

다중 GNSS 구축현황 및 표준절대측위 성능에 관한 연구

윤성현¹, 이흥규^{2*}, 응웬 딩 후이¹

¹창원대학교 대학원 친환경해양플랜트FEED공학과, ²창원대학교 토목환경화학공응합공학부

A Study on Status of Multi-GNSS Constellation and Its Positioning Performance on SPP mode

Seonghyeon Yun¹, Hungkyu Lee^{2*}, Huy Nguyen Dinh¹

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

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

요약 본 연구는 다양한 운용기관의 위성시스템 구축과 고도화에 따라 급변하는 위성 기반 측위환경이 표준절대측위 성능에 미치는 영향을 분석하고자 수행하였다. 이를 위해 각 위성시스템의 주파수와 운용 위성 수 등 그 특징을 파악하였고, 조사한 최신현황을 바탕으로 국토지리정보원 상시관측소 관측데이터를 이용한 표준절대측위 실험을 실시하였다. 실험은 위성시스템 데이터의 조합과 절사각에 따라 경우를 구분하여 처리한 후 측위 연속성과 정확도를 중심으로 그 성능을 분석하였다. 분석결과 절사각의 상승에 의한 가관측 위성 수의 감소로 측위의 불연속이 구간이 빈번하게 발생했으나, 이는 위성 시스템 관측데이터 조합을 통해 극복할 수 있었다. 특히, GPS와 BeiDou 혹은 GPS를 포함한 세 개 이상의 시스템 데이터 조합 시 연속성을 90% 이상으로 향상시킬 수 있었다. 정확도는 위성 유발 오차의 종합 지표인 SISRE의 영향으로 GPS와 Galileo 데이터 포함 시 상대적으로 높게 계산되었다. 측위실험 결과를 고려할 때, 도심지 등 신호차폐가 심한 지역에서 측위의 높은 연속성과 정확도를 유지하기 위해서는 다중 GNSS 데이터를 조합한 처리가 필요한 것으로 사료된다.

Abstract This paper investigates the most recent status of multi-GNSS, including technical features, types of ranging signals provided, and satellite constellation. Furthermore, a series of multi-GNSS positioning experiments in SPP mode were carried out to assess the achievable accuracy and continuity with an application to various positioning scenarios. A week of GNSS measurements each in 2018 and 2019 was acquired from the national geographical information institute and processed. The results show that a single GNSS-based scenario often encounters positioning blockage in the harsh operational environment, while multi-constellation cases are able to remedy this situation. The accuracy of multi-GNSS with a combination of GPS and Galileo is superior to that of other GNSS compositions due to the larger SISRE (Signal In Space Ranging Errors) of GLONASS and Beidou. Due to the different characteristics of GNSS SISRE, an issue has been raised to optimally integrate satellite measurements to maximize accuracy of multi-GNSS positioning.

Keywords : Multi-GNSS, GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, SPP

*Corresponding Author : Hungkyu Lee(Changwon National University)

email: hkyulee@changwon.ac.kr

Received May 31, 2019

Revised June 27, 2019

Accepted August 2, 2019

Published August 31, 2019

1. 서론

GNSS(Global Navigation Satellite Systems)는 위성이 전송하는 전자기파를 취득하여 지구상 3차원 위치를 결정하는 인공위성 기반의 무선항법 기술로 미국의 GPS(Global Positioning System)가 2000년대 중반까지 주도한 바 있다. 위성 측위기술은 사용자의 요구에 따라 다양한 수준의 정확도로 위치결정이 가능하다.

최근 GNSS는 수신기 제조 기술과 측위 알고리즘의 발달로 소형화와 측위 성능 향상이 이루어지고 있다. 이로 인해 GNSS는 드론 응용분야, 자율주행 자동차 등 위치기반 서비스의 확장에 따라 폭발적으로 증가 중인 위치정보에 대한 요구를 충족시킬 수 있는 적절한 기술로써 각광받고 있다.

GNSS 운영기관(service providers)들은 위성 측위 기술을 이용한 위치 기반 서비스 시장을 주도하고자 적극적인 고도화는 물론 독자적인 시스템을 구축 중에 있다[1-4]. 최근 유럽연합과 중국에서 Galileo와 BeiDou 시스템 구축 완료를 위해 위성의 궤도배치를 지속하고 있으며, 미국과 러시아는 기운영 GPS와 GLONASS 시스템의 고도화를 위해 새로운 위성을 개발하고 있다. 현재 미국, 러시아, 유럽연합, 중국 등에서 운영하는 시스템들이 측위 서비스를 시작함에 따라 사용자 입장에서는 동시에 다양한 시스템으로부터 신호를 취득할 수 있게 되어 명실상부하게 다중 GNSS 측위환경이 구축되었다.

다중 GNSS 환경 도래에 따라 최병규 등(2015)은 북포 상시관측소에서 취득한 GPS, GLONASS, BeiDou 그리고 QZSS 데이터를 조합하여 표준절대측위를 수행하고 정확도 비교와 측위 정확도 향상을 위한 시스템 상호간 편의를 추정·제시한 바 있다[5]. 박준규와 엄대용(2016)은 다중 GNSS 측위결과를 가용 위성수, 정밀도, PDOP 관점에서 분석한 후 다중 GNSS를 활용한 측위 성능의 향상을 위한 위성측량 인프라의 고도화 방안을 제안하였다[6]. 석효정과 박병운(2016)은 각 위성시스템의 궤도 설계 정보와 서울시 3차원 지형공간정보를 이용하여 2015~2020년의 측위 성능을 예측하였다[7]. 대부분의 사전 연구들은 측위 성능 중 정확도 위주로 분석하였으나 다중 GNSS 활용의 관점에서는 연속성 또한 주요한 성능지표로 평가할 필요가 있다. 뿐만 아니라 2018년 Galileo와 BeiDou가 많은 위성을 발사하여 측위환경이 크게 달라졌기 때문에 이로 인한 다중 GNSS가 측위성능 변화에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 연구는 다중 GNSS 구축 현황과 특징에 대한 최신 현황 조사와 측위

환경 변화에 따른 표준절대측위(SPP: Standard Point Positioning) 성능을 정확도와 연속성 측면에서 분석하는 것을 목적으로 수행하였다.

다중 GNSS 측위 성능 분석 실험을 위해 국토지리정보원에서 운영 중인 8개 GNSS 상시관측소의 2018년과 2019년 동일한 일주일 관측데이터를 확보하였다. 매 에포크(epoch) 좌표를 추정하기 위해 동적 모드에서 SPP 방식을 적용해 관측데이터를 시스템 조합과 위성 절사각(cut-off angle)에 따라 11가지 경우로 구분·처리하여 상시관측소 고시좌표와 비교한 정확도 그리고 전체에 대한 측위 가능 에포크의 비율 계산을 통해 연속성을 분석하고 결과를 요약하였다.

