

State of the Art on Terrestrial Radionavigation System and Its Applications for Maritime PNT Service

Kiyeol Seo¹, Tae Hyun Fang¹, Sang Hyun Park^{2†}

¹Maritime Safety and Environmental Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

²Maritime PNT Research Office, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

This paper addresses on the International technical trends, standards, and development status of terrestrial radionavigation system to provide more accurate and fail-safe Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Information available in maritime navigation environment. We analyze the performance result of pilot service in enhanced Long range navigation (eLoran) testbed environment using Low Frequency (LF) signal, and describe the development status of Ranging-Mode (R-Mode) system using Medium Frequency (MF) and Very High Frequency (VHF) to meet the Harbor Entrances and Approaches (HEA) requirement of International Maritime Organization (IMO) within 10m position accuracy. Furthermore, we present an architecture for integrated service of satellite-terrestrial navigation system and future maritime applicable fields. As the core information infrastructure of future navigation for 4th industrial revolution, this paper will be contributed to determining the direction of present and future to provide fail-safe PNT service with Global Navigation Satellite System (GNSS) based on the technical enhancement of terrestrial integrated navigation system.

Keywords: terrestrial radionavigation system, eLoran, R-Mode, PNT, GNSS

1. INTRODUCTION

미래 해양 모빌리티 (Maritime Mobilities), 즉 자율운항선박 (Maritime Autonomous Surface Ships), 무인선박 (Unmanned Ships), 해양 드론 (Maritime Drones) 등에 가장 근간이 되는 핵심 기술은 이동 물체의 위치를 끊임 없이 식별하는 측위항법 기술, 시스템의 자율운항 및 동기를 위한 시각동기 기술일 것이다. 현재는 측위/항법/시각 (Positioning, Navigation, and Timing; PNT) 이라는 큰 범위에서 Global Positioning System (GPS)로 대두되는 위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System; GNSS)을 이용하고 있으며, 이를 이용한 보다 정확한 위치정보를 기반으로 이동체의 경로를 식별하고 있다. 또한 해상에서도 이동체

및 물표의 위치 획득을 위해 GNSS를 근간으로 하는 PNT 정보를 이용하고 있다. 즉, 드론, 무인이동체, 자율운항선박 등은 온전히 위성항법시스템에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 위성항법신호의 취약성은 미래 무인/자율이동체의 안전을 위협하는 핵심 요인 중의 하나이다. 재밍 (Jamming)은 위성항법신호의 차단을 통해 이동체의 위치를 알 수 없게 만들며, 스푸핑 (Spoofing)이라 불리는 위성항법 신호의 해킹은 이동체를 엉뚱한 곳으로 안내하여 큰 피해를 줄 수 있다.

위성항법시스템의 신호 취약성에 대비하기 위한 백업항법시스템, 그리고 위성항법시스템의 이용 불가시 대체 가능한 항법시스템으로 지상파를 기반으로 하는 항법시스템에 대한 기술개발이 유럽연합 (EU)과 우리나라 해양수산부를 중심으로 추진 중에 있다. 기존 저주파 (Low Frequency; LF) 펄스 신호를 이용하는 장거리 항법시스템 (Long Range Navigation, Loran)을 새롭게 고도화시킨 첨단 지상파항법시스템인 Enhanced Loran (eLoran) (Son et al. 2020)과 지상파 기반의 해상 통합항법시스템인 Ranging Mode (R-Mode)가 대표적이라 할 수 있다 (R-Mode Baltic 2022).

eLoran 시스템은 기존 고출력 로란 펄스 (Loran Pulse)를 이

Received Aug 04, 2022 Revised Aug 23, 2022 Accepted Sep 07, 2022

†Corresponding Author

E-mail: shpark@kriso.re.kr

Tel: +82-42-866-3681 Fax: +82-42-866-3609

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

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

Sang Hyun Park <https://orcid.org/0000-0003-0113-891X>

Table 1. Comparison of satellite and terrestrial navigation systems.

System	Satellite navigation system		Terrestrial navigation system		
	GPS (U.S.)	KPS (Korea)	LF (eLoran)	R-Mode	
				MF (Beacon DGNS)	VHF (AIS/VDES)
Frequency (wave length)	1.5 GHz (19.03 cm)	1.5 GHz (19.03 cm)	100 kHz (3 km)	283.5~315 kHz (1 km)	160 MHz (2 m)
Transmitting output power	60 W	60 W	50~150 kW	300~500 W	50 W
Coverage	Worldwide	Korean peninsula	1,000 km	Inland 80 km Ocean 185 km	Ocean 80 km
Transmitter	32 satellites	8 satellites	> 3 transmitters	17 reference stations	38 base stations
Reference station (Integrity monitor)		10 stations	dLoran stations (<30 km)	DGPS RSIMs	AIS base stations
Position accuracy	<10 m	<10 m	<20 m (ASF correction)	<10 m (Include eLoran)	<10 m (Include eLoran)
PNT&D* capabilities	P·N·T·D	P·N·T·D	P·N·T·D	P·N	P·N
Robustness against Jamming	Weak	Weak	Strong	Strong	Normal
Development status	In operation ('93~)	In development ('22~'35)	Pilot service ('20~)	In development of R-Mode ('20~'22)	

*PNT&D: Positioning, Navigation, Timing, and Data

용하는 Loran-C 항법시스템을 개선하여 측위기술 고도화 및 데이터 방송이 가능하도록 한 항법시스템이다. 반도체 고출력 증폭 소자를 이용하여 소형화되고 보다 안정된 출력의 송신기 시스템과 eLoran 펄스의 위치를 변경하는 변조기법이 적용된 로란 데이터 채널 (Loran Data Channel; LDC)을 이용한 보정메시지의 전송이 가능하다. 또한 세계협정시 (Coordinated Universal Time; UTC)에 동기된 지상 3개소 이상의 송신국에서 100 kHz 대의 펄스 신호를 송출하여 사용자 수신기까지의 전파 도달시간 (Time of arrival; TOA) 측정을 통해 위치를 계산하는 항법시스템으로서, 기존 Loran-C 시스템의 측위오차를 개선하기 위한 보정기준국 운영을 통해서 기준국 반경 30 km 이내에서 20 m 이내의 사용자 측위정확도를 얻을 수 있다 (Son et al. 2020).

