

Evaluation of Navigation System Performance of GPS/GLONASS/Galileo/BeiDou/QZSS System using High Performance GNSS Receiver

Yong-Hui Park, Jin-Ho Jeong, Jin-Mo Park, Sung-Hyun Park[†]

Research and Development Center, Dusitech, Inc., Daejeon 34027, Korea

ABSTRACT

The satellite navigation system was developed for the purpose of calculating the location of local users, starting with the Global Positioning System (GPS) in the 1980s. Advanced countries in the space industry are operating Global Navigation Satellite System (GNSS) that covers the entire earth, such as GPS, GLONASS, Galileo, and BeiDou, by establishing satellite navigation systems for each country. Regional Navigation Satellite Systems (RNSS) such as QZSS and NavIC are also in operation. In the early 2010s, only GPS and GLONASS could calculate location using a single system for location determination. After 2016, the EU and China also completed the establishment of GNSS such as Galileo and BeiDou. As a result, satellite navigation users can benefit from improved availability of GNSS. In addition, before Galileo and BeiDou's Full Operational Capability (FOC) declaration, they used combined navigation algorithms to calculate the user's location by adding another satellite navigation system to the GPS satellites. Recently, it may be possible to calculate a user's location for each navigation system using the resources of a single system. In this paper, we evaluated the performance of single system navigation and combined navigation solutions of GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou and QZSS individual navigation systems using high-performance GNSS receivers.

Keywords: GNSS, positioning accuracy, combined navigation

1. 서론

GNSS는 언제 어디서나 사용자의 위치/속도/시간을 계산할 수 있는 시스템으로 우주기술 선진국들은 독자적으로 자국의 위성항법시스템을 구축하여 운영하고 있으며, 미국/러시아/유럽연합/중국은 전지구 위성항법시스템, 일본과 인도는 지역 위성항법시스템을 구축하여 운영하고 있다. 2022년 현재 미국의 Global Positioning System (GPS)은 총 31기, 러시아의 Global Navigation Satellite System (GLONASS)은 총 26기, 유럽연합의 European Navigation Satellite System (Galileo)은 총 27기, 중국의 BeiDou Navigation Satellite System (BeiDou)은 총 44기의 항법위성시스템을 구축하여 운영하고 있다. 또한 일본의 Quasi-Zenith

Satellite System (QZSS)은 총 5기, 인도의 Navigation Indian Constellation (NAVIC)은 총 7기의 지역위성항법시스템을 운영하고 있다. 이러한 위성항법시스템의 발전과 함께 GNSS 수신기 제조사들은 다양한 항법시스템의 신호를 수신할 수 있는 GNSS 수신기를 개발하여 공급하고 있다. 2010년대 초까지 개별항법시스템으로 위치결정이 가능한 GNSS는 GPS와 GLONASS가 유일하였으나, 2016년 Galileo 시스템의 Initial Operational Capability (IOC) 및 2020년 BeiDou 시스템의 Full Operational Capability (FOC) 선언으로 현재에는 Galileo, BeiDou 또한 개별항법시스템 단독으로 사용자 위치결정이 가능해졌다.

Galileo, BeiDou 시스템이 추가되기 전까지는 전통적으로 GPS와 GLONASS 결합 항법 측위에 대한 연구에 국한되어 있었다 (Cai & Gao 2007, Li et al. 2009, Tolman et al. 2010). Galileo, BeiDou, QZSS 시스템이 항법신호를 제공함으로써 Galileo, BeiDou, QZSS 신호를 이용한 결합 항법 측위에 대한 연구가 진행되었으나 Galileo, BeiDou 단독항법에 대한 성능 분석은 이루어지지 않았다 (He et al. 2013, Tegedor et al. 2014, Santerre et al. 2014). 국내에서도 GPS, GLONASS, BeiDou, QZSS 복합항법에 관한 연구가 진행된 바 있으나 GPS, BeiDou, GPS+BeiDou 또는 GPS, GPS+GLONASS+BeiDou+QZSS에 대한 측위 정확도 분

Received Nov 23, 2022 Revised Dec 01, 2022 Accepted Dec 05, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: psh@dusi.co.kr

Tel: +82-42-280-1412 Fax: +82-42-280-1459

Yong-Hui Park <https://orcid.org/0000-0003-4896-8195>

Jin-Ho Jeong <https://orcid.org/0000-0003-1018-5355>

Jin-Mo Park <https://orcid.org/0000-0002-1632-7257>

Sung-Hyun Park <https://orcid.org/0000-0002-1921-520X>

Table 1. GNSS constellation status.

