

Impact of Multi-GNSS Measurements on Baseline Processing for Control Surveying Applications

Komal Narayan Pawar¹, Seonghyeon Yun¹, Hungkyu Lee^{2†}, Dinh Huy Nguyen³

¹Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

²School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea

³Department of Geodesy and Geomatics Engineering, National University of Civil Engineering, Hanoi 10000, Vietnam

ABSTRACT

A series of experiments have been carried out by using National Geographic Information Institute(NGII) 's Continuously Operating Reference Station (CORS) data with various strategies to analyze the impact of multi-GNSS measurements on baseline processing. The results of baseline processing were compared in terms of ambiguity fixing rate, precision, and hypothesis tests were conducted to confirm the statistical difference. The combination of multi-GNSS measurements has helped to improve ambiguity fixing rate, especially under harsh positioning environments. Combination of GPS, Galileo, BeiDou could get better precision than that of GPS, GLONASS, Galileo, and adding QZSS made the baseline solution's vertical component more precisely. The hypothesis tests have statistically confirmed that the inclusion of the multi-GNSS in the baseline processing enables not only to reduce field observation time length but also to enhance the solution's precision. However, it is of interest to notice that results of the baseline solution are dependent upon the software used. Hence, comprehensive studies should be performed shortly to derive the best practice to select the appropriate software.

Keywords: multi-GNSS, control survey, baseline processing, precision

1. INTRODUCTION

기준점측량은 위치 결정과 표현의 기준이 되는 물리적 표지의 위도, 경도, 타원체고, 정표고 등 성과 산정을 위한 관측과 계산 절차를 통칭한다. Global Navigation Satellite System (GNSS)는 그 정확도, 관측 효율성, 생산성으로 인해 정표고 결정을 제외하고는 대부분의 기준점 측량에 사용하고 있다. 특히, 기준점측량은 그 결과가 미치는 영향이 크므로 세부적인 절차와 방법이 엄격하게 규정되고 있으며, 우리나라에서는 국토지리정보원의 국가기준점측량과 공공측량 작업규정 등이 대표적이다. 그러나 이들 작업규정의 GNSS 측량을 살펴보면, 중국이 2020년 7월

BeiDou 시스템 위성배치 완료 이후 Full Operational Capability (FOC)를 선언하였고, 유럽연합은 Galileo 위성 20대 이상을 궤도에 배치하였으며, 또한 일본에서 지역적 위성항법시스템 Quasi Zenith Satellite System (QZSS)을 구축하고 있음에도 다중 GNSS 시대의 위성항법 기술발전을 반영하지 못하고 있다. 국토지리정보원은 이와 같은 GNSS 측위 환경 변화를 측량 분야에 적극 활용하기 위해 자체 운영 상시관측소의 안테나와 수신기를 교체해 다중 GNSS 관측데이터를 제공하고 있다. 다중 GNSS 관측데이터를 기준점 측량에 활용하면 GPS 단독 방식에 비해 위성의 기하강도 개선에 따라 미지정수 결정 성능과 정확도에 긍정적인 영향을 미칠수 있다 (Li et al. 2018, Ma et al. 2020). 특히, 그동안 주위 장애물 영향으로 충분한 GPS 관측데이터 취득이 어려워 측량이 불가능했던 지역에서 측량은 물론 정확도 향상에 따라 관측시간 단축에 효과가 있을 것으로 기대된다.

Quan et al. (2016)은 각 위성시스템 단독과 다중 GNSS 조합 측위를 수행해 그 미지정수 결정율, 정밀도, 정확도를 비교하였다. 이를 통해 다중 GNSS 조합으로 측위 정밀도와 정확도 향상, 대부분의 경우 미지정수 결정율이 상승하는 것을 보였다. 그러나 다중경로가 비교적 크게 발생하거나 위성 조합 수가 많아지는 경

Received May 24, 2021 Revised May 27, 2021 Accepted May 28, 2021

†Corresponding Author

E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3777 Fax: +82-55-285-9491

Komal Narayan Pawar <https://orcid.org/0000-0002-6863-8751>

Seonghyeon Yun <https://orcid.org/0000-0002-7135-0046>

Hungkyu Lee <https://orcid.org/0000-0002-7127-9702>

Dinh Huy Nguyen <https://orcid.org/0000-0002-2049-3338>

Table 1. Current status of multi-GNSS constellation and their signals (28th April 2021).

GNSS constellation	SV type	Number of satellites	Signals	Frequency bands (MHz)
GPS	IIR	8	L1 C/A, L1/L2 P(Y)	L1 (1575.42)
	IIR-M	7	+ L2 C + L1L2 M	L2 (1227.60)
	III F	12	+ L5	L5 (1176.45)
	III A	4	+L1C	
GLONASS	M	21	L1OF, L2OF, L1SF, L2SF (FDMA)	L1 (1602.00)
	M+	2	+ L3OC (CDMA)	L2 (1246.00)
	K	1	+ L2OC (CDMA)	L3 (1202.025)
Galileo	IOV	3	Open Service: E1-B/C, E5a-I/Q, E5b-I/Q Public regulated service: E1-A, E6-A	E1 (1575.42) E5a (1176.45) E5b (1207.14)
	FOC	19	Commercial service: E6-B/C	E6 (1278.75)
BeiDou	GEO	7	Open service: B1-I, B2-I	B1 (1561.098)
	IGSO	10	Authorized service: B1-Q, B2-Q, B3-I/Q	B2 (1207.14)
	MEO	27		B3 (1268.52)
QZSS	QZS-1~4	4	L1-C/A, L1C, L2C, L5	L1 (1575.42)
			L1-SAIF	L2 (1227.60)
			L6-LEX	L5 (1176.45)
				L6 (1278.75)

우 일부 위성에 대한 미지정수 결정 오류 등으로 미지정수 결정율이 하락할 수 있다고 분석했다. Msaewe et al. (2017)은 GPS 단독과 GLONASS, BeiDou를 추가 조합하여 측위를 수행하고, 다중 GNSS 조합에 따른 미지정수 결정율과 측위 정밀도 향상을 확인하였다. 특히, 위성 기하배치가 불량한 경우 다중 GNSS 조합 영향이 크다고 보고하였다. Yun et al. (2019)은 다중 GNSS 신호 주파수, 위성 수 등 당시 최신 현황에 대해 조사하고, 이들이 Standard Point Positioning (SPP)에 미치는 영향을 분석하고자 절사각(cut-off angle), 다중 GNSS 데이터 조합 등 조건을 달리해 측위를 수행하였다. 그 결과 절사각 증가에 따라 다중 GNSS 조합에 의한 연속성 향상이 두드러졌으며, GPS와 Galileo 포함이 정확도 향상에 효과적인 것으로 나타났다. Choi et al. (2019)는 GPS와 BeiDou 통합 측위 알고리즘을 개발하고 100~300 km의 장기선에 대한 Real-Time Kinematic (RTK) 측위를 수행하여 단일 시스템 측위에 비해 측위 정확도와 신뢰성이 향상됨을 보였다.