R-Mode 기술은 해상에서 운영 중인 해양안전 인프라인 중파 (Medium Frequency; MF) 비컨 기반 Differential GNSS (DGNS) 기준국과 초고주파 (Very High Frequency; VHF) 대역을 이용하는 Automatic Identification System (AIS) 및 VHF Data Exchange System (VDES) 기지국 등의 방송신호를 활용하여 거리를 측정함으로써 사용자가 위치를 획득할 수 있는 기술이다 (Johnson & Swaszek 2014, Lázaro et al. 2021). 서비스 범위 및 Dilution of Precision (DOP)의 한계를 eLoran 서비스를 통해 확장할 수 있으며, 국제 해양 관련 기구에서 요구하고 있는 항만 입출항 (Harbor Entrances and Approaches; HEA) 측위정확도 10 m 이내의 성능을 충족할 수 있다 (IMO 2001). 따라서 국제해사기구 (International Maritime Organization; IMO)와 국제항로표지협회 (International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities; IALA) 등 국제기구는 해양 항법안전에서 있어서 GNSS에 대한 의존도가 높아지는 현상과 함께 위성항법 신호의 전파 혼신에 대한 취약성을 지적하고 있고, 이를 위해 eLoran, R-Mode 등 GNSS 백업시스템에 대한 기술 확보가 필요함을 권고하고 있다 (IALA R0129 2012).

본 논문에서는 지상파항법시스템을 기반으로 하는 해양 PNT 기술 현황과 그 전망에 대해 함께 살펴본다. 먼저 위성항법시스템과 지상파항법시스템의 기술적 특성에 대해 비교하고, eLoran 시스템의 구축 현황과 R-Mode 시스템의 기술개발 현황에 대해 살펴본다. 마지막으로 지상파 통합 PNT 서비스의 활용 분야와 그 가능성에 대해 설명한다.

2. TECHNICAL COMPARISON OF RADIONAVIGATION SYSTEM

GNSS와 지상파항법시스템의 주요 특성을 비교하면 Table 1과 같다. 전지구적 위성항법시스템은 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 Galileo, 중국의 BeiDou 시스템이 있으며, 지역적 위성항법시스템은 일본의 QZSS, 인도의 NavIC, 그리고 2022년부터 개발 사업을 시작하는 우리나라의 한국형 위성항법시스템 (Korean Positioning System; KPS) 시스템이 있다. 위성항법시스템은 주로 1.2~1.5 GHz 주파수대를 이용하고 있으며, 전지구를 커버하기 위해서는 최소 24개 이상의 위성이, 해당 국가나 지역을 커버하기 위해서는 일반적으로 7~8기의 위성이 필요하다. 측위정확도는 코드기반 의사거리 측정의 경우 10 m급 정확도를 얻을 수 있고, 반송파를 이용할 경우 cm급의 정확도를 얻을 수 있다. 그러나 지상에서 수신하는 위성신호가 매우 미약하여 재밍의 영향에 취약하고 손쉽게 스푸핑을 통해 해킹이 가능하다. 지상파항법시스템의 경우, 저주파 (LF)를 이용하는 eLoran 시스템과 중파 (MF) 비컨 신호, 초고주파 (VHF) 신호를 이용하는 R-Mode 시스템으로 구분할 수 있다. Loran의 경우 서비스 커버리지는 1,000 km까지 약 460 m의 측위정확도를 얻을 수 있으며, eLoran의 경우 일반적으로 지리적 보정을 하면 50 m 측위정확도를 확보할 수 있고, 보정기준국을 이용한 시간적 변화에 대한 보정을 할 경우 보정기준국 반경 30 km 이내에서 20 m 이내의 성능을 얻을 수 있다. 그리고 R-Mode의 경우 100 kHz의 장파를 이용하는 기존 Loran 신호보다 파장이 짧은 MF와 VHF 신호를 이용하므로 10 m 이내의 측위정확도 성능을 얻을 수 있다. 그리고 신호 송출파워 측면에서도 eLoran은 50~150 kW 이상의 고출력이며, 중파 R-Mode의 경우도 출력이 300~500 W로 재밍에 강하여 위성항법시스템의 백업 항법시스템으로 각광을 받고 있다.

3. DEVELOPMENT TRENDS OF TERRESTRIAL RADIONAVIGATION SYSTEM

3.1 R&D Projects on Terrestrial Radionavigation System

Table 2. Technology trend of international R-Mode R&D projects.

Country	Project	Period	Description
EU	ACCSEAS	2012-2015	Feasibility study of MF/VHF R-Mode technology
	Baltic R-Mode	2017-2020	Baltic Sea demo of MF/VHF R-Mode technology
UK	-	2017	Analysis of MF R-Mode interference effect
Canada	-	2018-2021	MF R-Mode demo. and long-distance application
China	AAPS	2012-2015	Feasibility test of AIS R-Mode technology
Republic of Korea	-	2019	Performance prediction of MF/AIS R-Mode, eLoran integrated service
	WAVE	2020-2023	Testbed demo of terrestrial radionavigation system's performance

Table 3. International standards for eLoran and R-Mode service.