Item	GPS	GLONASS	Galileo	BeiDou
Country	USA	RUSSIA	EU	CHINA
Year of IOC/FOC	1995 [FOC]	2011 [FOC]	2016 [IOC]	2020 [FOC]
Orbit	MEO	MEO	MEO	IGSO/MEO/GEO
Time scale	GPST UTC(USNO)	UTC(SU)	GST UTC	BDT UTC
Circle	11h 58m	11h 16m	14h 04m	12h 50m (MEO)
Incline angle	55 deg.	64.8 deg.	56 deg.	-
Coord. system	WGS84	PZ 90	GTRF	CGCS 2000
Frequency (MHz)	3	3	5	4
	L1:1575.42 L2:1227.6 L5:1176.45	G1:1598.0625 ~1609.3125 G2:1242.9375 ~1251.6875 G3:1202.025	E1:1575.42 E5a:1176.45 E5b:1207.14 E5:1191.795 E6:1278.75	B1C:1575.42 B1:1561.098 B2:1207.14 B2a:1176.45 B2b:1207.14 B3:1268.52
Modulation	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA

석만 수행되었다 (Choi et al. 2013, 2015). 최근 Galileo, BeiDou 시스템 또한 단독으로 항법 측위가 가능해짐에 따라 가능한 모든 항법 시스템별 단일항법 및 시스템 조합에 의한 항법 측위 성능에 관한 분석이 필요하다고 판단되었다. 이에 본 논문에서는 동일 시간대의 관측치 정보를 수신하여 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS 개별 항법 시스템의 단일항법 정확도 및 다양한 GNSS 조합을 통한 복합항법 정확도를 평가하였다.

2. GPS/GLONASS/GALILEO/BEIDOU 상태 및 신호 비교

GPS는 GLONASS는 3개 (GPS ICD 2000, GLONASS ICD 2008), Galileo는 5개 (Galileo ICD 2021), BeiDou는 4개 (BeiDou ICD 2013)의 주파수 밴드로 항법신호를 송출한다. Table 1에 기술한 바와 같이 GPS, GLONASS, Galileo 위성은 Medium Earth Orbit (MEO)에 배치되어 있고 BeiDou 같은 경우에는 MEO에 27기, Geostationary (GEO)에 8기, Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO)에 10기가 배치되어 운용되고 있다. Table 1의 내용은 각 위성항법시스템의 공식 웹사이트 (GPS GOV 2022, European GNSS Service Centre 2022, Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office 2022, Application Consumer Center GLONASS 2022) 및 ICD 문서에 공개되어 있다.

Santerre et al. (2014)에 따르면 각 GNSS 항법시스템의 가장 중요한 차이점은 사용되는 시간 및 좌표계이다. 방송 궤도력은 3가지 다른 좌표계로 표현되지만 International Terrestrial Reference Frame과의 오차는 수 센티미터 이내이다. GPS 방송 궤도력의 정확도는 1 m보다 우수하다고 알려져 있다. GLONASS 방송 궤도력은 안정적인 sub-meter 궤도 정확도를 가진 것으로 나타났다. 또한, BeiDou 시스템의 방송 궤도력 정확도는 GEO 위성보다 MEO 위성에서 더 우수함을 보여주었다고 기술하였다.

각 GNSS 운영국은 시스템의 서비스 정확도에 대하여 공식적인 위치 정확도 측정 보고서를 발표하고 있다. 이들 보고서에 의하면 GPS의 전 지구 평균 위치오차는 대표적인 사용자 조건을 충족하는 위치/시간 솔루션에 대해 정의되는데 서비스 불

의 모든 지점에서 평균 24시간의 측정 기간 동안 계산된 GPS 정확도 (2DRMS)는 수평 < 9 m, 수직 < 15 m이고, GLONASS는 수평 < 5 m, 수직 < 9 m로 보고되었다. 글로벌 지역의 모든 지점에 대한 7일간의 측정 기간 동안 계산된 BeiDou 정확도 (2DRMS)는 수평 < 9 m, 수직 < 10 m이고 30 일간의 측정 기간 동안 계산된 Galileo 정확도 (2DRMS)는 수평 < 7.5 m 수직 < 15 m로 보고되었다 (Galileo OS SDD 2019, GLONASS OS PS 2020, GPS SPS PAR 2021, BeiDou OS PS 2021). 본 논문에서는 위와 같은 공식 문서에 제시된 위치 정확도를 참고하여 국내에서의 각 GNSS의 개별항법 및 복합항법 위치 정확도에 대하여 분석하였다.

3. 관측 데이터 처리 및 항법식

본 연구에서는 GPS L1 C/A, GLONASS L1, Galileo E1, BeiDou B1 코드를 사용하여 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou 관측데이터를 이용한 항법 위치 계산을 수행하였다. 위성부터 수신기 간의 거리는 수신기 시간과 위성 시간의 차이에 빛의 속도를 곱한 것과 같고 이를 의사거리라고 하며 의사거리 측정치 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$PR_i = c(T_{rcv} - T_{sv_i}) = \rho_i + c(\Delta t_{sv_i} - \Delta t_{rcv}) + d_{ion_i} + d_{trop_i} + c \cdot b_{rcv} + \varepsilon_i \quad (1)$$

여기서 아래첨자 i 는 i 번째 GNSS 위성을 나타낸다. T_{rcv} 는 수신기 시간, T_{sv_i} i 번째 위성의 시간을 나타내고 c 는 빛의 속도이다. ρ_i 는 실제거리, Δt_{sv_i} 는 위성 시계 bias, Δt_{rcv} 는 수신기 시계 bias를 나타낸다. d_{ion_i} 은 i 번째 위성의 전리층 지연오차, d_{trop_i} 은 i 번째 위성의 대류권 지연오차를 나타내고, b_{rcv} 는 수신기 잡음 오차, ε_i 는 다중 경로 오차를 포함한 다른 잡음오차를 나타낸다.