다중 GNSS 관련하여 수행된 연구의 대부분은 SPP와 RTK 측위에 미치는 영향을 분석한 것으로, 정적관측과 기선해석에 기반하는 기준점측량에 미치는 영향을 분석해 새로운 GNSS 측위 환경에 대응하기 위한 연구는 국내외에서 찾기 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 정적 방식 기준점측량의 기선해석에서 다중 GNSS 데이터 포함 여부가 성능에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 국토지리정보원 상시관측점 12개소의 일주일 분량 데이터를 다중 GNSS 조합, 절사각, 관측시간, 소프트웨어를 달리해 처리하여 미지정수 결정율과 정밀도를 비교하고 가설 검정을 통해 다중 GNSS 데이터 포함 여부의 효과를 통계적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 기준점측량에서 관측시간 단축과 같이 다중 GNSS 관측으로 얻을 수 있는 이점들을 정리하였다.

2. CURRENT STATUS OF MULTI-GNSS CONSTELLATION AND INFRASTRUCTURE IN KOREA

2.1 Current Status of Multi-GNSS Constellation

GPS와 GLONASS의 현대화, BeiDou의 FOC 선언, Galileo와 QZSS 구축 진행 등 GNSS 측위 환경이 지속해서 변하고 있다. Table 1은 2021년 4월 28일을 기준으로 하는 다중 GNSS 최신 현황을 조사해 요약한 것이다. GPS는 31대의 위성이 운용되고 있으며 (NAVCEN 2021), 새로운 민간·군용 신호 송출 및 현대화 위성 발사로 측위 성능 향상을 도모하고 있다 (Grewal et al. 2020). GLONASS는 시스템 복구와 함께 현대화를 진행하여 총 24대의 위성이 운용 중이며, 현대화 위성 세대교체를 위해 K 시리즈 위성 발사를 시작했다 (IAC 2021a). Galileo는 현재 22대의 위성을 궤도에 배치해 FOC에 매우 근접했으며, 사용자에게 따라 다양한 서비스를 제공한다 (EUSPA 2021). BeiDou는 Geostationary orbit (GEO), Inclined Geosynchronous Orbit (IGSO), Medium Earth Orbit (MEO)에 대해 각각 7대, 10대, 27대로 가장 많은 위성을 운용하고 있으며 (IAC 2021b), 최근 FOC를 선언하며 전세계적 서비스 시스템을 완전히 구축하였다 (BEIDOU 2021). QZSS는 현재 4대의 위성을 운용하고 있으며 7대 배치를 목표로 위성 개발과 생산을 지속하고 있다 (QZSS 2021).

2.2 Multi-GNSS Infrastructure in Korea

국내에서는 국토지리정보원을 비롯한 8개 국가기관에서 총 205개소의 GNSS 상시관측소를 운영하고 있으며, 2021년 5월 현재 GNSS 통합데이터센터 (<http://gnssdata.or.kr>)를 통해 제공되고 있는 관측데이터는 162개소를 대상으로 한다. Table 2에서 확인할 수 있듯이 국가기상위성센터(NMSC), 국립해양측위원(NMPNT)은 GPS와 GLONASS 데이터만 제공하는 반면 서울특별시, 한국지질자원연구원(KIGAM), 한국천문연구원(KASI), 국토지리정보원(NGII)에서는 GPS, GLONASS를 포함해 Galileo 데이터를 제공하고 있다. 특히, 다중 GNSS 관측데이터가 Receiver Independent Exchange format (RINEX) 2.11 형식으로 제공되고

Table 2. Summary of types and numbers of receivers of CORS in Korea (G: GPS, R: GLONASS, E: Galileo).

Institutes	Number of station (available)	Receiver		Available GNSS data
		Type	Number	
LX	30(0)	-	-	Not available
NMSC	24(22)	LEICA GR25	1	G, R
		SEPT POLARX4	9	
		SEPT SSR4	1	
		JPS DELTA	2	
		Trimble NetR9	8	
NMPNT	35(32)	Trimble NetR8	1	G, R
		TRIMBLE NETR8	28	
		TRIMBLE NETR9	1	
		TRIMBLE 4000SSE	2	
SEOUL	5(5)	TRIMBLE ALLOY	5	G, R, E
KSWC	5(0)	-	-	Not available
KIGAM	18(18)	SEPT POLARX5	18	G, R, E
KASI	9(8)	TRIMBLE NETR9	8	G, R, E
		LEICA GR10	4	
		LEICA GR25	1	
		LEICA GR50	13	
		TRIMBLE NETR9	43	
NGII	79(77)	TRIMBLE ALLOY	14	G, R, E
		TRIMBLE NETR8	2	
		TRIMBLE NETR8	2	
		TRIMBLE NETR8	2	

있어 수신기가 GPS, GLONASS, Galileo 이외의 데이터를 취득할 지라도 3가지 시스템에 대한 것만 제공되는 한계가 있다.

실시간으로 센티미터 수준의 정확도로 위치결정이 가능한 GNSS RTK 측량 지원을 위해 국토지리정보원과 서울특별시는 GPS와 GLONASS에 기반한 Virtual Reference Station (VRS) 방식의 네트워크 RTK 서비스를 제공 중이다. 추가로, 국토지리정보원은 실시간 GNSS 측위 서비스 다양화를 통한 활용 확대를 위해 Geo++ 사 GNSMART에 의한 FKP (Local Area Correction) 서비스를 함께 제공 중이며, Galileo와 BeiDou를 포함하는 다중 GNSS RTK 측위 지원을 위해 GNSMART 시스템 업그레이드 사업을 추진 중에 있다 (NGII 2019).

3. DATA AND METHODOLOGY

기준점측량의 기선해석에서 다중 GNSS 관측데이터 포함 이 미치는 영향 분석을 위해 수행한 실험 절차를 Fig. 1에 나타내었다. 이와 같은 연구 절차는 GNSS 관측데이터 확보·편집, 다중 GNSS 조합·관측시간·절사각·소프트웨어 등 여러 조건에 따른 기선처리, 측위 정밀도 분석을 위한 표준편차 계산·비교와 이에 대한 가설검정으로 이루어졌다. 이를 위해 가급적 짧은 기선을 형성하는 GNSS 상시관측점 12개소를 선정하였고 국토지리정보원으로부터 이에 대한 바이너리 형식 관측데이터 취득 후 GPS, GLONASS, Galileo와 더불어 BeiDou와 QZSS 데이터를 포함하도록 RINEX 3.02 버전으로 변환하였다. 관측데이터는 2020년 6월 1일부터 7일까지의 일주일 분량이며, 각 파일은 30초 간격으로 24시간 취득 데이터이다.