Organization	System	Document	Title
IALA	eLoran	Guideline (G1125)	The technical approach to establish a maritime eLoran service
		Recommendation (R1011)	The performance and monitoring of eLoran service in the frequency band 90-110 kHz
	R-Mode	In development	R-Mode (MF): Develop a guideline on the provision and use of marine beacon R-Mode
		Guideline (G1158)	VDES R-Mode
RTCM	eLoran	eLoran standard (SC-127)	Minimum performance standards for maritime LORAN receiving equipment
ITU	eLoran	Recommendation (ITU-R M.589-2)	Interference to radionavigation services from other services in the frequency bands between 70-130 kHz
	eLoran	Recommendation (ITU-R M.589-3)	Technical characteristics of methods of data transmission and interference protection for radionavigation services in the frequency bands between 70 and 130 kHz
IMO	Integrated receiver	Resolution (A.818(19))	Performance standards for shipborne Loran-C and Chayka Receivers
IEC TC80	Navigation equipment	Resolution (MSC.401(95))	Performance standards for multi-system shipborne radionavigation receivers
		IEC 61075	Loran-C receivers for ships - Minimum performance standards - Methods of testing and required test results

eLoran과 R-Mode 지상파항법시스템의 국내외 기술 동향을 살펴보면, Table 2에 나타난 것처럼, R-Mode 기술의 타당성 확인을 위한 유럽연합 (EU)의 Accessibility for Shipping, Efficiency Advantages and Substantiality (ACCSEAS) 프로젝트를 시작으로 MF 비컨 DGNS, AIS, eLoran을 활용한 R-Mode 성능시험 (Johnson & Swazek 2014), 중국의 AIS R-Mode 타당성 시험 (Zheng et al. 2016), 캐나다의 MF R-Mode를 포함한 Resilient PNT 솔루션 연구 (Huot et al. 2018), EU의 발틱해 실증 (Gewies et al. 2018), 그리고 대한민국의 eLoran/MF 지상파통합항법시스템 성능예측 및 실증을 들 수 있다 (Han et al. 2019).

3.2 International Standards of Terrestrial Radionavigation Service

대표적인 지상파 기반의 전파항법시스템인 eLoran과 R-Mode 서비스를 위한 국제표준 관련 현황을 살펴보면, Table 3과 같이 국제표준 (Standard), 권고 (Recommendation), 지침 (Guideline)으로 분류할 수 있다. IALA에서는 eLoran 운영 및 서비스를 위한 권고서 (IALA R1011 2017)와 지침서 (IALA G1125 2017)를 개발하였고, VDES R-Mode를 위한 지침서 (IALA G1158 2020)를 준비하고 있으며, MF R-Mode를 위한 지침서를 개발 중이다. 해양 무선통신기술위원회의 특별위원회인 SC-127에서 eLoran 수신장비를 위한 최소성능규격을 다루고 있으며, 국제전기통신연합 (ITU)은 ITU-R M.589-2에서 무선항법서비스에 대한 간섭과 ITU-R M.589-3에서 항법서비스 데이터 전송과 간섭보호에 관한 기술적 특성에 대해 설명하고 있다. IMO에서는 Resolution A.818(19)를 통해 선박용 Loran-C 및 Chayka 수신기를 위한 성능 표준을 제시하고 있으며, 국제전기기술위원회 (IEC)에서는 다중시스템

선박용 항법장비 성능표준 (MSC.401(95))과 선박용 Loran-C 수신기 (IEC 61075)에 대해 다루고 있다.

4. DEVELOPMENT STATUS OF TERRESTRIAL RADIONAVIGATION SYSTEM

4.1 Enhanced Loran (eLoran)

eLoran은 100 kHz 저주파를 이용하는 장거리 항법시스템인 Loran-C 시스템을 하드웨어와 측위방법, 그리고 측위정확도 측면에서 고도화된 지상파 기반 항법시스템이다. eLoran 시스템의 개념은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, eLoran 신호의 생성 및 변조 (Pulse Position Modulation; PPM), 그리고 증폭과 송출을 담당하는 송신국 시스템과 송출된 신호를 수신하여 신호품질을 감시하는 감시국 (Monitoring sites), 신호의 전달과정에서 발생하는 지연시간을 계산하는 보정기준국 (Differential Loran reference station), 그리고 송신국과 보정기준국 및 감시국 시스템과 연동하여 eLoran 시스템의 전체 운영하기 위한 제어국 (Control center)으로 구성된다 (ILA 2007).

우리나라는 해양수산부의 첨단지상파항법시스템 (eLoran) 기술개발 (2016-2020)을 통하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이, 인천 테스트베드 부지에 eLoran 시험송신국을 구축하였고, 인천항과 평택항 인근에 보정기준국을 각각 설치하였다 (Son et al. 2020). 또한 포항과 광주 Loran-C 송신국에 시각동기시스템을 구축하였고, 인천시험송신국을 포함한 3개 송신국의 UTC 기반 시각동기를 완료하여 서해북부 해역을 대상으로 시범서비스를 하고 있다.

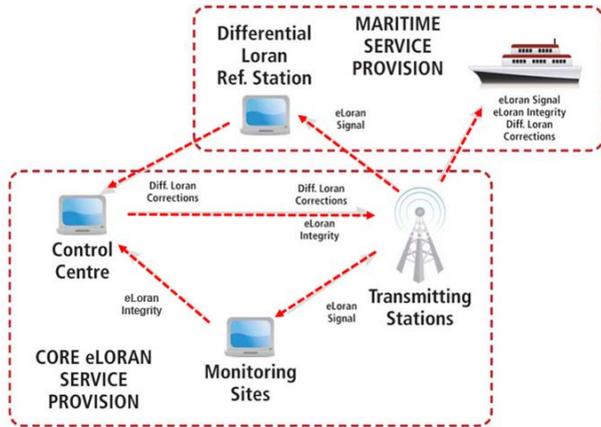


Fig. 1. Concept of eLoran system (ILA 2007).

