

Assessment of Position Degradation Due to Intermittent Broadcast of RTK MSM Correction Under Various Conditions

Hyo Jung Yoon, Cheol soon Lim, Byungwoon Park[†]

Department of Aerospace Engineering, Sejong University, Seoul 05006, Korea

ABSTRACT

GNSS has been evolving dramatically in recent years. There are currently 6 GNSS (4 GNSS, AND 2 RNSS) constellations, which are GPS (USA), GLONASS (Russia), BeiDou (China), Galileo (EU), QZSS (Japan), and IRNSS (India). The Number of navigation satellites is expected to be over 150 by 2020. As the number of both constellations and satellites used for the improvement of positioning performance, high accuracy, and robustness of precise positioning is more promising. However, a large amount of the correction messages is required to support the augmentation system for the available satellites of all the constellations. Since bandwidth for the correction messages is generally limited, sending or scheduling the correction messages might be a critical issue in the near future. In this study, we analyze the relationship between the size of the bandwidth and Real-Time Kinematics (RTK) performance. Multiple Signal Messages (MSM), the only Radio Technical Commission for Maritimes (RTCM) message that supports multi-constellation GNSS, has been used for this assessment. Instead of the conventional method that broadcasts all the messages at the same time, we assign the MSM broadcasting interval for each constellation in 5 seconds. An open sky static and dynamic test for this study was conducted on the roof of Sejong University. Our results show that the RTK fixed position accuracy is not affected by the 5-second interval corrections, but the ambiguity fixing rate is degraded for poor DOP cases when RTK correction are transmitted intermittently.

Keywords: GPS, RTK, correction, MSM, RTCM

1. INTRODUCTION

다중 위성군 시대가 도래함에 따라 Global Navigation Satellite System (GNSS) 위성의 수가 급증하고 있다 (Son et al. 2019). 현재 GNSS 시스템은 미국의 Global Positioning System (GPS)를 필두로, 러시아의 GLObal Navigation Satellite System (GLONASS), 중국의 BeiDou, EU 연합의 GALILEO, 일본의 Quasi-Zenith Satellite System (QZSS), 인도의 India Regional Navigation Satellite System (IRNSS)에 이르기까지 총 6개의 위성군이 구축 완료 혹은 진행 중이다. 2020년 현재 운영 중인 항법 위성은 140 개 이상이며 최대 150개 이상까지 늘어날 것으로 예상되고 있다

(Seok et al. 2015). GNSS 위성군이 다변화되고, 가용 위성의 수가 크게 증가함에 따라 정확성을 비롯한 전반적인 항법 성능이 이전 보다 향상되고 있다. 가용 위성수의 증가는 위치 결정 성능 향상에 큰 기여를 하지만(Seok & Park 2016), 보강시스템에 필수적인 보정정보 전송 데이터 대역폭에 문제가 발생할 수 있다. 향후 위성수가 지속적으로 증가할 것이므로 모든 위성의 보정정보를 전송하기 위해서는 더욱 많은 양의 데이터가 필요하기 때문이다. 그런데 보정정보 제공에 사용되는 통신 모듈의 대역폭은 기 구축된 하드웨어의 사용, 규제와 비용 등 여러가지 제약으로 인해 쉽게 증대할 수 없으므로, 모든 위성들에 대한 보정정보 지연 또는 미전송 등 문제가 발생할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 제한된 대역폭을 효과적으로 활용할 수 있는 방법으로 보정정보를 각 위성군 별로 주기적으로 제공하는 방안을 고려한다. 이를 통해, 제한된 대역폭 내에서 많은 위성의 보정정보를 전송할 수 있으므로 대역폭을 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 다만 이와 같은 간헐적인 보정정보 전송으로 인해 측위 성능이 저하되지 않는지를 분석하기 위하여 다양한 측위 환경에서 주기적인 보정정보의 전송과 Real Time

Received Jun 18, 2020 Revised Aug 20, 2020 Accepted Aug 26, 2020

[†]Corresponding Author

E-mail: byungwoon@sejong.ac.kr

Tel: +82-2-3408-4385 Mobile: +82-10-4350-7321

Hyo Jung Yoon <https://orcid.org/0000-0002-7543-1660>

Cheol soon Lim <https://orcid.org/0000-0003-4437-8999>

Byungwoon Park <https://orcid.org/0000-0001-8635-1773>

Table 1. The legacy RTCM-3 observation message.

Message type	Message name
MT 1001	L1 – only GPS RTK observables
MT 1002	Extended L1 – only GPS RTK observables
MT 1003	L1 & L2 GPS RTK observables
MT 1004	Extended L1 & L2 GPS RTK observables
MT 1009	L1 – only GLONASS RTK observables
MT 1010	Extended L1 – only GLONASS RTK observables
MT 1011	L1 & L2 GLONASS RTK observables
MT 1012	Extended L1 & L2 GLONASS RTK observables
MT 1071 - 1077	GPS MSMs
MT 1081 - 1087	GLONASS MSMs
MT 1091 - 1097	GALILEO MSMs
MT 1111 - 1117	QZSS MSMs
MT 1121 - 1127	BeiDou MSMs

Kinematics (RTK) 위치 성능과의 상관 관계에 대한 분석을 수행할 필요가 있다.

2. RTK CORRECTION MESSAGE

2.1 RTCM Message

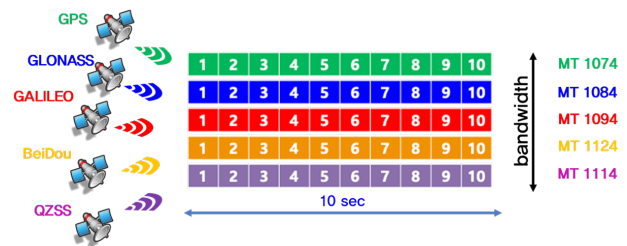
Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)은 전 세계의 해양 Differential GNSS (DGNSS) 서비스를 위하여 사용되는 보정정보 프로토콜이다. RTCM은 초기에는 해양용으로 개발되었지만 현재는 적용 분야와 무관하게 대다수의 상용 수신기에서 보정정보의 표준으로 사용되고 있다 (Seok et al. 2017, Lim & Park 2017). RTCM Correction Message는 현재 Version 2.x와 3.x가 표준으로 사용되고 있는데, RTCM Version 2.x는 Code 기반 측위인 DGNSS에 사용되고, Version 3.x는 Carrier phase 기반 정밀 측위인 RTK에 사용된다. RTCM의 Message type은 사용자의 측위 모드에 따라 필요한 데이터를 적절히 지원할 수 있도록 Table 1과 같이 설정되어 있다. GPS RTK 보정 정보는 1001번부터 1004번까지 할당되어 있는데, 이 중 1001번과 1002번은 GPS L1 Only, 1003번과 1004번은 GPS L1/L2 용 보정정보이다. 또한 1001과 1003은 각 모드에 필수적으로 요구되는 최소한의 메시지이고, 1002와 1004는 두 모드를 충분히 지원할 수 있는 확장형 데이터 포맷이다. GLONASS 역시 GPS와 유사한 형태로 1009번부터 1012번에 할당되어 제공되고 있다 (RTCM 2013).

