

Analysis of Range Measurement Based on MF DGNSS Infrastructures

Pyo-Woong Son^{1,2}, Younghoon Han¹, Kiyeol Seo¹, Tae Hyun Fang^{1†}

¹Maritime Safety and Environmental Research Department, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

²Ship and Ocean Engineering Major, University of Science and Technology, Daejeon 34113, Korea

ABSTRACT

As location-based services using the Global Navigation Satellite System (GNSS) are diversified, concerns about the vulnerability of GNSS to radio disturbance and deception are also growing. Accordingly, countries that own and operate GNSS, such as the United States, Russia, and Europe, are also developing additional navigation systems that can compensate for GNSS' weaknesses. Among them, an R-Mode system that transmits navigation signals using an infrastructure that transmits differential GNSS (DGNSS) information using signals from the medium frequency band currently in operation is being developed in Europe and Korea. Since 2020, Korea has improved four DGNSS transmission stations, including Chungju, Eocheongdo, Palmido, and Socheongdo, to transmit R-Mode signals and test navigation performance in some parts of the West Sea. In this paper, we intend to establish a testbed for measuring the distance of R-Mode signals currently being transmitted and analyze the results. It is confirmed that the distance measurement performance varies depending on the antenna type, diurnal variation, and propagation path of the signal.

Keywords: R-Mode, MF DGNSS, navigation, GNSS, positioning

1. INTRODUCTION

중파 대역의 전파신호를 이용해 범지구적 위성항법시스템의 보정정보를 송출하는 Medium Frequency Differential Global Navigation Satellite System (MF DGNSS) 인프라는 사용자에게 보다 정확한 위치 정보를 제공하는 중요한 수단으로 기능해왔다 (ITU 2006). 하지만 약한 신호 세기로 인한 위성항법시스템 (GNSS)의 취약성에 대한 우려가 높아지면서, GNSS 사용이 어려울 때 위치 정보를 제공받을 수 있는 백업항법시스템에 대한 다양한 고민이 이어지고 있다. 가장 대표적인 백업항법시스템은 100 kHz 대역의 펄스 신호를 이용하는 eLoran 시스템이 있고, 미국, 영국, 한국, 중동지역 등 많은 곳에서 활용 가능성을 검토하

거나 실제 운용을 목표로 구축하고 있다 (Offermans et al. 2015, Kim et al. 2022). 하지만 eLoran 시스템은 신호 송출을 효율적으로 하기 위해서는 높은 높이의 안테나가 필요하고, 이에 따라 넓은 안테나 부지가 필요하기 때문에 추가적인 시스템 구축에 어려움이 있다 (Son et al. 2020). 그에 반해 중파 대역의 전파신호를 사용하는 MF DGNSS 인프라를 통해 연속파를 송출하여 거리를 측정하는 MF Ranging Mode (R-Mode) 기술은 이미 구축된 인프라를 활용하기 때문에 상대적으로 쉽게 구축이 가능하다는 장점이 있다. 그렇기 때문에 유럽에서도 관련 기술에 대한 연구 개발이 활발히 이뤄지고 있다 (Gewies et al. 2020, Wirsing et al. 2021, Grundhöfer et al. 2021).

한국의 경우, 2020년부터 선박해양플랜트연구소가 4개의 MF DGNSS 인프라 (충주, 어청도, 소청도, 팔미도 기준국)를 MF R-Mode 신호 송출이 가능하도록 시설을 개량하여 서해 일부 지역에서 항법시스템으로의 활용 가능성을 확인하고자 연구과제를 수행하고 있다. 기존의 MF DGNSS 인프라는 각 기준국마다 약 300 kHz 주파수 내외의 고유한 중심주파수를 기준으로 500 Hz 대역폭 이내에서 Minimum Shift Key (MSK) 변조된 신호를 송출한다. MF R-Mode 신호는 MSK 신호와의 간섭을 최대한 줄이기 위해 대역폭 범위 내에서 중심주파수로부터 가장 멀리 떨어진 ±