본 연구에서 전리층 지연 오차는 Klobuchar 모델을 사용하여 계산하였다. Klobuchar 모델은 GPS 전리층 오차를 GPS 위성과 GPS 수신기 사이의 TEC (자유전자밀도)를 계산하여 전리층 지연을 추정하는 방식이며 이 모델을 적용시 대략 50% 정도의 전리층 오차를 제거할 수 있다. Klobuchar 모델의 8개 계수는 GPS 위성의 항법 메시지에 포함되어 있다. 대류층 지연오차는 Saastamoinen 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 항법 성능평가를 위하여 단일 시스템 항법 위치 계산뿐만 아니라 복합 항법 위치 계산을 수행하여야 한다. 복합항법 위치계산을 위해서는 GPS 시간을 기준으로 시스템간 시간 offset 부분을 다른 관측치 (GLONASS, Galileo, BeiDou)에 보상하여 항법식을 구성하여야 한다. 첫째로 각각의 항법시스템들은 GPS 시간과의 시각오차 보상정보를 항법 메시지에 실어 보내는데, 이를 이용하여 각 시스템의 의사거리를 보정하고 항법 계산을 수행할 수 있다. 예를 들면 Galileo 는 GGTO (GPS/Galileo time offset) 파라미터를 항법 메시지에 실어 보낸다. 이를 이용하여 Galileo 의사거리를 보정할 수 있고, Eq. (2)는 GPS-Galileo 시간 offset을 계산하는 공식이다.

$$\Delta X_{system} = t_{galileo} - t_{gps} \\ = A_{0G} + A_{1G}[\text{TimeOfWeek} - t_{0G} + 604800 \cdot (WN - WN_{0G})] \quad (2)$$

Galileo와 마찬가지로 GLONASS, BeiDou도 시간보정 계수로 의사거리를 보정하여 항법위치 계산을 할 수 있다. 두 번째로 각 항법시스템의 clock bias 부분을 따로 계산하도록 항법식을 변형하여 계산하는 방법이 있는데, 이는 GPS 시간을 기준으로 시스템간 시간 offset 부분을 별도로 보정하지 않고 항법 계산을 수행할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 두 번째 방식을 사용하여 항법식을 구성하였다.

GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou의 clock bias를 각각 계산하기 위하여 Geometry 행렬 G의 clock bias 부분은 항법시스템 별로 각각 분리하여 계산하도록 Eq. (3)과 같이 구성하였다.

$$G = \begin{bmatrix} \alpha_{x_1}^{gps} & \alpha_{y_1}^{gps} & \alpha_{z_1}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{x_2}^{gps} & \alpha_{y_2}^{gps} & \alpha_{z_2}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{gps} & \alpha_{y_n}^{gps} & \alpha_{z_n}^{gps} & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_{x_1}^{glo} & \alpha_{y_1}^{glo} & \alpha_{z_1}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{x_2}^{glo} & \alpha_{y_2}^{glo} & \alpha_{z_2}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{glo} & \alpha_{y_n}^{glo} & \alpha_{z_n}^{glo} & 0 & 1 & 0 \\ \alpha_{x_1}^{bds} & \alpha_{y_1}^{bds} & \alpha_{z_1}^{bds} & 0 & 0 & 1 \\ \alpha_{x_2}^{bds} & \alpha_{y_2}^{bds} & \alpha_{z_2}^{bds} & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{x_n}^{bds} & \alpha_{y_n}^{bds} & \alpha_{z_n}^{bds} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

GNSS 위성의 위치 및 앙각, 수신기 시계 오차, 시스템 간 편향을 추정하여 계산하기 위하여 Eq. (4)와 같이 가중치 최소 자승법을 사용하였다 (Tarrio et al. 2011).

$$X = (H^T W H)^{-1} H^T W v \quad (4)$$

4. 단일항법 및 복합항법 정확도 평가

본 연구에서는 단일항법과 복합항법 위치 정확도 평가를 위하여 1차시험으로 2022년 9월 6일 UTC 13시 50분부터 2022년 9월 7일 13시 50분까지 24시간 동안 시험을 수행하였다. 1차 시험에서는 GNSS 안테나의 위치에 건물 한쪽 부분이 가려져 GLONASS의 추적위성 수가 다른 항법시스템에 비하여 충분하지 않았기 때



Fig. 1. GNSS receiver (Novatel OEM-7700) & antenna (Trimble Zephyr 3).

Table 2. GNSS single point positioning & combined positioning accuracy (09-06-2022).