2.2 MSM Message

Multiple Signal Message (MSM)은 다양한 위성군의 GNSS 신호를 측위에 사용할 때 보편적인 방식으로 활용할 수 있도록 고안된 Message type이며 Table 2와 같이 구성되어 있다. MSM은 RINEX-3와 호환이 가능하고, 현재 사용하는 GNSS signal은 물론 향후 추가될 GNSS signal에 모두 보편적으로 사용할 수 있도록 설계 되었다. 현재 사용하고 있는 기존의 RTCM 메시지는 GPS 및 GLONASS 이외의 L5등과 같이 새로운 대역에 대한 Reference data를 생성할 수 없지만 MSM은 기존 RTCM 3.x의

Table 2. Short content of each MSM.

MSM type	Message name
MSM 1	Compact GNSS Pseudoranges
MSM 2	Compact GNSS PhaseRanges
MSM 3	Compact GNSS Pseudoranges & PhaseRanges
MSM 4	Full GNSS Pseudoranges & PhaseRanges plus CNR
MSM 5	Full GNSS Pseudoranges & PhaseRanges & PhaseRangesRate and CNR
MSM 6	Full GNSS Pseudoranges & PhaseRanges plus CNR (high resolution)
MSM 7	Full GNSS Pseudoranges & PhaseRanges & PhaseRangesRate and CNR (high resolution)

**Fig. 1.** Data bandwidth for broadcasting current MSM RTK correction.

RTK 수신기에도 쉽게 대체 적용 가능하다. 본 연구에서 사용하는 MSM 4의 경우 Message header, Satellite data, Signal data의 구조로 이루어져 있고, Pseudorange, Carrier phase, CNR의 보정정보를 제공하고 있다.

본 연구에서 사용한 MSM 4를 기준으로 Header 부분은 169 bps, Satellite data는 위성마다 18 bps, Signal data는 위성군마다 49 bps가 할당된다. 이때의 데이터 사이즈는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{bitsize} = 169 + N_{\text{sat}} * (18 + 49 * N_{\text{sig}}) \quad (1)$$

여기서 N_{sat} 는 사용 위성의 숫자를 의미하고, N_{sig} 는 사용된 위성군의 숫자를 의미한다. 즉 5개의 위성군에 대하여 40개의 항법 위성을 사용할 때, 데이터 사이즈는 10689 bps에 달한다. 본 연구는 다중 위성군의 GNSS 보정정보 적용을 위해 제한된 대역폭에서 효과적으로 전송할 수 있는 지 여부를 확인하는 것을 그 목적으로 하므로, 1001부터 1004, 1009부터 1012 메시지 대신 MSM 보정정보를 전송하고, 간헐적으로 전송할 경우 그 영향을 분석하기로 한다.

2.3 Intermittent Broadcast of MSM Message

현재 GNSS RTK 측위 시스템에서 RTCM 보정정보가 제공되는 방식은 Fig. 1과 같이 모든 데이터를 매초 보내는 방식을 사용하고 있다. 10초 시간 간격에 대하여 RTK 보정정보가 전송되는 상태를 일례로 들어보면, GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, QZSS 등 각 위성군의 보정정보 메시지 그룹을 매초 전송하여 RTK 사용자의 시간지연 오차를 최소화한다. 이 경우, 다중위성군에서 40개 이상의 많은 위성을 사용하여 RTK를 적용할 때 9,600 bps 대역의 통신 장비로는 보정정보를 전송하는데 문제가 발생할 수 있다.

필요한 대역폭을 줄이기 위한 방안으로 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 MSM 보정정보를 일정 주기로 전송하는 방안을 고려했다. 10초간 GPS, GLONASS, GALILEO, BeiDou, QZSS, 5개 위성군의 MSM 보정정보를 전송하는 경우, 보정정보를 5초 간격으로 전송함으로써, 보정정보 전송을 위한 대역폭을 최소화한다. 즉, 10초 동안 GPS는 1초와 6초, GLONASS는 2초와 7초, GALILEO는 3초와 8초, BeiDou는 4초와 9초, 그리고 QZSS는 5초와 10초에 각 MSM Message를 할당하여 제공할 수 있다. 이와 같은 방법을 적용할 경우 필요한 통신 대역폭을 1/5 수준으로 감소시킬 수 있다.

3. TEST RESULT

3.1 RTK Test Construction using Replay System

다양한 조건과 환경에서 보정정보 전송 주기에 따른 성능 평가 실험을 반복적으로 수행하기 위하여 Fig. 3과 같은 RTK Replay System을 구성하였다 (Yoon et al. 2018, Lim et al. 2019). RTK Replay System은 다중 위성군 GNSS RF 신호를 저장해두고, RTK를 위한 RTCM 보정정보를 file 형태로 저장한 후, 재 방사된 신호와 동기화된 보정정보를 수신기에 전송함으로써 다양한 실험 환경에서의 RTK 반복 실험을 가능하게 한다.

구체적으로, Rover는 Labsat3 Wideband 장치를 이용하여 GNSS RF 신호를 그대로 저장한 후 재 방사함으로써 다양한 모드

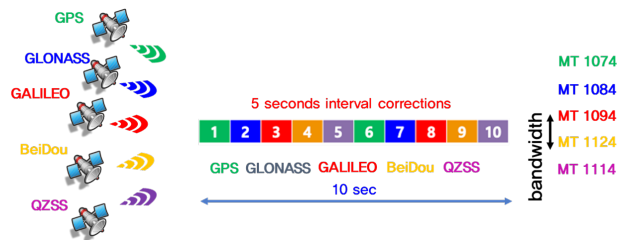


Fig. 2. Data bandwidth for intermittent broadcasting MSM RTK correction.