2. GNSS 기술현황

현재 세계 전역에 서비스를 제공하는 GNSS에는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou가 존재한다. 이들의 발전과정과 최근 위성 배치 현황 및 향후 계획에 대해 조사하였고 각 시스템 고유의 특징, 주파수의 종류 등을 파악하였다.

2.1 GPS

GPS는 1995년 FOC(Full Operational Capability)에 도달하였으나, 위치 기반 기술의 발전과 수요의 증가로 2000년대 초반부터 위성체 및 관제시스템에 대한 현대화(modernization)를 추진 중이다. 2005년 최초 현대화 위성 BLOCK IIR-M 발사한 이후 BLOCK IIF와 BLOCK III 위성을 개발하여 궤도에 배치하는 등 위성체의 성능 갱신을 지속하고 있다.

GPS Block-IIR-M 위성의 경우 기존(legacy) 위성 신호를 포함하여 L2 반송파에 동조 가능한 새로운 민간 신호 L2C를 추가와 함께 설계수명을 약 8년으로 향상되었다. 2010년부터 궤도 배치를 시작한 Block-IIF는 이전 모델의 모든 신호와 새로운 L5 반송파와 코드신호 송출이 가능하고 설계수명이 12년으로 연장되었다. 2018년부터 궤도 배치를 시작한 Block-III 모델은 L1에 동조할 수 있는 네 번째 민간신호 L1C를 송신할 뿐만 아니라 그 수명이 15년으로 증가되었으며, 위성신호에서 SA(Selective Availability) 기능을 완전히 제거되었다. 특히 GPS 현대화 위성의 신규 신호인 L5와 L1C는 타 시스템 신호와 주파수 대역을 공유하도록 설계되어 상호 운용성(inter-operability) 확보가 용이하다. Table 1은

GPS 위성신호의 각각의 반송파 주파수와 동조되는 송신하는 측위신호(코드)를 나타낸 것이다[1].

Table 1. Type of GPS satellite ranging signals

Carrier phase	Frequency (MHz)	Code
L1	1,575.42	- C/A - L1C(on test)
L2	1,227.60	- L2C
L5	1,176.45	- L5

2018년, 2019년 각각 1월 기준 위성 종류 별 운행 중인 대수를 Table 2에 요약하였다. 2018년 12월 말 3세대 현대화 위성 BLOCK-IIIa를 발사하였고 궤도에 배치하여 시험 운행 중이다. 그리고 7~8대의 예비 위성을 함께 운행하고 있어 현재 가용 위성 수가 30기 이상인 것을 확인할 수 있다[8]. GPS는 2023년까지 BLOCK-IIIa 10대 그리고 2034년까지 BLOCK IIIf 22대를 발사함으로써 기존의 위성군을 3세대 현대화 위성군으로 대체할 계획이다[9].

Table 2. The number of GPS satellites under operation.

Year	The type of satellite					total
	IIA	IIR	IIR-M	IIF	IIIA	
2018.01	1	12	7	12	0	32
2019.01	1	11	7	12	1(on test)	31 + 1

2.2 GLONASS

GLONASS는 러시아 우주군에서 운영 및 유지·관리하는 위성시스템이며, 신호 전달방식으로 주파수분할다원접속(FDMA: frequency division multiple access)을 채택하고 있다. 따라서 코드분할다원접속(CDMA: code division multiple access) 변조법을 사용하는 타 GNSS 시스템과 상호운용성이 낮은 것이 특징이다.

러시아는 GLONASS 시스템 복구와 현대화 프로젝트의 동시 추진을 통해 2003년 1세대 현대화 위성 GLONASS-M를 시작하였다. 현대화 위성 초기모델인 GLONASS-M은 0.1pm 수준으로 향상된 시계를 탑재하고 있으며, 두 번째 민간신호 L2OF를 G2 반송파에 동조하여 송출한다. 2세대 현대화 위성 GLONASS-K1에는 0.01pm으로 더욱 향상된 시계가 탑재 되었다. 특히추가된 세 번째 민간신호 L3OC를 CDMA 변조 방식으로 송출함으로써 타 GNSS와 상호운용성을 확보하고자 하였

다. 현재 개발 중인 차세대 위성 GLONASS-K2를 통해 기존의 반송파에 동조 가능한 CDMA 방식의 새로운 민간신호를 추가할 계획이며, 이를 통해 측위 정확도 및 타 위성시스템과 호환성을 더욱 강화할 수 있을 것으로 기대된다. GLOANSS가 송출하는 반송파와 해당 주파수 대역, 그리고 이에 동조되는 민간용 코드파를 정리하여 Table 3에 나타내었다[10].

Table 3. Type of GLONASS ranging signals.

Carrier phase	Frequency (MHz)	Code
G1	1602 + p×9/16	- L1OF
G2	1246 + p×7/16	- L2OF
G3	1202.025	- L3OC

* p = -7 ... 12

GLONASS 위성 운영 대수를 2018년, 2019년 1월 기준으로 구분하여 Table 4에 나타내었다. 대부분 1세대 현대화 위성 GLONASS-M으로 위성군을 구성하고 있으며 2019년 위성의 수가 2018년에 비해 1대 증가하여 총 24기를 운용하고 있다. 2020년까지 GLONASS-M 위성 4대 추가를 마지막으로 1세대 현대화 위성의 배치를 마무리하고, 이후 차세대 현대화 위성인 GLONASS-K1, -K2를 배치하여 위성군의 세대교체할 계획이다[2].

Table 4. The number of GLONASS satellites under operation.

Year	The type of satellite				total
	GLONASS	-M	-K1	-K2	
2018.01	Retired	22	1	0	23
2019.01		23	1	0	24

2.3 Galileo

Galileo는 민간에서의 사용을 우선으로 유럽 우주국에서 개발 중인 GNSS이다. 2005, 2008년 발사한 GIOVE-A와 -B 위성을 통해 위성신호 점검, 위성 추적과 지상 관제국의 성능 평가 등 초기시험을 진행하였다. 2011~2012년 발사한 4기의 IOV(In-Orbit Validation) 위성을 이용하여 위치 및 시각 결정 성능을 평가하였고 이후 2016년까지 18대의 위성을 궤도상에 배치하여 서비스를 제공하기 시작하였다. 궁극적으로 30대 위성을 궤도상에 배치하여 FOC를 선언할 예정이다[3, 11].