12개 상시관측소를 이용해 Fig. 2와 같이 기선장 약 26 ~ 41 km

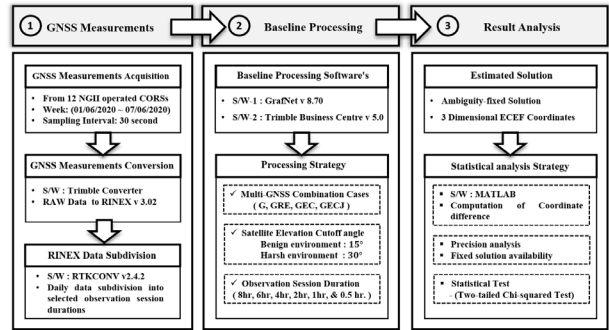


Fig. 1. Overview of experimental procedure including data acquisition, conversion, processing, and result analysis of multi-GNSS measurements.

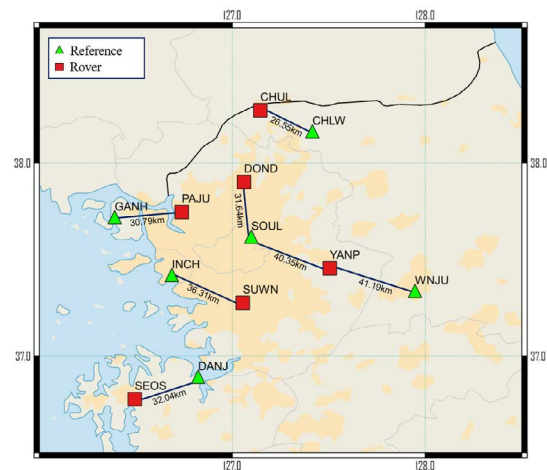


Fig. 2. Seven baselines formed for multi-GNSS measurements processing.

Table 3. Processing conditions of multi-GNSS measurements.

Condition	Description
Number of sessions per baseline	3 sessions / day 7days = 21 sessions
Baselines	CHLW-CHUL, GANH-PAJU, SOUL-DOND, DANJ-SEOS, INCH-SUWN, SOUL-YANP, WNJU-YANP
Combinations of multi-GNSS	G: GPS-only GRE: GPS + GLONASS + Galileo GEC: GPS + Galileo + BeiDou GECJ: GPS + Galileo + BeiDou + QZSS
Observation time	8-hr, 6-hr, 4-hr, 2-hr, 1-hr, 0.5-hr
Cut-off angle	15° and 30°

의 7개 기선을 정의했으며, 기선처리 시 다중 GNSS 데이터 포함 이 미치는 영향을 분석하고자 Table 3에 요약한 바와 같이 다중 GNSS 조합 방법을 비롯해 관측시간, 절사각, 소프트웨어 등의 조건을 고려하였다. 먼저, 관측시간에 따른 다중 GNSS 데이터 포함 효과 분석을 위해 24시간 데이터를 8시간, 6시간, 4시간, 2시간, 1시간, 0.5시간의 분량으로 재구성하였다. 이 때, 6가지로 나뉜 관측시간의 중심을 04:00:00, 12:00:00, 20:00:00로 통일해 각 경우에 대해 매일 3세션으로 편집해 정밀도를 계산 하고자 하였다. 또한, 기선처리에는 GPS 데이터 단독 처리 포함 다중 GNSS 조합 GRE (GPS + GLOANSS + Galileo), GEC (GPS + Galileo +

Table 4. Test statistics of SW-1 processed results for cut-off angle 15°.

Obs. time	Baseline	Horizontal				Vertical			
		G	GRE	GEC	GECJ	G	GRE	GEC	GECJ
8 hr.	CHLW-CHUL		13.54	13.58	11.23		20.4	16.72	18.7
	GANH-PAJU		17.42	15.11	15.82		12.65	12.79	11.58
	SOUL-DOND		13.15	15.08	12.16		18.82	20.03	19.6
	DANJ-SEOS	Reference	11.91	14.57	14.64	Reference	15.29	13.97	15.87
	INCH-SUWN		7.71	5.59	4.99		20.4	18.31	18.52
	SOUL-YANP		14.01	11.12	9.5		27.21	21.97	26.01
	WNJU-YANP		11.25	10.79	11.17		22.35	20.79	18.24
6 hr.	CHLW-CHUL	26.59	14.56	14.51	13.72	23.06	22.94	19.09	22.8
	GANH-PAJU	29.24	20.82	18.2	20.56	14.49	15.99	11.68	10.87
	SOUL-DOND	27.73	19.4	20.83	18.88	22.19	20.24	18.52	19.3
	DANJ-SEOS	19.27	15.23	18.15	23.32	20.56	19.41	14.7	16.06
	INCH-SUWN	25.68	9.85	6.84	6.84	31.79	23.43	23.7	22.54
	SOUL-YANP	17.33	17.1	11.77	10.52	34.65	29.45	25.38	24.66
	WNJU-YANP	22.1	14.14	10.45	8.98	36.06	21.88	23.82	22.74
4 hr.	CHLW-CHUL	27.06	18.5	21.99	17.85	38.33	38.1	25.41	28.62
	GANH-PAJU	45.08	26.78	28.65	28.6	19.24	17.08	14.29	13.23
	SOUL-DOND	40.37	24.47	20.09	19.14	23.43	21.06	16.07	16.38
	DANJ-SEOS	23.87	16.83	20.19	19.51	23.14	21.57	18.92	17.06
	INCH-SUWN	12.89	15.49	9.6	10.11	35.5	29.63	28.62	29.46
	SOUL-YANP	20.17	14.72	17.39	14.65	38.65	35.39	27.3	27.48
	WNJU-YANP	21.14	20.52	10.08	12.52	68.94	29.7	28.98	25.89
2 hr.	CHLW-CHUL	53.97	47.35	23.21	21.94	57.17	48.83	43.91	47.29
	GANH-PAJU	113.7	42	41.02	44.4	29.07	17.7	20.22	17.89
	SOUL-DOND	71.91	52.19	32.61	29.01	16.99	15.34	13.59	13.46
	DANJ-SEOS	30.6	37.02	16.53	23.54	34.05	29.41	24.25	23.03
	INCH-SUWN	16.6	16.25	9.77	10.25	45.53	37.7	31.51	34
	SOUL-YANP	26.1	20.73	16.06	15.91	44.43	43.62	34.43	34.82
	WNJU-YANP	31.92	54.77	14.85	15.39	31.14	26.84	29.65	29.43
1 hr.	CHLW-CHUL	378.36	81.17	105.24	113.46	119.52	73.6	64.96	72.94
	GANH-PAJU	960.86	779.97	260.87	238	63.73	61.08	32.93	29.82
	SOUL-DOND	145.66	123.86	93.53	92.35	34.06	24.83	21.99	23.57
	DANJ-SEOS	171.68	149.21	193.46	139.45	37.88	41.36	48.52	45.29
	INCH-SUWN	178.55	80.52	123.69	137.07	97.57	81.69	81.62	68.71
	SOUL-YANP	96.66	54.52	40.66	53.89	104.08	56.99	50.27	26.84
	WNJU-YANP	156.58	171.74	112.11	101.62	62.51	49.05	38.83	34.55
0.5 hr.	CHLW-CHUL	232.62	167.62	143.32	146.7	90.53	69.42	74.01	77.99
	GANH-PAJU	945.48	569.01	389.3	433.41	47.51	57.6	53.38	48.6
	SOUL-DOND	137.02	168.17	90.93	103.61	31.93	24.43	23.58	25.06
	DANJ-SEOS	183.58	159.03	149.34	140.18	67.67	49.31	54.11	44.14
	INCH-SUWN	248.61	131.66	97.07	124.22	110.8	157.31	120.76	92.82
	SOUL-YANP	172.28	389.18	46.16	65.03	161.56	153.04	59.55	73.96
	WNJU-YANP	202.66	177.13	146.18	142.52	93.86	82.98	63.73	65.45