Received Aug 12, 2022 Revised Aug 29, 2022 Accepted Sep 14, 2022

†Corresponding Author

E-mail: thfang@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3625 Fax: +82-42-866-3609

Pyo-Woong Son <https://orcid.org/0000-0002-6834-9247>

Younghoon Han <https://orcid.org/0000-0002-0054-3094>

Kiyeol Seo <https://orcid.org/0000-0002-1462-6720>

Tae Hyun Fang <https://orcid.org/0000-0001-7680-9875>

250 Hz 지점에서 연속과 형태로 송출되도록 설계되었다. 최근 연구과제 초기에 계획한 4개의 모든 MF DGNSS 기준국에서 MF R-Mode 신호 송출을 위한 작업이 마무리되었다.

위에서 언급한 연구과제에서는 MF R-Mode 신호를 이용해 GNSS 사용이 어려울 시 해상 사용자가 95%의 정확도로 10 m 이내의 위치를 결정할 수 있도록 핵심 기술을 개발하는 것이 목표이다. 정해진 송신국 위치, 신호 출력 등과 같은 제한된 환경 내에서 측위 정확도를 높이기 위해서는 사용자 측면에서의 다양한 기술 개발이 필요하다. 그러기 위해서는 먼저 MF R-Mode 신호를 이용한 거리 측정치에 대한 충분한 분석이 가능하도록 신호 수집 환경을 갖추는 것이 중요하다. 현재 선박해양플랜트연구소가 대산항에 설치한 테스트베드에는 충주, 어청도, 소청도, 팔미도 기준국으로부터 MF R-Mode 신호를 수신할 수 있도록 관련 시설이 구축되어 있다.

본 논문에서는 대산항 테스트베드에서 MF R-Mode 신호를 이용한 거리측정치를 수집하고 분석하였다. 안테나로부터 얻어지는 아날로그 신호를 디지털화 해주는 Analog Digital Converter (ADC)를 이용해 원시데이터를 수집하고 거리측정치 성능을 비교하였다. 또한 안테나 종류, 신호가 전파하는 지표 환경, 그리고 야간의 전리층 소멸로 인한 공간파 영향 등이 거리측정치 성능에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. MF R-MODE OVERVIEW

2.1 MF R-Mode Signal Specification

기존의 MF DGNSS 인프라에서 송출하는 MSK 변조 방식의 신호 $s_{MF-DGNSS}(t)$ 는 Eq. (1)과 같다 (Johnson et al. 2014).

$$s_{MF-DGNSS}(t) = A \sin \left(\left(w_c + b_k \frac{\pi}{2T_s} \right) (t - kT_s) + \phi_k \right) \quad (1)$$

여기서, A 는 신호 전력의 크기, $w_c (= 2\pi f_c)$ 는 각 주파수, f_c 는 중심 주파수, b_k 는 k 번째 이진 비트, $\frac{1}{T_s}$ 는 데이터 전송률, ϕ_k 는 위상의 연속성을 유지하기 위한 것으로 $\left\{ 0, \pm \frac{\pi}{2}, \pi \right\}$ 중 하나의 값을 갖는다.

MSK 변조 신호의 전력밀도를 살펴보면, 데이터 전송률에 따라 f_c 로부터 특정 이격거리마다 해당 주파수의 신호전력이 급격히 낮아진다. 200 bps의 데이터 전송률을 갖는 국내 MF DGNSS 인프라의 경우, $f_c \pm 150$ Hz, $f_c \pm 250$ Hz, $f_c \pm 350$ Hz 등에서 급격히 낮아진다. MF R-Mode 신호의 주파수가 f_c 에서 멀어질수록 MSK 신호와의 간섭이 줄어들지만, MF DGNSS 인프라는 송출하는 신호의 대역폭이 500 Hz 이내 이어야 하기 때문에 $f_c \pm 250$ Hz에서 MF R-Mode 신호가 송출되도록 설계되었다. 유럽의 경우, MSK 신호의 데이터 전송률이 100 bps이기 때문에 중심주파수로부터 ± 225 Hz 만큼 떨어진 곳에서 송출되도록 설계된 것으로 알려져 있다.