Galileo 시스템은 4가지 반송파 E1, E5a, E5b 그리

고 E6을 CDMA 방식을 통해 변조하여 전송한다. 이들 반송파 중 E1과 E5a는 각각 GPS L1과 L5, E5b는 GLONASS G3와 BeiDou B2, 그리고 E6는 BeiDou B3와 주파수 대역을 공유하도록 신호를 설계하여 타 시스템과의 높은 상호운용성을 확보하고 있다. Galileo의 독특한 특징은 사용자 요구에 따라 다양한 측위 서비스를 제공한다는 것으로 Open Service(OS), Commercial Service(CS), Public Regulated Service(PRS), Safety of Life(SoL)가 그것이다[12, 13]. Table 5는 Galileo 위성에서 송출하는 반송파의 주파수 대역과 측위신호의 종류를 요약한 것이다. 추가적으로 Galileo E5a와 E5b 반송파는 AltBOC(alternative Binary Offset Carrier) 변조법을 사용하여 이들을 각각 혹은 동시 처리를 통해 E5 주파수로 관측데이터를 취득할 수 있다[14].

Table 5. Type of Galileo ranging signals.

Carrier phase	Frequency (MHz)	Code(service)
E1	1575.42	- A (PRS) - B I/NAV (OS/CS/SoL)
E5a	1176.45	- I F/NAV (OS)
E5b	1207.140	- I I/NAV (OS/CS/SoL)
E5(E5a+E5b)	1191.795	- I, Q and I+Q
E6	1278.75	- B C/NAV(CS)

2018년, 2019년 1월 기준으로 궤도상에 배치된 위성의 수를 Table 6에 정리하였다. 초기시험 단계에서 사용되었던 위성들은 현재 모두 폐기처리 되었고, IOV 단계의 위성 4기 중 3기가 서비스를 지속적으로 제공하고 있다. FOC를 위해 꾸준히 위성을 발사하고 있어 현재 2018년에 비해 4기가 증가한 22대를 운영 중이다[15]. 운영 중인 위성의 폐기를 고려하여 12대 위성의 추가 배치를 통해 FOC에 진입할 계획이며, 2세대 위성의 개발로 향상된 데이터 제공을 준비하고 있다[16].

Table 6. The number of Galileo satellites under operation.

Year	The system phase			
	GIOVE-A & B	IOV	FOC	total
2018.01	Retired	3	15	18
2019.01		3	19	22

2.4 BeiDou

BeiDou는 중국에서 개발 중인 위성항법시스템으로 2012년 RNSS(Regional Navigation Satellite System)를 구축 완료 후 GNSS로 글로벌 서비스를 제공하기 위한 확대 구축을 추진 중이다. 이로 인해 BeiDou는 각기 다른 3가지 궤도에 위성이 배치되어 있으며, GEO (geostationary orbit), IGSO(inclined geosynchronous orbit), MEO(medium earth orbit)가 그것이다. Table 7은 BeiDou 위성에서 송출하는 반송파와 그 주파수, 이에 동조되는 코드파를 정리한 것이다. B1의 주파수 대역은 GPS의 L1, Galileo의 E1과 일부 겹치며, B2, B3은 Galileo E5b, E6과 각각 대역을 공유하고 있어 높은 상호운용성을 확보하고 있다[4].

Table 7. Type of BeiDou ranging signals.

Carrier phase	Frequency (MHz)	Code
B1	1561.098	- I, Q and I+Q
B2	1207.14	
B3	1268.52	

Table 8은 BeiDou 위성의 배치 상황을 2018년, 2019년으로 구분하여 나타낸 것이다. 2018년 한 해 동안 14대의 위성이 발사된 것에 주목할 필요가 있으며, 이들 중 대부분이 MEO 위성인 것을 확인할 수 있다. 이는 서비스 범위를 전세계로 확장하기 위함으로 2020년까지 9대 위성을 추가 배치하여 완전한 FOC 구축이 기대된다[17].

Table 8. Status of BeiDou satellite constellation.

Year	Number of satellite			
	GEO	IGSO	MEO	total
2018.01	6	6	7	19
2019.01	5	7	21	33

2.5 다중 GNSS의 특징

다중 GNSS 측위 환경이 시작됨에 따라 서비스를 제공하는 시스템과 신호의 종류가 다양해졌다. 이를 통해 측위 정확도와 연속성 등의 성능 향상이 기대되나 이는 시스템 사이의 상호 호환성의 확보를 전제로 한다. Fig 1은 각 시스템의 주파수 대역을 도시한 것으로 GPS의 L1과 L5, GLONASS의 G3 그리고 모든 Galileo와

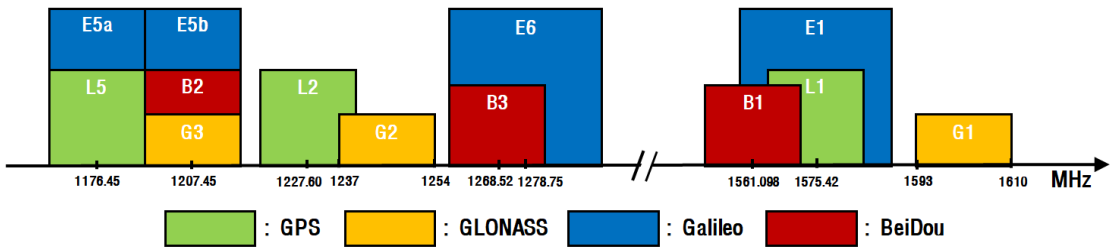


Fig. 1. GNSS carrier phase frequency band

BeiDou 신호들의 주파수 대역이 중첩되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 각 시스템들은 상호운용성 확보가 가능하다.

다중 위성군에 의한 사용자 상공에 존재하는 위성의 수가 증가하는 위성 배치의 기하강도(DOP: Dilution Of Precision)의 향상으로 이어져 측위의 정확도를 증가시킬 수 있다. 또한 취득할 수 있는 관측데이터 수의 증가로 신호의 차폐물이 다수 존재하는 도심지에서도 측위에 필요한 최소한의 데이터 확보가 가능하여 위치결정의 연속성을 높일 수 있다.

Fig 1에서 나타낸 것과 같이 다중 GNSS 측위 환경 아래에서는 다양한 주파수 대역의 신호를 동시에 취득할 수 있다. 이는 전리층 오차모델링 그리고 미지정수(integer ambiguity) 결정 능력 등을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다[18, 19].

실제 당시부터 GNSS를 목적으로 시스템을 구축한 GPS, GLONASS 및 Galileo와 달리 BeiDou는 RNSS 구축 이후 GNSS로 시스템의 범위를 확장하고 있어 현재 서로 다른 3가지 궤도에 위성을 배치하고 있다. Fig 2는 BeiDou 위성의 지상궤적을 나타낸 것으로 세 가지 궤도의 특징이 잘 나타나있다. 경도 60~150° 사이의 ‘팔’자 모양의 궤적은 IGSO 위성에 의한 것이며, 해당 경도 범위 내의 적도에는 5기의 GEO 위성이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 나머지 세계 전역에 고루 퍼져있는 원모양의 궤적은 MEO 위성에 의해 형성된 것이다.

