

Discontinuity in GNSS Coordinate Time Series due to Equipment Replacement

Dong-Hyo Sohn^{1†}, Byung-Kyu Choi¹, Hyunho Kim², Hasu Yoon², Sul Gee Park³, Sang-Hyun Park³

¹Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

²Department of Geodesy, National Geographic Information Institute, Suwon 16517, Korea

³Marine Safety Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering, Daejeon 34103, Korea

ABSTRACT

The GNSS coordinate time series is used as important data for geophysical analysis such as terrestrial reference frame establishment, crustal deformation, Earth orientation parameter estimation, etc. However, various factors may cause discontinuity in the coordinate time series, which may lead to errors in the interpretation. In this paper, we describe the discontinuity in the coordinate time series due to the equipment replacement for domestic GNSS stations and discuss the change in movement magnitude and velocity vector difference in each direction before and after discontinuity correction. To do this, we used three years (2017-2019) of data from 40 GNSS stations. The average magnitude of the velocity vector in the north-south, east-west, and vertical directions before correction is -12.9 ± 1.5 , 28.0 ± 1.9 , and 4.2 ± 7.6 mm/yr, respectively. After correction, the average moving speed in each direction was -13.0 ± 1.0 , 28.2 ± 0.8 , and 0.7 ± 2.1 mm/yr, respectively. The average magnitudes of the horizontal GNSS velocity vectors before and after discontinuous correction was similar, but the deviation in movement size of stations decreased after correction. After equipment replacement, the change in the vertical movement occurred more than the horizontal movement variation. Moreover, the change in the magnitude of movement in each direction may also cause a change in the velocity vector, which may lead to errors in geophysical analysis.

Keywords: GNSS, time series, offset, equipment replacement

1. INTRODUCTION

전지구 위성항법 시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS)은 다양한 분야에 활용되고 있다. 특히 장기간 관측된 GNSS 자료는 지각운동, 지구자전 및 극운동, 지구형상 등을 연구하는 고체지구과학 분야뿐만 아니라 전리권의 전자분포 및 대류권의 수증기량 분포에 대한 기후 요소적인 변화를 연구하는 대기

과학 분야 등에서도 이용된다.

지각의 움직임과 같이 오랜 시간 작은 변화를 감지하기 위해서는 GNSS 기준국들의 장기관측자료를 이용한 고정밀 자료처리가 필요하다. 일례로 측지학적 변형을 연구하기 위해서는 GNSS 속도벡터의 정밀도가 0.1 mm/yr 미만으로 필요하고 (Frankel et al. 2011, Masson et al. 2019), 해수면 변동과 관련된 GNSS 수직변위 연구에서는 1 mm/yr 보다 작은 정밀도가 요구된다 (Santamaría-Gómez et al. 2012, Wöppelmann & Marcos 2016).

GNSS 좌표시계열에서는 다양한 요인에 의해 불연속 현상이 나타난다. 불연속을 발생시키는 주 요인으로는 지진, 화산과 같은 자연현상에 의한 지각의 움직임과 GNSS 관측기기의 교체 또는 유지보수, 기준좌표계 변경 등이 있다 (Bruni et al. 2014). 일례로 2011년 발생한 동일본 대지진으로 인해, 한반도는 진앙지 (epicenter)로부터 1,000 km 이상 떨어져 있음에도 불구하고 연평균 이동속도와 비슷한 30 mm 정도의 수평 변위가 일시적으로 발생하였다 (Baek et al. 2012, Shao et al. 2016, Sohn et al. 2021). 그리고 수신안테나 교체로 인해 기준국의 수직좌표가 30-50 mm

Received Oct 11, 2022 Revised Nov 12, 2022 Accepted Nov 16, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: dhsohn@kasi.re.kr

Tel: +82-42-869-5921 Fax: +82-42-865-3358

Dong-Hyo Sohn <https://orcid.org/0000-0001-9719-702X>

Byung-Kyu Choi <https://orcid.org/0000-0003-2560-6714>

Hyunho Kim <https://orcid.org/0000-0001-6834-0245>

Hasu Yoon <https://orcid.org/0000-0001-9917-5246>

Sul Gee Park <https://orcid.org/0000-0002-8620-8413>

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

차이가 발생한다는 연구보고도 있었다 (Kim et al. 2015). 최근 Choi et al. (2022)는 IGS08에서 IGS14로의 기준계 변화가 정밀측 위에 수 mm 수준의 변화를 준다는 것을 보였다. Gazeaux et al. (2013)에 의하면 좌표시계열의 불연속을 발생시키는 요인의 34%가 지각변동이고, 29%가 관측장비 교체이며, 4% 정도가 기준계 변경, 관측환경 변화, 안테나 지지대 파괴 등으로 나타났다. 그리고 나머지 33%가 알려지지 않은 요인으로 보고하였다.

앞선 연구사례에서 보고된 바 같이, 좌표시계열의 불연속 발생 요인중에서 약 30% 정도가 관측장비와 관련된 작업에 의해 발생한다. GPS가 본격적으로 서비스된 이후 약 30년 동안 위성항법 시스템도 다양해지고 관측기기의 발전과 기능개선도 이루어졌다. 이에 상시적으로 운영되는 GNSS 기준국들은 다양한 위성신호를 수신하고 보다 좋은 품질의 관측자료를 확보하기 위해 장비를 교체하거나 성능향상을 위한 작업을 수행한다. 이로 인해 좌표시계열에서 불연속이 발생하곤 한다. 따라서 좌표시계열에서 불연속적인 지점을 찾고 (Gazeaux et al. 2013, Crocetti et al. 2021), 이를 보정 (Bruni et al. 2014, Kim et al. 2015)하는 것은 지각변형, 해수면 변동과 같은 장기간 변동 추이를 연구하는데 매우 중요하다.

