Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety
Technical Report
Vol. 27, No. 2, pp. 402-408, April 30, 2021, ISSN 1229-3431(Print) / ISSN 2287-3341(Online) https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.2.402

위성신호 반사계측(GNSS-R) 기술 현황과 해양 응용분야

서기열* · 박상현** · 박지혜***†
*, ** 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원, *** 미국 오레곤주립대학교 토목건축공학 조교수

State of the Art on GNSS Reflectometry and Marine Applications

Kiyeol Seo* · Sang-Hyun Park** · Jihye Park***†
*, ** Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 30125, Republic of Korea
*** Assistant Professor, School of Civil & Construction Engineering, Oregon State University, OR 97331, USA

요 약 : 위성신호 반사계측(GNSS-Reflectometry) 기술은 위성으로부터 전송되는 신호의 지표면 혹은 해수면에 반사되는 신호를 측정하여 분석하는 기법으로서, 해수면 높이측정, 태풍 및 기상이변, 그리고 토양의 수분 및 적설량 측정 등에 활용되고 있다. 본 논문에서는 GNSS-R 기술의 해양 활용확대와 그 가능성을 살펴보기 위하여, 위성신호의 신호대잡음비를 이용하는 GNSS-R 기술의 개념과 측정원리에 대해 설명하고, 국제적인 활용 사례를 조사하여 제시하였다. 특히 GNSS-R 기술을 기존 DGNSS 기준국 및 상시관측소 인프라를 이용하여 해양안전 및 환경 모니터링에 활용 가능할 뿐만 아니라, 지상 및 해양기준국, 위성기반, 해상선박 탑재 측면에서의 해양 응용 가능분야를 조사하여 제안하였다.

핵심용어 : 위성신호 반사계측법(GNSS-R), 해양응용, 해수면 높이 측정, DGNSS 기준국, 신호대잡음비

Abstract : *GNSS-Reflectometry (GNSS-R) is a technique for measuring and analyzing signals transmitted from satellites, reflecting on the surface of land or sea. GNSS-R is mainly used for measuring the water level variation, typhoon and meteorological anomaly, soil moisture, and snow depth. This paper describes the concept and measurement principle of GNSS-R technology, especially focusing on the field of marine utilization and its feasibility. In particular, it presents the applications of this technique for monitoring the safety of marine environment as well as the marine vessel and their utilization areas based on currently available infrastructure on the ground and maritime reference stations, such as the existing differential GNSS reference stations and integrity monitors (DGNSS RSIM), and GNSS reference station infrastructure, using the ground-based and the satellite-based GNSS-R approaches.*

Key Words : *GNSS-Reflectometry, Marine applications, Water level monitoring, DGNSS reference stations and integrity monitors, Signal-to-Noise Ratio (SNR)*

1. 서 론

GPS(Global Positioning System)를 대표로 하는 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)의 신호는 전 지구적으로 이용이 가능하고, 그 신호 구조는 군사목적을 제외하고 이미 알려져 있어, 위치, 항법 및 시각동기(PNT, Position, Navigation, and Timing) 분야에 널리 활용되고 있다. 또한 GNSS 신호는 PNT 서비스뿐만 아니라 원격 센싱을 목적으로 활용이 가능한 독특한 특성을 가지고 있으며, 이 특성을 이용하여 위성신호의 지표면과 해수면 반사신호를 계측하는 위성신호반사계측(GNSS-R, GNSS Reflectometry)기술 연구가 활발히 진행되고 있다(E-GEM, 2015). 특히 미국의 항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration)과 유럽연합(EU)의 ESA(European Space Agency)는 GNSS-R 응용을 중점으로 연구하는 프로젝트를 지원하고 있다. NASA에서는 태풍 및 기상 관측을 위한 CYGNSS(Cyclone GNSS) 프로젝트(Mashburn et al., 2020)를 추진하고 있으며, ESA는 PARIS (Passive Reflectometry and Interferometry System)(Martín-Neira, 1993)와 GEROS-ISS(GNSS REflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard the International Space Station) 프로젝트(E-GEM, 2015)를 수행 중이다.