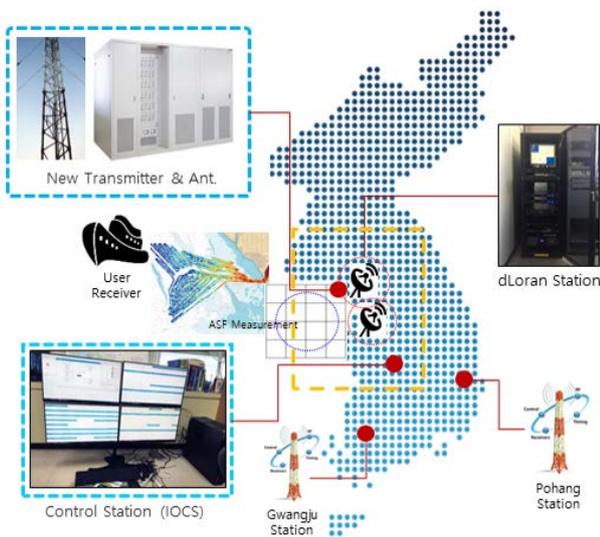


Fig. 2. Configuration of eLoran testbed system (Son et al. 2020).

4.1.1 eLoran transmission system

eLoran 펄스를 송출하기 위한 송신국 시스템은 eLoran 신호 증폭을 위한 송신기와 eLoran Group Repetition Interval (GRI) 구성 및 eLoran 시간 전송을 위해 자체 시각동기시스템을 Fig. 3 과 같이 구성하였다. 송신기는 20개의 증폭 모듈로 구성되어 최대 50 kW (Effective Radiated Power; ERP)까지 송출할 수 있고, 시각동기시스템은 UTC와 50 ns 이내의 동기성능을 유지할 수 있도록 설계하였다.

4.1.2 Differential Loran and IOCS

보정기준국은 eLoran 송신국으로부터 송출되는 신호를 수신하여 신호 전달과정에서의 지연요소를 계산한다. 먼저 송신기에서 수신기까지의 도달시간 (TOA)은 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$TOA=R/c+PF+SF+ASF+\epsilon \tag{1}$$



Fig. 3. eLoran transmitting and time synchronization systems.

여기서 R 은 송신기부터 수신기까지의 거리를 의미하고, 측지거리 (R)를 계산하기 위하여 RTCM SC-127에서는 Vincenty 기법을 제시하고 있으나, 개발 시스템에서는 동일 성능에 처리시간 단축이 가능한 Gauss mid latitude 기법을 적용하였다. 또한 eLoran 신호의 전달과정에서 발생하는 지연요소는 크게 Primary factor (PF), Secondary factor (SF), Additional secondary factor (ASF)로 구분되며, ϵ 은 그 외 잔여 측정잡음을 의미한다 (Kim et al. 2021, Son et al. 2022). 특히 ASF는 공간적 ASF (Spatial ASF)와 시변 ASF (Temporal ASF)로 나누어지는데, 공간적 ASF는 송신국 신호에 따라 해역별 ASF 지도를 구성하는 것이고, 시변 ASF는 보정기준국에서 시간적으로 변화하는 ASF 값을 측정하여 송신국에서 eLoran 신호변조를 통해 사용자에게 제공되는 ASF 보정데이터이다.

eLoran 송신국 시스템과 보정기준국 시스템을 이더넷 (Ethernet)으로 연결하여 제어하기 위한 통합운영제어시스템 (Integrated operation and control system; IOCS)의 구성은 Fig. 4와 같다.

4.1.3 Testbed system operation and the performance analysis

eLoran 시범서비스의 성능분석을 위하여, 포항과 광주 로란 송신국 송출신호 (9930M, 9930W)와 인천 eLoran 시험송신의 송출신호 (9930V)를 이용하여, 인천 보정기준국 (dLoran)에서 보정정보를 생성하고, 펄스의 위치를 변조하는 PPM 방식의 LDC 메시지로 구성하여 사용자에게 제공하도록 하였다 (ILA 2007). 테스트베드 시범운영에 따른 성능분석을 위해, 선박에 eLoran 수신기와 E-Field 안테나를 탑재하여 인천연안항에서 자월도까지 인천 보정기준국 반경 30 km 이내의 범위에서 성능분석을 수행하였다.

Fig. 5는 인천연안항에서 자월도까지 전체 항로에서의 측위정확도와 보정정보가 적용되었을 때의 측위정확도 결과를 각각 나타낸다 (Son et al. 2022). ASF 지도와 보정정보가 적용된 구간에서는 16.72 m (95%)의 수평위치 오차수준을 나타내었고, 보정정보를 적용되지 않고 ASF 지도 데이터만을 적용한 구간에서는 24.59 m (95%)의 위치정확도를 얻을 수 있었다. 여기에서 ASF 지도 영역 (초록색 구간)은 ASF 지도 (실측 데이터)를 적용한 영역에서의 결과이고, 그 외 나머지 구간은 ASF 예측치 (실측 ASF 지도의 최 외곽 데이터)를 이용한 결과이다.

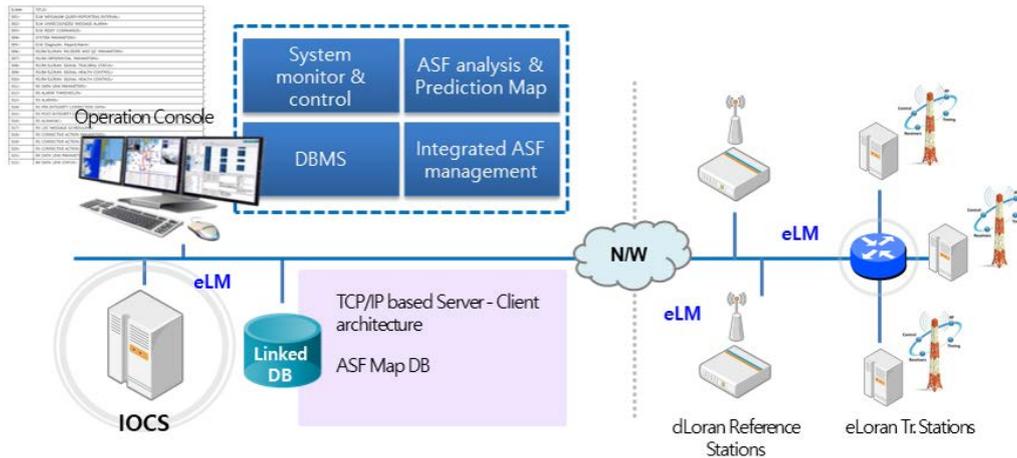


Fig. 4. Configuration of integrated operation & control system with dLoran.