BeiDou), GECJ (GEC + QZSS)를 적용하였고, 양호 · 불량한 관측환경에서의 측위 상황을 모의하고자 절사각을 15°와 30°로 다르게 설정하였다. 마지막으로, 이들 조건에 대한 관측데이터 처리에 SW-1과 SW-2로 구분한 두가지 소프트웨어를 활용해 소프트웨어 차이에 의한 영향도 분석하였다. 다중 GNSS 조합 4가지와 관측 시간 6가지 조합에 의한 24가지 실험 경우를 구성하고, 여기에 절사각과 소프트웨어를 달리해 각 21개 세션을 가지는 7개 기선에 적용하여 총 14,112회 관측데이터를 처리하였다. 특히, 본 연구에서 정의한 기선은 그 길이가 26 ~ 41 km에 달하는 중기선으로 최종 기선벡터 추정에는 무전리층 선형결합 관측데이터를 사용했음에 주목할 필요가 있다.

관측데이터 처리 이후 성공적인 미지정수 결정 여부를 확인하

고, 결과의 정밀도 평가를 위해 각 기선의 미지점 추정 좌표의 표준편차를 계산하였다. 각기 다른 조건에 대한 미지점 추정좌표의 정밀도 차이가 통계적으로 유의미한지 확인하기 위해 가설검정을 실시하였다. 검정에는 기준이 되는 분산과 비교 대상의 분산을 비교하는 카이제곱(Chi-square)을 적용했으며, 귀무가설과 대립가설은 Eq. (1)과 같이 각각 기준과 비교 대상의 분산이 통계적으로 같다/같지않다로 정의하였다. Eq. (2)로 검정통계량을 계산해 유의수준 5%에 대한 양쪽꼬리 검정하였다 (Kim et al. 2009).

$$\begin{cases} H_0: \sigma^2 = S^2 \\ H_a: \sigma^2 \neq S^2 \end{cases} \quad (1)$$

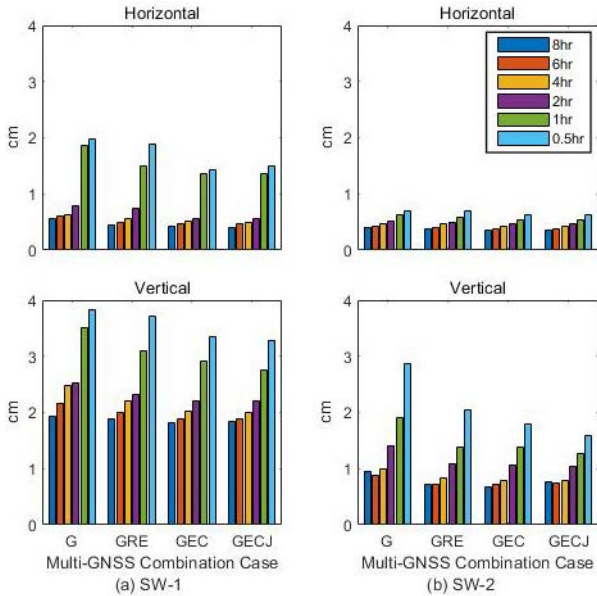


Fig. 3. The standard deviation with respect to observation time for cut-off angle 15°.

$$\chi^2 = \frac{\nu S^2}{\sigma^2} \tag{2}$$

여기서 H_0 , H_a 는 각각 귀무가설과 대립가설, χ^2 는 카이제곱 검정 통계량, ν 는 자유도, σ^2 과 S^2 는 각각 기준과 비교대상의 분산이다.

동일 소프트웨어 결과에 대한 다중 GNSS 조합과 관측시간에 따른 정밀도 차이 검정에서는 절사각 15°로 설정한 8시간 분량 GPS 단독처리 결과를 기준으로 나머지 조건을 비교하였다. 그 결과, 24가지 실험 경우에 대한 검정을 7개 기선에 대해 2가지 절사각과 2개 소프트웨어로 각각 수행하여, 665회 검정을 수행하였다. 두 소프트웨어 사이 정밀도 차이 검정은 동일한 다중 GNSS 조합, 관측시간, 절사각에 대해 SW-1 결과를 기준으로 SW-2를 검사하는 방식으로 진행되어 총 336회 검정이 이루어졌다. Table 4는 절사각 15°일 때 SW-1의 다중 GNSS 조합과 관측시간에 대한 가설검정 결과를 예시로 나타낸 것이다. Table 4에는 Eq. (2)로 계산한 검정통계량이 다중 GNSS 조합, 관측시간, 기선, 그리고 수평과 높이방향에 따라 정리되어 있으며, 숫자 두께를 달리 표현해 검정기각 여부를 쉽게 파악할 수 있도록 하였다.