본 연구에서는 국내 GNSS 기준국들을 대상으로 관측기기 변경으로 인한 좌표시계열상의 변동에 대해 기술하고, 기준국의 속도벡터에 대한 방향별 변화 관점에서 그 영향에 대해 분석한다. 이를 위해 10년 이상의 장기관측자료를 보유하고 있는 한국천문연구원과 국토지리정보원의 국내 GNSS 상시 관측망 자료를 이용한다. 먼저 기준국별 기기변경 사항을 조사하기 위해 Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 관측자료의 헤더정보와 GNSS 관측망 운영기관에서 보유하고 있는 이력정보를 이용하여 관측기기 변경시점을 확인한다. 그리고 고정밀 자료처리 소프트웨어인 Bernese v5.2를 이용하여 일일좌표를 산출하고, 좌표시계열상의 불연속 발생시점과 장비변경 날짜를 비교 분석한다. 또한 불연속 지점에 대한 보정 전과 후의 속도벡터를 방향성분별로 계산하고 그 변화를 분석한다. 마지막으로 이에 따른 지각의 움직임에 대한 영향을 해석한다.

2. DATA AND METHODOLOGY

2.1 GNSS Data

GNSS 기준국별 속도벡터를 추정하기 위해서 우리는 한국천문연구원과 국토지리정보원에서 운영하고 있는 GNSS 기준국의 관측자료를 이용한다. Fig. 1은 선정된 GNSS 기준국의 공간적 분포를 보여준다. 이들 기준국들은 10년 이상의 장기 관측자료를 보유하고 있고, 최소한 한 번 이상 수신기 또는 안테나 등의 관측기기가 변경된 곳이다.

본 연구에서는 2017부터 2019년 까지 3년간을 연구대상 기간으로 선정한다. Blewitt & Lavallée (2002)는 지각변동 해석 또는 기준 좌표계를 설정하기 위해 최소 2.5년 이상의 좌표시계열 자료를 이용하여 속도벡터가 산출되기를 권고하였다. 이 최소기간은 GNSS 시계열에서 계절적 변동신호에 의한 속도벡터 영향을

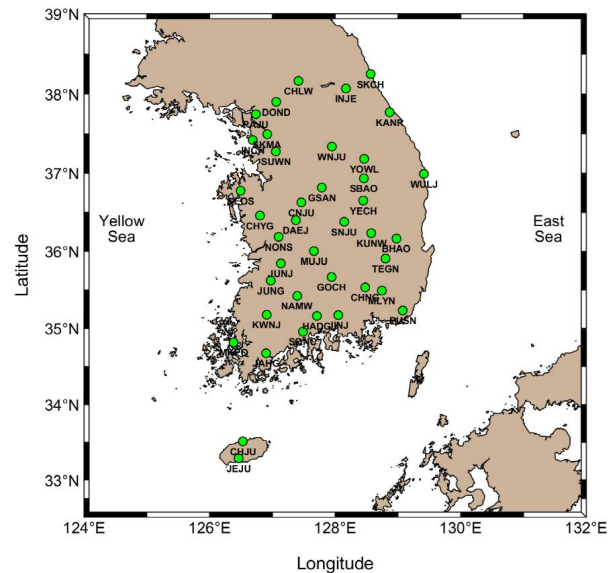


Fig. 1. The geographic location of 40 GNSS stations operated by the National Geographic Information Institute of Korea (NGII) and Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI).

최소화하기 위한 것이다. 그래서 우리는 3년간의 자료를 이용한다. 또한 2018년과 2019년 사이에 상당수의 기준국에서 장비교체가 이루어졌기 때문이다. 이와 더불어 연구대상 기간은 Sohn et al. (2021)이 동일 기준국들을 대상으로 속도벡터를 산출하고 지각변동 경향을 분석하기 위해 사용한 자료의 기간과 일치하여 불연속 보정 이후의 결과와 비교분석하기에 용이하다. 그러나 수행된 연구와 달리 본 연구에서는 GNSS 장비교체로 인한 정밀좌표시계열상의 불연속 발생과 불연속 보정전후의 속도벡터 차이에 대해 중점적으로 연구하기 때문에 이상값 제거, 불연속 보정 등과 같은 전처리 과정을 차별화하였다.

2.2 Methodology

기준국의 일일 관측 GNSS 자료와 고정밀 자료처리 소프트웨어인 Bernese v5.2를 이용하여 하루 단위로 정밀좌표를 산출한다 (Dach et al. 2015). 본 연구에서는 Bernese에서 지원하는 자료처리 엔진 중에 확장된 모호수 결정 체계를 갖춘 GPS/GLONASS 결합해를 기반으로 하는 표준 이중차분 망조정 기법을 이용한다. 이 엔진의 주 목적은 최소 제약 솔루션의 변환 조건을 사용하여 주어진 기준 프레임에 포함된 모든 기준국에 대한 정밀좌표, 대류권 매개변수 등을 계산하고, 정규 방정식 파일을 생성하는 것이다. 이때 ITRF2014 프레임에 기반한 IGS 정밀궤도력 및 위성시각정보, 위성 및 지상 안테나 위상중심 변동정보, 지구회전 매개변수, 전지구 전리권 지연모델, 해양조석 모델 등을 적용한다.