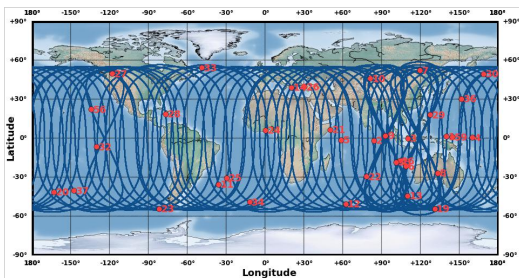


Fig. 2. Ground tracks of BeiDou Satellites[20].

SISRE(Signal-In-Space Ranging Errors)는 방송궤도력으로 계산한 위성 궤도와 탑재시계의 불확실성을 종합적으로 나타내는 지표로서 정밀궤도력에 포함된 위성 궤도와 시계 정보에 방송궤도력으로 취득한 결과를 비교하여 계산하며, 각 시스템의 SISRE를 Table 9에 요약하였다[21]. Galileo의 SISRE는 약 15cm 수준으로 양호한 반면 GLONASS의 값이 가장 불량하였고, BeiDou의 세 가지 궤도 중에서 GEO에 배치된 위성의 경우 가장 부정확한 것을 알 수 있다. 이는 정지궤도의 특성상 지상에서 이들의 궤도를 적절히 추정하기 어렵기 때문이다. 이들 결과는 위성궤도와 시계오차를 방송궤도력만으로 보정하는 SPP 측위 결과에 직접적인 영향을 미친다.

Table 9. Summary of GNSS SISRE (unit: cm).

Constellation	SISRE	SISRE(Orbit)
GPS	39 ~ 53	22 ~ 24
GLONASS	309	51
Galileo	14 ~ 15	14
BeiDou	all	66
	MEO	86
	IGSO	100
	GEO	198

3. 표준절대측위 성능 실험

3.1 절차 및 방법

다중 GNSS로부터 취득한 관측데이터의 조합이 표준절대측위 성능에 미치는 영향을 분석하고자 Fig 3의 절차에 따라 측위 실험을 수행하였다. 이를 위해 국토지리정보원에서 운영하는 8개 상시관측소의 2018년, 2019년 각각 1월 1일에서 7일까지의 일주일 분량 원시(raw) 관측데이터를 취득하였고, 모든 GNSS 데이터를 포함할 수 있는 RINEX 3.02 버전으로 변환하였다. 그리고 데이터 처리의 효율을 높이기 위해 GFZRNX 1.05 버전을 이

용하여 측정별 데이터를 단일 파일로 병합하였다[22].

관측자료 처리에는 RTKLIB 소프트웨어 패키지 중 후 처리용 RTKPOST를 사용해 표준절대측위 모드를 적용하였다[23]. 여기서 실험경우를 Table 10과 같이 시스템의 조합에 따라 11가지로 구분하였고 IGS(International GNSS Services)의 시스템 표기법을 준용하여 나타냈다. 데이터 처리 시 실시간 측위 상황을 재현하고자 매 에포크마다 좌표를 추정하였다. 이 때 개활지와 도심지 등에서 장애물에 따른 신호 차폐 환경을 반영하기 위해 15°, 30°, 45°의 위성 절사각을 각각 적용하였다.

Table 10. Experimental cases of GNSS positioning.

CASE	Combination	CASE	Combination
G	GPS only	GC	GPS + BeiDou
R	GLONASS only	GRE	GPS, GLONASS & Galileo
E	Galileo only	GRC	GPS, GLONASS & BeiDou
C	BeiDou only	GEC	GPS, Galileo & BeiDou
GR	GPS + GLONASS	GREC	All GNSS
GE	GPS + Galileo		

표준절대측위 성능 분석에는 데이터 처리 결과의 정확도와 연속성을 그 지표로서 사용하였다. 여기서 연속성은 전체 에포크에 대해 위치해가 취득된 에포크의 비율, 정확도는 추정된 좌표와 고시좌표의 차이를 이용해 계산한 RMSE(Root Mean Square Error)로 나타내었다.

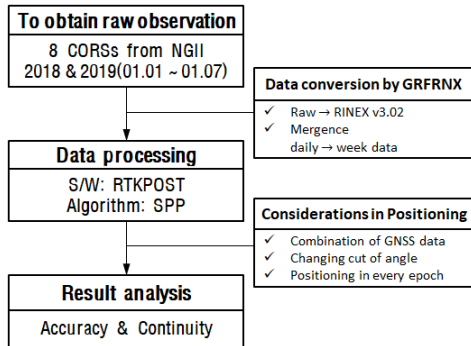


Fig. 3. A procedure of experimental analysis of multi-GNSS positioning performance in this study.

3.2 결과 및 분석

3.2.1 가관측 위성의 수

Fig 4는 2019년 관측기간 동안 수원 기준점에서 추적한 각 시스템 별 위성 궤적을 천공도에 도시한 것이다.

동시 추적 가능한 위성의 수는 GPS의 경우 4~10기, GLONASS 3~8기, Galileo와 BeiDou 각각 2~8기, 6~13기였다. GPS의 경우 7대의 예비 위성을 운영하고 있어 동시 추적 가능 위성 수가 GLONASS에 비해 상대적으로 많은 것을 알 수 있다. 그리고 현재 구축 중인 Galileo의 경우 추적 위성 수가 가장 적은 것으로 나타났으며, BeiDou의 경우 우리나라가 중국에 인접해 있어 GEO와 IGSO 위성을 추적할 수 있기 때문에 현재 구축 중임에도 불구하고 가장 많은 위성으로부터 신호를 취득할 수 있었다. 모든 GNSS를 함께 추적하는 경우 21~35개의 위성으로부터 동시에 신호를 취득할 수 있었으며, 이와 같이 수많은 위성으로부터 신호를 취득 가능한 것은 다중 GNSS 측위 환경의 가장 중요한 특징이다.

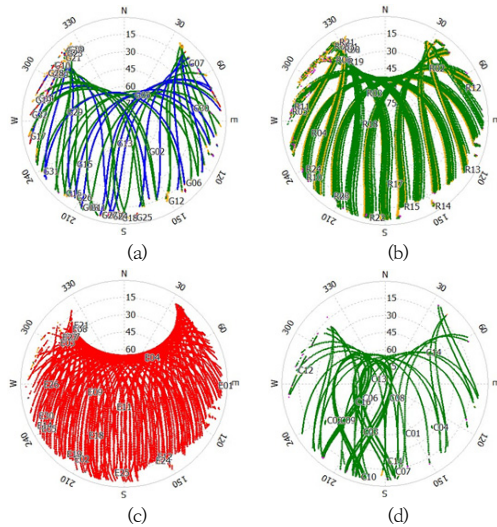


Fig. 4. Skyplots of GNSS satellites at SUWN station in 2019

(a) GPS (b) GLONASS (c) Galileo (d) BeiDou.