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

4.1 Benign Operational Environment

양호한 GNSS 환경에서의 관측 상황 고려해 절사각 15°로 설정해 7개 기선을 처리한 후 미지정수 결정율을 분석하였다. 관측시간이 0.5시간으로 짧아 데이터가 충분하지 않을 때를 제외하면 SW-1과 -2 모두 GPS 데이터만 단독 처리하더라도 모든 세션에서 미지정수를 정확히 결정하는 것으로 나타났다. 관측시간이 0.5시간일 때 다중 GNSS 조합 4가지 경우 모두 미지정수 결정율이

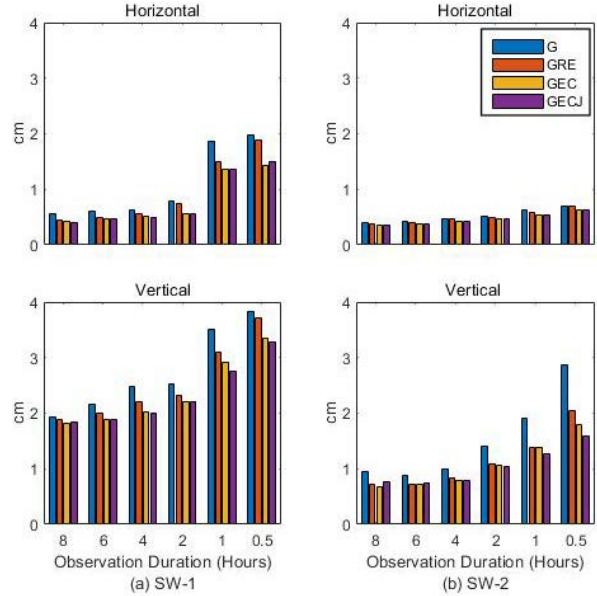


Fig. 4. The standard deviation with respect to multi-GNSS combination for cut-off angle 15°.

약 96 ~ 99%로 감소하였지만, 이는 여전히 높은 수준이다. GPS 데이터를 단독 처리하더라도 대부분 조건에서 미지정수를 정확하게 결정할 수 있는 것으로 나타나 관측환경이 양호할 때는 다중 GNSS 데이터 포함 여부가 정적관측 기선처리의 미지정수 결정에 미치는 영향은 제한적인 것으로 파악되었다.

미지정수를 정확히 결정한 세션에 대해 표준편차를 계산하여 Figs. 3과 4에 막대그래프로 나타내었다. Fig. 3은 다중 GNSS 조합을 기준으로 관측시간에 따라 수평과 수직, 그리고 SW-1과 SW-2로 구분해 나타낸 것이고, Fig. 4는 관측시간을 기준으로 다중 GNSS 조합에 따라 구분한 것이다. Fig. 3의 SW-1 결과를 살펴보면 수평과 높이, 다중 GNSS 조합 모두 관측시간이 감소할수록 표준편차가 증가하며, 관측시간이 1시간 이하가 되면 급격히 상승하는 것을 알 수 있다. SW-2의 수평방향에서는 표준편차가 관측시간 감소에 따라 증가하나 일정한 수준을 유지하는 반면 높이에서는 SW-1과 유사하게 관측시간이 2시간보다 짧아지면 표준편차의 급격한 상승이 나타났다.

Fig. 4에서는 관측시간 감소에 따른 표준편차 증가를 비롯해 다중 GNSS 조합 영향을 보다 직접적으로 확인할 수 있다. SW-1 결과를 보면 수평과 높이방향 모두 다중 GNSS 조합으로 표준편차 감소되어, 그 영향은 GRE보다 GEC에서 크게 나타났다. QZSS(J) 추가는 수평방향에 대해 그 영향이 미미하나 높이에서 눈에 띄는 영향을 미쳤으며, 이는 천정 방향 부근에 위치한 QZSS 관측데이터 추가로 수직성분 기하강도 증가에 따른 효과일 것으로 판단된다. SW-2 수평 표준편차는 Fig. 3에서 살펴본 바와 유사하게 다중 GNSS 관측데이터 추가로 정밀도가 상승하나 그 수준이 크지 않은 반면 높이방향에서는 그 영향이 확연하게 나타났으며, 관측시간이 짧아짐에 따라 GPS 단독 처리 결과와의 차이가 커지는 것을 관찰할 수 있다. 또한 SW-1 결과와 마찬가지로 특히 관측시간이 짧을 때 높이방향에서 QZSS 영향이 두드러지게 나

타났다.

여러 조건에 따라 계산된 표준편차에 통계적으로 유의미한 차이가 있는지 확인하고자 가설검정을 수행하였다. 앞서 Table 4에서 SW-1에 대한 결과를 예시로 나타냈으며, GPS 데이터 단독 처리 결과 중 수평 성분을 살펴보면 관측시간이 4시간으로 감소하면서 정밀도 저하에 따라 귀무가설을 기각하는 기선이 발생하였고, 관측시간 1시간 이하에서는 모든 기선이 기각되었다. 반면 다중 GNSS를 조합한 경우에는 관측시간 6 ~ 8시간에서 귀무가설을 기각하는 기선이 발생했으나, 이는 해당 조건의 정밀도가 검정 기준인 8시간 GPS 데이터 단독 처리 결과에 비해 통계적으로 더 정밀해 기각된 것이다. 다중 GNSS 조합 시 정밀도 저하로 인한 귀무가설 기각은 관측시간 2시간부터 나타났으며, 특히 GEC와 GECJ는 하나의 기선만이 기각되었다. 높이방향에 대한 검정 결과를 살펴보면 GPS 단독은 6시간, GRE는 4시간, GEC와 GECJ는 2시간 분량 데이터 처리 결과에서 정밀도 저하에 의한 기각 기선이 나타났다. 수평방향 성과만 고려할 때 GPS 단독 측량은 6시간까지 관측시간을 줄이더라도 8시간 분량 데이터 처리 결과와 동등한 수준의 정밀도로 측위가 가능할 것이고, 다중 GNSS를 조합한다면 GRE는 4시간, GEC, GECJ는 2시간까지 관측시간을 줄여도 무방할 것으로 보인다. 높이방향을 함께 고려하면 GPS 단독 처리는 8시간의 관측이 필요하나 GRE는 6시간, GEC와 GECJ는 4시간까지 관측시간을 단축하더라도 동등한 수준의 정밀도를 확보할 수 있을 것이다. SW-2 결과에서는 다중 GNSS 조합 4가지 모두 관측시간 4시간부터 수평과 높이방향에 정밀도 저하에 의한 귀무가설 기각 기선이 발생했다. 이때 GPS는 다수 기선이 기각되는 반면 다중 GNSS 조합한 경우에는 기각 기선이 하나에 불과했다. 관측시간이 2시간 이하로 감소함에 따라 4가지 GNSS 조합 조건 모두 다수 기선이 기각되는 것으로 나타나, SW-2를 사용할 때 GPS 단독은 6시간, 다중 GNSS 관측데이터 조합 시에는 4시간까지 관측시간을 단축시킬 수 있을 것이다.