산출된 정밀좌표는 지구중심 고정좌표계 (Earth-centered Earth-fixed coordinate)로 표기되어 있어 관측자 중심의 측지좌표계 (Geodetic coordinate)로 변환한다. 변환된 각 방향별 시계열 자료에 선형회귀 방정식을 이용하여 대상기간에 대한 속도벡터를 계산한다. 이때 방향별 일일 변화량은 2017년 1월 1일 시점의 정밀좌표를 기준으로 남북, 동서, 수직 방향으로 나누어 산출한다.

Table 1. Information on 40 stations equipment replacement (R: Receiver, A: Antenna, D: Radome).

Station	Date	Equipment replacement	Station	Date	Equipment replacement
CHJU	18.08.22	(D)DOME→SCIS	CHLW	18.01.15	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
CHNG	19.10.23	(R)Trimble NetR8→Leica GR50 (A)TRM55971→LEIAR25.R4 (D)DOME→LEIT	CHYG	18.07.13	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
CNJU	18.01.23	(D)DOME→SCIS	DOND	18.01.29	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
GOCH	18.07.20	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS	GSAN	18.07.17	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
HADG	19.10.22	(R)Trimble NetR8→ALLOY (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS	INCH	17.12.28	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
INJE	18.01.16	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS	JAHG	18.08.20	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
JINJ	18.01.25	(D)DOME→SCIS	JUNG	19.10.22	(R)Trimble NetR8→Leica GR50 (A)TRM55971→LEIAR25.R4 (D)DOME→LEIT
JUNJ	18.01.25	(D)DOME→SCIS	KANR	18.01.18	(D)DOME→SCIS
KUNW	18.07.18	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS	KWNJ	18.01.26	(D)DOME→SCIS
MUJU	19.10.21	(R)Trimble NetR8→Leica GR50 (A)TRM55971→LEIAR25.R4 (D)DOME→LEIT	NAMW	19.10.21	(R)Trimble NetR8→Leica GR50 (A)TRM55971→LEIAR25.R4 (D)DOME→LEIT
NONS	18.07.12	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS	PAJU	18.01.10	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
PUSN	18.07.26	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS	SEOS	18.01.24	(D)DOME→SCIS
SNJU	18.01.20	(D)DOME→SCIS	SONC	19.10.22	(R)Trimble NetR5→Leica GR50 (A)TRM55971→LEIAR25.R4 (D)DOME→LEIT
SUWN	18.02.05	(D)DOME→SCIS	TEGN	18.01.20	(D)DOME→SCIS
WNJU	18.01.18	(D)DOME→SCIS	WULJ	18.01.22	(D)DOME→SCIS
YECH	19.10.23	(R)Trimble NetR5→Leica GR50 (A)TRM55971→LEIAR25.R4 (D)DOME→LEIT	YOWL	18.01.17	(R)Trimble NetR5→NetR9 (A)TRM55971→TRM59800 (D)DOME→SCIS
BHAO	17.04.28	(D)NONE→SCIS	DAEJ	-	-
JEJU	17.05.19	(D)NONE→SCIS	MKPO	17.04.20	(D)NONE→SCIS
MLYN	17.06.10	(D)NONE→SCIS	SBAO	17.06.10	(D)NONE→SCIS
SKCH	17.04.11	(D)NONE→SCIS	SKMA	17.05.18	(A)TRM29659→TRM59800 (D)NONE→SCIS

2.3 Equipment Replacement

Table 1은 2017년부터 2019년 사이에 대상 기준국들의 장비별 변경사항과 일자를 정리한 것이다 (GNSS DATA CENTER 2022). 여기서 일자는 두 자리수의 연도, 월, 일이다. 대전(DAEJ) 기준국을 제외한 모든 기준국에서 장비가 교체가 이루어졌다. 대다수의 기준국들이 2018년과 2019년 사이에 장비교체 작업이 진행되었다. 장비별 변경사항은 수신기 교체가 19곳, 안테나 교체가 19곳, 레이돔 교체가 31곳이다.

3. DISCONTINUITY IN TIME SERIES

3.1 GNSS Coordinate Time Series

좌표시계열상의 불연속을 발생시키는 대표적인 요인으로 지진에 의한 지각의 움직임이 있다. Ergintav et al. (2002)는 지진에 의한 지진동 및 지진 후 변형과 같은 지각변동을 발생시키는 데 규모 7.0 이상의 대규모 지진이 중요한 역할의 한다고 보고한 바 있다. 그러나 연구대상 기간동안 한반도에서는 지각변동을