GNSS-R은 1988년에 Hall과 Cordey가 GPS 신호를 이용한 다중 정적 스캐터 계측법의 개념을 제안(Hall and Cordey, 1988)한 것을 시작으로 이제는 가용한 모든 GNSS 위성신호

* First Author : kyseo@kriso.re.kr, 042-866-3684
† Corresponding Author : jihye.park@oregonstate.edu, +1 541-737-4563

를 활용하고 있으며, 지표면 혹은 해수면에 반사되는 신호를 지상 기준국, 항공기, 저궤도 위성에서 수신하여 기술의 응용 범위를 확대해 나가고 있다. GNSS 반사 신호를 이용하여, 육상에서는 토질 측정, 눈의 적설량, 농작물 성장 관측에 활용(Semmiling et al., 2019)이 가능하며, 해상에서는 해상 기상정보 즉, 해상 조위, 파고, 파향을 측정(Ichikawa et al., 2016; Purnel et al., 2020) 하고 더 나아가 태풍 관측 및 경로 예측(Mashburn et al., 2020)에 활용이 가능하다. 이처럼 GNSS-R 기술은 국제적인 프로젝트 진행을 통한 연구 및 관련 논문이 발표되고 있으나, 국내의 경우 아직까지 학술적 및 기술적 관심도 측면에서 부족한 실정이다.

그러므로 본 논문에서는 GNSS-R에 대한 관심을 이끌고자 국제적으로 이슈가 되고 있는 GNSS-R 기술의 개념에 대해 설명하고, GNSS-R을 이용하여 해수면의 높이를 측정하는 기법에 대해 설명한다. 또한 GNSS-R 기술의 국제적인 활용사례 조사를 토대로 해양 분야로의 기술적 확대를 위한 응용분야에 대해 조사하고 그 가능성에 대해 살펴본다. 특히 해양 안전 환경정보, 즉 파고, 파향, 조류, 조석 정보 등은 해상활동과 선박의 안전운항을 위한 가장 기본이 되는 중요한 정보이므로 GNSS-R 기술을 활용한다면 저비용 고해상도의 실시간 측정 정보를 얻을 수 있을 것이다.

2. 위성신호 반사계측(GNSS-R)

2.1 GNSS-R 개념

GNSS-R은 기본적으로 GNSS 위성으로부터 전송되는 신호를 수신기 안테나를 통해서 수신하는 두 가지 경로, 즉 안테나로 직접 수신되는 신호와 육상과 해수면에 반사된 신호를 수신하여 그 신호 특성을 분석하는 것이다. 신호 분석을 통해 해수면의 높이, 토질 분석, 쌓인 눈의 높이, 토양 및 토질 분석, 수면과 육지의 경계 분석 등에 활용이 가능하다(Wickett, 2016). Fig. 1은 표면에서 GNSS 신호가 반사되어 수신기(R)까지 전달되는 과정을 개념적으로 도시한 것이다.

Fig. 1에서 반사되는 신호의 경로 d는 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$d = d_i + d_r \tag{1}$$

여기에서 $d_r = d_r'$ 및 $h = h'$ 라고 하면, 식(2)로 유도될 수 있다. 여기에서 e는 위성신호 고도각을 의미한다.

$$\delta_i + \delta_r' = 2hcos(\frac{\pi}{2} - e) \tag{2}$$

표면에서 수신기까지의 높이(h)는 식(3)으로 구할 수 있다.

$$h = \frac{\delta}{2\sin e} \tag{3}$$

위성에서 수신기까지 위성신호가 도달할 때 직접도달 신호와 반사된 신호 사이에서 수신기 내 위상차에 의한 간섭패턴이 발생하는데, 이 간섭패턴은 수신기가 제공하는 신호대잡음비(SNR, Signal to Noise Ratio)로 파악할 수 있다. Fig. 2는 간섭패턴 분석을 통해 지표면에서 수신기까지의 높이와 분포를 측정하는 개념을 나타낸다. 위성으로부터 직접 수신된 신호와 지표면에 반사된 신호의 시간차이를 계산하여 높이를 계측하고, 반사된 신호의 형태를 분석하여 분포를 추정한다.

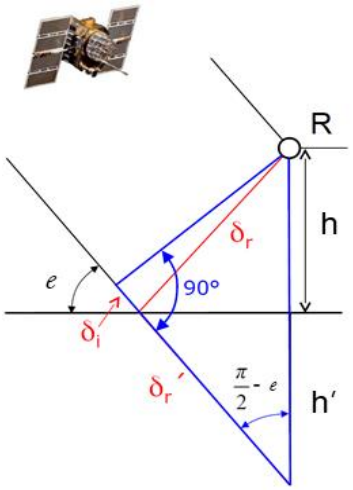

Fig. 1. Principle of GNSS-R (Wickett, 2016).

