

대산항 테스트베드 기반 VDES R-Mode 해상 이동 시험 결과 및 분석

황태현, 한영훈, 김영기, 서기열[†]

VDES R-Mode Experimental Test and Analysis in Daesan Port Testbed

Tae Hyun Fang^{ID}, Younghoon Han^{ID}, Youngki Kim^{ID}, Kiyeol Seo^{† ID}

Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Republic of Korea

ABSTRACT

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are vulnerable to radio interference, which creates challenges in determining vessel positions at sea. In response, by extending the functionality of the VHF Data Exchange System (VDES) for maritime navigation support, the VDES Ranging Mode (VDES R-Mode) has been proposed. A testbed was established around Daesan Port, and both static and dynamic trials were conducted to assess its feasibility. Initial correction was applied to mitigate bias errors. The results show that positioning errors varied with line-of-sight conditions, transmitter-receiver distance, signal-to-noise ratio (SNR), and horizontal dilution of precision (HDOP). The positioning performance remained stable without persistent bias errors. Excluding geographical constraints specific to the west coast of Korea, the results demonstrate the potential of VDES R-Mode as a maritime auxiliary navigation technology.

Keywords: global navigation satellite system, user range accuracy, regional navigation satellite system
주요어: 위성항법시스템, 사용자 거리 정확도, 지역 위성항법시스템

1. 서론

VHF Data Exchange System (VDES)는 해양 통신을 위한 차세대 디지털 데이터 통신 시스템으로, 기존 Automatic Identification System (AIS)의 한계를 극복하고 해상에서 보다 빠르고 안전한 데이터 통신을 가능하게 하는 기술이다. VDES는 VHF Data Exchange Application Specific Message (VDE-ASM), VDE Terrestrial (VDE-TER), VDE Satellite (VDE-SAT)와 같은 통신링크를 가진다. VDES Ranging Mode (VDES R-Mode)는 VDES의 기능을 확장하여 Global Navigation Satellite System (GNSS, 위성항법시스템) 없이도 선박의 위치를 측정할 수 있도록 하는 보조 항법 기술이다 (IALA 2020, 2024). VDE-TER에 기반하는 VDES R-Mode는 GNSS의 장애 상황에서 선박의 위치를 추정할 수 있는 육상 기반 항법시스템이다. VDE-SAT에 기반하는 VDES R-Mode는 육상 기반 VDES R-Mode 기술을 위

성 통신 기반으로 확장한 것이다. R-Mode는 상대적으로 적은 신규 전파항법 기간시설 구축에 따른 투자비용으로 Positioning, Navigation, and Timing (PNT)를 획득할 수 있는 시스템을 구현할 수 있으며, 위성 전파항법시스템과 독립적으로 구축되어 역할을 수행할 수 있다는 점에서 연구 및 구현에 관한 관심이 높아지고 있다 (Bronk et al. 2021, Fang et al. 2022, Han et al. 2024, Johnson et al. 2024, Pettersen et al. 2025).

유럽의 R-Mode Baltic 프로젝트는 발탁해(Baltic Sea)에 VDES R-Mode 시설을 구축하고 실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 VDES R-Mode의 실현 가능성을 제시하였다. 그러나 VDES 장비를 이용하지 않고 Software Defined Radio (SDR) 장치로 수신 신호의 사후처리(postprocessing)를 통해 전파시간 지연(Time of Arrival, TOA)을 추정하였다. Wirsing et al. (2021)은 내륙의 작은 호수에 VDES R-Mode를 설치하고 시험하여 결과를 제시하였다. 시험 결과는 95% 수평측위오차가 22 m 달성

Received Aug 22, 2025 Revised Sep 04, 2025 Accepted Oct 24, 2025

[†]Corresponding Author E-mail: kyseo@kriso.re.kr



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://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.

이 가능함을 보여주었다. 우리나라 Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO)의 지상파 통합 항법시스템(R-Mode) 기술개발 프로젝트 (Fang et al. 2022)는 VDE-TER 기반 VDES R-Mode 테스트베드를 서해 항구에 구축하고 성능을 시험하였다. 미국은 VDES R-Mode를 VDES의 기회신호(Signal of Opportunity) 활용 방안으로 고려하여 테스트베드를 구성하고 있다 (Johnson et al. 2024). 유럽우주국(European Space Agency, ESA) Navigation Innovation and Support Program (NAVISP)은 VDE-SAT의 TOA를 활용하여 단일 송신 위성 신호로 거리 측정을 시도하고 결과를 제시하였다. Pettersen et al. (2025)은 단일 위성을 통한 누적 결과를 바탕으로 매우 큰 오차가 발생함을 보이고 이를 분석하였다. 그러나 VDE-SAT 기반 VDES R-Mode가 항법을 위한 백업 PNT 요소로서 활용될 가능성을 보였다.