국내 MF R-Mode 신호는 Eq. (2)와 같이 연속과 형태이기 때문에 이론적으로는 신호의 대역폭 조건을 만족시키지만, 실제 송출되는 신호의 경우 이를 만족시키지 못할 가능성이 있기 때문에 관련하여 추가적인 연구와 테스트를 통해 올바른 정책 결정이 요

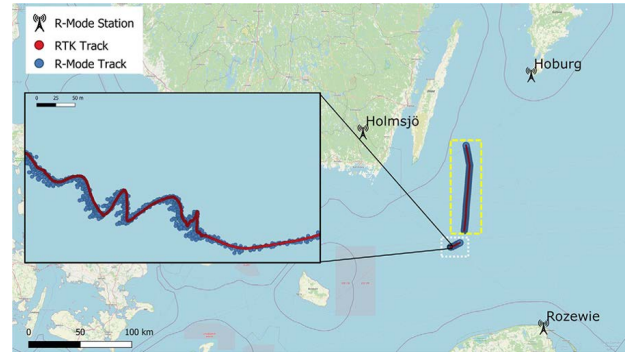


Fig. 1. Geometry of Baltic R-Mode transmitting station and user (Fig. 5 of Grundhöfer et al. 2020).

구되는 상황이다.

$$s_{R-Mode}(t) = A \sin(2\pi(f_c \pm 250)t) \quad (2)$$

2.2 Recent Studies of MF R-Mode

MF R-Mode 신호는 연속파이기 때문에 신호가 송출되는 순간부터 수신되는 순간까지의 거리에 따라 수신되는 신호의 위상이 변화하고, 이를 이용해 송출지점과 수신지점 간의 거리를 추정할 수 있다. 만약, 사용자가 3개 이상의 MF R-Mode 신호를 수신할 수 있으면 GNSS와 같은 방식으로 자신의 절대위치를 계산할 수 있기 때문에, GNSS와 함께 신뢰할 수 있는 위치정보를 제공할 수 있는 주요 인프라 중 하나로 주목받고 있다.

유럽에서는 GNSS의 취약성에 대한 대응 방안의 하나로 MF R-Mode 시스템을 이용한 항법시스템의 가능성을 검토하는 Accessibility for Shipping, Efficiency Advantages and Sustainability (ACCSEAS) Project가 수행되었다. ACCSEAS Projects는 북해 지역에서의 항법위험요소를 최소화하고 해양접근성을 높일 수 있도록 EU INTERREG IVb의 지원을 받아 3년간 수행되었고, MF R-Mode에 대해서는 15가지의 방안을 검토하고 최종적으로 4개 방안을 제안한 바 있다 (Johnson & Swaszek 2014).

ACCSEAS Projects의 결과물을 바탕으로 EU Interreg Baltic Sea Region Programme (Baltic R-Mode)에서는 2017년 10월부터 2021년 12월까지 2개의 R-Mode Baltic Projects를 수행하였다 (R-Mode Baltic 2022). R-Mode Baltic Projects에서는 MF R-Mode 뿐만 아니라 Very high frequency Data Exchange System (VDES)를 이용하는 R-Mode 시스템까지 개발하였고, 실제로 해상에서의 실험결과를 통해 GNSS와는 독립적으로 위치 계산을 수행할 수 있음을 보였다 (Wirsing et al. 2021, Grundhöfer et al. 2021). 하지만 Baltic R-Mode에서의 결과는 Fig. 1과 같이 사용자와 신호원 간의 기하학적 배치가 좋아야 하고 공간파의 영향이 무시될 수 있는 주간 시간에만 10 m (95%)의 측위 정확도 달성에 대한 가능성을 확인했다는 한계가 있다. 특히 야간의 공간파 영향은 MF R-Mode 신호의 거리측정치에 대한 정확성을 매우 크게 떨어뜨리기 때문에 현재까지 많은 연구자들이 이 문제를 해결하기 위해 노력하고 있지만 효과적인 대안이

제시되지 못했다. 이에 Baltic R-Mode에서는 MF DGNSS 주파수 영역에 대한 신호를 전반적으로 재설계하자는 의견도 제시된 바 있다 (Grundhöfer et al. 2020).