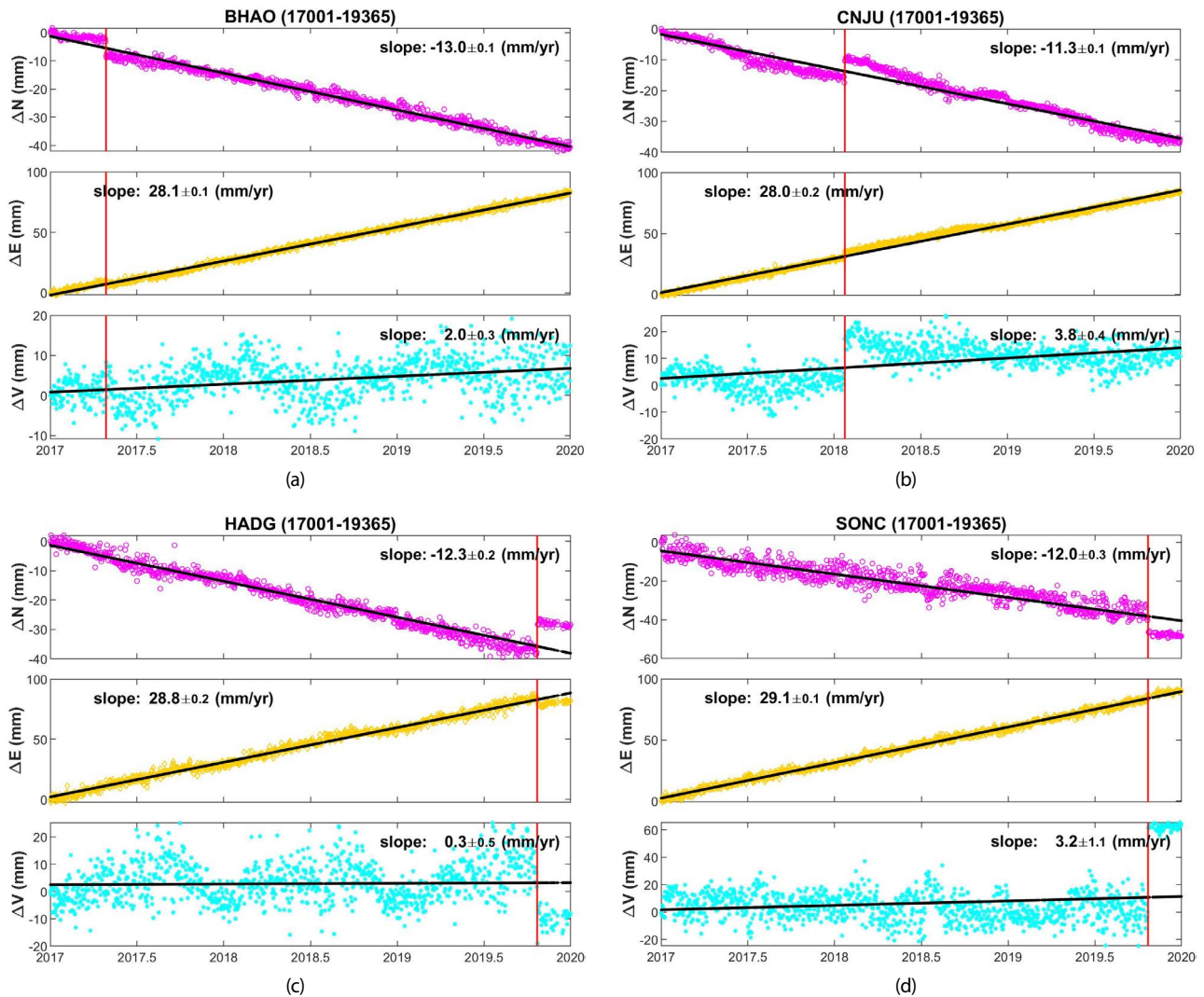


Fig. 2. GNSS coordinate time series of the north, east and up direction for (a) BHAO, (b) CNJU, (c) HADG, (d) SONC. The vertical red line indicates the time of equipment replacement. The solid black lines (slope) are the best linear fits to the data.



Fig. 3. The magnitude of the GNSS velocity vector by the north, east, and up directions for all stations.

일으킬 만큼 큰 규모의 지진이 발생하지 않았다 (KMA 2021). 그래서 우리는 지진에 의한 불연속 발생가능성을 고려하지 않는다.

Fig. 2는 일부 기준국들의 남북, 동서, 수직 방향에 대한 좌표 시계열이다. 그림에서 방향별 변화량은 2017년 1월 1일 기준 시점으로 변동된 크기이다. 시계열에서 불연속이 나타나는 시점을 확인할 수 있다. 불연속이 나타난 시점은 RINXE와 이력정보로부터 확인한 장비교체 일자(붉은색 수직선)와 정확하게 일치한다. 이를 통해 장비교체가 좌표시계열의 불연속을 유발한다는 것을 알 수 있다.

GNSS 장비별 교체 사항을 정리한 Table 1에서 보는 바와 같이, 안테나에 레이돔을 덧 씌운 보현(BHAO) 기준국 (Fig. 2a), 레이돔만 교체한 청주(CNJU) 기준국 (Fig. 2b), 같은 제조사의 수신기, 안테나, 레이돔으로 교체한 하동(HADG) 기준국 (Fig. 2c), 그리고 제조사가 다른 장비들로 교체한 순천(SONC) 기준국 (Fig. 2d) 모두 시계열 점프현상이 발생하였다. 특히, 안테나가 교체된 하동과 순천 기준국은 타 기준국에 비해 수직방향 성분의 불연속