KRISO의 VDES R-Mode 테스트베드는 서해의 대산항을 중심으로 3개의 송신국을 구축하였다(Fang et al. 2022, Han et al. 2024). 또한 VDES R-Mode의 측위 성능 확인을 위한 프로토타입 VDES R-Mode 수신기 (Ryu et al. 2021)를 활용하여 측위 성능 시험을 수행하였다. 측위 성능 시험은 수신기가 지상에 고정되는 정지 시험과 해상에서 이동하는 선박에 부착되는 이동 시험이 수행되었다. 본 논문에서는 VDES R-Mode의 시험을 위한 시험 환경과 시험 결과를 제시한다. 송신국 구축 내용은 참조문헌(Fang et al. 2022)을 참조할 수 있다.

VDES R-Mode는 초단파 대역의 157.2375 / 161.8375 MHz를 사용하는데 초단파는 전파전달 경로 상의 산과 같은 자연 장애물이나 선박과 같은 인공 구조물 등으로 인해 신호 전송에 방해를 받을 수 있으므로 가시성 확보가 중요하다. 우리나라 서해는 VDES R-Mode의 송신장치를 설치하고 전파를 송신할 수 있는 많은 섬이나 곶(cape)과 같은 해안 지형을 가지고 있다. 그러나 많은 해안 지형에 포함된 구릉 지대는 VDES R-Mode 신호의 송수신을 크게 방해할 수 있다. 또한 Baltic 프로젝트의 호수 시험은 정기 여객선이 VDES R-Mode 신호의 수신을 방해하여 측위 오차가 크게 증가하는 것을 보였다 (Raulefs 2021). 선박의 이동이 통제되지 않는 해역에서 VDES R-Mode 송수신 및 측위는 임의의 중대형 선박의 이동에 따라 성능 저하가 유발될 수 있다.

2. 테스트베드 실험 환경

VDES R-Mode의 해상 이동 시험을 위한 테스트베드는 충청남도 서산시 대산항을 중심으로 구성되었다. VDES R-Mode 송신기는 Fig. 1과 같이 3개 지점에 설치하였다. 1번 송신국(Nanjido)은 충남 당진시 난지도관광지관리사무소이고, 2번 송신국(Humansan)은 충남 태안군 후방산 AIS 기지국이며, 3번 송신국(Budo)은 인천시 용진군 부도항로표지관리소이다. 각 송신국은 해상 시험을 수행할 대산항 주요 항로에서 약 20 km 이내에 위치하고 있다. 1번 난지도 송신국의 안테나 높이는 약 15 m이며, 안테나가 설치된 난지도관광지관리사무소는 난지해수욕장의 중앙에 위치하고 있다. 3개의 송신국 중에서 안테나 높이가 가장 낮으며, 송신 안테나와 대산항 주요 항로 사이의 거리는 약 2~10 km이다. 2번 후방산 송신국의 안테나 높이는 약 105 m이며, 3개의 송신국



Fig. 1. VDES R-Mode transmitting stations and sea trial area shown on the map.



Fig. 2. Prototype VDES R-Mode transmitter.

중에서 안테나 높이가 가장 높지만 대산항 주요 항로 사이의 거리가 약 6~14 km이다. 또한 전파 경로는 서산시 독곶리와 대죽리의 육상 경로를 포함한다. 3번 부도 송신국의 안테나 높이는 약 40 m이다. 안테나와 대산항 주요 항로 사이의 거리는 약 12~17 km이며, 3개의 송신국 중에서 전파경로가 가장 길다.

정지 시험을 위한 테스트베드는 충남 서산시 부석면의 서산방조제에 임시로 구성되었다. 해상 시험과 동일하게 송신기는 3개 지점에 설치되었다. 송신국 1은 충남 서산시 부석면 간월도리 691 지점에 설치되었고 수신기 사이의 거리는 약 2.1 km이다. 송신국 2는 충남 홍성군 서부면 궁리 540-116 지점에 설치되었고 수신기 사이의 거리는 약 2 km이다. 송신국 3은 충남 홍성군 서부면 궁리 1027이며 수신기 사이의 거리는 3.1 km이다. 송신국 1, 2, 그리고 3의 안테나 높이는 각각 29 m, 27 m, 그리고 25 m이다. 안테나의 높이는 일회성 시험을 위하여 차량탑재형 고소작업대를 이용하였다. 이를 통하여 안정된 송신 및 수신 성능을 기대할 수 있다.

VDES R-Mode 송신기는 (주)코메스타에서 개발한 프로토타입 장치를 사용하였다 (Ryu et al. 2021). 프로토타입 VDES R-Mode 송신기는 IALA (2020, 2024) 권고안을 준수하였다. 주요 규격은 주파수 157.2375 MHz와 161.8375 MHz, 대역폭 100 kHz, 변조방식 $\pi/4$ -QPSK, 출력전력 12.5 W이다. 거리 시퀀스(ranging sequence)의 송신 간격은 800 ms이고 30개의 VDES R-Mode 슬롯을 전송한다. Fig. 2는 VDES R-Mode 송신기의 외형이다. 송신기의 크기는 270 x 223 x 270 mm이며 무게는 9.1 kg으로 어렵지 않게 이동 및 설치할 수 있다. 3개의 송신국은 Septentrio PolarXSTR가 제공하는 GPS 기준시각에 동기화하였다. 전면에 송신국 주요 설정을 위한 GUI 화면을 가지고 있으며, 송신국의



Fig. 3. Appearance of the test vessel Hanuriho, a harbor patrol ship.