Positioning solution	Avg. SVs	Horizontal (CEP)	Vertical (PE)	Horizontal (2DRMS)	Vertical (2DRMS)
GPS	7.7	0.935	1.226	2.243	3.660
GLONASS	-	-	-	-	-
Galileo	5.6	0.830	1.057	2.491	4.310
BeiDou	13.83	1.038	1.444	2.068	3.604
GPS+GLONASS	12.1	1.578	1.707	3.788	5.095
GPS+Galileo	13.2	0.830	1.057	1.992	3.154
GPS+BeiDou	21.5	0.779	1.018	1.869	3.040
GPS+GLONASS+Galileo	17.4	1.114	1.305	2.673	3.895
GPS+GLONASS+BeiDou	25.7	0.992	1.115	2.380	3.327
GPS+Galileo+BeiDou	27.0	0.783	0.877	1.879	2.619

문에 위치오차 결과를 신뢰할 수 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2차 시험은 건물의 영향을 받지 않는 곳으로 안테나의 위치를 위로 올려 총 3일간의 관측데이터를 저장하여 시험하였다.

2차 시험은 2022년 11월 11일 UTC 0시 0분 0초부터 2022년 11월 13일 23시 59분 59초까지 72시간 동안 2차 시험을 수행하였다. 외부 환경적 오차 요인 (전파간섭, multi-path)을 최소화하기 위하여 Fig. 1과 같이 양호한 LOS를 확보할 수 있는 장소에 GNSS 안테나를 설치하였다. 또한 모든 GNSS 항법신호를 동시에 수신하고 수신기의 하드웨어 오차를 최소화하여 외부 오차성분을 배제한 각 항법 시스템의 순수 항법 위치 정확도를 평가하기 위하여 최신의 고성능 GNSS 수신기를 사용하여 보다 정밀한 관측치 데이터를 수집하였다.

GNSS 안테나는 GNSS의 모든 주파수를 수신할 수 있고 Multi-path rejection 기능이 있는 Trimble Zephyr 3 Rover 안테나를 사용하였다. 수신기는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS를 수신할 수 있고 GPS L1, L2, L5 및 대부분의 항법신호를 동시에 처리할 수 있는 Novatel OEM-7700 모델을 이용하여, 시험용 기준점에서 원시 관측치 및 방송 궤도력 데이터를 수신하여 30초 간격으로 항법 위치오차를 산출하였다. 기준점에 대한 정보는 고정밀 GNSS 후처리 소프트웨어로 계산된 좌표를 참값으로 사용하였다. 단일 시스템 위치 정확도 시험에서는 Elevation mask angle과, 최소 C/No 값은 10 degree, 35 dBHz 이상으로 제한하였다.

Table 2와 같이 1차 시험에서 단일 시스템의 위성만 이용하여 계산된 GPS 위치오차 (2DRMS)는 수평 2.243 m 수직 3.660 m Galileo는 수평 2.491 m 수직 4.310 m, BeiDou는 수평 2.068 m 수직 3.604 m로 산출되었다. GLONASS는 실험데이터 획득 기간 동안의 추적위성 수가 다른 항법시스템에 비하여 충분하지 않았기 때문에 위치오차 결과를 신뢰할 수 없어 단일항법시스템 사용자 위치오차 결과에서는 제외하였다. Table 2과 같이 항법시스템별

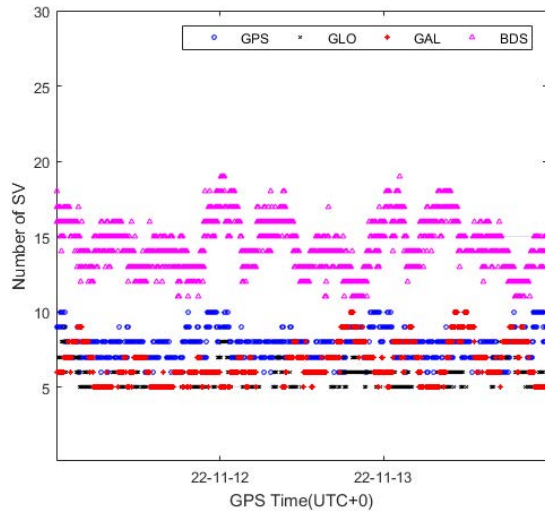


Fig. 2. Number of SV's (SPP).

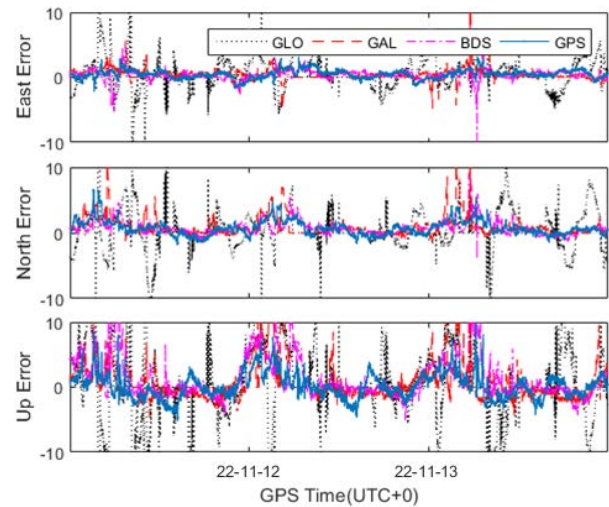


Fig. 3. Positioning accuracy (SPP).