Fig 5는 2019년 수원 관측소(SUWN)에서 취득한 데이터를 이용하여 각 위성시스템 단독 측위 시 위치결정에 사용된 위성 개수를 절사각 별로 도시한 것이며, 이에 반해 Table 11은 매 에포크마다 추적한 위성의 개수를 가중 평균하여 나타낸 것이다. 절사각 15°에서는 위치결정에 필요한 최소 위성 수 확보가 가능하였으나 절사각을 높이면서 추적 위성 수가 급격히 하락하는 것으로 나타났다. 측위에 부족한 위성 수는 연속성에 직접적인 영향을 미치며, 이는 위성 개수 시계열 그래프의 절사각 45°에서 불연속 구간이 크게 증가하는 것으로 확인할 수 있다.

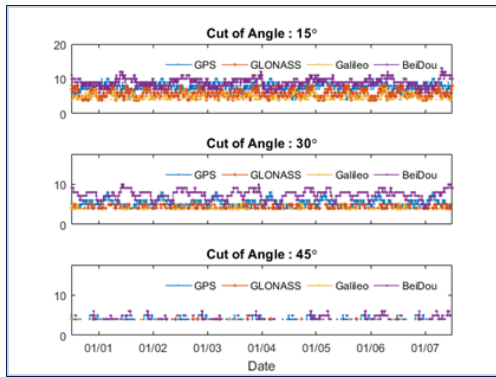


Fig. 5. The time series of the number of satellite used in positioning at SUWN in 2019.

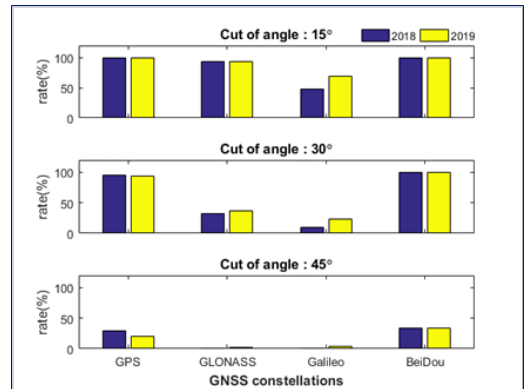


Fig. 6. Continuity of standalone GNSS positioning.

Table 11. The weighted average of the satellite number in the measurements.

Mask angle	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou	
	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
15°	7.82	7.71	5.96	5.80	4.01	4.73	8.66	9.66
30°	5.26	5.18	4.01	3.90	2.70	3.26	6.91	7.72
45°	3.32	3.23	2.41	2.34	1.71	2.04	3.49	4.16

3.2.2 측위 연속성

Fig 6은 각 시스템 관측데이터만 사용한 경우의 측위 연속성을 절사각에 대해 별로 도시한 것이며, Table 12는 그 통계값을 요약한 것이다. 절사각 15°의 양호한 측위 환경에서는 GPS와 BeiDou는 100%, GLONASS는 93~94%의 연속성을 확보할 수 있었다. GPS와 GLONASS는 FOC이고 BeiDou는 GEO와 IGSO의 영향으로 이와 같은 결과를 얻을 수 있는 것으로 사료된다. 현재 구축중인 Galileo의 경우 연속성이 상대적으로 낮았으나 2019년 측위 연속성이 소폭 향상된 것으로 계산되었으며, 이는 FOC 구축을 위해 꾸준히 위성을 배치 중이기 때문에 향후 더욱 높아질 것으로 예상된다. 절사각을 높이는 경우 연속성이 전체적으로 대폭 하락하였으나 GPS와 BeiDou는 상대적으로 높은 연속성을 유지할 수 있었으며, 그 이유는 GPS는 예비위성 그리고 BeiDou는 IGSO 위성으로부터 데이터를 취득할 수 있기 때문이다. 하지만 이들 역시 연속성이 20 ~ 34%에 불과하기 때문에 실시간 측위 응용분야에 안정적인 서비스 제공은 불가능하다.

Table 12. Continuity of standalone GNSS positioning.

Year	Mask angle	Continuity(%)			
		G	R	E	C
2018	15°	100	94	48	100
	30°	96	33	10	100
	45°	29	1	1	33
2019	15°	100	93	69	100
	30°	93	36	24	100
	45°	20	2	3	34

Fig 7과 Table 13은 위성시스템 관측데이터 조합 측위의 연속성을 절사각과 연도 별로 구분하여 나타낸 것이다. 관측데이터의 조합을 통해 절사각 45°의 불량한 측위 환경에서도 높은 연속성을 확보할 수 있었고 특히, BeiDou 관측데이터 포함 혹은 3개 이상의 시스템 관측데이터를 조합하는 경우 대부분의 에포크에서 위치를 결정할 수 있었다. 따라서 도심지와 같이 신호의 차폐물이 많은 지역에서 위치결정의 높은 연속성을 확보하기 위해서는 3개 이상의 시스템 관측데이터를 조합해야 하며 특히, BeiDou 데이터를 포함해야 할 것이다.

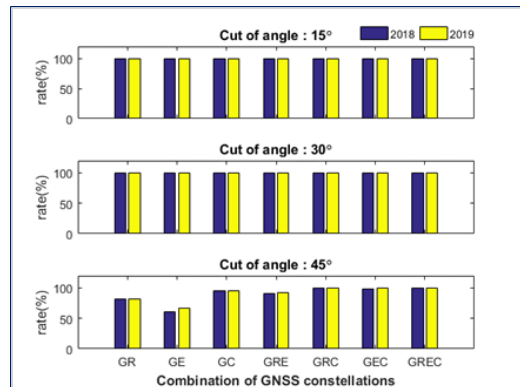


Fig. 7. Continuity of multi-GNSS positioning.

Table 13. Continuity of multi-GNSS positioning.

Year	Mask angle	Continuity(%)						
		GR	GE	GC	GRE	GRC	GEC	GREC
2018	15°	100	100	100	100	100	100	100
	30°	100	100	100	100	100	100	100
	45°	81	60	95	90	100	99	100
2019	15°	100	100	100	100	100	100	100
	30°	100	100	100	100	100	100	100
	45°	81	67	96	92	100	99	100

3.2.3 측위 정확도

Fig 8은 2019년 SUWN 관측소 데이터 처리를 통해 추정된 남-북 방향 좌표 성분과 고시성과의 차이를 나타낸 것이다. 동-서 및 높이방향 성과도 이와 같이 고시좌표와의 차이를 산출하였고 이로부터 RMSE를 계산하여 측위 정확도를 평가하였다.