3. MAIN PARAMETERS FOR MF R-MODE RANGE MEASUREMENT

3.1 Receiving Antenna

사용자 수신기는 수신한 MF R-Mode 신호의 위상을 측정하여 송신국과 사용자 간의 거리를 계산한다. MF R-Mode 신호는 지표를 통해 전파하는 지상파이기 때문에 수신 안테나의 특성에 따라 측정값이 달라질 수 있다. 현재 가장 널리 이용되고 있는 DGNSS 안테나는 주로 Furuno사, Hemisphere사의 제품 등과 같이 H-field 방식으로 제작된 제품으로, GNSS 신호와 DGNSS 신호를 동시에 수신할 수 있도록 설계되어 있기 때문에 많은 선박에서 사용하고 있다. 또한 일부 선박에서는 DGNSS 신호만을 수신할 수 있는 길이가 긴 형태의 E-field 타입의 안테나를 사용하기도 한다. H-field 안테나는 무선전파 신호의 자기장을 이용하여 신호를 측정하고 E-field 안테나는 무선 전파의 전기장을 이용하여 신호를 측정하기 때문에, 다양한 신호 수신환경에서 나타나는 특성이 다르게 발현될 수 있어 관련 연구가 필요한 상황이다.

또한, 안테나에 외부전원을 추가적으로 공급하여 사용하는 방식의 액티브 안테나는 패시브 안테나에 비해 신호 이득이 높다는 장점이 있지만, 잡음이 큰 환경에서는 오히려 잡음으로 인한 신호 왜곡이 심화되는 문제도 있다. MF R-Mode 신호의 경우 야간에 전리층이 소멸되면서 반사되는 공간파가 지표파에 비해 더 높은 세기로 수신되는 경우도 있어서 안테나 특성에 따른 이용에 유의할 필요가 있다.

3.2 Environment of the Signal Propagation Path

전파환경의 변화는 날씨와 같은 일변화와 계절 변화 등과 같은 자연적인 현상에 따라 달라지기도 하고, 대량의 전자파를 방출하는 발전소나 공장과 같은 인위적인 변수 등으로 인해 달라지기도 한다. 비가 오거나 눈이 오게 되면, 대기 중 습도나 지표의 유효대지도전율이 달라지면서 전파의 전파속도가 달라진다고 알려져 있고, 고도와 같은 지형에 따른 변수도 전파경로의 유효전파거리에 큰 영향을 미쳐 지상파의 거리측정치에 영향을 크게 미친다고 알려져 있다 (Son et al. 2019). 또한 계절에 따라 전파경로상의 대기잡음이 변하면서 지상파 신호의 신호대잡음비가 달라지기 때문에 마찬가지로 거리측정치에 영향을 주는 주요한 요소이다 (Rhee & Seo 2013).

지표를 통해 전파하는 지상파를 이용해 거리를 측정하는 지상파 항법시스템의 경우, 위에서 언급한 바와 같이 전파 경로의 다양한 환경 변화에 따라 거리측정치가 변화하기 때문에, 이 변화량을 예측하고 보정하는 것이 중요하다. 대표적으로 지상파를 이용한 시스템인 eLoran의 경우, 다양한 환경 변화로 인한 전파 지연요소를 예측하는 것이 현실적으로 어렵기 때문에 서비스 영역