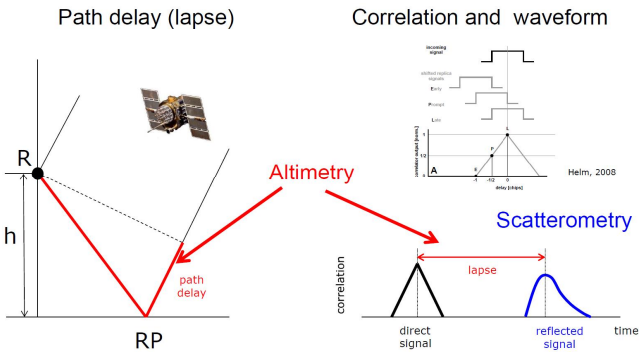

Fig. 2. Altimetry and scatterometry using GNSS-R (Wickett et al., 2018).

2.2 GNSS-R 측정기법

GNSS-R 측정기법을 해수면 높이 측정의 경우를 예로 들어 설명하면 다음과 같다. Fig. 3은 GNSS-R을 이용한 해수면의 높이 측정을 위한 개념도를 나타내며, 해수면 근처에 설치되어 있는 GNSS 안테나를 통해 GNSS 위성으로부터 직접

수신한 신호와 해수면을 통해 반사되는 신호를 비교 측정하여 그 특성을 분석한다.

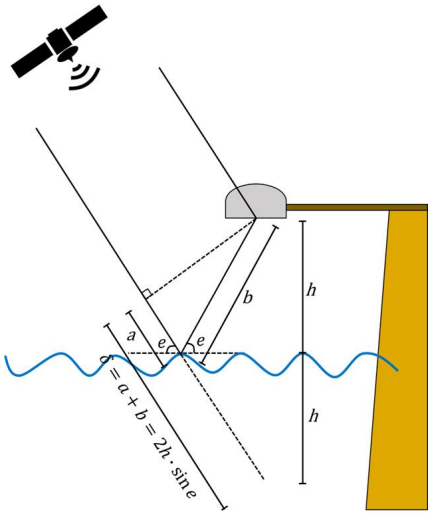

Fig. 3. GNSS-R application for water level measurement (Kim and Park, 2018).

위성으로부터 직접 도달된 신호와 해수면에 반사된 신호의 간섭패턴은 신호대잡음비(SNR, Signal to Noise ratio)로 나타나며, 이 SNR 변화는 식(4)와 같이 표현할 수 있다(Kim and Park, 2018). 여기에서 A는 진동주파수의 크기이고, θ는 진동주파수의 위상, 그리고 φ는 위상옵셋을 나타낸다.

$$dSNR = Acos(\theta + \varphi) \tag{4}$$

SNR 진동주파수의 위상(θ)은 식(5)로 나타낼 수 있으며(Kim and Park, 2018), 여기에서 λ는 파장, e는 위성 고도각(elevation angle), h는 반사표면에서 안테나까지의 높이, 그리고 δ는 직접 신호에 대한 반사 신호의 경로지연을 나타낸다.

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \frac{2\pi}{\lambda}2h\sin e \tag{5}$$

$$\frac{d\theta}{d\sin e} = \frac{4\pi h}{\lambda},\ f = \frac{2h}{\lambda} \tag{6}$$

여기에서 f는 SNR 진동의 추정 주파수를 나타내는데, 주파수를 위상변화의 시간적 변화로 추정하는 것이 아닌, 반사되어 들어오는 각도, 즉 위성고도각의 변화에 의하여 결정한 것이다. 그러므로 진동주파수는 해수면에서 안테나 높이로 변환될 수 있으며, GNSS의 연속 신호를 이용하여 시간에 따른 해수면과 안테나 사이의 높이 변화를 관측할 수 있다.

3. GNSS-R 기술 현황

3.1 GNSS-R 응용 현황

GNSS-R은 해수면 높이 측정, 태풍 영향 분석, 해빙 모니터링, 눈 적설량 측정, 토양 수분 측정 등의 연구에 활용되고 있으며, 국제적인 GNSS-R 프로젝트를 통해 응용범위를 범지구적 기상 관측으로 확대하고 있다.