앞서 정량적으로 비교한 SW-1과 SW-2의 표준편차 차이가 통계적으로 유의미한지 판단하기 위해 동일 조건에 대한 두 소프트웨어 결과를 검정했다. 수평방향에 대해 GPS 단독 처리 결과는 관측시간 8시간부터 다수의 기선에서 SW-2 결과가 더 정밀한 것으로 나타났으며, 1시간 이하에서는 모든 기선이 더 정밀하였다. 다중 GNSS 데이터를 조합하면 관측시간 4 ~ 8시간일 때 일부 기선에서 SW-2 결과가 더 정밀했으나 전반적으로 동등한 수준의 정밀도를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 관측시간이 1시간 이하로 줄어들어 따라 SW-2 결과의 정밀도가 통계적으로 더 높았으며, 이는 앞서 Figs. 3과 4에서 확인한 바와 같이 SW-1의 결과가 1시간 이하에서 크게 상승하기 때문일 것이다. 높이방향에서는 관측시간 0.5시간의 GPS 데이터 단독 처리를 제외하고 대부분 조건에서 SW-2의 정밀도가 높은 것으로 나타났다. 이를 통해 소프트웨어에 따라 성과 산정 정밀도에 통계적으로 유의미한 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이는 아직 다중 GNSS 구축이 진행중이므로 관련 측위 알고리즘 등 또한 아직 개발되고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 다중 GNSS 데이터를 처리할 때는 사용할 소프트웨어 선택에 신중을 기해야하며, 관련 규정이나 지침에서 다중 GNSS 측위를 도입할 때에도 소프트웨어 선택과 검증 절차 등을 추가로 고려·반영할 필요가 있다고 사료된다.

Table 5. Rate of ambiguity-fixed solutions for cut-off angle 30° (unit: %).

Obs. time (hours)	SW-1				SW-2			
	G	GRE	GEC	GECJ	G	GRE	GEC	GECJ
8	90.18	100.0	100.0	100.0	99.32	100.0	100.0	100.0
6	89.80	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
4	88.00	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2	80.95	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
1	83.20	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
0.5	81.63	95.24	96.60	97.96	94.56	97.96	99.32	99.32

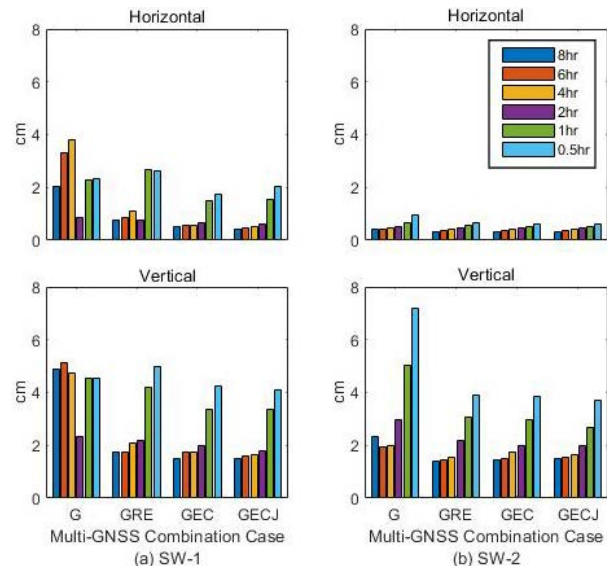


Fig. 5. The standard deviation with respect to observation time for cut-off angle 30°.

4.2 Harsh Operational Environment

GNSS 안테나 주변 장애물 등에 의해 고도각 30° 이하 위성 신호 취득이 어려운 상황을 재현하고자 절사각 30°로 데이터를 처리하였고, 미지정수 결정율은 Table 5와 같다. SW-1 미지정수 결정율을 보면 GPS 단독 처리 시 관측시간 8시간에서 약 90%이며, 관측시간 감소에 따라 미지정수 결정율도 함께 감소하여 0.5시간에서는 약 80%에 불과한 것을 확인할 수 있다. 반면 다중 GNSS를 조합할 때는 관측시간을 1시간까지 줄이더라도 모든 세션에서 미지정수를 정확히 결정했으며, 0.5시간일 때 미지정수 결정율이 감소했으나 95% 이상 높은 결정율을 유지하였다. 반면 SW-2는 GPS 단독 처리하더라도 관측시간 1시간까지 미지정수 결정율이 100%였으며, 0.5시간에서 95%로 감소하나, 다중 GNSS 조합 시 이를 약 98% 이상으로 향상시킬 수 있었다. 소프트웨어에 따라 미지정수 결정 성능에 차이가 있으나, 다중 GNSS 활용으로 불리한 환경에서 미지정수 결정 성능을 향상시킬 수 있다는 사실은 공통적으로 나타났다.

미지정수 고정해 취득 세션에 대해 계산한 표준편차를 Figs. 5와 6에 막대그래프로 도시하였다. Fig. 5는 다중 GNSS 조합을 기

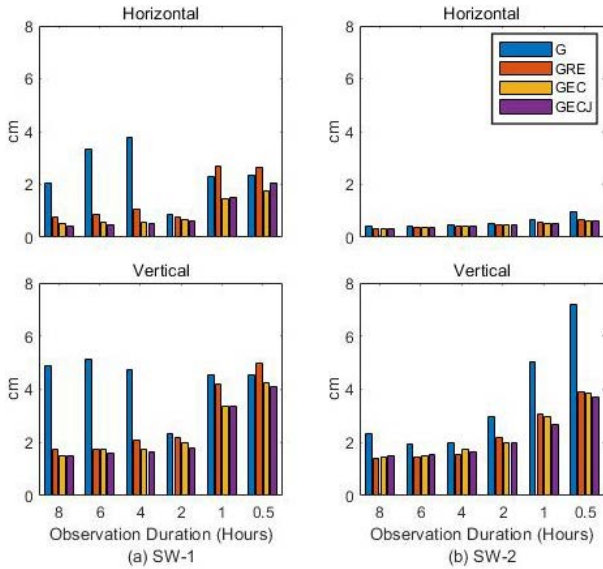


Fig. 6. The standard deviation with respect to multi-GNSS combination for cut-off angle 30°.

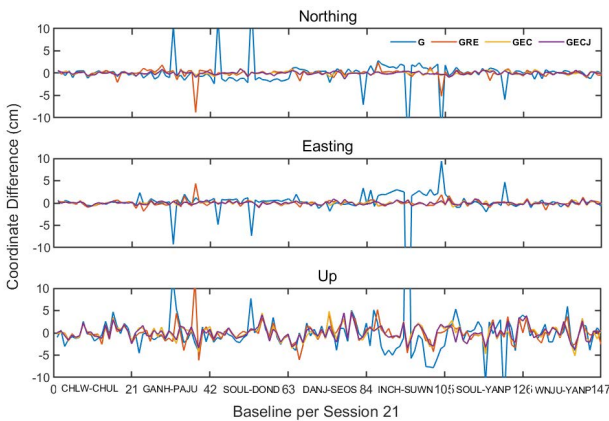


Fig. 7. Coordinate difference of each baseline processed with SW-1, 4 hours data, and cut-off angle 30°.