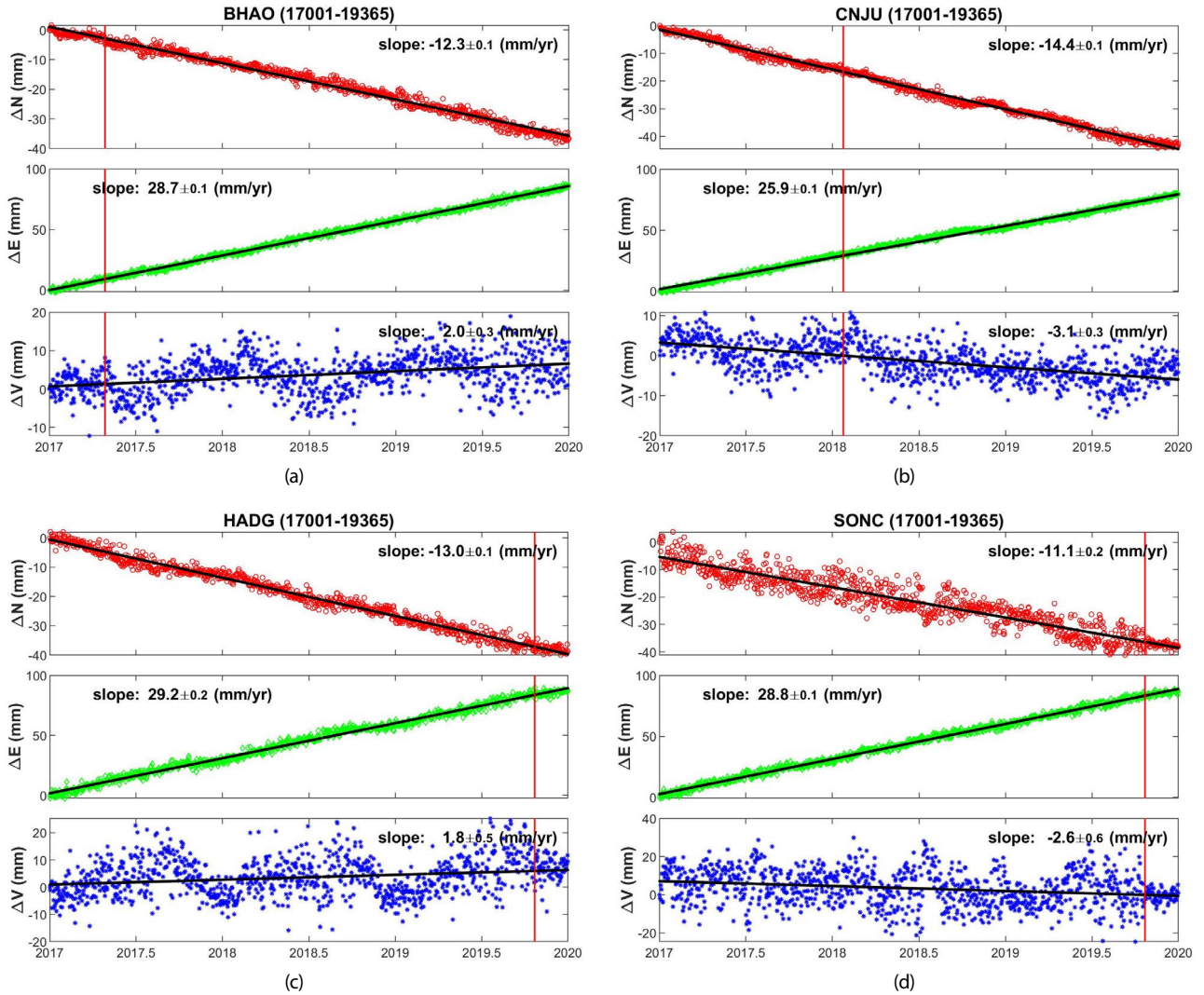


Fig. 4. Corrected coordinate time series of the north, east and up direction for (a) BHAO, (b) CNJU, (c) HADG, (d) SONC. The vertical red line indicates the time of equipment replacement.

이 상대적으로 크게 나타났다. Kim et al. (2015)는 GIPSY-OASIS를 이용하여 산출한 시계열좌표에서 안테나 교체로 인해 수직방향으로 30–50 mm 이격이 발생한다고 기술하였다.

3.2 GNSS Velocity Vector

Fig. 2에서 검은색 사선은 각 방향별 데이터에 대한 선형회귀선이다. 사선에 대한 기울기 값은 방향별 이동속도를 나타낸다. 선형회귀는 주어진 독립 변수 X (시간)에 대해 종속 변수 Y (방향별 자료)와의 선형관계를 설명한 회귀분석 기법이며, 식 (1)과 같이 표현된다 (Draper & Smith 1998).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \varepsilon \quad (1)$$

여기서, β_0 와 β_1 는 독립 변수의 계수이고, ε 는 오차항이다. 이때 방향별 자료는 선형회귀선의 신뢰구간 2σ (95.4%) 이내의 자료만

사용한다.

선형회귀법으로 추정된 보현 기준국의 이동속도는 남북 방향으로 -13.0 mm/yr이고, 동서 방향으로 28.1 mm/yr이다 (Fig. 2a). 청주, 하동, 순천 기준국의 남북 방향 이동속도는 각각 -11.3 , -12.3 , -12.0 mm/yr이고, 동서 방향 이동속도는 28.0 , 28.8 , 29.1 mm/yr이다 (Fig. 2b–d). 그리고 수직 방향의 이동속도는 0 – 4 mm/yr로 나타났다.

Fig. 3은 대상 기준국 전체의 방향별 이동속도 크기를 보여준다. 남북 및 동서 방향의 평균 이동속도는 각각 -12.9 , 28.0 mm/yr이고, 표준편차는 각각 1.5 , 1.9 mm/yr로 나타났다. 남북 방향과 동서 방향의 평균 속도 벡터합을 계산하면 크기가 30.8 mm/yr이고 진행방향은 114.8° 로 나타나 전체적으로 남동 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 수직방향은 평균 4.2 mm/yr로 나타나 전체적으로 상승하는 경향을 보이지만, 표준편차가 7.6 mm/yr로 나타나 일부 기준국들은 하강하는 추세를 보이기도 한다.