- 해수면 높이 측정

GNSS-R 기반 해수면 모니터링은 해수면이 보이는 위치에 설치된 GNSS 기준국의 수신 데이터를 이용하여 해수면의 높이를 측정하는 방식이다(Strandberg et al., 2019; Sun et al., 2017). Fig. 4는 GNSS-R 기반 조위측정 사례를 나타낸다.

GNSS-R 측정 결과에 대한 신뢰성 검토를 위해 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 조위측정 결과와 비교하여 제시하고 있다.

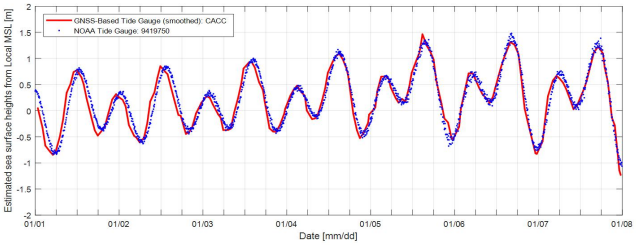

Fig. 4. Tide monitoring based on GNSS-R (Kim and Park, 2018).

- 허리케인에 의한 조위 영향 분석

Fig. 5는 허리케인 하비(Harvey) 가 발생했을 때, 태풍이 조위에 미치는 영향을 분석한 결과를 나타낸다. GNSS-R을 이용한 조위측정 결과와 동일 위치의 조위계측기 결과를 동일 시간대로 비교하였으며, 스무딩 기법을 적용한 GNSS-R 결과를 보면 조류계측기와 거의 일치하는 정확도를 나타냄을 확인할 수 있다.

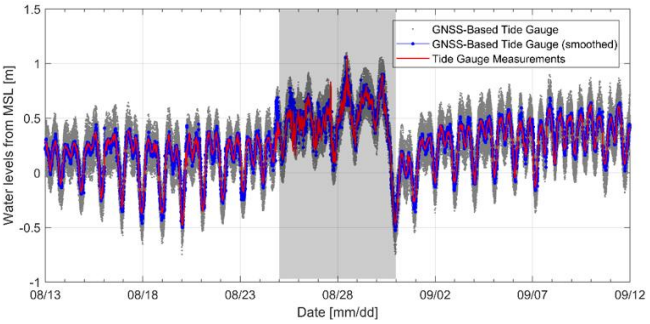

Fig. 5. Time series of water levels derived by GNSS-R (Kim and Park, 2020).

• 해빙 모니터링

GNSS 수신기를 통해 취득된 반사 신호를 분석하여 인근 해역의 해빙 분포 측정에 활용되었다. Fig. 6은 그린란드(Greenland)에 설치된 GPS 수신기와 측정된 반사 신호를 분석하여 해빙 원격 모니터링의 가능성에 대해 연구한 사례를 나타낸다.

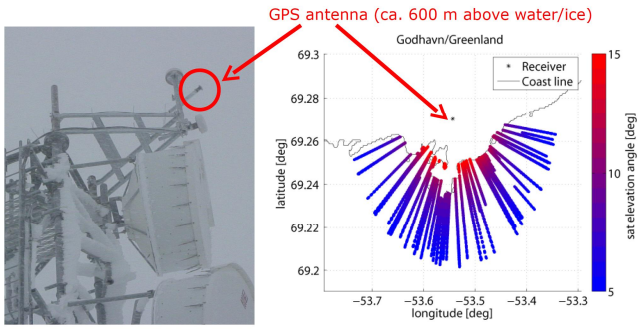

Fig. 6. Potential see-ice remote sensing (Wickett, 2016).

• 토양 수분 측정

GNSS 지상 기준국의 수신 정보를 이용하여 토양의 수분 측정이 가능하다. Fig. 7은 남아프리카(South Africa)의 서덜랜드(Sutherland)에 설치된 GNSS 상시관측소 정보를 분석하여 토양 수분 측정에 활용한 사례를 나타낸다. GNSS-R 측정 결과와 토양의 수분 함유량에 따른 신호의 전달시간을 측정하는 TDR(Time-Domain Reflectometry) 방식의 결과를 비교한 것이다.