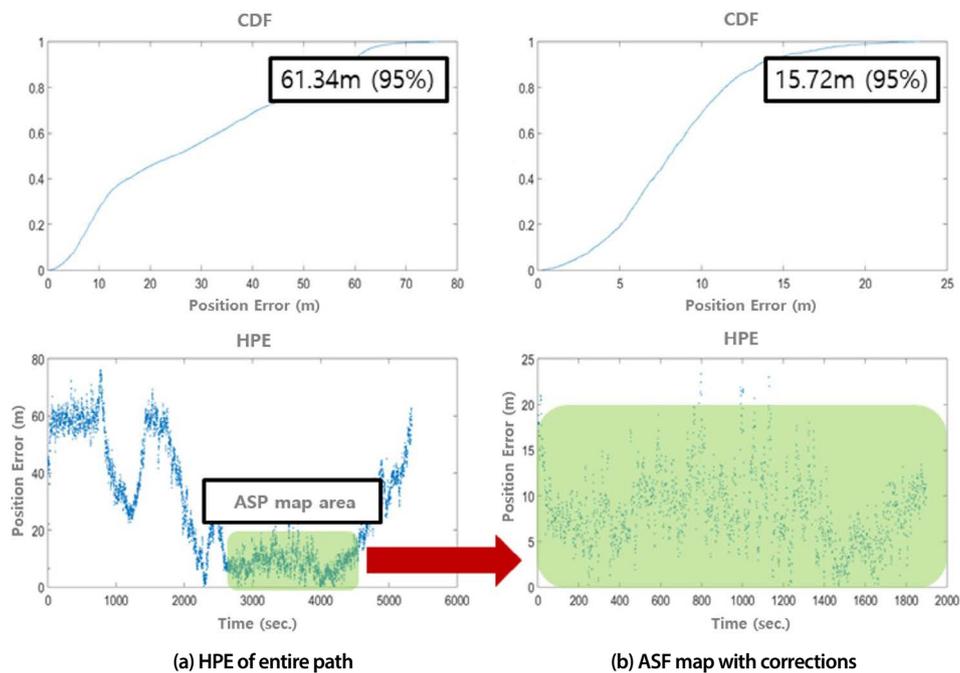


Fig. 5. Position accuracy of entire path and ASF map with the corrections (Son et al. 2022).

4.2. Ranging Mode (R-Mode)

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서는 해양수산부의 지원으로 IMO의 항법 요구성능인 HEA 10 m 이내의 항법성능을 충족할 수 있는 저주파 (LF) 펄스를 이용하는 eLoran 신호 연계의 지상파통합항법 (R-Mode) 기술개발을 추진하고 있다 (Han et al. 2020). R-Mode는 현재 해상 통신으로 이용되고 있는 전파신호를 거리측정을 위한 매체로 확장하여 활용할 수 있도록 하는 방법이나 기술을 의미하는데, 전파신호의 송신원과 수신기 사이의 거리를 측정하고, 두 개 이상의 송신원으로부터의 거리 정보를 이용해 사용자가 PNT 정보를 취득할 수 있는 항법시스템이다.

Fig. 6은 eLoran 신호를 포함하는 R-Mode 항법서비스의 개념을 나타낸다. 해양수산부에서 운영하고 있는 MF를 기반으로 하는 DGNSS 기준국과 VHF를 이용하는 AIS/VDES 기지국의 송출 신호에 거리측정을 위한 항법신호를 추가하여 기준국/기지국의 안테나로부터 사용자 수신기 안테나까지의 TOA 측정을 통해 사용자의 위치를 계산할 수 있다. Loran-C 단독측위일 경우 460 m, eLoran 신호를 보정정보와 함께 이용할 경우 보정기준국 30 km 반경 내에서는 20 m 이내, 그리고 R-Mode의 경우 가용한 전파측, eLoran (LF), DGNSS (MF), AIS/VDES (VHF) 신호를 모두 활용이 가능하므로 PNT의 신뢰성 증대와 함께 10 m 이내의 측위정확도 성능을 얻을 수 있다.

R-Mode 신호 역시 eLoran 신호와 마찬가지로 지표파

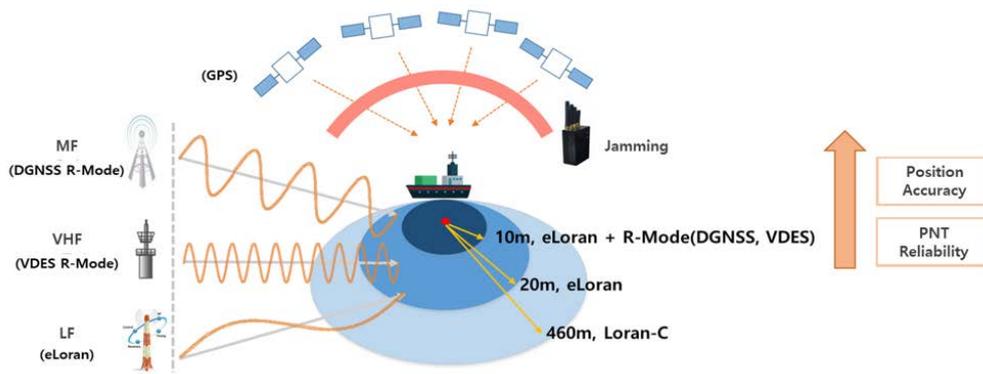


Fig. 6. Concept of R-Mode navigation service with eLoran system.