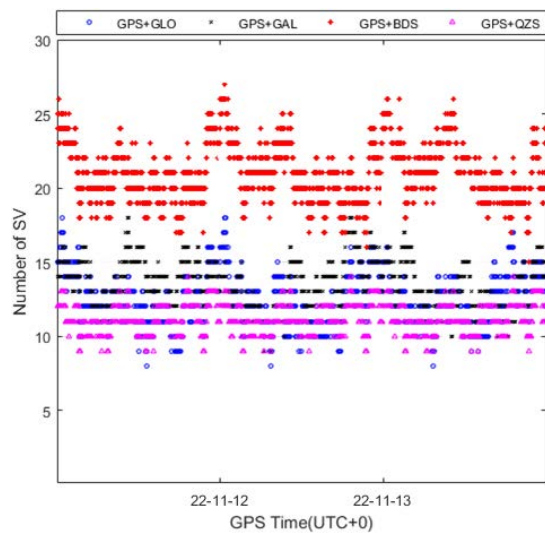


Fig. 4. Number of SV's (dual combined solution).

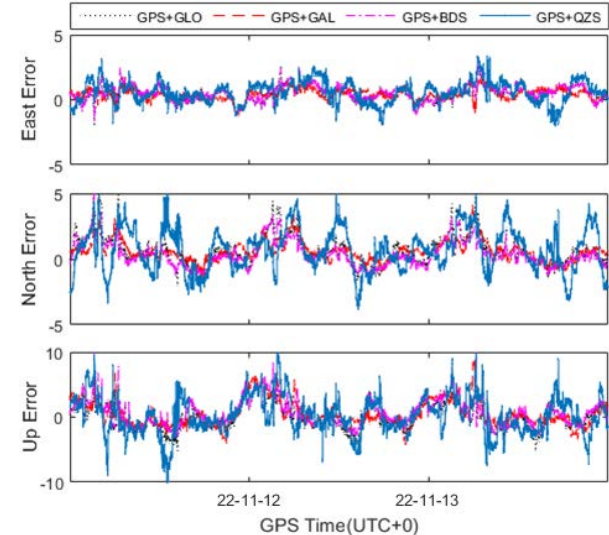


Fig. 5. Positioning accuracy (dual combined solution).

Table 3. GNSS single point positioning accuracy (11-11-2022 ~ 11-13-2022).

System	Avg. SVs	Horizontal (CEP)	Vertical (PE)	Horizontal (2DRMS)	Vertical (2DRMS)	Avg. GDOP	Availability (%)
GPS	7.76	1.287	1.319	3.090	3.938	2.624	100.0
GLONASS	5.77	4.766	7.391	11.439	22.063	3.953	68.9
Galileo	6.66	1.722	2.570	4.132	7.672	2.907	91.3
BeiDou	14.70	1.329	2.605	3.190	7.776	1.84	100.0

각각의 조합으로 산출한 위치오차 (2DRMS)는 GPS+GLONASS 수평 3.788 m 수직 5.095 m, GPS+Galileo 수평 1.992 m 수직 3.154 m, GPS+BeiDou 수평 1.869 m 수직 3.040 m로 산출되었다.

2차 시험은 3일 (72시간)간 실시되었고, Fig. 2는 각 단일항법에 사용된 위성 수를 보여주며, Fig. 3은 각각의 항법시스템 단독으로 계산된 사용자 위치오차를 나타낸다. Fig. 3에서 파란색 실선은 GPS 단독으로 계산된 사용자 위치오차이고 점점색 점선은 GLONASS, 빨간색 파선은 Galileo, 분홍색 일점쇄선은 BeiDou 위치오차를 나타낸다.

Table 3과 같이 단일 시스템의 위성만 이용하여 계산된 GPS 위치오차 (2DRMS)는 수평 3.090 m 수직 3.938 m, GLONASS 수평 11.439 m 수직 22.063 m로 산출되었고 가용성 또한 68.9%로 4개의 항법시스템 중에서 가장 낮았다. Galileo 위치오차는 수평 4.132 m 수직 7.672 m, BeiDou 수평 3.190 m 수직 7.776 m로 산출되었다. Galileo, BeiDou 단독항법의 경우 1차 시험 결과에 비해 수직 방향 위치오차가 증가 하였고, 1차 시험에서 데이터 신뢰성 문제로 제외한 GLONASS는 안테나 위치를 GNSS 신호를 수신하기 용이한 곳으로 이동했음에도 불구하고 가용성 및 정확도 성능

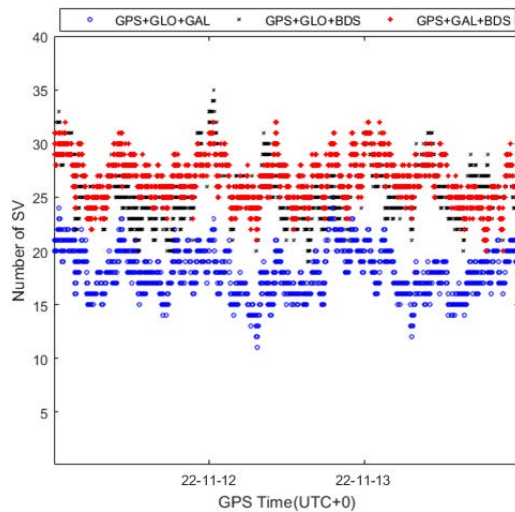


Fig. 6. Number of SV's (triple combined solution).