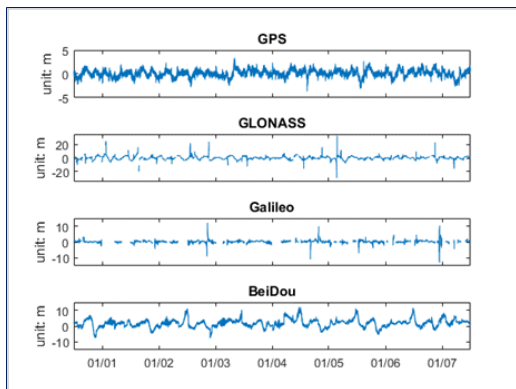


Fig. 8. The time series of difference between the estimated and published coordinates in N-S component at SUWN in 2019.

Fig 9와 10은 8개 상시관측소 2019년 관측데이터의 절사각에 따른 시스템 별 단독측위 정확도를 도시한 것으로 전자는 수평, 후자는 수직방향 결과이다. 2018년 측위 정확도는 2019년 결과와 유사한 경향을 띄고 있어 본 논문에서는 단독으로 다루지 않았다. GPS와 Galileo 데이터 이용 시 상대적으로 측위 정확도가 높았으며, 이는 앞서 언급한 각 시스템 SISRE의 직접적인 영향에 의한 것으로 판단된다. 그리고 절사각을 높일수록 위성배치의 기하강도가 낮아지기 때문에 SISRE의 영향이 더욱 커지는 것으로 나타났다.

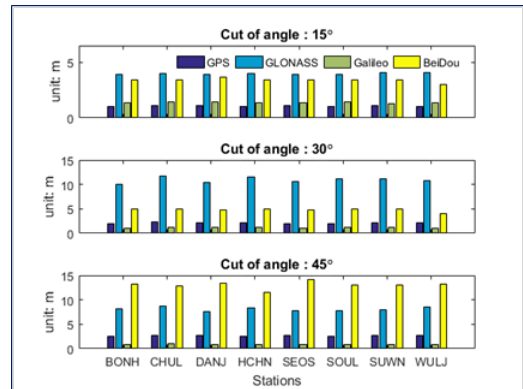


Fig. 9. Horizontal accuracies of standalone GNSS positioning in 2019.

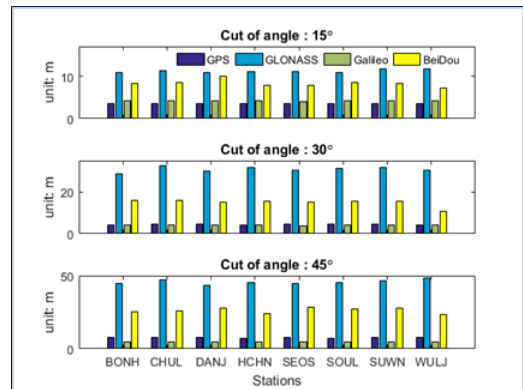


Fig. 10. Vertical accuracies of standalone GNSS positioning in 2019.

Fig 11과 12는 각 상시관측소의 위성시스템 조합 측위 정확도를 수평과 수직방향으로 각각 구분하여 막대그래프로 나타낸 것이다. 양호한 측위환경 아래에서는 충분한 위성신호가 취득되어 SPP 정확도를 고려할 때 어떠한 조합을 하더라도 정확도에 유의미한 차이는 발생하지 않았다. 반면 측위환경이 불량한 절사각 45°에서는 측위에 사용 가능한 위성의 개수가 줄어 SISRE의 영향이 나타나기 시작하며 GLONASS 관측데이터의 조합이 정확도를 하락시키는 요인으로 작용하였다. 조합측위 결과 중 독특한 점은 절사각 45°에서 BeiDou 데이터를 포함한 실험경우의 정확도가 향상된다는 것으로, 절사각을 높임에 따라 GEO 위성 관측데이터가 측위에서 제외되는 것이 그 이유인 것으로 사료된다.

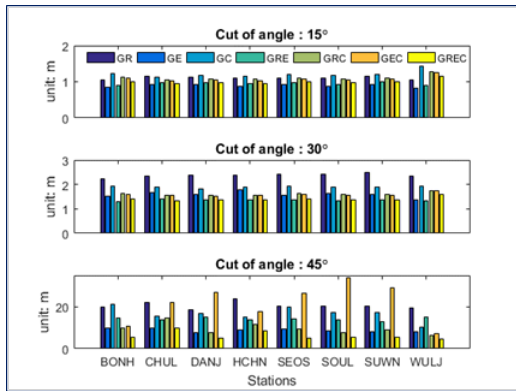


Fig. 11. Horizontal accuracies of combined GNSS positioning at each station (2019).

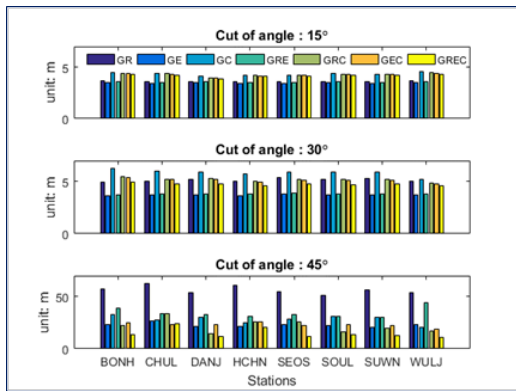


Fig. 12. Vertical accuracies of combined GNSS positioning at each station (2019).

Fig 13과 14는 각 측정의 2018년과 2019년 데이터를 이용해 계산한 GNSS 단독측위 정확도의 평균을 나타낸 것으로 전자는 수평, 후자는 수직방향 결과이며, 이들의 정략적인 수치를 Table 14에 정리하였다. 앞서 살펴본 측정별 단독측위 결과와 같이 SISRE의 영향으로 GPS와 Galileo 데이터의 측위 정확도가 상대적으로 우수한 것을 확인할 수 있다. Table 11에서 알아본 바와 같이

GPS는 2018년, 2019년 위성 수의 변화가 크지 않아 정확도가 유사하게 유지하고 있으나 2019년 위성 수가 소폭 감소한 GLONASS의 정확도는 2018년의 것이 보다 높은 것으로 나타났다. 그리고 현재 꾸준히 위성을 궤도에 배치 중인 Galileo와 BeiDou의 경우 2019년의 측위 정확도가 소폭 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 향후 FOC에 진입하면 위치결정 정확도는 보다 높아질 것으로 기대된다.

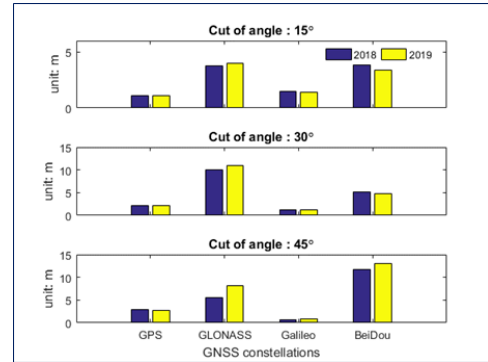


Fig. 13. Horizontal averaged accuracy of the single GNSS positioning.

