한다.

Ⅱ. 본 론

2-1 항공기 비행 시나리오 설정 방안

비행 시나리오를 설정하기 위해서는 먼저 비행 가능 영역에 대한 검토가 선행되어야 한다. 레이다의 배치 위치, 비행 공역, 고도 제한, 민·항공기 운항 현황 등은 비행 시험 가능 여부와 시나리오 구성에 영향을 미친다[3].

그림 1은 비행시험 행 가능 공역을 선정하기 위해 NOTAM(notices to airmen)에 공지된 공역 정보를 통해 검토한 결과이다. 그림 1의 A(내륙), B(해안) 영역 및 레이다의 위치를 고려한 공역 검토 결과, 두 공역에서 비행이 가능한 것으로 확인했다. 그림 2는 A, B 영역에 대한 LOS(line of sight)를 확인한 결과이다[4]. 그림 1의 C영역은 지형 클러터로 인해 레이다 배치 지점 기준으로 LOS 확보가 어려운 지역으로, 비행 시험 검토 영역에서 제외하였다. LOS와 NOTAM을 고려했을 때, 상대적으로 넓은 비행 가능 영역인 B 영역을 선정한다.

공역 검토를 통해 확보된 비행 가능 범위를 바탕으로, 레이다의 추적 성능을 검증하기 위한 비행 시나리오를 설정한다. 시나리오 설정 시 추적 성능에 지표가 되는 거리, 고각, 방위각을 레이다가 배치된 지점을 기준으로 동시에 확인 및 검증할 수 있는 방안을 고려하고, 항공기의 최대 및 최저 비행 고도, 레이다의 추적 범위를 고려하여 비행 시나리오를 설정한다[5].

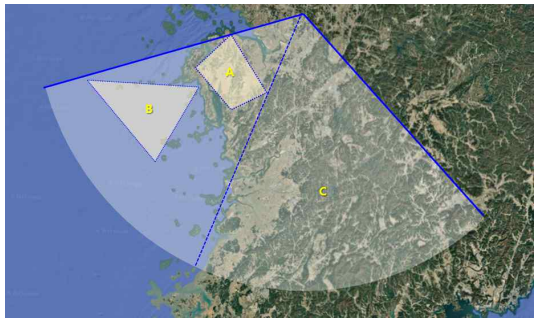


그림 1. 비행시험을 위한 비행 영역 검토
Fig. 1. Flight area review for flight test.

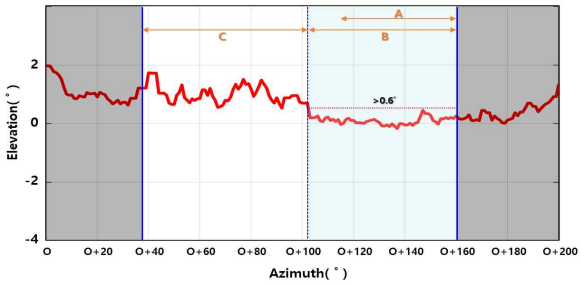


그림 2. 지상 레이다 가시거리(LOS) 검토
Fig. 2. Line of sight review of ground radar.

본 연구에서는 대기 굴절률 등에 대한 환경변수는 레이다 시스템의 기본 보정 과정에서 이미 반영한 것으로 전제한다.

2-2 항공기 비행을 통한 레이다 추적 성능 시험

본 절은 설정한 비행 시나리오에 따라 레이다의 추적 성능을 검증하기 위한 비행시험 방안을 설명한다. 항공기에 탑재된 DGPS 수신기로부터 위성 메시지를 수신 및 저장하여 LLA(latitude, longitude, altitude) 기반의 위치 정보와 UTC(coordinated universal time) 정보를 획득한다.

본 시험에 사용된 DGPS 수신기는 표 1 수준의 위치 정확도를 제공한다. 비행 중인 항공기에 탑재된 DGPS 수신기는 위성 기반 보정 시스템인 SBAS의 보정 정보를 받고, 속도 정확도는 초당 수평 7 cm, 수직 20 cm 수준으로 고속 이동체 위치 데이터를 수집하는 데 적합한 성능을 제공한다.

레이다는 비행 중인 항공기를 탐지/추적하여 R-Az-El 기반의 추적 데이터와 위성으로부터 수신한 UTC 시간 정보를 획득한다.