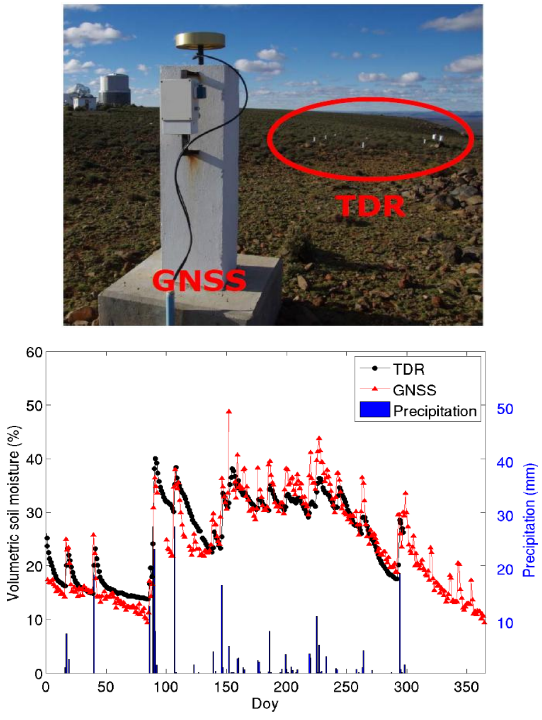

Fig. 7. Soil moisture measurement (Wickett, 2016).

• 적설량(Snow depth) 측정

GNSS 반사신호를 측정하여 눈이 쌓인 깊이를 측정한 실험 사례는 Fig. 8에 나타낸다. 초음파 센서(Ultra sonic sensor)를 이용하여 관측한 결과와 GNSS-R 측정결과를 비교하여 최대 1.7cm정도의 오차 결과를 제시하고 있다.

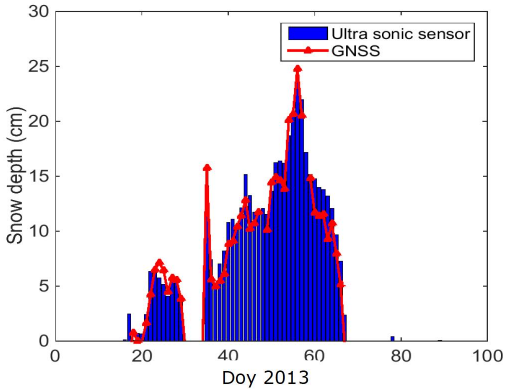

Fig. 8. Snow depth measurement (Wickett, 2016).

3.2 GNSS-R 국제 기술동향

GNSS-R은 육상 및 해상 GNSS 기준국 수신기뿐만 아니라 저궤도 위성에 탑재된 수신기를 이용하여, 지구과학 및 해상 기상 모니터링까지 폭넓게 활용되어지고 있다. 국제적인 GNSS-R 관련 프로젝트 추진현황을 정리하여 Table 1에 나타낸다.

Table 1. International projects of GNSS-R

Organization	Project
NASA, OSU	◦ Cyclone GNSS (CYGNSS) project, 2016 ◦ GNSS-R based water level monitoring
UK-DMC, ESA	◦ UK Disaster Monitoring Satellite Constellation (UK-DMC), 2005 ◦ TechDemoSat-1, Sea Surface Height, Ocean Winds, 2014 ◦ 3CAT-2 Cube Sat (ESA), Multi-constellation, dual frequency and dual polarization GNSS-Reflectometry and GNSS-Radio-Occultations, 2016 ◦ The Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS) IoD (ESA) ◦ GEROS-ISS (ESA), Mapping sea surface from the Space Station
China Meteorological Center	◦ Sea wind and wave detection with BDS/GPS (2013) ◦ Program for BDS/GPS-R stations - Ground-based BDS/GPS-R observation system (2018~2022)
Japan Ministry of ECSST	◦ GROWTH project - GNSS Reflectometry for Ocean Waves, Tides, and Height (GROWTH) (2015~2017)

미국 항공우주국(NASA)에서는 GNSS-R을 이용한 해양 기상관측 위성인 사이클론 모니터링 프로젝트(Cyclone GNSS, CYGNSS)를 2016년부터 추진하고 있으며, 오레곤주립대(OSU)에서는 GNSS-R 기반 수위 감시 및 관련 응용 연구를 수행해 오고 있다. 또한 GNSS-R 기술을 이용하여 준 실시간 해상 조위관측 성능비교 결과와 허리케인 하비의 조위 영향 관측(Kim and Park, 2020), 그리고 알래스카 수위 변화를 관측한 결과를 제시하였다.