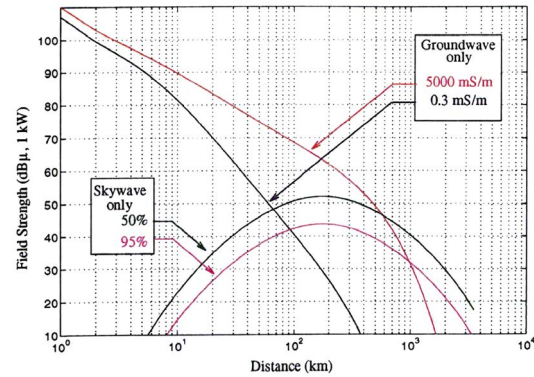


Fig. 2. Curves of groundwave and skywave field strength against distance (Fig. 6.1 of Poppe 1995).

에서의 전파시간 지연량을 사전에 실측하여 지도 형태로 배포하고, 실시간으로 변화하는 추가적인 지연량은 근처의 보정기준국에서 실시간으로 측정하여 별도의 데이터채널을 통해 보상할 수 있도록 설계되어 있다 (Rhee et al. 2021). MF R-Mode 신호도 지상파 신호를 이용하기 때문에 정확한 거리측정을 위해서는 전파 경로에 의한 영향을 최소화할 수 있는 방법을 연구할 필요가 있다.

3.3 Skywave Effect

지상에서 송출한 신호는 지표를 따라 전파하기도 하지만, 상공에서 반사되어 지표로 도달하기도 한다. 중파 대역의 신호는 태양활동이 활발한 주간에는 전리층에 흡수되어 지표로 반사되는 신호세기가 매우 약하지만, 야간에는 전리층 일부가 소멸되어 중파 대역의 신호가 반사되는 현상이 나타난다. 송신 안테나로부터의 거리가 멀어질수록 지표파는 신호 감쇄 크기가 커지기 때문에, 전리층에서 반사되어 수신되는 공간파의 신호 세기가 더 높게 수신되는 경우도 발생할 수 있다. Fig. 2에 따르면 신호전파거리가 약 100 km 이상일 경우 공간파 영향으로 인해 거리측정치의 부정확성이 매우 심화될 것으로 예상된다 (Poppe 1995).

eLoran 시스템의 경우, 이 공간파 영향을 최소화하기 위해 연속파가 아닌 펄스 형태의 신호가 설계되었다. 하지만 MF R-Mode 시스템은 연속파를 사용하기 때문에 공간파와 지표파가 합성된 신호를 수신하게 되면 MF R-Mode 신호를 이용한 거리 측정이 부정확해지는 한계가 있다. Baltic R-Mode에서 MF R-Mode 신호를 이용해 계산한 위치의 정확도는 낮의 경우 12 m (95%), 밤에는 63.7 m (95%)로 나타났듯이, 공간파 영향으로 인한 거리측정치의 정확도 저하는 많은 개선이 필요한 부분이다.

4. EXPERIMENTAL RESULTS AT THE TESTBED

4.1 Experimental Set up

MF R-Mode 신호를 상시 수집하고 분석할 수 있는 테스트베

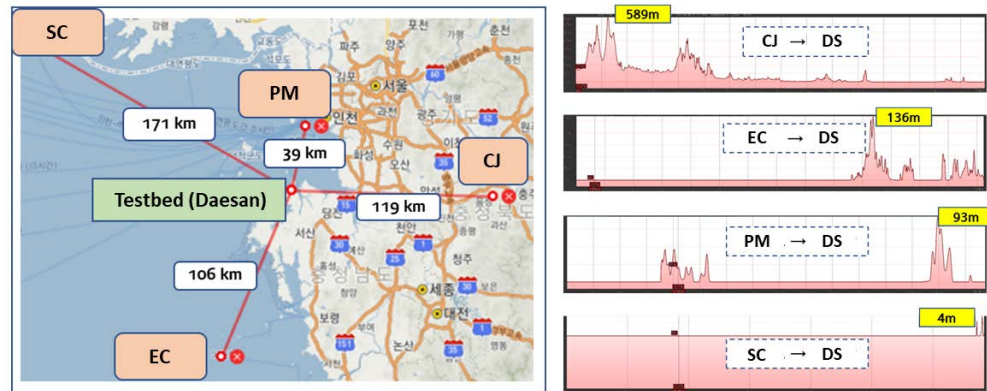


Fig. 3. Geometry of Korean MF R-Mode transmitting station and the Daesan testbed (left), The topographic characteristics of the propagation path of each MF R-Mode signal (right).