에서의 Rover 위치를 계산할 수 있다. RF 신호가 저장되는 동안, 개발한 RTCM Message Logger를 이용하여 세종대학교 측무관에 설치된 Trimble NetR9 수신기에서 생성한 보정정보를 file 형태로 저장하였다. 이후, Labsat3에서 재방사한 신호를 Novatel Flexpak 6에서 수신한 결과인 The National Marine Electronics Association 데이터에서 Coordinated Universal Time 정보를 확인할 수 있는데, 개발한 Correction Transmit S/W를 이용하여 해당 시간과 일치하는 MSM 보정정보를 검색하여 이를 수신기에 입력한다. 이와 같이 RTK Replay System을 이용하면 보정정보의 전송 주기를 실험 목적에 맞게 변경하여 동일한 사용자 RF 신호에 적용할 수 있으므로, 보정정보 전송 주기와 RTK 성능 간의 관계를 분석할 수 있다.

3.2 Bandwidth Analysis for Intermittent Broadcast of MSM Correction Messages

본 논문에서 고려한 보정정보의 주기적인 간헐적 전송에 따른 보정정보 bandwidth의 크기 변화를 분석하여, Fig. 4와 Table 3에 제시하였다. 기존 방법과 같이 동일 epoch에 모든 가시 위성의 보정정보를 전송하는 경우, 본 실험 수행 시 RTK에 사용된 위성은 36개이고, 이때 평균 데이터 양은 1초에 6249 bit, 순간 최대 데이터 사용량은 6888 bit였다.

반면 본 연구에서 고려하는 5초 주기로 간헐적 전송을 한 경우, 매초 보정정보를 전송한 위성 수는 평균 7개였으며 그에 따른 1초 전송 평균 데이터 양은 1222 bit로 감소하였고, 최대 데이터 전송량은 1초에 1912 bit이었다. 따라서 5초 주기로 MSM 보정정보를 간헐적으로 전송하는 경우, 보정정보 전송을 위한 BaudRate는 7200 또는 9600 bps에서 2400 bps 수준으로 축소할 수 있는 것을 확인하였다.

3.3 Open-sky Static Test

MSM Correction의 간헐적 전송과 RTK 측위 성능과의 상관관

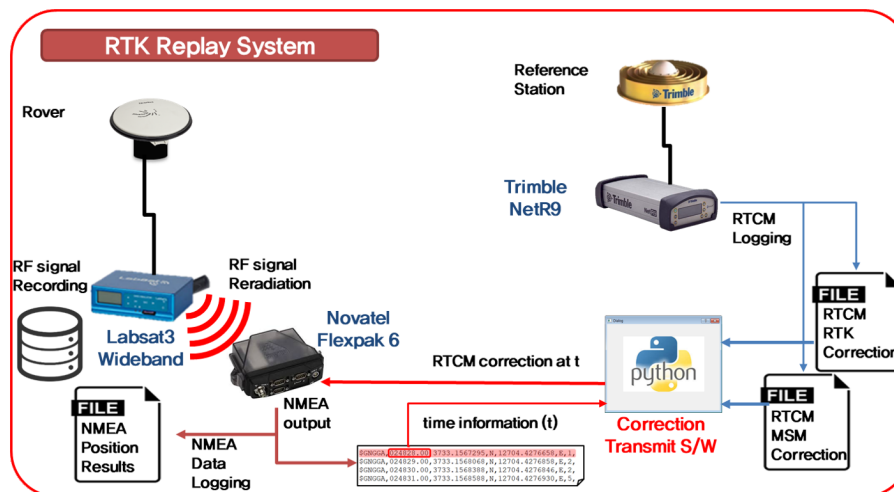


Fig. 3. RTK replay system.

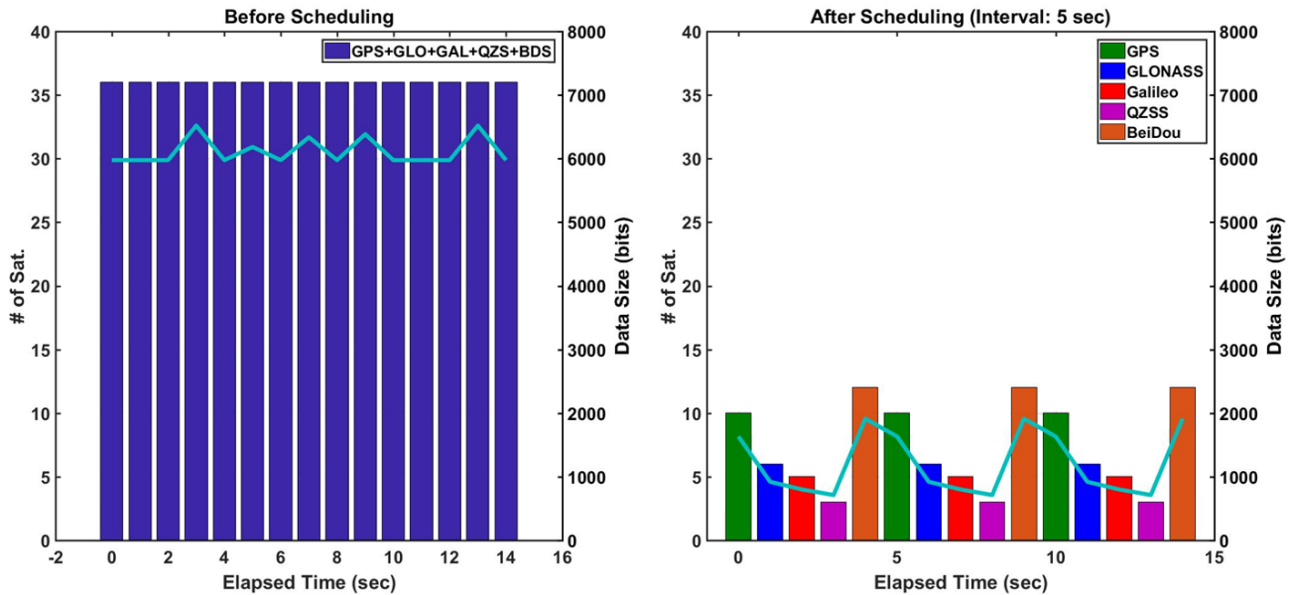


Fig. 4. Data packet analysis.