(Surface wave)를 이용하는데, 지표파는 대기 전파에 의한 시간 지연 (PF), 지표면 전도율 (Conductivity)에 의한 시간지연 (SF), 그리고 지표면 지형에 의한 시간지연 (ASF)을 가진다. 이러한 시간지연은 시간지연 모델, 격자기반의 보정지도, 그리고 실시간 차분 보정시스템에 의하여 보정될 수 있다. 지표파 시간지연 보상은 중파 및 장파 신호에 유효하다. 지표파 시간지연이 적절히 보정된다면, R-Mode 거리측정치는 수신기와 송신기 사이의 거리, 수신기 시계오차, 그리고 측정잡음으로 구성된다. 위성항법시스템의 거리측정치와 유사한 방식이나, 위성항법시스템에서 수신기와 송신기 사이의 거리는 직각좌표계에서 두 지점의 직선 거리를 나타내지만, R-Mode 시스템에서 거리측정치는 지표면상에서 두 지점의 측지거리 (Geodesic distance)를 나타낸다. 거리측정치를 이용하는 측위 알고리즘은 예측위치의 위치오차에 대한 선형방정식을 이용하여 예측위치에 대한 위치오차 추정 방식 (Iterative snapshot position determination)으로 수행될 수 있다. 다만 선형방정식의 측정행렬 (Measurement matrix)이 직교좌표계에서 정의되는 단위벡터의 증분이 아닌 평면좌표계에서 정의되는 단위벡터의 증분으로 이루어진다. 지표파에 의한 이러한 측위 방법은 R-Mode와 eLoran에 동일하게 적용될 수 있다.

4.2.1 Building of R-Mode testbed system

현재 eLoran, DGNS 기반의 MF, AIS/VDES 신호를 통합한 R-Mode 서비스를 위한 테스트베드 구성은 Fig. 7에 나타내었다. 충주, 어청도, 팔미도, 소청도 DGNS 기준국에 중파 R-Mode 송신기를 설치하였고, 대산항에 R-Mode 통합감시국을 구축하여 송신국으로부터 오는 R-Mode 신호를 수신하고 성능을 분석할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

4.2.2 R-Mode transmission system

R-Mode 송신국 시스템은 Fig. 8에 보인 바와 같이, 국립해양측위정보원에서 운영 중인 DGNS 기준국 인프라 (National Maritime PNT Office 2022) 및 방송 서비스 (ITU 2006)와 연동되도록 구성하였다. R-Mode 신호 생성 및 송출을 위한 송신기와 R-Mode 메시지가 포함된 신규 RTCM 표준 기반의 보정정보를 생성하고 사용자에게 제공 (RTCM 2010)하기 위한 RTCM 생성기

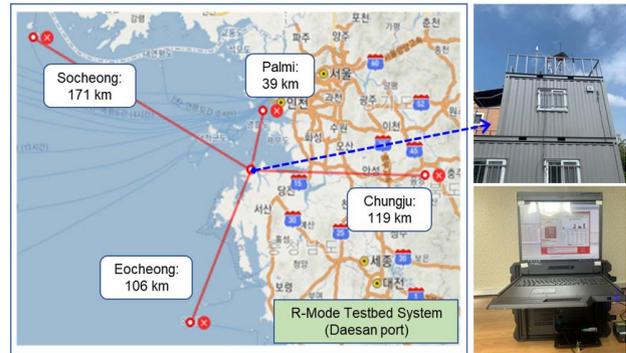


Fig. 7. Implementation of R-Mode testbed system.



Fig. 8. Configuration of MF R-Mode transmission system with DGNS reference station.

및 Minimum Shift Keying (MSK) 모듈레이터가 연결되어 있다.

4.2.3 Performance analysis of signal receiving

대산항에 구축된 R-Mode 테스트베드 통합 감시국의 R-Mode 신호수신 결과를 기반으로 성능 분석을 진행하고 있다. 통합감시국으로부터 시험운영 중인 중파 (MF) R-Mode 송신국까지의 거리는 충주 120 km, 어청도 107 km, 팔미도 39 km, 소청도 170 km 이며, 중파 R-Mode 수신 데이터의 거리측정치 일변화 누적분포는 Figs. 9와 10에 각각 나타내었다. 여기에서 중파 수신 데이터의 거리측정치 일변화 누적 분포가 낮고 밤에 차이가 나는 것은 밤에는 이온층을 통해 반사되는 스카이웨이브 (Skywave) 간섭이

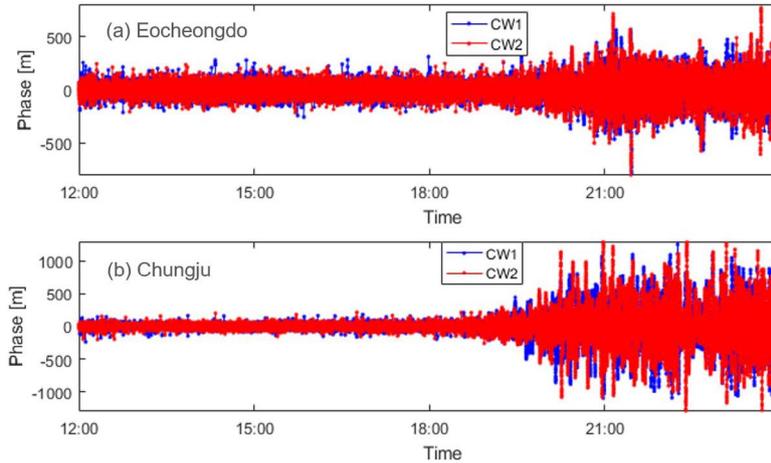


Fig. 9. Variation of MF R-Mode receiving data (30 June 2022).