Fig. 4. Ship-mounted VDES R-Mode receiver and reception server.

식별번호(ID), 송신국의 위치, 송신국 네트워크를 설정할 수 있다. VDES R-Mode 수신기는 송신기와 동일한 크기 및 외형으로 개발된 프로토타입 장치를 사용하였다 (Ryu et al. 2021). 주파수는 157,200~157,275 (lower) 및 161,800~161,875 (upper)이며 대역폭과 변조방식은 송신기와 동일하다. 외형과 크기는 송신기와 동일하며 무게는 8.68 kg으로 송신기에 비해 조금 작다. 수신기는 각 송신국 ID의 TOA을 샘플링 주파수 92.16 Mhz의 샘플 카운터로 제공한다. 즉, 송신기와 수신기의 거리 측정치는 Eq. (1)과 같이 결정된다.

$$\rho = (\text{TOA counter}) \times \frac{c}{92.16 \times 10^6} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도를 나타낸다. 이때, 수신기 거리 측정치 분해능은 3.253 m이다. 수신 안테나는 (주)위성안테나전자의 해양용 AIS 안테나를 사용하였고 사용 모델은 V20PS-11AIS이다.

VDES R-Mode 수신기는 해상 이동 시험을 위하여 선박에 설치하였다. 시험용 수신장치는 VDES R-Mode 수신기, 수신 서버, GNSS 수신기로 구성되었다. 수신 서버는 VDES R-Mode 수신기용 시간동기화를 위한 외부 클럭 10 Mhz와 1 pps를 제공하고 VDES R-Mode 수신기로부터 전송받은 계측 데이터를 저장한다. GNSS 수신기는 선박의 이동 궤적에 대한 기준값을 결정하기 위한 장치이며 정밀한 측위를 위하여 NovAtel의 TerraStar 서비스를 활용하였다. 장비가 설치된 선박은 대산항 항만순찰선 한우리호이며, 대산지방해양수산청의 협조를 얻었다. Figs. 3과 4는 각각 한우리호와 선내에 설치된 시험용 수신장치를 나타낸다. 한우리호는 약 49톤급이며 해상 안전 관리와 해상 불법 행위 단속 등의 임무를 수행하며 대산항 일대 해역에 대한 순찰 운항을

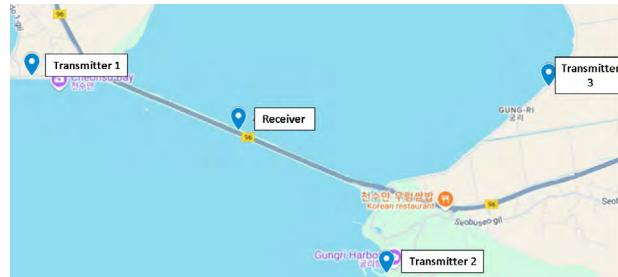


Fig. 5. Allocation of VDES R-Mode transmitter and receiver for static test.

정기적으로 수행하고 있다. 선박 운항이 수행되는 경우에 VDES R-Mode 수신기의 측정치를 수신 서버에 자동으로 저장하도록 장치를 구성하였다. 이를 통하여 장비 관리자가 없이도 해상 이동 시험의 계측 데이터를 지속적으로 획득할 수 있었다.

3. VDES R-MODE 측위 시험 결과

VDES R-Mode 정지 시험은 대산항 테스트베드에서 남쪽 방향으로 약 45 km 떨어진 서산방조제에서 수행하였다. 시험용 수신장치는 신호 수신에 장애가 없도록 Fig. 5와 같이 방조제의 중간에 설치하였다. VDES R-Mode 송신기는 수신기로부터 약 2~3 km 이내 지점에 설치되었다. 송신기와 수신기의 위치는 고정되어 있으므로 Horizontal Dilution of Precision (HDOP) (Son et al. 2019)은 1.75로 고정되어 나타났다. 3개의 송신기에 대하여 약 200분 동안 계측하였다. 정지 시험에서 얻어진 SNR은 계측 기간 동안 일정한 수준을 유지하였으며 송신국 1과 3은 약 25 dB를 가졌으며 송신국 3은 약 27 dB를 가졌다. 정지 측위는 지상파 항법(terrestrial navigation)용으로 유도된 Newton-Raphson 기반 반복적 스냅샷(iterative snap-shot) 방법을 적용하였다 (Groves 2013, Fang et al. 2020).