준으로 관측시간별, Fig. 6은 관측시간에 대한 다중 GNSS 조합별로 구분한 것이다. Fig 5의 SW-1 결과를 살펴보면 GPS 데이터 단독 처리 시 관측시간이 4 ~ 8시간으로 충분히 길더라도 수평과 높이방향 표준편차가 크게 계산되었다. 그 원인은 각 기선의 21개 세션, 4시간 분량 기선처리 결과 중 고정해와 그 평균의 차이를 나타낸 Fig. 7에서 확인할 수 있는 바와 같이 일부 기선에서 GPS 데이터 단독 처리 결과의 좌표차가 매우 크게 계산되었기 때문이다. 이는 정확한 미지정수 결정을 위한 통계검정에서 발생한 제 2종 오류 즉, 정확한 미지정수 결정이 되지 않았으나 정확한 미지정수가 결정된 것이라 소프트웨어가 판단했기 때문으로 여겨진다. 따라서 실제 미지정수 결정율은 앞서 Table 5에서 보인 수치에 비해 더 낮을 것으로 보인다. 반면, 다중 GNSS 데이터 조합 기선처리 시에는 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 GPS 단독 처리와 달리 비정상적인 크기의 좌표차가 나타나지 않았으며, 이에 따라 Fig 5에 도시한 표준편차도 상대적으로 작게 계산되었다. 양호한

환경에서와 마찬가지로 관측시간 1시간 이하에서 표준편차가 크게 증가하는 경향은 다중 GNSS 조합 4가지 모두에서 확인할 수 있다. SW-2 수평방향 표준편차는 양호한 환경에서의 결과와 마찬가지로 관측시간 감소에 따른 표준편차 상승이 작은 폭을 유지하는 반면 높이방향에서는 관측시간 1시간부터 정밀도가 크게 저하되었으며, 특히 GPS 단독 처리 시 증가 폭이 다른 경우에 비해 컸다. Fig. 6의 SW-1 결과를 보면 GPS 단독측위 정밀도가 다중 GNSS에 비해 크게 불량한 것을 확인할 수 있으며, 이는 앞서 언급되었던 사항이다. 다중 GNSS 조합에 의한 정밀도 향상은 양호한 환경에서와 마찬가지로 GRE에 비해 GEC가 높으며, 높이방향에서는 QZSS(J)의 긍정적인 영향을 관찰할 수 있다. SW-2 결과 중 수평방향에 대한 다중 GNSS 조합의 영향은 크지 않으나, 높이방향에서는 그 영향이 두드러지게 나타나며 관측시간이 짧아짐에 따라 효과가 더욱 커졌다. SW-1과 달리 관측시간이 4 ~ 8시간일 때 높이방향 정밀도는 GRE가 가장 높게 계산되었으나 관측시간 2시간 이하에서는 GEC가 가장 정밀하며, QZSS 영향이 나타나기 시작했다.

SW-1에 대한 통계검정 결과 관측시간이 8시간으로 길다하더라도 GPS 데이터만 단독 처리하면 수평과 높이방향에서 대부분의 기선이 기각되었다. 이는 잘못된 미지정수 고정해 취득에 따라 계산된 표준편차가 매우 커졌기 때문에 앞서 확인하였다. 다중 GNSS 조합 중에서 GRE는 관측시간이 8시간이더라도 다수 기선이 기각된 반면 GEC, GECJ는 4 ~ 6시간에서 하나의 기선이 기각되었으며, 2시간부터는 네가지 조합 모두 다수의 기선이 기각되었다. 높이방향에 대해 GRE는 6시간까지 통계적으로 기준 집단과 동등한 수준의 표준편차를 유지했으며, 4시간에서 기선 하나, 2시간부터는 다수의 기선이 기각되었다. 반면 GEC와 GECJ는 2시간까지 기각되는 기선이 발생하지 않았다. 수평과 높이방향 가설검정 결과를 함께 고려할 때, 불량한 관측환경에서 GPS 데이터만을 이용한 측위는 충분한 정밀도를 확보하기 어려우나, 다중 GNSS 중 GEC, GECJ 조합으로 관측시간을 4시간까지 단축시킬 수 있을 것으로 나타났다. SW-2의 경우 수평방향은 4가지 다중 GNSS 조합 모두 4시간까지 기각하는 기선이 발생하지 않았으나 2시간부터 4가지 조합 모두 다수의 기선이 기각되었고, 높이방향에서는 8시간부터 4가지 조합 모두 다수 기선이 기각되었다. 따라서 SW-2를 사용할 때는 다중 GNSS 데이터를 조합하더라도 수평성과 산정에만 제한적으로 사용해야할 것이다.

SW-1과 -2를 비교할 때 모든 관측시간에 대해 대부분 기선에서 SW-2의 GPS 단독과 GRE 수평방향 정밀도가 SW-1에 비해 높은 것으로 나타났으며, GEC는 다수의 기선, GECJ는 일부 기선이 더 정밀한 것으로 나타났고, 정밀도가 낮아 가설검정이 기각되는 경우는 없었다. 높이방향에서는 통계적 동등·양호·불량이 특정한 경향을 따라 나타나지 않고 혼재되어 있으나 GEC, GECJ 조합 시 전반적으로 동등한 수준이었다.

5. CONCLUDING REMARKS

고정밀 위치결정을 위한 반송파 기반 정적 상대측위에 다중 GNSS 데이터 추가가 미치는 영향을 분석하기 위해 다중 GNSS

조합, 관측시간, 절사각, 소프트웨어 등 다양한 조건에 따라 데이터를 처리하였다. 기선처리 결과를 기반으로 미지정수 결정율 및 고정해에 대한 표준편차 계산·비교와 가설검정 결과를 아래와 같이 요약하였다.

첫째, SW-1 사용 시 불량한 환경에서 관측시간에 따라 80 ~ 90%에 불과한 GPS 데이터 단독처리의 미지정수 결정율은 다중 GNSS 데이터 조합으로 관측시간 1 ~ 8시간일 때는 100%, 0.5시간에서는 95%까지 향상시켰다. SW-2에서도 다중 GNSS 조합을 이용했을 때, GPS 단독처리로 감소한 미지정수 결정율이 높아지며 특히 불량한 환경에서 다중 GNSS 데이터 활용이 미지정수 결정 성능 향상에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다.

둘째, 다중 GNSS 데이터 조합으로 GPS 데이터 단독 처리에 비해 높은 정밀도를 확보할 수 있음을 SW-1과 SW-2 모두에서 확인하였다. 본 실험에서 적용한 조합 중에서 GRE에 비해 GEC가 보다 긍정적인 영향을 미쳤으며, QZSS 데이터 포함은 수직방향 기하강도 개선에 기여해 높이방향 정밀도를 향상시키는 것으로 판단된다.