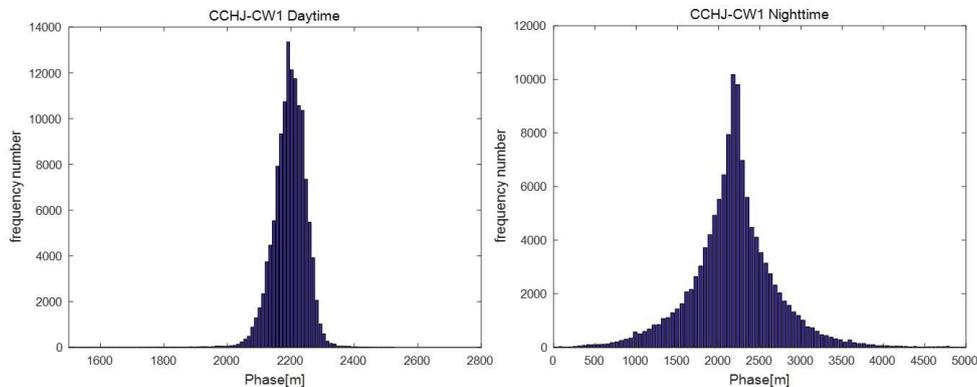


Fig. 10. Phase distributions of MF R-Mode receiving data (27~30 June 2022).

사용자 수신기에 영향을 주기 때문이며, 이러한 스카이웨이브 검출과 처리는 통합감시국을 통해서 가능하다.

현재 R-Mode 테스트베드 시스템을 선박해양플랜트연구소에서 해양수산부와 함께 구축 중에 있으며, 구축이 완료되면 R-Mode 수신신호의 통합된 성능결과를 제시할 수 있을 것으로 기대하고 있다. 기 수행된 R-Mode 시뮬레이션 결과 (Han et al. 2019)에서는 eLoran 신호와 중파 R-Mode 신호를 이용할 경우, IMO에서 요구하는 HEA 수평측위정확도 10 m (95%) 이내를 충족하는 결과를 얻을 수 있었다.

5. PROSPECT AND APPLICATION OF TERRESTRIAL RADIONAVIGATION SERVICE

지상파항법시스템은 해양수산부에서 운용 중인 해양통신 및 항법인프라를 이용하여 GPS 수준의 PNT 성능을 얻을 수 있어 비용 효율적인 장점이 있으나, GNSS의 백업시스템이라는 한계를 극복하기는 어렵다. 그러나 현재까지 재밍 (Jamming)과 스푸핑 (Spoofing)에 의한 위성항법신호 단절과 해킹시 백업 및 보완 항법이 가능한 유일한 시스템이므로 Fig. 11과 같이 위성기반 항법

시스템과 지상기반 항법시스템을 상호 보완할 수 있는 통합서비스체계를 구축한다면, 전국망 고정밀 시각동기 및 전해상 지상파 통합 PNT 서비스 제공으로 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

위성항법 신호의 수신 불가시 GNSS 백업 혹은 보완이 가능한 지상파항법시스템의 해양 활용이 가능한 분야를 해양항법, 시각동기, 해상교통관제, 그리고 해양응용 측면으로 분류하면 Table 4와 같이 나타낼 수 있다.

6. CONCLUSION

본 논문에서는 GNSS의 신호 취약성에 대비하고, 해양분야에서 이용이 가능한 보다 정확하고 끊임 없는 PNT 서비스 제공과 활용을 위하여, 지상파항법시스템을 기반으로 하는 해양 PNT 기술 현황과 전망, 그리고 활용분야에 대해 살펴보았다. 먼저 위성항법시스템과 지상파항법시스템의 기술적 특성에 대해 비교하였고, 국제기구의 표준화 현황에 대해 정리하였다. 우리나라 eLoran 시스템의 구축현황 및 시범서비스 성능결과와 함께 R-Mode 시스템의 기술개발 현황에 대해 다루었다. 또한 위성항법시스템과 지상파항법시스템을 연계하는 통합 PNT 서비스 체계 구축의 필요성과 통합 PNT 서비스의 해양 활용가능분야에 대

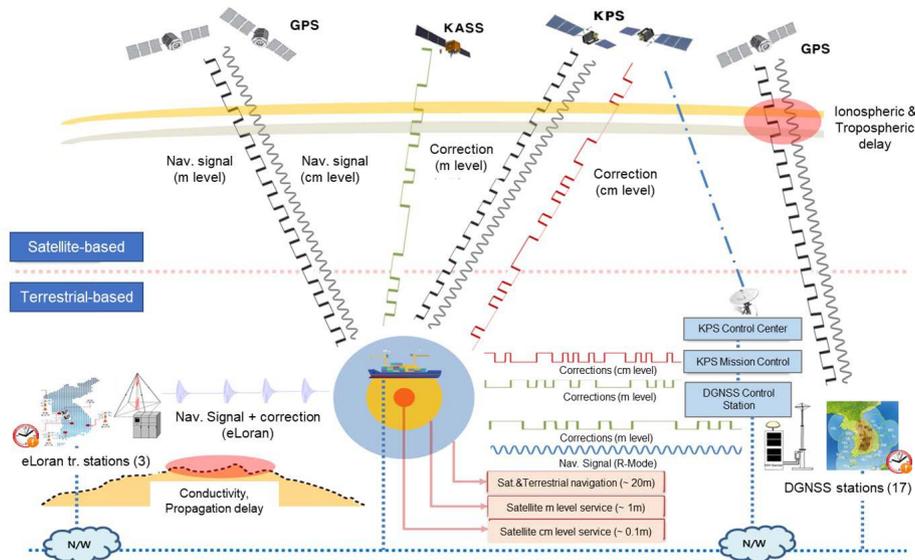


Fig. 11. An integrated architecture for satellite-terrestrial navigation service.

Table 4. Marine applications of terrestrial radionavigation service.