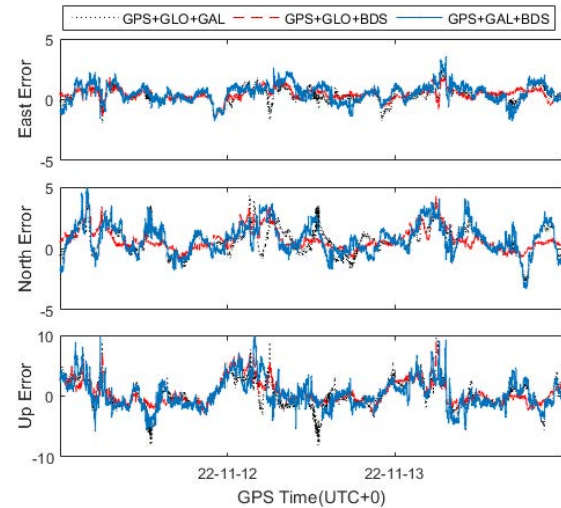


Fig. 7. Positioning accuracy (triple combined solution).

Table 4. Dual-GNSS combined positioning accuracy (11-11-2022 ~ 11-13-2022).

System	Avg. SVs	Horizontal (CEP)	Vertical (PE)	Horizontal (2DRMS)	Vertical (2DRMS)	Avg. GDOP	Availability (%)
GPS+GLONASS	12.370	1.667	1.950	4.000	5.821	1.987	100.0
GPS+Galileo	13.433	1.266	1.261	3.038	3.764	1.886	100.0
GPS+BeiDou	21.223	0.927	1.385	2.224	4.133	1.512	100.0
GPS+QZSS	11.162	1.086	1.409	2.607	4.207	2.119	100.0

Table 5. Triple-GNSS combined positioning accuracy (11-11-2022 ~ 11-13-2022).

System	Avg. SVs	Horizontal (CEP)	Vertical (PE)	Horizontal (2DRMS)	Vertical (2DRMS)	Avg. GDOP	Availability (%)
GPS+GLONASS+Galileo	18.042	1.427	1.619	3.424	4.833	1.027	100.0
GPS+GLONASS+BeiDou	25.832	1.195	1.591	2.869	4.749	0.928	100.0
GPS+Galileo+BeiDou	26.895	1.085	1.377	2.603	4.110	1.241	100.0

이 떨어졌다. 아직까지 국내에서는 GLONASS 관측위성의 개수가 다른 위성에 비해 적어 가용성이 떨어지고 위치오차도 커지는 경향을 보였다.

GNSS 복합항법은 도심지에서 GPS 위성의 가용성이 좋지 않아 사용자 위치오차가 증가하거나 항법 위치계산을 수행할 수 없을 경우 다른 항법시스템의 관측치를 함께 사용하여 항법해를 산출할 수 있고 사용자 위치오차를 개선할 수 있는 유용한 방법으로 알려져 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 GPS를 기준으로 GLONASS, Galileo, BeiDou 위성군을 조합하여 dual-GNSS 위성군으로 복합항법 정확도를 평가하였다. 2개 이상의 복합 시스템 위치 정확도 시험에서는 충분한 GNSS 위성의 가용성 확보가 가능하여 Elevation mask angle은 15 degree, Minimum C/No 값은 35 dBHz 이상으로 제한하였다. Fig. 4는 시간에 따른 dual-GNSS 복합항법에 사용된 위성 수를 보여주며, Fig. 5는 각각의 복합 항법시스템으로 계산된 사용자 위치오차를 나타내었다. 파란색 실선은 GPS+QZSS, 검정색 점선은 GPS+GLONASS, 빨간색 파선은 GPS+Galileo, 분홍색 일점쇄선은 GPS+BeiDou의 위치오차를 나타낸다. Dual-GNSS 관측 데이터를 이용한 복합항법 위치오차는 다음과 같다. GPS+GLONASS 위치오차 (2DRMS)는 수평 4.000 m 수직 5.821 m, GPS+Galileo 수평 3.038 m 수직 3.764 m, GPS+BeiDou 수평 2.224 m 수직 4.133 m, GPS+QZSS 수평 2.607 m 수직 4.207 m로 산출되었다.

Table 4와 같이 전반적으로 단일 항법 시스템을 이용한 위치 정확도 보다 복합항법을 이용한 위치 정확도 성능이 전반적으로 개선되었고, 특히 고도오차가 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 또한 항법 위치계산을 위한 가용성도 개선되어 100%의 가용성을 보이고 Geometric Dilution of Precision (GDOP) 또한 낮아지는 것을 볼 수 있다.