영국과 유럽연합(EU)에서는 재난 감시 위성 배치 및 위성을 이용한 해수면 고도, 해양풍 측정연구를 추진하였으며, ESA(European Space Agency)에서는 큐브 위성을 이용한 GNSS-R 연구와 패시브 반사계측 및 간섭계측 시스템(PARIS), GEROS-ISS(GNSS REflectometry, Radio Occultation and Scatterometry onboard the International Space Station)를 통한 해수면 지도제작 연구를 수행하였다. 한편 중국은 자체위성항법시스템인 BDS(BeiDou System)를 이용한 BDS/GPS-R 기준국 프로그램(Cao, 2018)을 2018년부터 추진하고 있다. 해상 기상관측 및 지상기반 BDS/GPS-R 관측시스템을 운영하고 있으며, BDS/GPS 반사 신호를 이용하여 해상 파고 및 파향, 파속의 측정이 가능하다. 일본은 GNSS-R을 이용한 해양 파도, 조위, 파고 측정을 위한 GROWTH(GNSS Reflectometry for Ocean Waves, Tides, and Height) 프로젝트(Ichikawa et al., 2016)를 2015년부터 2017년까지 수행하였다. Table 1의 국제 기술동향에서 보이는 바와 같이, GNSS-R은 국제적인 프로젝트 진행을 통한 연구 및 관련 논문이 발표되고 있으나, 국내의 경우 아직까지 기술적 관심도 측면에서 부족한 실정이므로 이를 위한 노력이 필요하다. 특히 해양수산부의 DGNSS(Differential GNSS) 기준국 및 국토지리정보원의 상시관측소 측정 데이터를 이용하여, 활용 가능한 분야를 발굴하고, GNSS-R 기술 확보 및 이를 이용한 시스템 기술개발을 추진해야 할 것이다.

4. GNSS-R 해양 응용 가능 분야

GNSS-R의 해양 응용가능 분야에 대해 살펴보기 위하여, 위성신호를 수신하기 위한 GNSS 수신기의 설치 위치에 따라 지상 및 해양 기준국, 항공우주, 해상 선박탑재 분야로 구분하였다. 그리고 GNSS-R 기술의 활용이 가능한 인프라의 현황과 그에 따른 해양 응용 가능 분야를 다음과 같이 정리하였다.

4.1 지상 기반 GNSS-R 응용

지상 및 해양 기준국 인프라를 이용한의 GNSS-R의 활용 가능성을 살펴보면, 국립해양측위정보원의 해양 DGNSS 기준국 11개소 및 국립해양조사원 해양종합과학기지 3개소의 GNSS 수신 데이터를 활용하여 지역적 해수면 모니터링과 파도, 해빙 측정에 활용이 가능하다.

또한 국토지리정보원의 GNSS 데이터 통합센터에서 제공하는 해안 근처의 상시관측소 데이터를 이용한 해안가 변화 모니터링, 그리고 특정 목적의 GNSS 수신기 설치를 통한 댐 수위관측에도 활용이 가능할 것이다.

4.2 항공우주기반 GNSS-R 응용

항공기 및 우주기반 GNSS-R 응용 가능분야를 살펴보면, 항공기 혹은 저궤도 위성 기반 광역 해상 환경 모니터링 활용이 가능하다. 항공기 혹은 저궤도 위성에 탑재된 GNSS 수신기를 통해 지구 표면(해수면)에서 반사되는 위성신호를 측정하여 선박식별, 해상 유출류 모니터링, 태풍 및 쓰나미 모니터링 등에 활용할 수 있으며, 주기적인 해안선 측량에도 활용이 가능할 것이다.

4.3 선박탑재 GNSS-R 응용

해상 선박 GNSS-R 응용 즉, Shipborne GNSS-R에도 응용이 가능하다. Fig. 9는 Shipborne GNSS-R을 이용한 빙하의 높이 및 해빙 농축도(Sea Ice Concentration) 측정의 응용 예를 나타내는데, 극지역을 운항하는 쇄빙선에 탑재하여 빙하의 해수면 높이와 빙질 측정에도 활용이 가능할 것이다.