정지 시험은 효과적인 신호 송신을 위하여 안테나를 고소작업대에 설치하였는데 시험 참여 인원의 안전성을 고려하는 과정에서 송신 안테나의 위치에 대한 정확한 측량이 이루어지지 못하였다. 송신기 안테나의 위치에 대한 측량 오차를 고려한다면 초기 바이어스 오차를 가질 수 있다. VDES R-Mode가 보조 항법 기술로서 활용을 고려한다면 초기 주 항법 장치를 통한 거리측정 값 초기 보정을 포함할 수 있다. 초기 보정값은 최초 1분동안 계측된 거리측정값의 평균에서 GNSS로 계산된 거리측정값을 차감하여 구하였다. 초기 보정값의 크기는 매우 큰 값으로 나타났는데 이것은 공통오차인 수신기 시각오차를 포함한 것으로 판단된다. 거리측정값 초기 보정값을 적용하여 결정한 VDES R-Mode 정지 시험의 측위 결과는 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6의 좌측 그림은 수평위치오차(Horizontal Position Error, HPE)의 빈도수 히스토그램을 나타낸 것이고, 우측 그림은 누적 분포 함수(Cumulative Distribution Function, CDF)를 나타낸 것이다. CDF로부터 확인되는 95% HPE는 13.687 m로 나타났다.

VDES R-Mode 해상 이동 시험은 2023년 5월~7월 사이에 수행되었다. 시험용 수신 장치를 탑재한 한우리호는 본연의 계획에

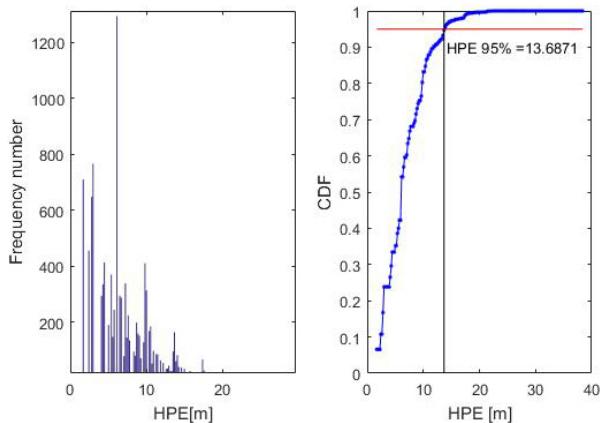


Fig. 6. Frequency number of Horizontal Position Error (HPE) and Cumulative Distribution Function (CDF) of HPE.

따라 순찰 임무를 수행하며 이동하였다. 시험용 수신 장치는 선박 운항시 전원 ON/OFF에 따라 일괄적으로 동작 개시/중지되며 동작하는 동안에 지속적으로 계측값을 저장한다. 선박 운항 시 장치 용 전원 인가 누락이나 수신 서버 소프트웨어의 작동 실패 등의 이유로 계측값의 확보 실패가 종종 발생하였다.

VDES R-Mode 송신기가 3개소에 설치되었기에 수신기 시각 오차를 포함한 평면에서의 위치 측위는 가능하였다. 그러나 정확성 열화 정도를 나타내는 HDOP는 시험영역에서 충분한 값을 가지기 어려웠다. Fig. 7은 대산항 테스트베드 해역의 HDOP를 나타낸다. 송신기 1(붉은 원)은 난지도 송신기를 나타내고, 송신기 2(붉은 사각형)은 후망산 송신기를 나타내며, 송신기 3(붉은 오각형)은 부도 송신기를 나타낸다. 한우리호의 대산항 정박지(검은색 사각형)는 HDOP 약 4.5를 가지며, 난지도 송신기와 흑어도(검은색 타원) 사이의 지점에 이르러서야 HDOP 1.0 이하를 가지게 됨을 알 수 있다.

이동 시험에서 측위는 동적 시스템을 고려하여야 한다. 동적 시스템의 운동 모델은 지표면 직각좌표계에서 정의되지만 거리 측정값에 대한 측정 방정식은 측지거리(geodesic distance)에 대하여 정의될 수 있으므로 높은 비선형성을 가진다. 이러한 비선형성을 효과적으로 처리할 수 있도록 본 측위에서는 Unscented Kalman Filter (UKF)를 적용하였다 (Ristic et al. 2003). 동적 시스템의 운동 모델은 상태방정식(state equation)으로 표현될 수 있다. 수신기 시계 오차 ρ_c 를 고려하면 Eqs. (2-4)와 같이 7차의 상태벡터를 가지는 이산시간(discrete time) 상태 방정식을 정의할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_k = [x(t_k) \ v_x(t_k) \ a_x(t_k) \ y(t_k) \ v_y(t_k) \ a_y(t_k) \ \rho_c(t_k)]^H \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_k = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{F}}_k & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\mathbf{F}}_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{F}}_k = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{v}_k 는 시스템 잡음을 나타낸다. 분산 q_a 를 가지며 가속도에

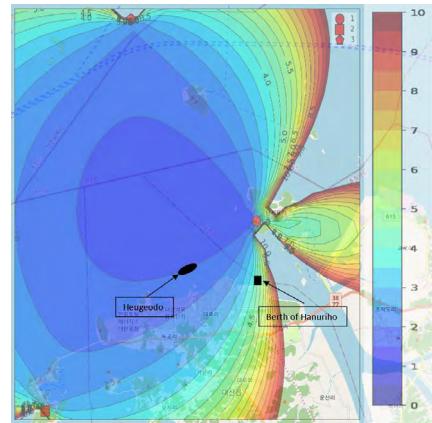


Fig. 7. HDOP with 3 transmitters at Daesan port testbed. Transmitter 1 (red circle) is Nanji-do station. Transmitter 2 (red square) is Humang station. Transmitter 3 (red pentagon) is Bu-do station.