2-3 레이다 추적 성능 분석

본 절에서는 항공기의 DGPS 수신기로부터 획득한 데이터와 레이다에서 항공기를 탐지/추적한 데이터를 비교하여 추적 성능을 분석하는 방법을 설명한다. DGPS 수신기로부터 획득한 데이터는 LLA 기반의 데이터로 레이다에서 획득한 데이터와 비교하기 위해서는 좌표계를 일치시켜야 한다.

R-Az-El로의 변환은 기본적인 3차원 회전 행렬에서 유도된다. Heading, roll, tilt에 대해 각각 X축, Y축, Z축 회전 행렬을 적용하며, 식 (4)~식 (6)은 이 세 회전 행렬을 순차적으로 곱하여 얻어진 결과이다. 이를 통해 LLA 기반의 데이터를 R-Az-El로 변환한다.

LLA 좌표계에서 직교 좌표계로 변환 과정은 식 (1)~식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_{North} \\ Y_{Up} \\ Z_{East} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\lambda_R) & \cos(\lambda_R) & 0 \\ -\sin(\phi_R)\cos(\lambda_R) & -\sin(\phi_R)\sin(\lambda_R) & \cos(\phi_R) \\ \cos(\phi_R)\cos(\lambda_R) & \cos(\phi_R)\sin(\lambda_R) & \sin(\phi_R) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{Target} - X_{Radar} \\ Y_{Target} - Y_{Radar} \\ Z_{Target} - Z_{Radar} \end{bmatrix}$$

$$\phi_R = Latitude,\ \lambda_R = Longitude,\ H_R = Altitude \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_{Radar} \\ Y_{Radar} \\ Z_{Radar} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C+H_R)\cos(\phi_R)\cos(\lambda_R) \\ (C+H_R)\cos(\phi_R)\sin(\lambda_R) \\ (C(1-e^2)+H_R)\sin(\lambda_R) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} X_{Target} \\ Y_{Target} \\ Z_{Target} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (C+H_T)\cos(\phi_T)\cos(\lambda_T) \\ (C+H_T)\cos(\phi_T)\sin(\lambda_T) \\ (C(1-e^2)+H_T)\sin(\lambda_T) \end{bmatrix}$$

$$C = E_q / \sqrt{1-e^2\sin^2(\lambda_R)} \quad (E_q = Earth\ equatorial\ radius,\ e = Eccentricity) \quad (3)$$

LLA 좌표계에서 R(거리), Az(방위각), El(고각)의 변환 과정은 그림 3과 같다[6]. ECEF(earth centered, earth fixed) 좌표계 기준인 X_{Target}, X_{Radar}은 아래와 같이 LLA로 표현되며 WGS84 기준의 상수를 사용한다[7].

식 (4)~식 (6)은 레이다의 자세 변수인 heading, roll, tilt에 대한 변환 함수를 나타낸다[8].

$$Rot_\beta = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

$$Rot_\varepsilon = \begin{bmatrix} \cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) & 0 \\ \sin(\varepsilon) & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

표 1. DGPS 수신기 정확도
Table 1. Accuracy of DGPS receiver.

Category	Specifications	
	Horizontal	Vertical
Position accuracy (SBAS) (m)	0.50	0.85
Velocity accuracy (m/s)	0.007	0.020
DGPS receiver model	BX940 (Manufacturer: Trimble)	

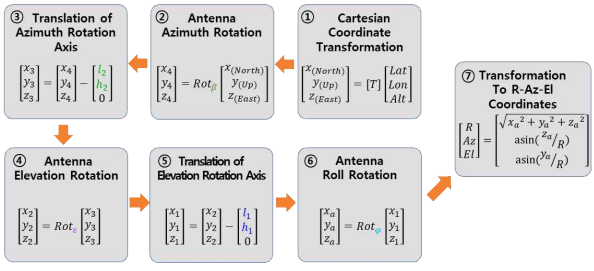


그림 3. 좌표계 변환 과정
Fig. 3. Procedure transformation of coordinate system.