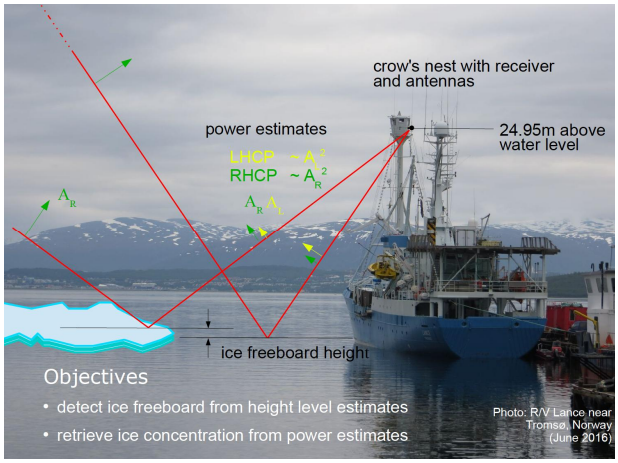

Fig. 9. Sea ice measurement using Shipborne GNSS-R (Cardellach et al., 2018; Semmiling et al., 2019).

더 나아가 선박에 탑재한 GNSS 수신기와 안테나를 이용하여, 선박의 트림 정보 측정 및 모니터링, 흘수 측정, 교량 통과 높이 결정, 수심측량, 여유수심(UKC, Under Keel Clearance) 모니터링에 활용이 가능하다. 위에 언급한 GNSS-R의 해양응용 가능분야를 요약 정리하여 Table 2에 나타낸다.

Table 2. Marine applications of GNSS-R

	Infrastructure	Applications
Ground based GNSS-R	·Maritime DGNSS Stations: 11 ·Ocean Research Stations: 3 ·GNSS Stations: 202 ·Aids to Navigations (AtoN)	·Loral and regional sea level monitoring (tide, wave height & direction, freak wave) ·Sea ice, soil moisture, snow depth measurement ·Dam water level monitoring ·Beach profile
Space based GNSS-R	·Airplane ·LEO Sat ·Cube Sat	·ocean wide environmental monitoring (Typhoon, Tsunami) ·Shoreline survey ·Vessel identification and monitoring ·Marine outflow monitoring
Shipborne GNSS-R	·Large ship ·Unmanned/Autonomous Vessel ·Icebreaker ·Survey Vessel ·Research ship	·Sea ice concentration ·Vessel draft, trim, heel monitoring ·Under keel clearance (UKC) and air draft clearance decision

5. 결론 및 전망

위성신호 반사계측법(GNSS-R)은 위성신호의 지표면 혹은 해수면 반사 신호를 측정하여, 육·해상 분야에서 해상 조위 관측 및 기상 모니터링, 해빙 관측 및 태풍 모니터링 분야까지 응용이 가능하며, 이를 위한 국제적인 프로젝트가 활발하게 진행되고 있다. 특히 미국 항공우주국(NASA)의 CYGNSS 위성을 통한 해양 기상 모니터링, EU의 PARIS 및 GEROS-ISS 프로젝트, 일본의 GNSS-R 프로젝트는 현재 운영중인 GNSS 신호를 활용하는 의미 있는 결과를 보여주고 있다. 또한 GNSS-R 기술은 국제적인 프로젝트 진행을 통한 연구 및 그 결과를 보여주는 논문이 활발히 발표되고 있으나, 국내의 경우 아직까지는 학술적 및 기술적 관심도 측면에서 많이 부족한 실정이다.

본 논문에서는 GNSS-R에 대한 관심을 이끌고자 위성신호 반사계측법의 기술현황과 국제적인 프로젝트 추진내용, 그리고 해양 응용이 가능한 인프라의 현황과 그 활용 가능 분야에 대해 지상 및 해양 기준국, 항공우주 기반, 해상 선박 탑재 측면에서 정리하여 제시하였다.

이를 기반으로 해양수산부의 DGNSS 기준국(NMPNT, 2021) 및 국토지리정보원의 상시관측소(NGII, 2021; GNSSDATA, 2021), 국립해양조사원의 측정 데이터(KHOA, 2021)를 이용하여, 응용 가능한 분야를 발굴하고, GNSS-R 기술 확보 및 이를 이용한 시스템 개발을 추진해야 할 것이다.

특히 GNSS-R의 실시간 응용을 위한 데이터 처리 기술이 확보된다면, 기존 인프라를 활용한 저비용 고해상도의 실시간 측정이 가능하므로 해상 활동의 안전을 강화하기 위한 선박 통항 안전 지원, 해양 기상 및 환경 모니터링에도 활용이 가능할 것이다.

후 기

본 논문은 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “스마트기기 기반 해상교통 안전용 측위·항법 핵심기술 개발” [과제번호: PES4060]의 지원으로 수행되었음.