영향을 미치는 백색잡음으로 가정할 때, \mathbf{v}_k 의 공분산 행렬은 Eq. (5)의 \mathbf{Q}_k 와 같이 구해진다. 상태벡터의 x, v_x, a_x 는 특정 국소 원점 (local origin)에 대한 East North Up (ENU) 직각좌표계에서 x 축의 위치, 속도 및 가속도를 각각 나타내며, y, v_y, a_y 는 y 축에 대한 값을 각각 나타낸다. 위첨자 H 는 전치행렬을 나타내고 T 는 샘플링 주기를 나타낸다. 아래첨자 k 는 시간 $t_k=kT$ 에 대응하는 이산시간 간 색인을 나타낸다. 이후로는 시간 t_k 대신에 k 로 나타낸다.

$$\mathbf{Q}_k = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{Q}}_k & 0 & 0 \\ 0 & \bar{\mathbf{Q}}_k & 0 \\ 0 & 0 & q_{\rho_c} \end{bmatrix}, \bar{\mathbf{Q}}_k = q_a \begin{bmatrix} T^5/20 & T^4/8 & T^3/6 \\ T^4/8 & T^3/3 & T^2/2 \\ T^3/6 & T^2/2 & T \end{bmatrix} \quad (5)$$

측정 방정식(measurement equation)은 이산시간 k 에서 송신국 ID i 에 대한 거리 측정치 $\rho_{i,k}$ 에 대하여 Eqs. (6, 7)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_k = [\rho_{1,k} \ \rho_{2,k} \ \rho_{3,k}]^H \quad (7)$$

여기서, \mathbf{p}_1 은 송신국의 지리좌표계 좌표를 나타내고, \mathbf{p}_2 는 국소 원점의 지리좌표계 좌표를 나타낸다. 국소 원점의 좌표와 상태벡터의 수신기 ENU 좌표를 이용하면 수신기 지리좌표계 좌표를 결정할 수 있다. 송신국 좌표와 수신기 좌표 사이의 거리는 Vincenty (1975)의 방법과 같은 측지거리 계산 방법을 이용하여 결정할 수 있다. $\mathbf{h}(\cdot)$ 는 수신기 지리좌표계를 계산하는 함수와 두 지리좌표계를 이용한 측지거리를 계산하는 함수를 결합한 비선형 함수를 나타낸다.

UKF를 이용한 위치 추정은 상태벡터 초기값을 비롯한 설정값을 지정함으로서 작동될 수 있다. ENU 좌표계를 위한 국소 원점은 대산항 주 항로의 중간 지점을 설정하였고 초기 상태값은 국소 원점으로 하였다. 또한 초기 속도와 가속도는 모두 0으로 설정하였다. 이 경우에 상태벡터 초기값은 영벡터가 된다. 분산 q_a 는 시행착오를 통하여 0.1로 설정하였다. UKF를 위한 α 와 β 는 경험에 따라 각각 0.001과 2로 설정하였다.



Fig. 8. Trajectories of test vessel estimated by VDES R-Mode and GNSS.

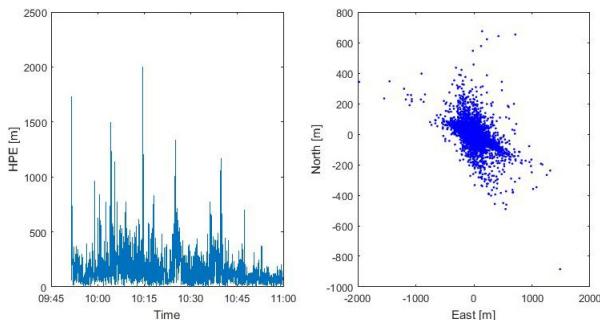


Fig. 9. HPE variations (left) and HPE distribution from sea trial at June 9, 2023.

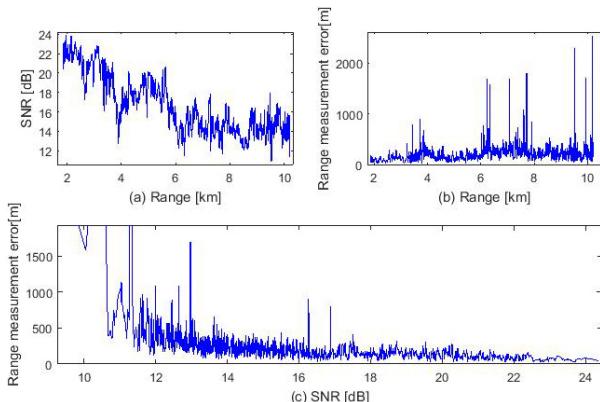


Fig. 10. SNR, range and range measurement error for Nanjido transmitter: (a) SNR to range, (b) Range measurement error to range, (c) Range measurement error to SNR.