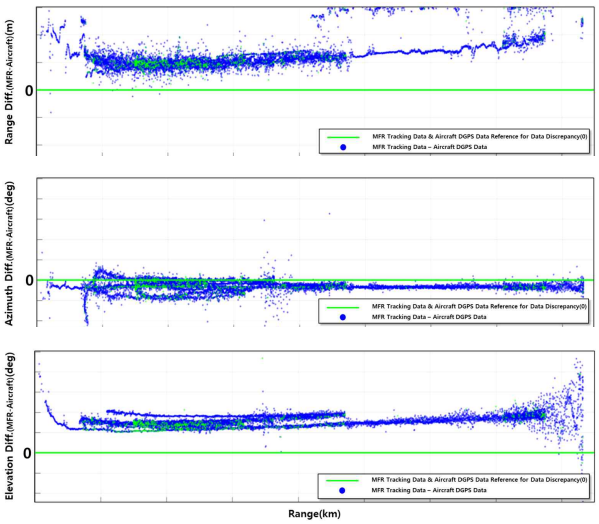


그림 4. 거리, 방위각, 고각 분석 결과
Fig. 4. Range, Azimuth, Elevation analysis result.

$$Rot_{\varphi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix}^{-1} \quad (6)$$

변환된 데이터를 토대로 비교 분석 시 항공기 및 레이다에서 각각 획득한 UTC를 기준으로 각각의 데이터를 비교한다. 그림 4는 데이터 분석 결과를 나타낸다.

분석 결과, 데이터 전송 지연, 레이다의 GPS 수신기의 자체 bias 등으로 인해 GPS 수신기에서 레이다로 전송된 UTC 시간 정보가 오차로 인해 그림 4와 같이 레이다 탐지/추적 데이터에 오차가 포함됐음을 확인했다.

이에 지상 레이다 시스템 시간에 동기화되는 UTC 시간을 ns 단위로 보정할 수 있는 PTP를 레이다의 시스템 시간에 적용하였다. 본 연구에서 적용한 PTP 보정 적용은 레이다 시스템 시간과 DGPS 기준 데이터 시간 기준을 같은 축으로 일치시키기 위한 절차이다. 시간 동기화가 정확히 이뤄지지 않을 경우, 레이다가 관측한 표적 위치와 DGPS 기준 위치가 서로 다른 정보를 참조하게 되어 추적 성능에 대한 오차가 발생할 수 있기 때문에 PTP 보정은 중요한 의미를 갖는다(그림 5).

표 2와 같이 최대 11.275 ms, 최소 10.613 ms, 평균 10.868 ms로, PTP를 통해 시간을 보정한 UTC와 PTP로 보정하지 않은 UTC 간 시간 차이가 있음을 확인할 수 있다.

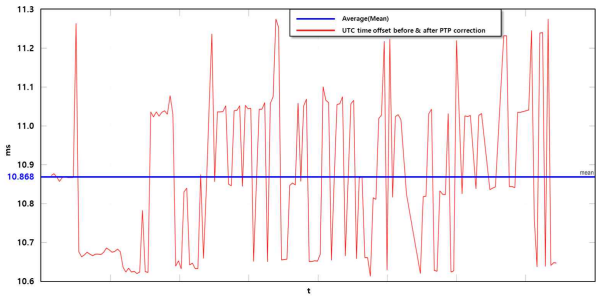


그림 5. PTP 보정 및 무보정 UTC 시간 차이
Fig. 5. UTC time offset before & after PTP correction.

표 2. PTP 보정 및 무보정 UTC 시간 차이(단위: ms)
Table 2. UTC time offset before & after PTP correction (unit: ms).

Status \ Value (ms)	Max.	Min.	Mean
UTC time offset before & after PTP correction	11.275	10.613	10.868

PTP 보정 및 무보정 UTC 간 시간 차이에 대한 보상 값을 적용하여 그림 6과 같은 결과를 도출하였다.