Table 3. Data packet analysis result.

	Average data size (bps)	Max data size (bps)	Average # of SV	Max. # of SV
Without scheduling	6249	6688	36.65	37
Scheduling (0.2 Hz)	1222	1912	7.34	12

계 분석을 위하여 Fig. 5와 같은 Open-sky 환경에서 정적 실험을 진행하였다. Open-sky 정적 실험은 2019년 2월 20일 8시 15분부터 9시 15분까지 세종대학교의 충무관 옥상에 설치된 Baseline의 거리가 약 31 m인 사용자와 기준국의 안테나를 통해 취득한 1시간 동안의 정적 데이터를 사용하였다.

기준국의 안테나와 수신기는 Trimble Choke Ring Antenna와 Trimble Net R9이고, RINEX data 및 RTCM MSM 보정정보를 file의 형태로 저장하였다. 사용자의 안테나는 Novatel사의 Wheel 타입모델을 사용하였고, 수신된 GNSS RF 신호를 Labsat3 Wideband를 사용하여 저장하였다. 이후 앞서 기술한 RTK Replay System을 이용하여 저장한 MSM 정보를 Flexpak-6 수신기에 입력함으로써 RTK 측위를 수행하였다. 사용자의 True position은 이미 정확히 측정되어 있기 때문에 True position을 기준으로 하여 오차 값을 분석함으로써 성능을 파악할 수 있다.

Fig. 6은 저장해 놓은 MSM Message를 별도의 Scheduling 없이 기존의 방법대로 RTK Replay System에 입력하여 RTK Processing을 수행하는 방식을 표현하고 있고, Fig. 7은 5초 주기로 MSM Message를 입력하는 방식을 보여주고 있다.

이와 같은 방법으로 Fig. 8과 Table 4는 개활지 환경에서의 기존 방법과 Scheduling한 방법을 비교한 것이다. 빨간색 점은 기존 방법을 이용해 매초 보정정보를 전송하여 RTK를 수행한 결과이고, 파란색 점은 5초 주기로 전송된 보정정보를 적용하여 RTK를 수행한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 8은 GPS-only와 다중위성군 보정정보를 기존 방법과 5초 주기로 전송한 후 취득한 RTK 측위 결과를 비교한 것이다. GPS

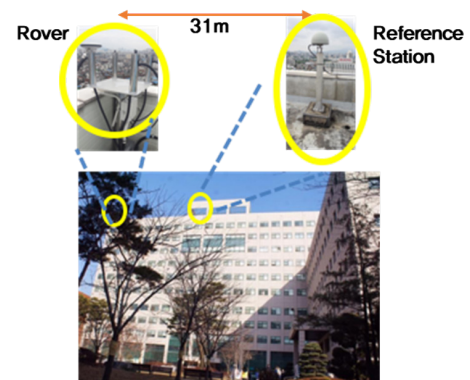


Fig. 5. Static test constructions.

only에 대하여, 기존 방법으로 RTK를 수행하였을 때 Root Mean Square (RMS)는 수평방향으로 5 mm, 수직방향으로는 5.6 mm의 위치 오차가 발생하였고, 5초 간격으로 보정정보를 적용한 방법은 각각 5.9 mm, 7.0 mm의 위치 오차가 발생했다. 두 케이스의 결과를 비교하였을 때 그 차이가 RMS 2 mm 이하로 5초 간격의 보정정보 적용이 GPS-only 성능 저하에 영향이 거의 없다는 것을 확인할 수 있었다.

Flexpak 6 모델은 동시에 최대 3개의 위성 조합의 사용이 가능하므로 GPS+BeiDou, GPS+GLONASS+BeiDou의 조합으로 구성된 다중위성군 RTK 결과도 확인해 보았고, 그 결과가 GPS-only와 유사한 것으로 확인하였다.

GPS+BeiDou의 위성군 조합으로 RTK 측위 수행시 RMS 기준으로 수평방향으로 기존 방법은 2.4 mm, 수직방향으로 4.2 mm의 위치오차가 발생하였으며, 0.2 Hz로 보정정보를 전송한 방법은 수평 4.7 mm, 수직 6 mm의 RMS 위치 오차가 발생했다.

또한 GPS+BeiDou+GLONASS 케이스는 수평방향 4.8 mm, 수직방향 6.7 mm의 RMS 오차가 발생했고 보정정보를 간헐적으로 전송한 RTK 결과는 방향은 서로 차이가 있지만 수평 방향 4.8

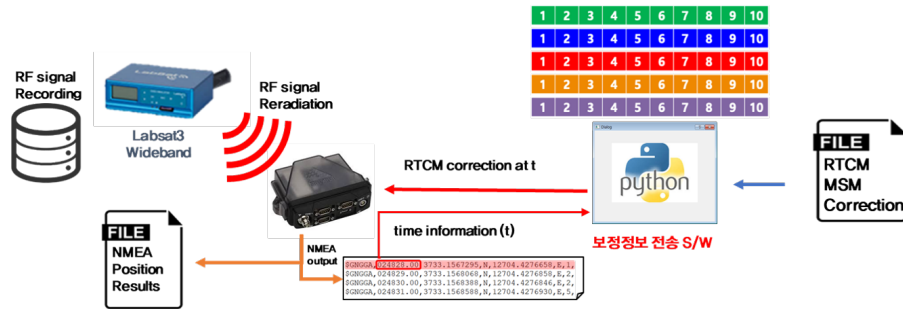


Fig. 6. RTK replay system without scheduling.

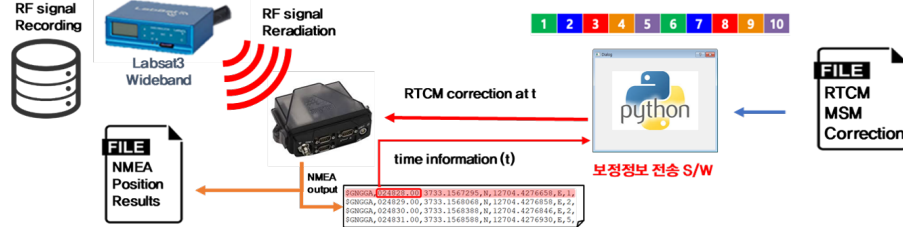


Fig. 7. RTK replay system with scheduling.