4. CORRECTION OF THE DISCONTINUITIES

4.1 Correction of GNSS Coordinate Discontinuities

시계열상의 불연속은 부정확한 GNSS 속도벡터를 야기하기 때문에 연구자들은 보다 정확한 지구물리학적 해석을 위해 이를 보정한다. Bruni et al. (2014)은 체제 이동의 순차적 t-test 분석 (Sequential t-test Analysis of Regime Shifts) 기법을 이용하여 사전 정보 없이 GNSS 시계열의 불연속이 발생한 시기와 그 크기를 식별하고 보정하였다. 그리고 Kim et al. (2015)은 시계열에 대한 선형 추세와 공통 모드 신호를 결합한 결과를 안타나교체 전후로 각각 산출하여 교체시점 전후 30일간 평균 차이를 계산해 보정한 바 있다.

본 연구에서는 장비교체로 인한 불연속이 명확하여 그 시점을 식별하는 과정이 필요하지 않다. 이와 더불어 한반도는 유라시아 지각판 내부에 위치하고 있어 지진으로 인한 지각변동이 적고 선형적으로 조금씩 움직이는 지각판의 이동에 따라 유사한 변동경향을 보인다 (Kim et al. 2018). 그래서 본 연구에서는 계산식이 간단하고 처리속도가 빠른 선형회귀식을 이용하였다. 먼저 불연속 전후로 구간을 나누고 구간별 전체 기간에 대해 선형회귀선을 각각 산출한다. 그리고 이들 선형회귀선에 대한 평행이동 차이만큼 교체 이후의 값에 적용한다. 이를 통해 연구대상 전체 기간의 이동 속도벡터에 대한 연속성을 유지하고자 한다. Fig. 4는 Fig. 2에서 보여준 기준국들의 불연속을 평행이동 차이만큼 보정한 시계열이다. 장비교체 시점에 나타났던 점프현상이 사라진 것을 확인할 수 있다.

4.2 Velocities of the Corrected Time Series

앞서 구간별 선형회귀법과 평행이동 차이를 이용하여 장비교체로 인해 발생한 불연속을 보정하였다. 보정된 시계열 자료를 이용하여 기준국들의 남북, 동서, 수직 방향에 대한 속도벡터의 크기를 산출하였다. Table 2는 4곳 기준국의 방향별 이동속도 크기를 보정전후로 정리한 것이다. 남북 방향의 경우, 작게는 0.7 mm/yr, 크게는 3.1 mm/yr 변화가 발생하였다. 동서와 수직의 경우에는 각각 0.3~2.1 mm/yr와 0.0~6.9 mm/yr 변화가 나타났다. 수평방향보다 수직방향의 변화가 더 크게 발생하였다.

선형회귀법을 이용한 보정을 대상 기준국 전체에 적용하였다. 보정 후 방향별 속도벡터의 크기와 변화 정도를 Fig. 5에 표시하였다. 그림에서 회색 마커들은 Fig. 3에서 보여준 보정 전 방향별 크기이고, 수직 점선은 변화 정도이다. 방향별 이동크기에 크고 작은 변화가 발생한 것을 확인할 수 있다. 남북방향의 경우, CNJU 기준국이 최대 3.1 mm/yr 보정되었고, 동서와 수직 방향은 INJE와 GOCH이 각각 최대 5.6, 32.1 mm/yr 보정되었다.

보정 후 남북 및 동서 방향의 이동속도 평균은 각각 -13.0, 28.2 mm/yr로 나타나 보정전과 유사하였지만, 표준편차는 각각 1.0, 0.8 mm/yr로 나타나 보정전에 비해 흩어짐 정도가 작아졌다. 이는 관측소간 수평 이동크기의 차이가 크지 않음을 의미한다. 수직방향의 경우에도 평균과 표준편차가 각각 0.7, 2.1 mm/yr로 나타나 보정전에 비해 관측소간 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

Table 2. GNSS velocity vector before and after removing the identified jumps.

	Trend	N	E	U
Original velocity (mm/yr)	BHAO	-13.0 ± 0.1	28.1 ± 0.1	2.0 ± 0.3
	CNJU	-11.3 ± 0.1	28.0 ± 0.2	3.8 ± 0.4
	HADG	-12.3 ± 0.2	28.8 ± 0.2	0.3 ± 0.5
	SONC	-12.0 ± 0.3	29.1 ± 0.1	3.2 ± 1.1
Corrected velocity (mm/yr)	BHAO	-12.3 ± 0.1	28.7 ± 0.1	2.0 ± 0.3
	CNJU	-14.4 ± 0.1	25.9 ± 0.1	-3.1 ± 0.3
	HADG	-13.0 ± 0.1	29.2 ± 0.2	1.8 ± 0.5
	SONC	-11.1 ± 0.2	28.8 ± 0.1	-2.6 ± 0.6

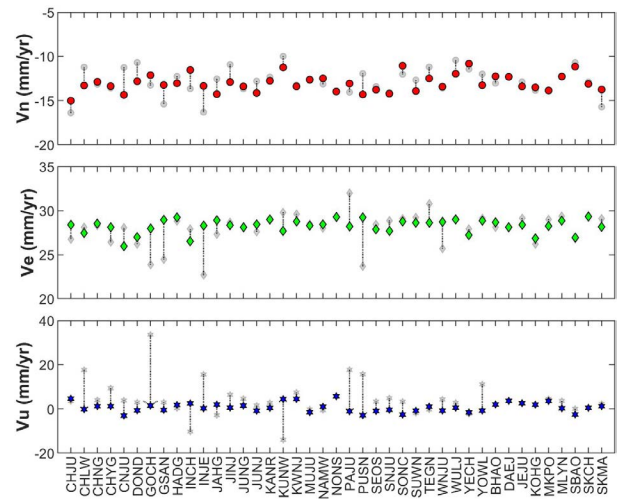


Fig. 5. The magnitude of the GNSS velocity vector by the north, east, and up directions after correction for all stations. The gray markers are the magnitude of each direction before correction shown in Fig. 3.