Fig. 8은 2023년 6월 9일에 시행된 해상 시험의 VDES R-Mode 측위 결과를 나타낸다. 측위 결과는 VDES R-Mode에 의한 궤적(푸른 실선)과 GNSS에 의한 궤적(붉은 실선)으로 비교하여 나타내었다. 이동 시에 수신기와 송신국 사이의 상대배치에 대한 직관을 위하여 3개의 송신국을 직선(검은 실선)으로 연결하여 나타

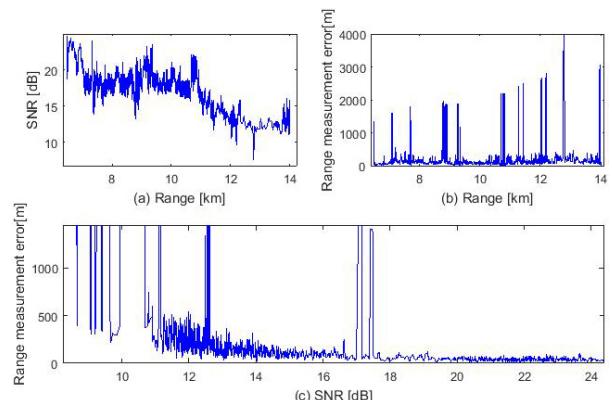


Fig. 11. SNR, range and range measurement error for Humangsan transmitter: (a) SNR to range, (b) Range measurement error to range, (c) Range measurement error to SNR.

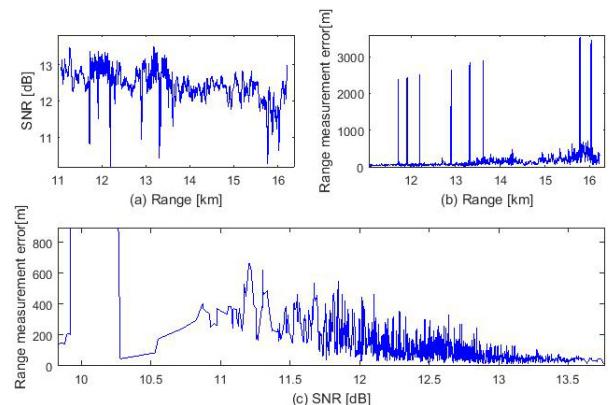


Fig. 12. SNR, range and range measurement error for Budo transmitter: (a) SNR to range, (b) Range measurement error to range, (c) Range measurement error to SNR.

내었다.

시험선은 대산항 정박지에서 출항하여 대산항 주항로를 시계 방향으로 선회하여 약 70분간 운항하였다. 대산항 정박지와 난지도 송신국 안테나 사이에 있는 난지도 남측 구릉 지대는 VDES R-Mode 전파의 송신을 방해한다. 이로 인하여 시험선이 정박지에서 출발하여 난지도 송신국이 나타나는 지점까지 VDES R-Mode 수신기는 적절한 거리계측값을 수신하지 못하였다. 난지도 송신국의 신호가 계측되는 지점은 난지도 송신국과 후망산 송신국을 연결한 직선과 거의 일치한다. Fig. 9는 시험으로부터 구해진 수평위치오차의 시간 변화 추이와 평면 상의 분포를 나타낸다. 수평위치오차 분포로부터 구해지는 95% HPE는 492.79 m로 확인되었다. 정지 시험에 의한 위치오차 결과에 비해 약 30배의 큰 위치오차를 얻었다.

Fig. 10은 난지도 송신국 신호에 대한 SNR, 송-수신기 거리, 그리고 거리계측값 오차를 나타낸다. Fig. 10a는 송-수신기 거리에 대한 SNR의 변화 추이를 나타내고, Fig. 10b는 송-수신기 거리에 대한 거리측정값 오차의 변화 추이를 나타낸다. 그리고 Fig. 10c는 SNR에 대한 거리계측값 오차의 변화 추이를 나타낸다. Figs. 10a

와 10c는 명확한 경향성을 보여준다. Figs. 11과 12는 각각 후망산 송신국 신호와 부도 송신국 신호에 대한 변화 추이를 나타낸다. 각각은 난지도 송신국 신호와 동일한 경향성을 가진다. 다만 후망산 송신국의 높은 고도 덕분에 송-수신기 거리가 11 km일 때까지 SNR이 크게 감소하지는 않는다. 부도 송신국 신호는 중간 수준의 안테나 고도와 상대적으로 가장 긴 전파경로로 인하여 전체적으로 낮은 SNR을 가진다. 그럼에도 불구하고 전파경로상의 지상 장애물 부재로 낮은 SNR에서도 높지 않은 거리측정값 오차를 가짐을 알 수 있다. Figs. 10c, 11c, 12c는 송-수신기 거리의 증가에 따라 이상치(outlier)로 분류될 수 있는 거리측정값 오차 크기가 점차적으로 증가하는 것을 보여준다. 또한 발생 지점은 SNR의 국부 최소와 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 만약 충분한 수량의 송신국을 확보한다면 거리측정값 이상치는 적절히 제거될 수 있음을 나타낸다. 다만 송신국과의 거리의 증가가 SNR의 감소를 유발하므로 SNR의 단순한 감소만을 고려하여 이상치를 제거한다면 거리측정값의 수량이 부족하여 성능 개선의 효과를 얻지 못할 수 있다.