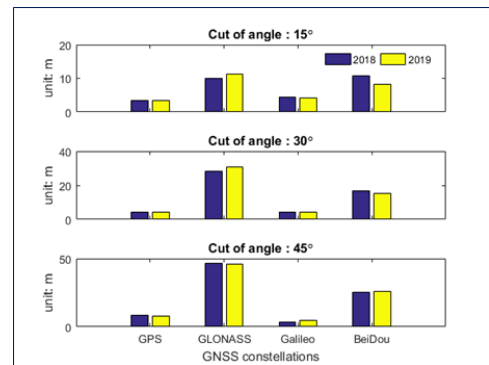


Fig. 14. Vertical averaged accuracy of the single GNSS positioning.

Table 14. The averaged accuracy of the single GNSS positioning.

Component	Mask angel	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou	
		2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Horizontal	15°	1.11	1.07	3.73	3.96	1.47	1.38	3.85	3.38
	30°	2.14	2.09	9.95	10.91	1.30	1.14	5.09	4.81
	45°	2.90	2.66	5.50	8.15	0.74	0.90	11.79	13.05
Vertical	15°	3.42	3.49	10.12	11.19	4.42	4.15	10.79	8.32
	30°	4.23	4.42	28.34	30.83	4.42	4.01	16.61	15.00
	45°	8.66	7.66	46.75	45.71	3.18	4.64	25.34	26.20

Table 15. The averaged accuracy of the combined GNSS positioning.

Component	Mask angle	GR		GE		GC		GRE		GRC		GEC		GREC	
		2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
Horizontal	15°	1.15	1.10	0.98	0.89	1.19	1.21	1.03	0.95	1.08	1.11	1.05	1.08	0.99	1.00
	30°	1.92	2.37	1.71	1.59	2.24	1.90	1.52	1.35	1.79	1.61	1.80	1.59	1.55	1.41
	45°	44.31	20.65	27.68	8.80	13.19	16.69	15.73	14.19	7.44	9.51	10.06	21.82	5.73	6.11
Vertical	15°	3.55	3.61	3.43	3.46	5.03	4.33	3.52	3.54	4.79	4.28	4.83	4.24	4.65	4.15
	30°	4.39	5.14	4.05	3.71	6.88	5.87	3.85	3.82	6.10	5.20	6.23	5.12	5.71	4.75
	45°	77.61	56.14	59.13	22.77	38.39	28.28	67.96	34.22	26.15	21.96	25.90	22.89	17.23	14.99

Fig 15와 16은 측정별 조합측위의 수평·수직 정확도의 평균을 계산하여 절사각에 따라 막대그래프로 나타낸 것으로 앞서 살펴본 측정별 조합측위 결과와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. Table 15는 평균 정확도의 정량적인 값을 요약한 것으로, 이를 살펴보면 양호한 측위환경에서는 위치결정 정확도에 유의미한 차이가 존재하지 않으나 측위환경이 점차 불량해짐에 따라 각 시스템 위성유발오차의 영향으로 측위 정확도 차이가 뚜렷해지는 것을 알 수 있다. 이는 높아지는 절사각에 따라 측위 가용 위성 수 감소가 위성 배치의 기하강도를 증가시키기 때문으로 판단된다. 그리고 절사각을 45°로 설정하는 경우 BeiDou의 GEO 위성 데이터가 처리에서 제외됨에 따른 측위 정확도 향상 효과를 확인할 수 있다. 그리고 Galileo와 BeiDou 관측데이터를 포함하는 경우의 2019년 정확도 상승은 꾸준한 위성 발사 및 배치에 의한 것으로, 향후 그 정확도는 더욱 향상될 것으로 기대된다.

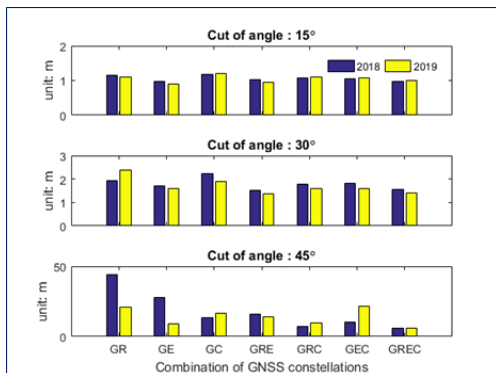


Fig. 15. Horizontal averaged accuracy of the combined GNSS positioning.

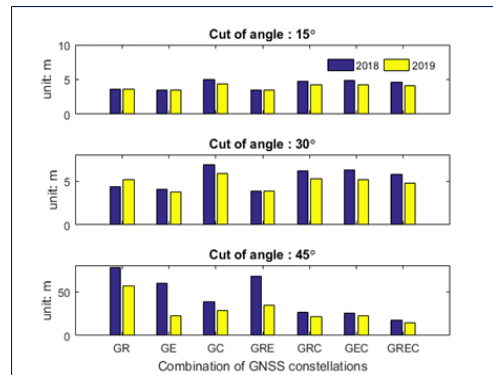


Fig. 16. Vertical averaged accuracy of the combined GNSS positioning.

4. 결론

다중 GNSS 측위 환경이 SPP 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 국토지리정보원 8개 상시관측소데이터를 취득하여 절사각과 위성시스템 관측데이터 조합에 따라 실험경우를 구분하여 측위실험을 수행하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째로 현황조사 결과 위성시스템의 성능은 점차 진보되고 있으며 각 시스템의 상호호환을 위한 노력이 진행 중인 것을 파악할 수 있었다. 이를 통해 전리층 모델링, 미지정수 추정 능력 향상 등 측위 성능의 기술적인 도약을 기대할 수 있었다.

둘째, 차폐물에 의해 위성신호 취득이 어려운 경우 측위의 불연속이 증가하였다. 절사각 45°에서 연속성은 GPS와 BeiDou 데이터를 단독으로 사용하는 경우 각각 20~30% 그리고 35%에 불과하였다. 또한 Glonass와 Galileo 단독 측위 시 연속성은 1~3% 수준이었으며, 이러한 문제는 관측데이터의 조합으로 극복할 수 있었다.

특히, BeiDou 혹은 세 개 이상의 시스템 데이터 조합을 통해 연속성을 90% 이상으로 유지할 수 있었다.

셋 째, GPS와 Galileo의 위성궤도 및 시계오차가 타 시스템에 비해 양호하여 높은 정확도의 측위가 가능하였다. 측위환경이 불량해짐에 따라 위성배치의 기하강도 하락으로 각 시스템 위성유발오차의 영향이 더욱 커졌으며, 절사각 45° 이상에서는 BeiDou의 GEO 위성이 측위에서 제외되어 BeiDou를 포함한 실험경우들의 정확도가 향상되는 경향을 보였다.