마지막으로 triple-GNSS 위성군을 조합하여 복합항법 정확도를 평가하였다. Dual-GNSS 위성군을 사용한 복합항법 위치 정확도 시험과 같이 Elevation mask angle은 15 degree, Minimum C/No 값은 35 dBHz 이상으로 제한하였다. Fig. 6은 72 시간 동안의 시간에 따른 위성 수를 보여주며, Fig. 7은 triple-GNSS 위성군을 사용한 복합 항법시스템 위치 오차를 보여준다. Table 5에서 보이는 바와 같이 triple-GNSS 위성군을 조합으로 계산된 위치오차 (2DRMS)는 GPS+GLONASS+Galileo 수평 3.424 m 수직 4.833 m, GPS+GLONAGLO+BeiDou 수평 2.869 m 수직 4.749 m, GPS+Galileo+BeiDou 수평 2.603 m 수직 4.110 m로 산출되었다.

Table 5에서 GPS+GLONASS+Galileo 조합의 결과는 Table 4의 GPS+GLONASS 보다 향상된 정확도 성능을 보이지만 GPS+Galileo에 비하여 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 GPS+GLONASS+BeiDou, GPS+Galileo+BeiDou 두 조합의 결과들도 동일한 결과를 나타내었음을 확인하였다. 이와 같은 경향을 나타내는 이유를 분석하기 위하여 triple-

GNSS 위성군이 포함된 dual-GNSS 위치 정확도의 평균값을 계산하여 triple-GNSS 측위 결과와 비교하였다. Table 4에서 GPS+GLONASS와 GPS+Galileo 위치 정확도의 평균은 수평 3.519 m 수직 4.792 m이다. 이러한 방식으로 나머지 GNSS 조합도 같은 방식으로 계산하여 triple-GNSS 위성군의 복합항법 위치 정확도와 비교한 결과 triple-GNSS 위성군으로 계산한 항법 위치 정확도가 Dual-GNSS 위성군으로 계산된 위치 정확도의 평균과 유사함을 확인할 수 있었다. Choi et al. (2015)에서는 24시간 MKPO 상시관측소 관측 데이터로 계산된 단일 항법 결과와 복합 항법 결과를 제시하였는데, 그 값을 2DRMS (95%) 값으로 변환한 결과는 다음과 같다. GPS 위치오차는 수평 3.03 m 수직 5.38 m, BeiDou 수평 2.960 m 수직 4.82 m, GPS+GLONASS는 수평 3.260 m 수직 6.080 m, GPS+BeiDou 수평 2.960 m 수직 4.820 m, GPS+GLONASS+BeiDou는 수평 2.474 m 수직 4.360 m로 제시하고 있고, 다른 조합의 위치 정확도 결과는 없었다. 본 논문과 같은 GNSS 조합만을 추출하여 비교하면 수평오차는 거의 동등한 성능을 보이고 수직 오차는 약간의 차이가 있다. 이는 데이터 획득 시점 및 기간 위성배치 상황 등에 따른 현상이라 판단되고 충분한 시험시간 및 시험횟수를 반복하여 평균을 산출한다면 실제 위치오차 값은 평균에 수렴할 것이라 생각된다.

본 연구에서는 1차 시험 결과와 비교하여 2차 시험의 항법 위치오차가 전반적으로 커지는 경향을 보였다. 그러나 2차 시험에 사용된 관측데이터가 월등히 많기 때문에 통계적 정확도가 높아질 것을 예상할 수 있는 바 2차 시험의 결과가 더 신뢰할 만한 GNSS 항법 위치 정확도 평가라고 판단되었다.

5. 결론

본 논문에서는 외부 오차요인을 최대한 배제하고 동시에 가용한 모든 GNSS 관측 데이터를 이용한 GNSS 위치 정확도 성능 평가를 위하여, 고성능 GNSS 수신기로 동일 시간대의 관측치 정보를 저장하고 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS의 72시간 동안 단독항법 정확도 및 dual-GNSS, triple-GNSS의 조합을 통한 복합항법 정확도, 가용성 및 GDOP을 산출하여 성능을 평가하였다. GPS, Galileo, BeiDou 시스템은 24시간 동안 단일항법을 수행하는 데에 필요한 위성의 수가 충족되었으나 GLONASS는 항법계산이 불가능한 음영 시간 구간이 많이 발생하여 현재까지는 국내에서 GLONASS 신호만을 수신하여 단독 항법에 사용하기엔 적합하지 않다고 판단되었다. 또한 GLONASS의 경우 관측치의 오차 성분 때문에 GLONASS 관측치가 사용된 triple-GNSS 조합의 복합항법 정확도에 영향을 미쳐 오히려 복합항법 위치오차가 커지는 결과를 보였다. 반면에 GLONASS 관측치를 사용하지 않은 GPS, Galileo, BeiDou 조합의 복합항법 정확도는 각 항법시스템의 단일 항법 정확도보다 우수함을 확인하였다. 이는 가시위성의 증가에 따른 위성항법시스템 가용성과 Dilution of Precision (DOP) 향상의 결과로 항법 위치 정확도가 개선된 것으로 판단된다. 또한 triple-GNSS 조합의 결과에서 알 수 있듯이 여러 시스템의 조합으로 항법에 사용된 위성이 많다고 해서 반드시 위치 정확도가 향상된다고 볼 수 없음도 확인되었다.