2023년 5월~7월 사이에 매달 약 6회 계측 데이터가 성공적으로 획득되었으며 대산항 주 항로에서 유의미한 시간동안 운항한 횟수는 매달 약 2회로 관찰되었다. 계측된 측위 결과는 5월 22일에 605.37 m, 5월 30일에 597.94 m, 6월 8일에 422.06 m, 7월 3일에 549.23 m, 그리고 7월 4일에 489.47 m의 95% HPE를 얻었다. 총 6회의 측위에 대해 평균 95% HPE는 526.15 m로 나타났다. 추가적으로 거리측정치 이상치 제거를 위하여 SNR 임계값을 적용하여 측위를 수행하였다. 기존 SNR 임계값을 적용치 않은 결과와 비교하여, 측위 오차의 증가 및 감소가 구간에 따라 다르게 나타났다. 그러나 총 6회의 평균 95% HPE는 528.16 m로 나타났으며 측위 성능은 유사한 것으로 나타났다. 다만 만약 송신국의 수량이 증가한다면 SNR 임계값 적용은 성능 개선에 기여할 것으로 예상할 수 있다.

대산항은 유조선을 포함하는 대형 화물선이 주로 다니는 항구이며 인근에 많은 해상 정박지를 가지고 있다. 시험선이 운항되는 경로에 정박한 대형 선박은 난지도 및 부도와 같은 높지 않은 안테나에 의한 VDES R-Mode 신호의 수신을 방해한다. 거리측정값의 이상치는 이러한 해상 구조물의 방해에 의해 일어날 수 있다. 후망산 송신국의 전파 경로는 대산항 주 항로에 이르기까지 대부분 육상 경로를 포함한다. 특히 황금산(충남 서산시 대산읍 독곶리 산 230-2)은 정상 고도가 152 m로 넓은 음영 지역을 발생시킨다.

VDES R-Mode 정지 시험 및 해상 이동 시험을 통하여 거리측정치를 수집하고 측위 정확도를 도출하였다. 정지 시험을 통하여 확인된 VDES R-Mode 측위 정확도는 해상 이동 시험에서 재현되지 못하였다. 이것은 송신국 안테나 고도의 한계, 송신국과 수신기 사이의 지형에 의한 방해, 그리고 송신국과 수신기 사이의 대형 이동 선박에 의한 방해에 의한 것으로 판단된다.

4. 결론

지상파 항법시스템은 위성항법시스템의 취약성을 보완할 수

있는 방안으로 논의되고 있다. VDES R-Mode는 초단파 대역을 사용하는 해상 데이터 통신 시스템인 VDES의 기능을 확장한 기회신호 항법 기술이다. 이 연구에서는 충청남도 서산시 대산항을 중심으로 VDES R-Mode에 대한 정지 시험 및 해상 이동 시험을 수행한 결과를 나타내었다. 정지 시험은 송신국 3국과 명확한 시계선이 확보된 수신기를 이용하였다. 거리측정값에 대한 초기 보정을 수행하여 95% HPE는 13.687 m를 획득하였다. 해상 이동 시험은 동일하게 송신국 3국(난지도, 후망산, 부도)을 설치하고 대산항 주 항로에서 해상 시험선을 통하여 수행하였다. 총 6회의 이동 시험에 대하여 평균 95% HPE는 526.15 m를 얻었다.