본 실험은 다양한 위성 측위 알고리즘 중 가장 널리 활용 중인 표준절대측위 기법을 활용한 측위실험을 통해 측위환경에 따른 차량이나 스마트폰 등의 위치결정 연속성과 정확도를 유추해 볼 수 있었다. 본 실험의 결과를 바탕으로 도심지와 같이 측위환경이 불량한 지역에서 GNSS 관측데이터 조합을 통해 높은 연속성과 정확도를 유지할 수 있다는 결론을 도출하였다. 하지만 실험에 사용한 데이터는 국토지리정보원에서 운영하는 상시관측소에서 취득한 것으로 측위환경이 양호하고 고성능 수신기와 안테나를 사용하여 데이터를 취득하였기 때문에 실제 차량이나 스마트폰에 탑재된 GNSS 수신기를 활용한 측위 결과와 상이할 수 있다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 향후 저가형 수신기를 이용한 측위실험을 수행하여 보다 현실적인 측위 결과를 취득할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] National Coordination Office(NCO), Modernization, National Coordination Office, Available From: <https://www.gps.gov/systems/gps/modernization/> (accessed Jan. 31. 2019)
- [2] Information and Analysis Center(IAC), GLONASS Status, Information and Analysis Center, Available From: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/index.php> (accessed Jan. 31. 2019)
- [3] European GNSS Service Centre(EGSC), Program, European GNSS Service Centre, <https://www.gsc-europa.eu/galileo-gsc-overview/programme> (accessed Jan. 30. 2019)
- [4] Information and Analysis Center(IAC), BeiDou, Information and Analysis Center, Available From: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/beidou.php> (accessed Jan. 31. 2019)
- [5] B. K. Choi, C. H. Cho, J. H. Cho, S. J. Lee, "Multi-GNSS Standard Point Positioning using GPS, GLONASS, BeiDou and QZSS Measurements Recorded at MKPO Reference e Station in South Korea", *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, Vol.4, No.4, pp.205-211, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.11003/JPNT.2015.4.4.205>
- [6] J. Q. Park, D. Y. Um, "Analysis of Positioning Performance According to the Condition of Multi-constellation GNSS", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.4, pp.567-572, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.567>
- [7] H. J. Seok, B. W. Park, "Annual Prediction of Multi-GNSS Navigation Performance in Urban Canyon", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol.34, No.1, pp.71-78, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.1.71>
- [8] National Coordination Office(NCO), Space Segment, National Coordination Office, Available From: <https://www.gps.gov/systems/gps/space/> (accessed Jan. 31. 2019)
- [9] L. Schaub, "GPS Status & Modernization Progress", CGSIC Meeting & ION GNSS+ 2018 Conference, Sep. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.33012/2018.15841>
- [10] Information and Analysis Center(IAC), GLONASS History, Information and Analysis Center, Available From: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/index.php> (accessed Jan. 26. 2019)
- [11] Gunter's Space Page, Galileo FOC, Gunter's Space Page, Available From : https://space.skyrocket.de/doc_sdat/galileo-foc.htm (accessed Jan, 27. 2019)
- [12] European Space Agency(ESA), Galileo Signal Plan, European Space Agency, Available From : https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan (accessed Jan, 24. 2019)
- [13] European GNSS Service Centre(EGSC), Services, European GNSS Service Centre, Available From : <https://www.gsc-europa.eu/galileo-gsc-overview/services> (accessed Jan, 30. 2019)
- [14] S. H. Jeon, H. M. So, T. J. Lee, G. H. Kim, S. I. Jeon, C. W. Kim, C. D. Kee, S. U. Lee, J. H. Kim, "Development of Galileo E5 Signal Receiving Software for AltBOC Signal Modulation", *Journal of the Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.37, No.9, pp.855-862, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2009.37.9.855>
- [15] European GNSS Service Centre(EGSC), Constellation Information, European GNSS Service Centre, <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information> (accessed Jan, 30. 2019)
- [16] The European Space Agency(ESA), Electric Thrusters May steel Galileo in Future, The European Space Agency, Available From :

http://m.esa.int/Our_Activities/Navigation/Electric_thrusters_may_steer_Galileo_in_future (accessed Mar. 15. 2019)

- [17] Information and Analysis Center(IAC), BeiDou Status, Information and Analysis Center, Available From: <https://www.glonass-iac.ru/en/BEIDOU/index.php>, (accessed Jan, 30. 2019)
- [18] P. Henkel, C. Günther, "Reliable Integer Ambiguity Resolution: Multi-Frequency Code Carrier Linear Combinations and Statistical A Priori Knowledge of Attitude", *Navigation*, Vol.59, No.1, pp.61-75, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/navi.6>
- [19] B. Li, "Review of triple-frequency GNSS: ambiguity resolution, benefits and challenges", *The Journal of Global Positioning Systems*, Vol.16, No.1, pp.1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41445-018-0010-y>
- [20] BeiDou Navigation Satellite System, Ephemeris, BeiDou Navigation Satellite System, http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/Ephemeris/201905/t20190527_18299.html (accessed May, 27. 2019)
- [21] P. Steigenberger, O. Montenbruck, "Multi-GNSS SISRE Monitoring - Methodology and Results", IGS Workshop 2017, Jul. 2017.
- [22] T. Nischan, "GFZRNx-RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox (Version 1.05)", GFZ Data Services, Germany, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2016.002>
- [23] T. Takasu, "RTKLIB : Open Source Program Package for RTK-GPS", FOSS4G 2009 Tokyo, Japan, 2009.

윤 성 현(Seonghyeon Yun)

[정회원]



- 2017년 2월 : 창원대학교 토목공학과(공학학사)
- 2019년 2월 : 창원대학교 친환경 해양플랜트FEED공학과정, 토목조선해양공학전공(공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 친환경 해양플랜트FEED공학과정, 토목조선해양공학전공(박사과정)

<관심분야>

GNSS 측위/항법, 측지측량, 공간정보 수치모델링

이 흥 규(Hungkyu Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동아대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2004년 10월 : 호주 뉴사우스 웨일즈 대학교 측량 및 공간정보 시스템공학과(공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2005년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 토목환경화공융합공학부 교수

<관심분야>

GNSS 측위/항법, 측지측량, 공간정보 수치모델링

응웬 딩 후이(Huy Nguyen Dinh)

[정회원]



- 2014년 3월 : 베트남 국립토목건설대학교 측지 및 지도제작학과(공학사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 친환경 해양플랜트FEED공학과정, 토목조선해양공학전공(석사과정)

<관심분야>

GNSS 측위/항법, 측지측량, GIS