Table 4. Statistics of static test results.

		Current broadcast method		Intermittent broadcast (0.2 Hz)	
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
GPS only	RMS error (cm)	0.50	0.56	0.59	0.70
	Mean error (cm)	0.43	-0.26	0.53	-0.02
	Max error (cm)	2.81	2.73	1.63	3.17
GPS+BeiDou	RMS error (cm)	0.24	0.42	0.47	0.60
	Mean error (cm)	0.21	-0.23	0.42	-0.27
	Max error (cm)	1.27	1.67	1.72	2.23
GPS+GLONASS +BeiDou	RMS error (cm)	0.48	0.65	0.48	0.55
	Mean error (cm)	0.46	0.53	0.43	-0.22
	Max error (cm)	1.05	1.77	1.64	1.93

mm 수평 방향 5.5 mm의 RMS 위치 오차가 발생했다. 즉 3개의 Multi Constellation에서 성능 차이 역시 RMS 기준 1 mm 이하의 차이가 발생하였으므로, open sky에서는 보정정보의 간헐적인 전송이 RTK 성능에 미미한 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

3.4 Effect of Intermittent Broadcast of MSM Messages on the RTK Positioning Performance under Poor Satellite Geometry

개활지가 아닌 수신 환경에서 간헐적 보정정보 전송 영향을 분석해 보았다. 본 연구에서는 mask angle을 고양각으로 설정한 경우와 한쪽 방향이 가려진 poor Horizontal Dilution Of Precision (HDOP) 환경을 비 개활지 수신환경으로 고려하였다.

3.4.1 Messages intermittent broadcast effect with high - elevation angle masking

첫 번째로 도심지나 산악지형과 같은 환경을 가정하여 수신기의 Mask angle을 높여 연직 방향에 가시 위성이 제한적으로 모

여 있는 위성 배치 상황에서 기존 방법과 간헐적 보정정보 전송 방법의 RTK 측위 성능을 비교하였다. Fig. 9는 3.3절의 개활지 환경에서 수신한 데이터에 High elevation angle masking을 적용한 Sky plot을 비교한 그림이다. 본 연구에서는 Fig. 9의 오른쪽 그림처럼 Mask angle을 30°로 설정한 것을 High elevation angle masking로 가정하였고, 이후 1 Hz와 0.2 Hz의 MSM 보정정보를 각각 적용하였다.

High Elevation Angle Masking 환경에서 GPS+GLONASS+Beidou 결과는 개활지 결과와 크게 다르지 않았다. Fig. 10과 Table 5에서와 같이 기존 1 Hz 보정정보 적용 방법은 수평방향 RMS 6.4 mm, 수직방향 RMS 10 mm의 오차가 발생했고, 0.2 Hz의 MSM 보정정보를 적용하였을 때의 RTK 결과는 수평방향 RMS 4.8 mm, 수직방향 RMS 5 mm의 오차로 오히려 간헐적 보정정보 전송 결과가 미세하게 양호한 결과를 제시하였으나, 2 mm 이내의 차이이므로 유의미한 결과로 보이지 않는다.

High elevation angle masking으로 인해 가용 위성수는 줄어들었으나, 고양각 위성의 오차 변화율은 저양각에 비하여 매우 작기 때문에 (Park et al. 2006, Yoon & Lee 2014) 간헐적 보정정보의 영향이 크지 않는 것으로 추정된다. 따라서 open-sky와 마찬가지로

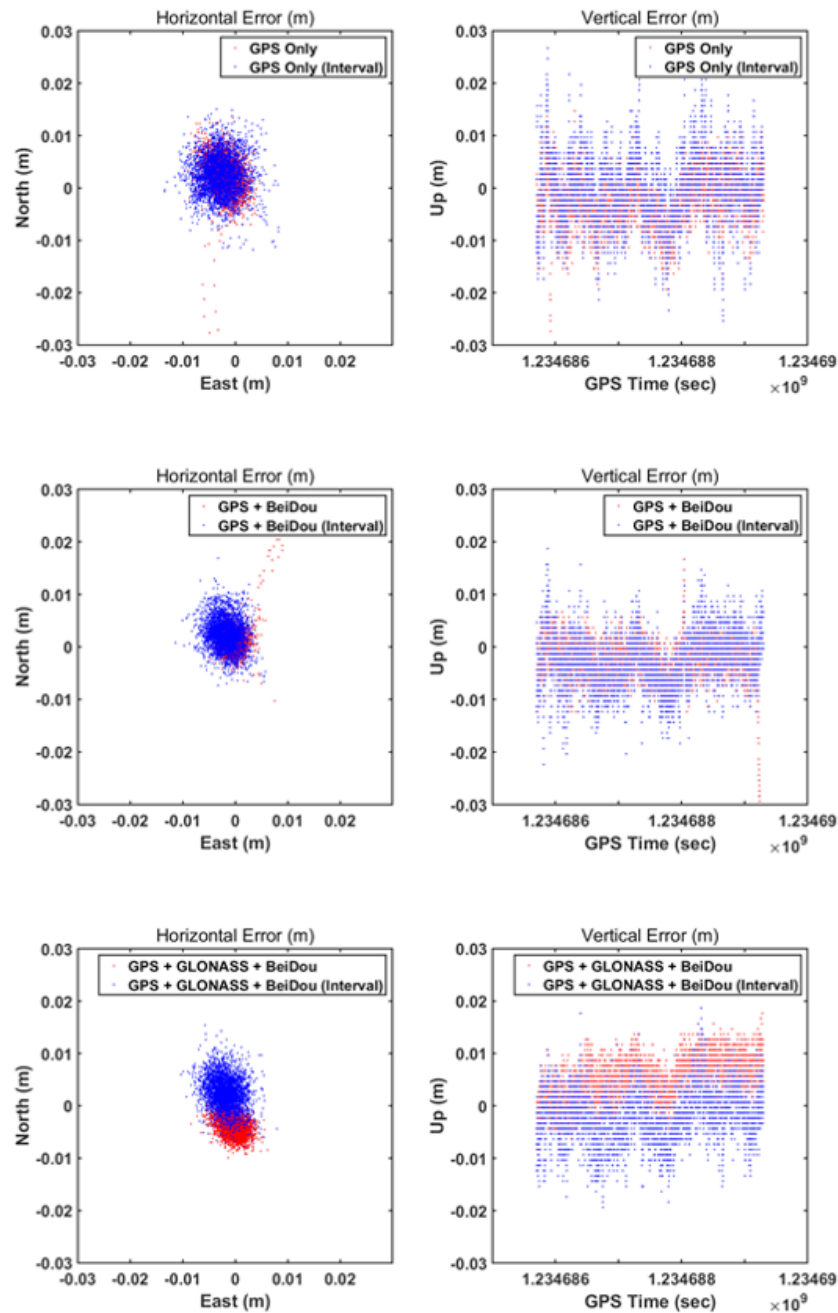


Fig. 8. Static test results.