References

[1] Cardellach E., J. Wickert, R. Baggen, J. Benito, A. Camps, N. Catarino, B. Chapron, A. Dielacher, F. Fabra, G. Flato, H. Fragner, C. Gabarró, C. Gommenginger, C. Haas, S. Healy, M. Hernandez-Pajares, P. Høeg, A. JäGgi, J. Kainulainen, S. A. Khan, N. M. K. Lemke, W. Li, S. V. Nghiem, N. Pierdicca, M. Portabella, K. Rautiainen, A. Rius, I. Sasgen, M. Semmling, C. K. Shum, F Soulat, A. K. Steiner, S. Tailhades, M. Thomas, R. Vilaseca, and C. Zuffada(2018), GNSS Transpolar Earth Reflectometry ExploriNg System (G-TERN): Mission Concept, IEEE Access, Vol. 6, pp. 13980-14018.

[2] Cao, Y.(2018), The Status of BDS/GPS-Based Meteorological Applications in China.

[3] E-GEM(2015), European GNSS-R Earth Monitoring, Earth Observation with GNSS Reflections, State of the Art.

[4] GNSSDATA(2021), Global Navigation Satellite System Integrated Data Center, http://www.gnssdata.or.kr.

[5] Hall, C. D. and R. A. Cordey(1988), Multistatic Scatterometry, Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 561-562.

[6] Ichikawa, K., H. Akiyama, T. Ebinuma, O. Isoguchi, N. Kimura, Y. Kitazawa, M. Konda, N. Kouguchi, H. Tamura, H. Tomita, Y. Yoshikawa, and T. Waseda(2016), Progress Report on the GROWTH (GNSS Reflectometry for Ocean Waves, Tides, and Height) Research Project, EGU General

Assembly 2016, held 17-22 April, 2016 in Vienna Austria.

[7] Kim, S. and J. Park(2018), On performance enhancement of GNSS-R based water level monitoring for near-real time applications, ION-GNSS.

[8] Kim, S. and J. Park(2020), The preliminary study on the performance enhancement of GNSS-R based water level monitoring for near-real time applications (Draft version), GPS Solutions.

[9] KHOA(2021), Korea Real Time Database for NEAR-GOOS, Korea Hydrographic and Oceanographic Agency, http://www.khoa.go.kr/eng/.

[10] Mashburn, J., P. Axelrad, C. Zuffada, E. Loria, A. O'Brien, and B. Haines(2020), Improved GNSS-R Ocean Surface Altimetry With CYGNSS in the Seas of Indonesia, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 58, Issue 9, pp. 6071-6087, https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2973079.

[11] Martín-Neira, M.(1993) A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry. ESA J., Vol. 17(4), pp. 331-335.

[12] NGII(2021), GNSS reference stations, National Geographic Information Institute, http://www.ngii.go.kr/eng/main.do.

[13] NMPNT(2021), DGNSS reference stations and integrity monitors, National Maritime PNT Office, http://www.nmpnt.go.kr/html/en/.

[14] Purnell, D., N. Gomez, N. H. Chan, J. Strandberg, D. M. Holland, and T. Hobiger(2020), Quantifying the Uncertainty in Ground-Based GNSS-Reflectometry Sea Level Measurements, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, Vol. 13, pp. 4419-4428.

[15] Semmling, M., G. Stienne, S. Gontharet, S. Gerland, S. Reboul, and J. Wickett(2019), Estimation of Sea Ice Concentration and Soil Moisture: A GNSS Reflectometry Concept, GNSS+R Workshop.

[16] Strandberg, J., T. Hobiger, and R. Haas(2019), Real-time Sea-level Monitoring using Kalman Filtering of GNSS-R, GPS Solutions Vol. 23, No. 61, https://doi.org/10.1007/s10291-019-0851-1.

[17] Sun, J., C. K. Shum, Y. Yi, J. Hohnson, J. Park, Y. Jia, L. Bao, S. Calmant, V. Ballu, P. Chu, C. Kuo, T. Schone, and J. Wickert(2017), GNSS-Reflectometry Based Coastal Sea and Water-Level Measurements, GNSS+R Workshop.

[18] Wickett, J.(2016) GNSS Reflectometry: Introduction and Recent Developments, GFZ.

[19] Wickett, J., K. Larson, E. Cardellach, and T. Simeonov(2018), GNSS-Reflectometry for Earth Observation: History, Results and Prospects, IGS Workshop.

Received : 2021. 03. 08.
Revised : 2021. 04. 15.
Accepted : 2021. 04. 27.