Table 1. MF R-Mode ranging results for 1-hour campaign at Daesan testbed.

Antenna type	Active						Passive					
Time	Day			Night			Day			Night		
Transmitter	CJ	EC	PM	CJ	EC	PM	CJ	EC	PM	CJ	EC	PM
Precision (1 σ , unit: m)	6.46	5.63	1.98	30.24	9.91	1.89	9.16	16.65	4.35	23.54	17.20	3.85

드를 대산항에 구축하고 중파 대역의 신호를 수신할 수 있는 액티브/패시브 안테나, 그리고 MF R-Mode 수신기를 설치하였다. 수신기는 Serco 사의 MFR-1a 제품을 사용하였으며 안테나는 narda 사의 액티브 E-field 안테나인 RA-01 모델, 위성안테나 전자사의 패시브 E-field 안테나인 R20MK-40.2LW 모델을 사용하였다. Furuno 사의 H-field 액티브 안테나는 안테나 이득이 30 dB로 미약한 신호를 수신하는데 유리하지만, Serco사의 MFR-1a 수신기를 사용할 경우 안정적인 데이터 취득이 어려운 현상이 발견되어 본 논문의 연구결과에서는 배제하였다. MFR-1a 수신기는 285–325 kHz의 통과대역을 갖는 필터를 거친 후 16 bit 분해능의 ADC와 GNSS 혼련된 루비듐을 이용하여 1 MHz로 샘플링 된 데이터를 이용해 MF R-Mode 신호를 분석한다.

4.2 MF R-Mode Transmitters and the Testbed Geometry

대산항 테스트베드 (DS)에서는 Fig. 3과 같이 4개 기준국으로부터 신호를 수신하는데, 각 기준국에서의 MF R-Mode 신호가 전파하는 환경이 지형적으로 매우 다양하다. 충주 기준국 (CJ) 신호의 경우 모든 전파경로가 육지로 되어있으며 중간에 고도가 높은 산악지형을 통과하는 특징이 있다. 여청도 기준국 (EC)의 경우 전파 경로의 길이는 충주 기준국과 유사한 환경이지만, 전파 경로가 바다와 육지가 혼합되어 구성된다. 팔미도 기준국 (PM)의 경우 테스트베드까지의 거리가 매우 가깝고 섬을 제외하고는 모두 바다를 통해 신호가 전파하는 특징이 있다. 소청도 기준국 (SC)의 경우 가장 길이가 긴 전파경로로 구성되어 있으며 테스트베드까지 모두 바다를 거쳐 신호가 전파하게 된다. 4개 기준국과 대산항 테스트베드 간의 Horizontal Dilution of Precision (HDOP)은 1.01이다.

4.3 Range Measurement Analysis

이번절에서는 대산항 테스트베드에서 수신 가능한 4개의 MF R-Mode 신호 중 충주, 여청도, 팔미도 기준국의 신호를 수집하여 분석하였다. 소청도 기준국 신호의 경우, 전파 경로의 거리가 멀어 본 논문에서의 수신기 및 안테나를 이용해서는 유의미한 거리측정치를 생성하기 어렵고, 안테나 이득이 더 높은 것을 사용하거나 수신기에서의 이득이 보다 높게 설정될 수 있어야 한다. MF R-Mode 신호를 이용한 거리측정치에 영향을 줄 수 있는 안테나 종류, 시간대 (주간/야간), 전파경로 환경 등에 따라 데이터를 각각 1시간씩 수집하였고 결과를 정리하면 Table 1과 같다.