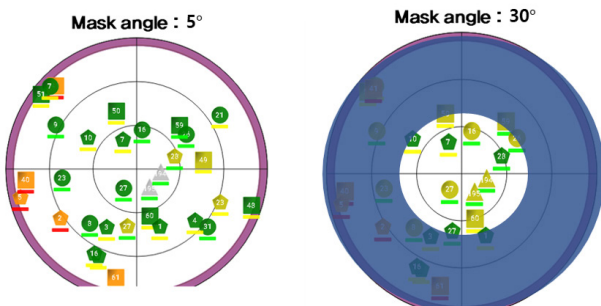


Fig. 9. High elevation angle masking environments.

Table 5. High elevation angle masking environment test - GPS GLONASS BeiDou result.

GPS+GLONASS+BeiDou (mask angle of 30°)	Current broadcast method		Intermittent broadcast (0.2 Hz)	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
RMS error (cm)	0.64	1.06	0.48	0.54
Mean error (cm)	0.60	0.84	0.43	-0.20
Max error (cm)	1.61	3.07	1.41	2.03

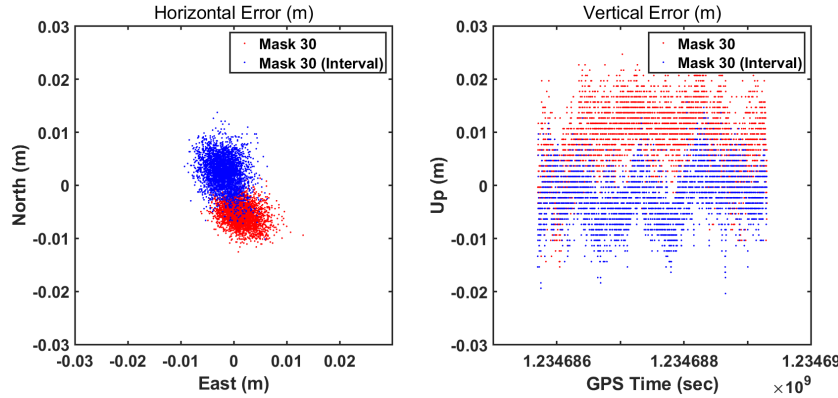


Fig. 10. High elevation angle masking environment test - GPS GLONASS BeiDou.

가지로 30° 이상의 High Elevation Angle Masking 환경에서도 보정정보의 전송주기에 의한 정확도 성능 차이가 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

반면, 2개 이하의 위성군을 조합한 경우에는 수직 방향의 위성 배치가 양호하지 않았을 때 보정정보 전송 주기가 측위 모드 전환에는 영향을 주는 것으로 확인되었다. Table 6에서 확인할 수 있는 것처럼 Mask Angle이 5°일 때에는 1 Hz와 0.2 Hz로 MSM Message를 제공한 두 방법 모두 RTK 고정해를 얻을 수 있었지만, Mask Angle를 30°로 설정한 경우, 5초 주기로 MSM 보정정보를 전송하였을 때 GPS+GLONASS 조합이나 GPS+BeiDou 조합의 측위 모드에서는 RTK 위치해가 고정(fixed)되지 않고 실험 구간 내내 유동해(float solution)가 도출되기도 하였다.

이와 같이 보정정보의 전송 주기에 따라 위치해의 고정 여부가 달라지는데 이는 미지정수 결정시 검색공간과 상관관계가 있을 것으로 추정된다. 본 연구에서는 반송파 측정치의 미지정수의 해의 모호성에 대한 GNSS 모델의 강도를 유추하는 데 사용할 수 있는 측정 값인 Ambiguity Dilution Of Precision (ADOP)을 고려하도록 한다 (Odijk & Teunissen 2008). 앞서 설정한 개활지 환경과 High elevation angle masking 환경에서의 ADOP를 비교하여 보았다.

ADOP는 식 (2~6)과 같은 방법을 통해 계산할 수 있다. 관측방정식 H 는 위성 항법군의 조합에 따라 식 (2)와 같이 설정할 수 있다. 식 (3)의 K matrix는 반송파 측정치의 Noise level 수준에 따라 설정하였다.

$$H = \begin{bmatrix} e^2 - e^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e^3 - e^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \dots & \vdots \\ e^n - e^1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ e^2 - e^1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ e^3 - e^1 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^n - e^1 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$Q = (H^T H)^{-1} H^T K H (H^T H)^{-1} \quad (3)$$

$$K = \begin{bmatrix} 4 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 4 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 4 \times 10^{-4} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 4 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Table 6. High elevation angle masking effect result – various GNSS constellation combination.