향후 각 위성항법시스템들의 dual-frequency positioning 및 DGNSS에 대한 항법 정확도 평가를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 RS-2022-00143625).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, Y.-H. Park.; methodology, Y.-H. Park.; data acquisition S.-H. Park.; writing-original draft preparation, Y.-H. Park.; writing-review and editing, S.-H. Park, and J.-M. Park.; project administration, J.-H. Jeong.; validation, Y.-H. Park.; formal analysis, Y.-H. Park.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Application Consumer Center GLONASS 2022, [Internet], cited 2022, available from: <https://www.glonass-iac.ru/en/sostavOG>
- BeiDou ICD 2013, BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space, Open Service Signal (Version 2.0), China Satellite Navigation Office. https://gge.ext.unb.ca/Resources/beidou_icd_english_ver2.0.pdf
- BeiDou OS PS 2021, BeiDou Navigation Satellite System Open Service Performance Standard (Version 3.0) 2021, China Satellite Navigation Office. <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Officialdocument/202110/P020211014595952404052.pdf>
- Cai, C. & Gao, Y. 2007, Precise Point Positioning Using Combined GPS and GLONASS Observations, *Journal of Global Positioning Systems*, 6, 13-22.
- Choi, B.-K., Cho, C.-H., Cho, J. H., & Lee, S. J. 2015, Multi-GNSS Standard Point Positioning using GPS, GLONASS, BeiDou and QZSS Measurements Recorded at MKPO Reference Station in South Korea, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 4, 205-211. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2015.4.4.205>
- Choi, B.-K., Roh, K.-M., & Lee, S. J. 2013, Analysis of the Combined Positioning Accuracy using GPS and GLONASS Navigation Satellites, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 2, 131-137. <https://doi.org/10.11003/>

JKGS.2013.2.2.131

European GNSS Service Centre 2022, [Internet], cited 2016, available from: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>

Galileo ICD 2021, European GNSS (GALILEO) Open Service, OS SIS ICD, Issue 2.0, 2021, European GNSS Service Centre. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo_OS_SIS_ICD_v2.0.pdf

Galileo OS SDD 2019, EUROPEAN GNSS (GALILEO) Open Service Service Definition Document Issue 1.1, May 2019, European GNSS Service Centre. https://www.gsc-europa.eu/sites/default/files/sites/all/files/Galileo-OS-SDD_v1.1.1.pdf

GLONASS ICD 2008, Navigational radiosignal in bands L1, L2 (Edition 5.1) (Moscow: Russian Institute of Space Device Engineering). [https://www.unavco.org/help/glossary/docs/ICD_GLONASS_5.1_\(2008\)_en.pdf](https://www.unavco.org/help/glossary/docs/ICD_GLONASS_5.1_(2008)_en.pdf)

GLONASS OS PS 2020, GLOBAL Open Service Performance Standard (OS PS) Edition 2.2 Korolev 2020. https://www.glonass-iac.ru/upload/docs/stehos/stehos_en.pdf

GPS GOV 2022, [Internet], cited 2022, available from: <https://www.gps.gov/systems/gps/space>

GPS ICD 2000, Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces, GPS.GOV, <https://www.gps.gov/technical/icwg/ICD-GPS-200C.pdf>

GPS SPS PAR 2021, Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Analysis Report, January 2021, https://www.nstb.tc.faa.gov/reports/2020_Q4_SPS_PAN_v2.0.pdf

Li, X., Zhang, X., & Guo, F. 2009, Study on Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS, Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, GA, 22-25 Sept 2009, pp.2449-2459.

Santerre, R., Pan, L., Cai, C., & Zhu, J. 2014, Single Point Positioning Using GPS, GLONASS and BeiDou Satellites, Positioning, 5, 107-114. <https://doi.org/10.4236/pos.2014.54013>

Tarrío, P., Bernardos, A. M., & Casar, J. R. 2011, Weighted Least Squares Techniques for Improved Received Signal Strength Based Localization, Sensors, 11, 8569-8592, <https://doi.org/10.3390/s110908569>

Test and Assessment Research Center of China Satellite Navigation Office 2022, [Internet], cited 2016, available from: <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>

Tolman, B. W., Kerkhoff, A., Rainwater, D., Munton, D., & Bank, J. 2010, Absolute Precise Kinematic Positioning with GPS and GLONASS, ION GNSS 2010, Portland, OR, 21-24 Sept 2010, pp.2565-2576.



Yong-Hui Park received the Master's degree in Electronics from Hanbat National University in 2002. He has been working at R&D Center, Dusitech, Inc. since 1999. His research interests include GNSS Receiver, GNSS positioning algorithm.



Jin-Ho Jeong received the Doctor's degree in Electronics from Paichai University in 2017. He has been working at R&D Center, Dusitech, Inc. since 1998. His research interests include GNSS, UAV.



Jin-Mo Park received the Master's degree in Electronics from Hanbat University in 2015. He has been working at R&D Center, Dusitech, Inc. since 2000. His research interests include GNSS receiver development.



Sung-Hyun Park received the Master's degree in Electronics from Paichai University in 2014. He has been working at R&D Center, Dusitech, Inc. since 2014. His research interests include GNSS receiver test.