액티브 안테나의 경우 2021년 11월 27일 오후 1시 15분부터 오후 2시 15분까지 주간 데이터를 사용하였고, 야간의 경우에는 2021년 11월 27일 오후 9시 30분부터 오후 10시 30분까지의 데이터를 사용하였다. 패시브 안테나의 경우 2022년 4월 28일 오후 4시 15분부터 오후 5시 15분까지의 주간 데이터를 사용하였고, 2022년 4월 28일 오후 9시 50분부터 오후 10시 50분까지의 야간 데이터를 사용하였다. 데이터 분석기간을 늘렸을 경우에도 일반성을 잃지 않고 1시간 동안의 데이터 분석 결과와 유사하였다.

액티브 안테나를 사용하면 안테나 이득으로 인해 수신기에서 수신하는 신호의 전력이 더 높아지고, 거리측정치의 정밀도가 패시브 안테나를 사용할 때보다 더 높아지는 것처럼 보인다. 하지만 야간의 경우 액티브 안테나를 통해 측정된 거리측정치의 성능 열화가 패시브 안테나를 이용할 때보다 두드러지는 것을 볼 수 있다. 이는 야간에 소멸된 전리층으로 인해 수신기에서 수신되는 공간파의 신호 세기가 커지고, 안테나 이득으로 인해 공간파의 영향력도 커지기 때문인 것으로 추정된다.

또한 기선거리에 따른 공간파 영향도 확인할 수 있다. Fig. 2에 따르면 유효대지도전율 0.03 mS/m을 갖는 지표면을 거쳐 전파

하는 신호의 경우 기선거리가 60 km 이상일 때 공간과 신호의 세기가 지표파보다 커질 수 있기 때문에 거리측정 성능이 열화될 수 있다. 실제로 119 km의 지표로 구성된 기선거리를 갖는 충주 송신국 신호의 경우, 다른 송신국 신호들보다 훨씬 공간과 영향이 두드러지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 지표면과 해수면을 혼합한 전파경로에 대해서는, 어청도 송신국 신호 (기선거리: 106 km)의 공간과 영향이 팔미도 송신국 신호 (기선거리: 39 km)의 공간과 영향에 비해 훨씬 큰 것을 확인할 수 있다. 특히, 팔미도 송신국 신호의 경우 기선거리도 짧고 대부분 해상을 지나기 때문에 공간과 영향을 거의 받지 않는 것을 확인할 수 있다.

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 MF DGNSS 인프라를 이용해 거리를 측정할 수 있도록 설계된 MF R-Mode 신호를 수집 및 분석할 수 있는 테스트베드를 구축하고, 안테나 종류, 시간대 (주간/야간), 전파경로 환경에 따라 분석하였다. MF R-Mode 신호의 거리측정치는 지형, 일변화 등과 같이 전파경로상의 환경에 따라 정밀도가 크게 변화하는 것을 확인하였다. 야간에 공간과 영향에 대한 해결방안을 찾을 수 있다면, GNSS 사용이 어려울 때 이득이 높은 액티브 안테나를 활용하여 MF R-Mode 시스템을 대안으로 사용할 수 있다고 판단된다. 또한 보다 높은 이득의 안테나를 사용해 신호를 수신하고 보다 높은 샘플링 레이트로 신호를 처리할 수 있다면, 더욱 정밀한 거리측정이 가능할 것으로 기대된다. MF R-Mode 시스템을 이용해 사용자의 위치를 계산하는 기술이 고도화된다면, 사용자가 GNSS 사용이 어려울 때에도 신뢰할 수 있는 위치 정보 획득이 가능해질 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부 재원으로 국가연구개발사업인 “지상과 통합 항법시스템 (R-Mode) 기술개발”에 의해 수행되었습니다 (1525012261).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