MSM message broadcast	Mask angle	GNSS constellation combination for positioning		
		GPS+GLONASS	GPS+BeiDou	GPS+GLONASS+BeiDou
1 Hz	5°	Fixed	Fixed	Fixed
	30°	Fixed	Fixed	Fixed
0.2 Hz	5°	Fixed	Fixed	Fixed
	30°	Float	Float	Fixed

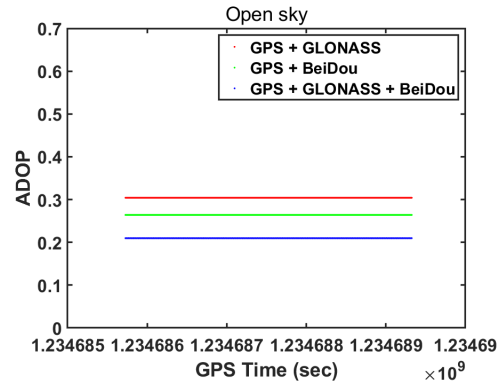


Fig. 11. Open – sky environment ADOP.

$$Q = \begin{bmatrix} Q_b & Q_{ba} \\ Q_{ab} & Q_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$ADOP = \det(Q_a)^{\frac{1}{2n}} \quad (6)$$

개활지에서의 ADOP는 Fig. 11과 같이 GPS+GLONASS는 0.304 cycle, GPS+BeiDou 조합은 0.264 cycle, GPS+GLONASS+BeiDou는 0.205 cycle로 산출되었다. 반면, High elevation angle masking 환경에서는 Fig. 12에서 확인할 수 있는 것처럼 GPS+BeiDou+GLONASS 3개 위성군을 사용할 경우는 0.3 이하의 값인 0.294 cycle의 ADOP이 산출되었으나, GPS+GLONASS은 0.48 cycle, GPS+BeiDou 조합의 경우 0.59 cycle의 결과가 도출되었다. 따라서 High elevation angle masking 환경에서 위성 조합군의 감소에 따라 검색 공간이 확대되는 경우, 간헐적인 보정정보 전송이 미지정수 결정에 영향을 끼쳐 유동해가 도출되는 것으로 추정된다.

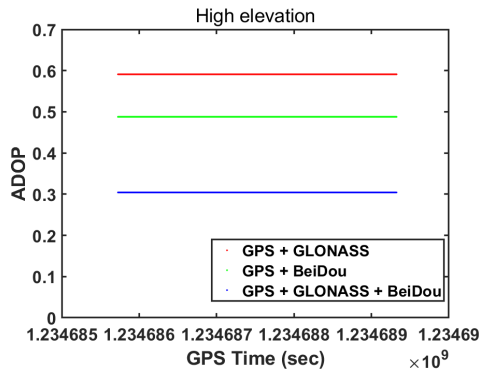


Fig. 12. High elevation angle masking ADOP.

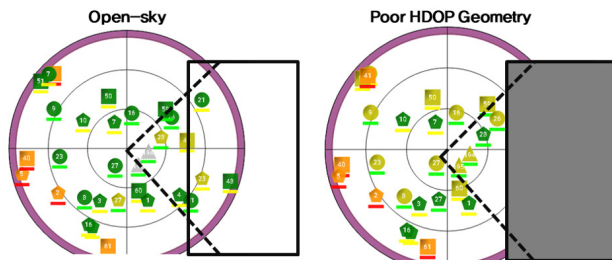


Fig. 13. Poor horizontal satellite geometry case.

반송파 측정치 미지정수 정수성이 보장되지 않는 유동해는 정밀 측위 및 항법 분야에서 불확실한 항법해로 간주되기 때문에 (Cho et al. 2011), 정확성(accuracy)과 가용성(availability) 등 RTK 위치해의 성능 인자는 미지정수가 정확히 결정된 이후의 항법해인 고정해에 한하여만 평가해야 한다 (Lim et al. 2018).

따라서 High elevation angle masking 경우에도 앞선 개활지 경우와 동일하게, 미지정수 결정 이후에는 MSM 보정정보의 전송 주기가 RTK 위치 성능에 끼치는 영향이 미미하나, 측위에 사용되는 Multi constellation의 수가 적을 경우에는 미지정수 결정 여부에 영향을 끼칠 수 있음을 확인하였다.

3.4.2 Message intermittent broadcast effect under poor HDOP condition

수평방향의 위성 배치가 양호하지 않은 환경에서 간헐적으로 전송된 MSM Message가 RTK 측위 결과에 끼치는 영향을 분석하였다. Fig. 13과 같이, Azimuth angle 45~135° 방향에 위성 신호를 방해하는 장애물이 있다고 가정하고 해당 방향의 위성을 고의적으로 제거하여 Poor HDOP condition을 구성하였다.

DOP는 사용자의 위치를 결정할 때 항법위성의 기하학적 배치상태를 나타내는 성능지표로써 (Wang et al. 2008), 관측행렬 H 를 이용해 계산할 수 있다. 수직방향의 위치 정확도 수치를 나타내는 HDOP의 경우, 식 (7~9)와 같이 DOP 성분을 이용해 계산할 수 있다 (Kihara 1994, Subirana et al. 2013).

$$Q = H^T H \quad (7)$$

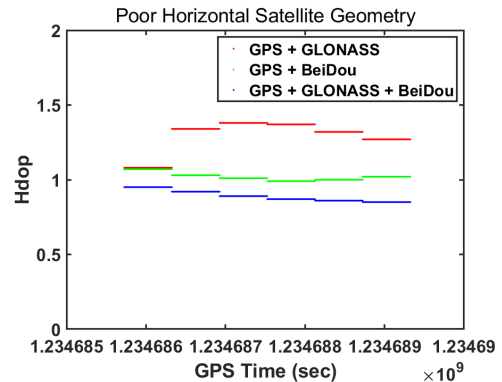


Fig. 14. Time history HDOP of the simulation poor horizontal satellite geometry case.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{EE} & q_{EN} & q_{EU} & q_{ET} \\ q_{NE} & q_{NN} & q_{NU} & q_{NT} \\ q_{UE} & q_{UN} & q_{UU} & q_{UT} \\ q_{TE} & q_{TN} & q_{TU} & q_{TT} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$HDOP = \sqrt{q_{EE} + q_{NN}} \quad (9)$$

Fig. 14는 시뮬레이션한 Poor HDOP의 시계열을 도시하고 있으며, 개활지에서는 HDOP 값이 평균 0.59, 최대 0.80이었으나, poor HDOP 환경에서는 HDOP 값의 평균이 1.56, 최대 3.10이었다.

Fig. 15와 Table 7은 Poor DOP Condition에서의 기존 방법의 RTK와 Scheduling된 MSM 보정정보를 적용한 결과이다.

GPS+GLONASS 조합의 경우 기존 RTK 방식과 간헐적 보정정보 전송 간 수평과 수직 RMS 차이는 2~3 mm 수준이었고, GPS+BeiDou 조합에서의 RMS 차이도 역시 2~3 mm 수준이었다.