5. DISCUSSION

방향별 이동크기의 변화는 지각 움직임의 속도벡터에도 차이가 발생한다. Sohn et al. (2021)은 2017부터 2019년 까지의 GNSS 자료를 이용해 한반도의 지각이 114.7±1.7도 방향으로 연간 31.1±0.9 mm 이동한다고 보고한 바 있다. 본 연구의 기준국들을 대상으로 이 기간 동안 불연속 보정전후에 따른 속도벡터 차이에 대해 논의한다. 이때 동일한 사항을 비교하기 위해 수평 성분만 고려한다.

보정 전 기준국들의 평균 속도벡터의 크기는 30.8 mm/yr이고, 진행방향은 114.8도의 남동방향이다. 이때 이동 크기와 진행방향에 대한 표준편차는 각각 1.6 mm/yr와 3.3도로 나타났다. 보정 후 평균 속도벡터의 크기와 방향은 31.1 mm/yr, 114.8도이고, 표준편차는 각각 0.9 mm/yr와 1.6도이다. 보정후의 속도벡터 결과는 Sohn et al. (2021)의 결과와 유사하게 나타났다.

불연속 보정전후의 평균 속도벡터는 유사하였지만 기준국에 따라 속도벡터에 큰 변화가 발생하였다. 일례로 INJE의 경우, 보정 전 125.7도 방향으로 진행하던 움직임이 115.3도 방향으로 약 10도 달라졌고, 27.9 mm/yr 크기의 속력이 3.3 mm/yr 증가하여 31.2 mm/yr로 변화하였다. 이와 같이 속도벡터 변화는 기준국 자료에 기

반한 지각 움직임의 해석에 차이를 유발시킨다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 장비교체는 수평성분보다 수직성분의 변화를 더 크게 발생시킨다. 수평성분의 변화가 평균 0.3 mm/yr, 표준편차 2.3 mm/yr이고 최대 6 mm/yr 미만인 반면, 수직성분의 평균 변화는 3.5 mm/yr, 표준편차는 8.3mm/yr로 나타났고 GOCH 기준국이 최대 32.1 mm/yr 변화였다. 가장 큰 변화가 발생한 GOCH 기준국은 수신기, 안테나, 레이돔이 모두 교체되었고, 10 mm/yr 이상의 수직변화가 발생한 기준국들도 이와 유사하게 모든 장비들이 교체된 것으로 확인되었다. 수직성분 변화는 장비들 중에서 안테나의 교체에 따른 영향을 가장 많이 받는다. 그래서 안테나 교체 시 기존 안테나와의 방향별 차이를 기록하고 자료처리지 반영해야 한다. 하지만 장비교체에 대한 이력관리가 원활하지 않아서 예전 정보가 부정확한 경우가 있다. 이로 인해 기존 안테나와의 높이 차이가 정확하게 반영되지 않고 자료처리가 이루어져 수직성분의 변화에 대한 차이가 크게 나타난 것이라 사료된다.

6. CONCLUSIONS

본 연구에서는 GNSS 관측장비 교체로 인한 기준국들의 정밀 좌표 시계열 불연속 발생과 불연속 보정 전후의 방향별 속도벡터 크기 변화에 대해 분석하였다. 좌표시계열 상에서 불연속이 나타나는 시점이 장비교체 일자와 일치하는 것을 확인하였고, 장비교체가 좌표시계열상의 불연속을 유발한다는 것을 알 수 있었다. 불연속 보정전후로 대상 기준국들의 방향별 이동속도 평균 크기는 유사하였지만, 보정이후 기준국간 이동크기 편차는 줄어들었다. 또한 기준국의 이동속도 벡터에도 보정전후로 차이를 발생시켜 기준국에 따라 속도벡터에 큰 변화가 일어났다. 장비교체는 수평성분보다 수직성분의 변화를 더 크게 발생시킨다. 특히, 안테나 교체에 따른 좌표변화가 다른 관측기기의 교체로 인한 변화보다 상대적으로 더 크게 나타났다. 이와 같이 장비교체는 정밀 좌표 변화 및 속도벡터에 크게 영향을 준다. 그래서 장비교체에 대한 이력관리가 철저히 이루어지고 변경된 정보가 정확히 제공됨으로써 발생할 수 있는 불연속을 최소화하여 정밀좌표 산출 결과의 일관성을 유지할 뿐만 아니라 GNSS를 이용한 지구물리학적 연구에 오차를 최소화할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was partly supported by a grant from National R&D Project “Development of ground-based centimeter-level maritime precise PNT technologies” funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (1525012253). This work was also partly supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT) (No.2021R1C1C2008774).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, D.H.Sohn and B.K.Choi; methodology, D.H.Sohn and B.K.Choi; software, D.H.Sohn; validation, D.H.Sohn, H.H.Kim and H.S.Yoon; formal analysis, D.H.Sohn, B.K.Choi, H.H.Kim, and H.S.Yoon; investigation, D.H.Sohn and B.K.Choi; writing—original draft preparation, D.H.Sohn and B.K.Choi; writing—review and editing, H.H.Kim, H.S.Yoon, S.G.Park and S.H.Park; visualization, D.H.Sohn; project administration, S.G.Park and S.H.Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Baek, J., Shin, Y. H., Na, S. H., Shestakov, N. V., Park, P. H., et al. 2012, Coseismic and post-seismic crustal deformations of the Korean Peninsula caused by the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan, from global positioning system data, *Terra Nova*, 24, 295-300. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01062.x>
- Blewitt, G. & Lavallée, D. 2002, Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107:B72145. <https://doi.org/10.1029/2001JB000570>
- Bruni, S., Zerbini, S., Raicich, F., Errico, M., & Santi, E. 2014, Detecting discontinuities in GNSS coordinate time series with STARS: case study, the Bologna and Medicina GPS sites, *J. Geod.*, 88, 1203-1214. <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0754-4>
- Choi, B.-K., Sohn, D.-H., Yoon, H.-S., & Lee, S. J. 2022, GNSS Antenna PCO/PCV and Position Changes due to the Switch IGS08/igs08.atx to IGS14/igs14.atx, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 11, 83-89. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2022.11.2.83>
- Crocetti, L., Schartner, M., & Soja, B. 2021, Discontinuity Detection in GNSS Station Coordinate Time Series Using Machine Learning, *Remote Sens.*, 13, 3906. <https://doi.org/10.3390/rs13193906>
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., & Fridez, P. 2015, Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual (Biel: Publikation Digital AG). <https://doi.org/10.7892/boris.72297>
- Draper, N. R. & Smith, H. 1998, *Applied Regression Analysis*, 3rd ed. (New York: John Wiley & Sons)
- Ergintav, S., Burgmann, R., McClusky, S., Cakmak, R., Reilinger, R., et al. 2002, Postseismic deformation near the Izmit earthquake (17 August 1999, M 7.5) rupture