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

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Gewies, S., Grundhofer, L., & Hehenkamp, N. 2020, Availability of maritime radio beacon signals for R-mode in the southern Baltic Sea, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14, 173-178. <http://doi.org/10.12716/1001.14.01.21>
- Grundhöfer, L., Gewies, S., Hehenkamp, N., & Galdo, G.-D. 2020, Redesigned waveforms in the maritime medium frequency bands, *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*, pp.827-831. <http://doi.org/10.1109/PLANS46316.2020.9110174>
- Grundhöfer, L., Rizzi, F.-G., Gewies, S., Hoppe, M., Bäckstedt, J., et al. 2021, Positioning with medium frequency R-Mode, *NAVIGATION*, 68, 829-841
- International Telecommunication Union 2006, Technical characteristics of differential transmissions for global navigation satellite systems from maritime radio beacons in the frequency band 283.5-315 kHz in Region 1 and 285-325 kHz in Regions 2 and 3, *Recommendation ITU-R, M.823-3*
- Johnson, G. & Swaszek, P. 2014, Feasibility Study of R-Mode combining MF DGNSS, AIS, and eLoran Transmissions, *German Federal Waterways and Shipping Administration, Final Report*
- Johnson, G., Swaszek, P., Alberding, J., Hoppe, M., & Oltmann, J.-H. 2014 Analysis of MF-DGNSS Modifications for Improved Ranging, *Proceedings of the European Navigation Conference (ENC) 2014*, Rotterdam, Netherlands.
- Kim, W., Son, P.-W., Park, S., Park, S., & Seo, J. 2022, First demonstration of the Korean eLoran accuracy in a narrow waterway using improved ASF maps, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 58, 1492-1496. <http://doi.org/10.1109/TAES.2021.3114272>
- Offermans, G., Johannessen, E., Bartlett, S., Schue, C., Grebnev, A., et al. 2015, Loran initial operational capability in the United Kingdom-first results, *Proceedings of the 2015 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, Dana Point, CA, USA, 26-28 Jan.2015, pp.27-39
- Poppe, D. C. 1995, Coverage and performance prediction of DGPS systems employing radiobeacon transmissions, *PhD Dissertation*, Bangor University
- R-Mode Baltic, Project reports, [Internet], cited 2022 Aug 1, available from: <https://www.r-mode-baltic.eu/publications>
- Rhee, J. H., Kim, S., Son, P. -W., & Seo, J. 2021, Enhanced accuracy simulator for a future Korean nationwide

eLoran system, IEEE Access, 9, 115042-115052. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105063>

Rhee, J. H. & Seo, J. 2013, eLoran signal strength and atmospheric noise simulation over Korea. *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 2, 101-108, <https://doi.org/10.11003/JKGS.2013.2.2.101>

Son, P.-W., Park, S., Han, Y., & Seo, K. 2020, eLoran: Resilient Positioning, Navigation, and Timing Infrastructure in Maritime Areas, IEEE Access, 193708-193716. <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033215>

Son, P.-W., Rhee, J. H., Hwang, J., & Seo, J. 2019, Universal kriging for Loran ASF map generation, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 55, 1828-1842. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876587>

Wirsing, M., Dammann, A., & Raulefs, R. 2021, VDES R-Mode performance analysis and experimental results, *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 1-20. <https://doi.org/10.1002/sat.1424>



Pyo-Woong Son received his B.S. degree in electrical and electronic engineering from Yonsei University, Seoul, South Korea, in 2012, and his Ph.D. in integrated technology at Yonsei University, Incheon, South Korea. He is currently a senior researcher with the Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO) and an assistant professor with University of Science and Technology (UST), Daejeon, South Korea. His research interests include complementary positioning, navigation, and timing systems, including eLoran. Dr. Son was a recipient of the Graduate Fellowship from the Information and Communications Technology (ICT) Consilience Creative Program supported by the Ministry of Science and ICT, South Korea.



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, South Korea. His research interests include backup PNT navigation technologies for maritime application especially as an eLoran and an R-Mode.



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



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 Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Korea. His research interests include sensor fusion systems, PNT technology, and target tracking filter.