그림 6과 같이 거리 및 방위각에 대한 항공기 및 레이

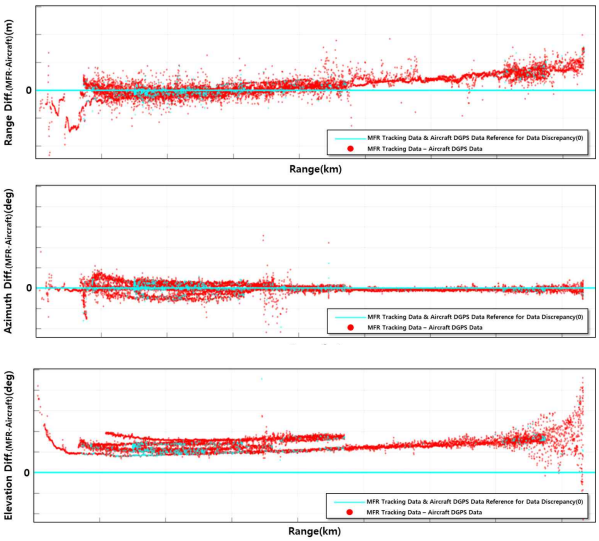


그림 6. PTP 보정 후 거리, 방위각, 고각 성능 분석 결과
Fig. 6. Range, azimuth, elevation analysis result after PTP correction.

다의 위치 데이터가 시간에 대한 오차가 보정이 적용되어 항공기에서 획득한 위치 데이터와 레이다로 탐지/추적한 데이터의 차이값이 0에 분포함을 보인다. 또한, 고각 데이터는 PTP 보정이 적용되어도 오차 분포가 0에 수렴하지 않는다. 이는 DGPS 수신기의 고도 정보가 수평 위치에 비해 상대적으로 오차가 크고 변동성이 높아, 좌표 변환 과정에서 이러한 고도 오차가 고각 계산에 직접적으로 반영되었기 때문으로 해석된다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 항공기 비행시험을 통해 레이다의 추적 성능을 검증하는 방법론을 제안하였다. 시험 공역 검토를 바탕으로 거리, 방위각, 고각 변화가 동시에 발생하는 비행 시나리오를 설정하였으며, DGPS 수신기로 획득한 항공기 위치 데이터와 레이다 탐지/추적 데이터를 UTC 기준으로 정렬하여 비교하였다. 마지막으로 PTP 보정을 적용해 레이다와 DGPS 수신기 간 시간 오차를 제거하여 신뢰성 있는 레이다 보정 값을 도출하였다.

References

[1] J. Kim, S. Hong, "Satellite tracking method using ground-based multi function radar," in *Summer Conference, KIEES*, Pyeongchang, Aug. 2024.

[2] H. Kim, J. Lee, "The study of RADAR flight test for fighter development," in *2014 The Society for Aerospace System Engineering(SASE) Spring Conference*, Jeju, May 2014, pp. 336-340.

[3] Y. K. Kwak, "Development of radar HILS system and verification radar performance scenario-based," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 27, no. 5, pp. 574-579, Oct. 2023.

[4] Korea Aerospace Research Institute (KARI), "Research for flight test technology of FAR23 Class, FR09230, Daejeon, Dec. 2009.

[5] 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 Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 27, no. 3, pp. 387-394, Jun. 2024.

[6] B. Duvenhage, J. J. Nel, "Inaccuracies when mixing coordinate reference frameworks in a system of systems simulation," in *AFRICON 2007*, Windhoek, Sep. 2007.

[7] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global Positioning System: Theory and Practice*, New York, NY, Springer, 2001.

[8] H. S. Shin, J. H. Choi, D. O. Kim, and T. H. Kim, "The study on coordinate transformation of the tracking radar in NARO Space Center," *Aerospace Engineering and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 116-121, Jul. 2011.

박 두 연 [한화시스템/선임연구원]

https://orcid.org/0009-0007-1931-3049



2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)

2017년 7월~2020년 2월: ㈜한화 품질보증2팀

2020년 3월~현재: 한화시스템 지상레이다체계1팀

[주 관심분야] RF 시스템, 레이다 시스템 등

윤 범 식 [한화시스템/연구원]

https://orcid.org/0009-0002-6918-7566



2021년 2월: 충남대학교 전파정보통신공학과 (공학사)

2021년 1월~2022년 2월: ㈜휴라 시스템개발팀

2022년 8월~현재: 한화시스템 지상레이다체계1팀

[주 관심분야] RF 시스템, 레이다 시스템 등

김 호 준 [국방과학연구소/선임연구원]

https://orcid.org/0009-0005-8016-6776



2011년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

2013년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2018년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2019년 12월～현재: 국방과학연구소 2 연구원

[주 관심분야] 지대공 레이다 시스템, 추적 알고리즘