Application fields	Applicable systems	Descriptions
Marine navigation	Onboard navigation system, Safe navigation support system, Integrated navigation system for Unmanned & Autonomous vessel	It can be used in navigation systems, navigation support systems, and integrated navigation systems for unmanned and autonomous vessels to support safe navigation of maritime vessel traffic.
Time synchronization	Automatic Identification System (AIS) Aids to Navigation (AtoN)	The GPS time synchronization system, which is the standard for AIS time slot allocation for ship information transmission, can be backed up and replaced with terrestrial navigation service.
Maritime vessel traffic monitoring	GICOMS, VTS, VMS, V-PASS, e-NAV,	The position information of marine vessels based on GNSS can be used as a backup PNT service for the operation of the maritime traffic control system to support safety navigation.
Marine applications	Marine mobility, Smart device-based navigation App, Hea-road, Bada-Navi.	To utilize maritime location information and safety information services, it can be used for sea positioning navigation APP using smart devices, which are user terminals.

해 소개하였다. 지상파통합항법시스템의 고도화 기술개발은 기 구축되어 운영 중인 해양안전 인프라를 활용하여 저비용의 향상된 지상파 기반 해양 항법인프라를 구축함으로써, 선박의 안전항법에 관한 국제표준에 대해 선제적 대응이 가능하고 4차 산업의 핵심 항법인프라로서 위성항법시스템과 함께 미래 PNT 서비스를 지탱하는 기반이 될 것이다.

editing, T. H. Fang and K. Seo; project administration, S. H. Park and T. H. Fang.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

ACKNOWLEDGMENTS

본 논문은 해양수산부의 지원으로 해양과학기술진흥원의 관리 하에 수행 중인 “지상파통합항법시스템 (R-Mode) 기술개발” [과제고유번호: 1525012261]의 지원으로 수행되었습니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K. Seo and S. H. Park; methodology, K. Seo and S. H. Park; writing-original draft preparation and visualization, K. Seo and S. H. Park; writing-review and

REFERENCES

Gewies, S., Dammann, A., Zibold, R., Bäckstedt, J., Bronk, K., et al. 2018, R-Mode Testbed in the Baltic Sea, In Proceedings of the 19th IALA Conference, Incheon, Republic of Korea, 27 May - 2 Jun 2018. <https://elib.dlr.de/120702/>

Han, Y.-H., Lee, S.-H., Park, S.-G., Fang, T.-H., & Park, S.-H. 2019, A Study on Backup PNT Service for Korean Maritime Using NDGNSS, Journal of Navigation & Port Research, 43, 42-48. <https://doi.org/10.5394/>

KINPR.2019.43.1.42

- Han, Y.-H., Park, S.-H., Son, P.-W., & Fang, T. H. 2020, Technology and standardization trends of integrated R-Mode navigation system, in 2020 Joint Conference of the Korea Maritime Science and Technology Council, Busan, Republic of Korea, 23 July 2020, pp.151-152.
- Huot, C., Châteauvert, A., & Delisle, J. 2018, Study for a Resilient Position, Navigation and Timing (PNT) Backup Solution in Canada, Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018), Miami, Florida, September 24-28 2018, pp.1806-1816. <https://doi.org/10.33012/2018.15945>
- IALA G1125 2017, The technical approach to establish a maritime eLoran service, Edition 1.0, [Internet], cited 2022 Jul 8, available from: <https://www.iala-aism.org/product/g1125/>
- IALA G1158 2020, VDES R-Mode, Edition 1.0, [Internet], cited 2022 Jul 8, available from: <https://www.iala-aism.org/product/g1158/>
- IALA R0129 2012, GNSS vulnerability and mitigation measures, [Internet], cited 2022 Jul 8, available from: <https://www.iala-aism.org/product/r0129/>
- IALA R1011 2017, The performance and monitoring of eLoran service in the frequency band 90-110kHz, Edition 1.1, [Internet], cited 2022 Jul 8, available from: <https://www.iala-aism.org/product/r1011/>
- ILA 2007, eLoran Definition Document, version 1.0, International Loran Association, [Internet], cited 2022 Jul 7, available from: <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/eLoran-Definition-Documnt-0-1-Released.pdf>
- IMO 2001, IMO resolution A.915(22), Revised Maritime Policy and Requirements for a Future GNSS, [Internet], cited 2022 Jul 7, available from: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915\(22\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.915(22).pdf)
- ITU 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, International Telecommunication Union, Recommendation 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.
- Kim, W., Son, P.-W., Park, S. G., Park, S. H., & Seo, J. 2021, 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. <https://doi.org/10.1109/TAES.2021.3114272>
- Lázaro, F., Raulefs, R., Bartz, H., & Jerkovits, T. 2021, VDES R-Mode: Vulnerability analysis and mitigation concepts, International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 1-17. <https://doi.org/10.1002/sat.1427>
- National Maritime PNT Office [Internet], cited 2022 Jul 28, available from: <https://www.nmpnt.go.kr/home/sub.do?menukey=4130>
- R-Mode Baltic [Internet], cited 2022 Jul 28, available from: <https://interreg-baltic.eu/project/r-mode-baltic/>
- RTCM 2010, RTCM Recommended Standards for Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service, Radio Technical Commission for Maritime Services, version 2.3.
- Son, P.-W., Fang, T.-H., Park, S.-G, Han, Y., & Seo, K. 2022, Compensation Method of eLoran Signal's Propagation Delay and Performance Assessment in the Field Experiment, JPNT, 11, 23-28. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.1.23>
- Son, P.-W., Park, S.-G., Han, Y., & Seo, K. 2020, eLoran: Resilient Positioning, Navigation, and Timing Infrastructure in Maritime Areas, IEEE Access, 8, 193708-193716. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3033215>
- Zheng, K., Hu, Q., & Zhang, J. 2016, Positioning Error Analysis of Ranging-Mode Using AIS Signals in China, Journal of Sensors, 2016, Article ID 6928961. <https://doi.org/10.1155/2016/6928961>



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.



Sang Hyun Park received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Electronics Engineering from Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea, in 1994, 1996, and 2002, respectively. From 2012 to 2013, he was a visiting scholar at University of New Brunswick, Canada. He is currently a head at Maritime PNT Research Office, Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering, Daejeon, Republic of Korea. His research interests include precise positioning technology for maritime service, development of Korean Positioning System (KPS), and resilient PNT technology.