셋째, 가설검정을 통해 다중 GNSS 데이터 조합·사용에 따른 정밀도 향상으로 관측시간 단축과 불량한 환경에서의 측위 가용성 증가가 가능함을 확인하였다. 수평과 높이방향 함께 고려 시 SW-1을 활용했을 때는 GRE 조합으로 6시간, GEC와 GECJ는 4시간까지 관측시간을 줄여도 8시간 분량 GPS 단독 처리와 동등한 정밀도 수준으로 측위가 가능하였다. SW-2의 경우 GRE, GEC, GECJ 모두 4시간까지 관측시간을 단축시켜도 무방한 것으로 나타났다. 절사각 30°에 대한 GPS 데이터 단독 처리는 관측시간이 8시간으로 충분히 길더라도 비교 기준인 절사각 15°의 8시간 분량 GPS 단독 처리 결과에 비해 정밀도가 떨어지는 것으로 나타났다. SW-1 사용 시 GEC, GECJ 조합은 4시간까지 관측시간을 줄여도 비교 기준 집단체와 동등한 수준의 정밀도를 확보할 수 있었다. 반면 SW-2는 높이방향에서 4가지 조합 모두 대부분 조건에서 정밀도가 하락하는 것으로 나타나, 불량한 환경에서는 수평성과 산정으로 그 활용을 제한해야 한다는 결론을 도출하였다.

넷째, 두 소프트웨어 결과에 대한 가설검정을 통해 SW-2 활용 시 전반적으로 정밀한 측위가 가능한 것을 알 수 있었다. 이는 소프트웨어에 따라 측위 결과에 통계적 차이가 있을 수 있음을 의미하며, 이러한 차이가 발생한 원인은 현재 진행 중인 다중 GNSS 구축에 따른 관련 알고리즘 개발 미완성일 것으로 사료된다. 따라서 다중 GNSS 데이터를 처리할 때는 사용 소프트웨어 선택에 신중을 기해야하며, 관련 규정이나 지침에서 다중 GNSS 측위를 반영하고자 할 때, 소프트웨어 선택과 검정 절차 등을 추가로 고려해야 할 것이다.

참고로, 본 실험에서 수행한 기선 처리는 기선장 약 26 ~ 40 km의 중기선에 해당하는 것으로 단기선 처리 시 결과가 달라질 수 있어, 추후 이에 대한 연구가 필요할 것이다. 또한, 다중 GNSS 구축이 진행됨에 따라 더 나은 알고리즘 등의 개발이 이루어질 것으로 기대되는 바 추후에는 동일한 실험에 대해 본 연구와 다른 결과를 얻을 수 있음에 유의해야 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

The national geographical information institute should be appreciated for providing the multi-GNSS measurements used in this research.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, H.L.; methodology, H.L.; software, K.N.P. and D.H.N.; validation, H.L.; formal analysis, K.N.P. and S.Y.; investigation, H.L., K.N.P. and S.Y.; data curation, K.N.P.; writing—original draft preparation, H.L. and S.Y.; writing—review and editing, H.L. and S.Y.; visualization, K.N.P. and S.Y.; supervision, H.L.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- BeiDou Navigation Satellite System (BEIDOU), FOC of BeiDou [Internet], cited 2021 Apr 30, available from: http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/202008/t20200803_21013.html
- Choi, B. K., Yoon, H. S., & Lee, S. J. 2019, Performance analysis of long baseline relative positioning using dual-frequency GPS/BDS measurements, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 8, 87-94. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2019.8.2.87>
- European Union Agency for the Space Programme (EUSPA), GALILEO constellation [Internet], cited 2021 Apr 28, available from: <https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>
- Grewal, M. S., Andrews, A. P., & Bartone, C. G. 2020, *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*, 4th ed. (New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.)
- Information and Analysis Center (IAC), GLONASS constellation [Internet], cited 2021a Apr 28, available from: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>
- Information and Analysis Center (IAC), BEIDOU constellation [Internet], cited 2021b Apr 28, available from: <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/index.php>
- Kim, Y. D., Kim, W. C., Park, B. W., Park, S. H., Park, T. S., et al. 2009, *Introduction of the Statistics*, 5th ed. (Seoul:

Youngji publishers)

- Li, T., Zhang, H., Gao, Z., Chen, Q., & Niu, X. 2018, High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/MEMS-IMU integration, *Remote sensing*, 10, 205. <https://doi.org/10.3390/rs10020205>
- Ma, H., Zhao, Q., Verhagen, S., Psychas, D., & Liu, X. 2020, Assessing the performance of multi-GNSS PPP-RTK in the local area, *Remote Sensing*, 12, 3343. <https://doi.org/10.3390/rs12203343>
- Msaewe, H. A., Hancock, C. M., Psimoulis, P. A., Roberts, G. W., Bonenberg, L., et al. 2017, Investigating multi-GNSS performance in the UK and China based on a zero-baseline measurement approach, *Measurement*, 102, 186-199. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.004>
- National Geographic Information Institute (NGII) 2019, A basic study on the introduction of new GNSS correction signal by the development of real-time positioning technology, National Geographic Information Institute Report, 11-1613436-000204-01. https://www.ngii.go.kr/kor/contents/view.do?sq=1221&board_code=contents_data
- Quan, Y., Lau, L., Roberts, G. W., & Meng, X. 2016, Measurement signal quality assessment on all available and new signals of multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BDS, and QZSS) with real data, *The Journal of Navigation*, 69, 313-334. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000624>
- Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), QZSS constellation [Internet], cited 2021 Apr 28, available from: <https://qzss.go.jp/en/technical/satellites/index.html>
- U.S. Coast Guard Navigation Center (NAVCEN), GPS constellation [Internet], cited 2021 Apr 28, available from: <https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>
- Yun, S., Lee, H., & Dinh, H. N. 2019, A study on status of multi-GNSS constellation and its positioning performance on SPP mode, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 20, 662-673. <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.8.662>



Komal Narayan Pawar is a MS candidate at the Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University, Republic of Korea. She received B. E. degree from the Shivaji University Kolhapur, India in 2012. Her research interests include Multi-GNSS for surveying applications.



Seonghyeon Yun is a Ph.D. candidate at the Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Changwon National University, Republic of Korea. He received B.S. and M.S., degrees from the same university in 2017 and 2019, respectively. His experience and research interests include GNSS signals, satellite-based positioning, and GPS/GNSS applications for geodetic science and engineering.



Hungkyu Lee is a professor at the school of civil, environmental and chemical engineering, Changwon National University, Republic of Korea, where he has been teaching and investigating subjects related to engineering geodesy and measurement systems since 2005. He obtained Ph.D. in satellite geodesy and navigation from the school of surveying and spatial information systems, The University of New South Wales, Australia in 2004. His experience and research interests include statistical theories for high precision of satellite-based positioning and navigation systems, modernization of geodetic infrastructure, and GPS/GNSS applications for geodetic science and engineering.



Dinh Huy Nguyen is a lecturer at the department of geodesy and geomatics engineering, national university of civil engineering (NUCE), Hanoi, Vietnam. He received B.S. degree in 2014 and M.S., degree in 2020 from NUCE and Changwon National University, Republic of Korea, respectively. His experience and research interests is multi-GNSS positioning techniques for engineering geodey.