zone, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 92, 194-207. <https://doi.org/10.1785/0120000836>

Frankel, K. L., Dolan, J. F., Owen, L. A., Ganey, P., & Finkel, R. C. 2011, Spatial and temporal constancy of seismic strain release along an evolving segment of the Pacific-North America plate boundary, *Earth and Planetary Science Letters*, 304, 565-576. <http://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.02.034>

Gazeaux, J., Williams, S., King, M., Bos, M., Dach, R., et al. 2013, Detecting offsets in GPS time series: first results from the detection of offsets in GPS experiment, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 2397-2407. <http://doi.org/10.1002/jgrb.50152>

GNSS DATA CENTER, [Internet], cited 2022 July, available from: <https://www.gnssdata.or.kr/cors/getCorsView.do>

Kim, D., Park, K.-D., & Won, J. 2015, Correction of Coordinate Discontinuities Caused by GPS Antenna Replacements, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 4, 131-140. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2015.4.3.131>

Kim, S., Ree, J.-H., Yoon, H. S., Choi, B.-K., & Park, P.-H. 2018, Crustal Deformation of South Korea After the Tohoku-Oki Earthquake: Deformation Heterogeneity and Seismic Activity, *Tectonics*, 37, 2389-2403. <https://doi.org/10.1029/2018TC004967>

Korea Meteorological Administration 2021, 2020 Seismological Annual Report (KMA: Seoul, Korea).

Masson, C., Mazzotti, S., & Vernant, P. 2019, Precision of continuous GPS velocities from statistical analysis of synthetic time series, *Solid Earth*, 10, 329-342. <https://doi.org/10.5194/se-10-329-2019>

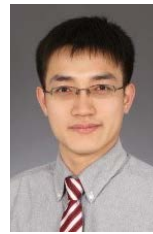
Santamaría-Gómez, A., Gravelle, M., Collilieux, X., Guichard, M., Miguez, B. M., et al. 2012, Mitigating the effects of vertical land motion in tide gauge records using a state-of-the-art GPS velocity field, *Global and Planetary Change*, 98-99, 6-17. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.007>

Shao, Z., Zhan, W., Zhang, L., & Xu, J. 2016, Analysis of the far-field co-seismic and post-seismic responses caused by the 2011 MW 9.0 Tohoku-Oki earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, 173, 411-424. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-015-1131-9>

Sohn, D.-H., Choi, B.-K., Kim, S., Park, S.-C., Lee, W.-J., et al. 2021, Decaying Post-Seismic Deformation Observed on the Korean Peninsula Following the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Sensors*, 21, 4493. <https://doi.org/10.3390/s21134493>

Wöppelmann, G. & Marcos, M. 2016, Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability, *Rev. Geophys.*, 54, 64-92. <https://doi.org/10.1002/2015RG000502>

<https://doi.org/10.1002/2015RG000502>



Dong-Hyo Sohn received the Ph.D. degree in Geoinformatic Engineering in Inha University in 2015. He is currently working for Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include crustal deformation, GNSS precipitable water vapor, and ionospheric variations.



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC & DCB analysis.



Hyunho Kim received M.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, Korea. He is currently at National Geographic Information Institute as a researcher. His research interests include DGNSS/PPP-RTK and GNSS-CORS operation.



Hasu Yoon received a Ph.D. degree in Department of Geoinformatics in University of Seoul in 2015. He is currently working for National Geographic Information Institute. His current research interests include GNSS crustal deformation and Terrestrial Reference Frame.



Sul Gee Park is the general management team leader, maritime PNT research office and senior engineer of the maritime PNT research centre at Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering. She received B.S. and M.S. degrees from Chungnam National University Republic of Korea. Her current research focus on PPP-RTK, eLoran system and integrity monitoring.



Sang-Hyun Park is the head, maritime PNT research office and principal researcher the maritime PNT research centre at the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO). He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees from Chungnam National University, Republic of Korea. He

had worked as a senior research engineer at Automotive Electronic R&D Center for Hyundai-Kia Motors. He has been involved in lots of radio navigation-related research projects such as a vessel berthing system using GPS, DGNSS reference stations and integrity monitors, eLoran system, etc. His current research interests focus on resilient PNT systems for e-Navigation.