해상 이동 시험에 대한 결과는 정지 시험의 결과에 비하여 높은 측위 오차를 보여주었다. 정지 시험은 통제 가능한 환경에서 송신기 및 수신기 안테나를 적절한 고도에 설치하고 전파 경로상의 장애물을 관리하였다. 이에 비하여 해상 이동 시험에서는 충분한 고도의 해안 시설 확보의 어려움으로 송신국과 수신기 사이에 명확한 시계선이 확보되지 못하였다. 가려진 시계선은 이동 측위의 성능을 저하시켰다. 정지 시험과 해상 이동 시험에서 거리계측값에 대한 초기 보정을 수행하였다. 초기 보정 후의 거리계측값과 측위 결과는 지속적인 편향 오차 없이 안정적인 측위 성능을 보여 주었다. 우리나라 서해안의 지형적인 특성 등에 의한 제약을 제외한다면 VDES R-Mode는 해상용 보조 전파 항법 기술로 활용되는 가능성을 보여준다. 또한 상대적으로 가벼운 송신국 시설 요구를 고려한다면, 다수의 송신국 설치를 통하여 HDOP의 개선 및 시계선 제약의 극복을 추구할 수 있다. 이를 통하여 개선된 이동 측위 성능을 달성한다면 VDES R-Mode는 해상 보조 항법 시스템으로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 더불어 지상 송신국을 통한 VDES R-Mode 이동 시험 경험이나 측위 데이터는 향후 VDE-SAT 기반 VDES R-Mode 기술이나 지상 및 위성을 결합한 VDES R-Mode 기술 개발 등을 추진할 때 기초 데이터로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST) funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (RS-2024-00407003).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K. Seo and T. H. Fang; methodology, Y. Kim and Y. Han; writing-original draft preparation and visualization, T. H. Fang; writing-review and editing, K. Seo; project administration, K. Seo.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Bronk, K., Koncicki, P., Lipka, A., Niski, R., & Wereszko, B. 2021, Concept, signal design, and measurement studies of the R-mode Baltic system, *Journal of The Institute of Navigation*, 68, 465-483. <https://doi.org/10.1002/navi.443>
- Fang, T. H., Kim, Y., Park, S. G., Seo, K., & Park, S. H. 2020, GPS and eLoran Integrated Navigation for Marine Applications Using Augmented Measurement Equation Based on Range Domain, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 2349-2359. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0287-y>
- Fang, T. H., Han, Y., Son, P., Kim, Y., & Seo, K. 2022, Development status of a Korean R-Mode Navigation System testbed for port entry and departure navigation performance requirement, In Proceedings of the 2022 Korea Conference of Navigation and Port Research, Busan, Korea, 10-11 Nov 2022, pp.209-211. <https://koreascience.kr/article/CFKO202221372006683.page>
- Groves, P. D. 2013, Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd ed. (Boston: Artech House), pp.481-487.
- Han, Y., Son, P.-W., Ahn, J. M., Seo, K., & Fang, T. H. 2024, Development of Korean MF R-Mode Test-bed system for resilient PNT in maritime domain, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 13, 467-473. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2024.13.4.467>
- IALA 2020, G1139, The technical specification of VDES, Edition 4.0, June 2020, ENAV
- IALA 2024, G1158, VDES R-Mode, Edition 2.0, December 2024, ENAV
- Johnson, G., Dykstra, K., Cassidy, R., & Spilsbury, J. 2024, VDES R-Mode test bed in Long Island Sound, In Proceedings of the 2024 International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2024), Baltimore, Maryland, USA, 16-20 Sep 2024, pp.523-538. <https://doi.org/10.33012/2024.19681>
- Pettersen, Ø. B., IJssel, J. van den, & Rasmussen, S.-I. 2025, Characteristics of experimental VDE-SAT ranging signals and system performance analysis for critical navigation, *Engineering Proceedings*, 88, 60. <https://doi.org/10.3390/engproc2025088060>
- Raulefs, R. 2021, VDES R-Mode: From ranging analysis to positioning trials, In Proceedings of R-Mode Baltic Project Conference, March 2021 (online by COVID-19, not published).
- Ristic, B., Arulampalam, S., & Gordon, N. 2003, Beyond the Kalman filter: Particle filters for tracking applications (Boston: Artech House), pp.28-31.
- Ryu, H. J., Jung, Y. H., Kim, W. Y., & Fang, T. H. 2021, Design

and implementation of propagation Time-of-Arrival estimator for VDES R-Mode, In Proceedings of the 2021 IPNT Conference, Gangneung, Korea, 3-5 Nov 2021, pp.63-67. <https://ipnt.or.kr/2021proc/169>

Son, P.-W., Han, Y., Lee, S., & Park, S. 2019, Development of the simulation tool to predict a coverage of the R-Mode system, *Journal of Navigation and Port Research*, 43, 429-436. <https://doi.org/10.5394/KINPR.2019.43.6.429>

Vincenty, T. 1975, Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations, *Survey Review*, 23, 88-93. <https://doi.org/10.1179/sre.1975.23.176.88>

Wirsing, M., Dammann, A., & Raulefs, R. 2021, VDES R-Mode performance analysis and experimental results, *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 41, 158-177. <https://doi.org/10.1002/sat.1424>



Tae Hyun Fang received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University, Busan, Korea, in 1994, 1998, and 2003, respectively. From 2004 to 2005, he was a visiting scholar at the Intelligent Transportation Research Center, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, United States. Since 2005, he has been with Ocean and Maritime Digital Technology Research Division, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Republic of Korea. His research interests include sensor fusion systems, PNT technology, and target tracking filter.



Younghoon Han received his B.S. and M.S. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea, in 2010 and 2012, respectively. He is currently a senior research engineer with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Daejeon, Republic of Korea. His research interests include Resilient PNT technologies for maritime application especially as an eLoran and an R-Mode.



Youngki Kim received his B.S. and M.S., and Ph.D. degrees in Marine Information System Engineering from Mokpo National Maritime University, Republic of Korea, in 2004, 2011 and 2024, respectively. He is currently a research engineer with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering

(KRISO), Daejeon, Republic of Korea. His research interests include resilient PNT technologies, eLoran System and integrated navigation system.



Kiyeol Seo is currently a principal researcher with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO). He received his Ph.D. degree in Maritime Information Measurement Engineering from Mokpo National Maritime University, Republic of Korea, in 2003. He has been involved in the development of advanced technology for terrestrial radionavigation system. His research interests include resilient PNT system and integrity monitoring, GNSS reflectometry (GNSS-R), and precise positioning technology for maritime applications.