GPS+GLONASS+BeiDou 3개 위성군을 기존 RTK와 5초 간격으로 Scheduling한 MSM 보정정보를 사용한 결과를 비교하였을 때 역시 RMS 기준으로 3 mm 이하의 차이가 나타나는 것을 확인하였고 성능의 차이는 거의 없다는 것을 확인하였다.

3.5 MSM Message Intermittent Broadcast Effect on RTK Dynamic Positioning

간헐적으로 전송되는 MSM Correction Message를 동적 사용자에게 적용하여 RTK 결과에 끼치는 영향을 비교하였다.

Dynamic Test는 Fig. 16과 같이 세종대학교 광개토관 옥상의 헬기장에서 2018년 11월 06일 15분간 진행하였다. 비행을 수행한 Rover와 기준국은 1 km 이하의 거리에서 실험을 수행하였다. Dynamic test에서 Rover의 경우 DJI Phantom 3 Pro 상부에 Patch 안테나를 장착하고 Labsat3 WideBand 장치를 연결하여 RF 신호를 저장하였다. 비행 궤적은 Fig. 16 하단의 헬기 착륙 표식에 맞추어 이동하였다. 총 10분동안의 비행 데이터를 활용하였으며, 초반 3분은 지상에 정지되어 있다가, 7분 동안 저속으로 비행하였다. 각 꼭지점마다 1분간 Hovering 하였다가 다음 지점으로 약 30초 동안 이동하면서 사각형 궤적으로 비행을 수행하였다. 성능 비교에 사용할 기준 위치는 RF 신호를 통해 획득한 RINEX를 이

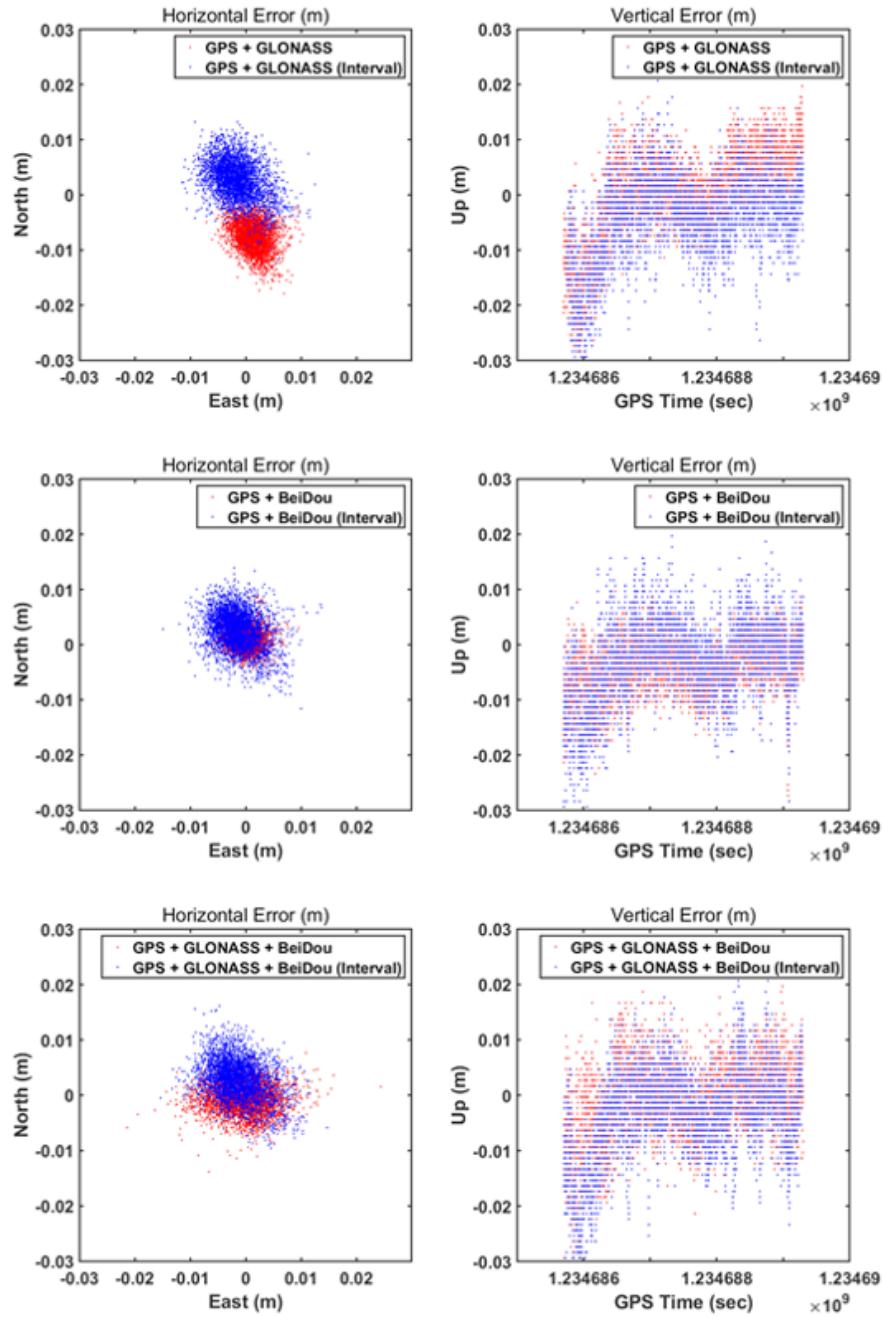


Fig. 15. Pool DOP condition test.

Table 7. Pool DOP condition test result.

		Current broadcast method		Intermittent broadcast (0.2 Hz)	
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
GPS+GLONASS (Poor DOP)	RMS error (cm)	1.03	1.06	0.80	1.36
	Mean error (cm)	0.98	0.30	0.66	-0.61
	Max error (cm)	3.71	5.17	5.82	6.33
GPS+BeiDou (Poor DOP)	RMS error (cm)	0.29	0.64	0.55	0.79
	Mean error (cm)	0.26	-0.41	0.49	-0.31
	Max error (cm)	1.00	3.83	1.54	3.33
GPS+GLONASS +BeiDou (Poor DOP)	RMS error (cm)	0.48	0.69	0.59	0.93
	Mean error (cm)	0.42	0.07	0.53	-0.40
	Max error (cm)	2.45	4.43	1.81	3.93

용하여 Trimble Business Center 후처리 측량 소프트웨어를 이용하여 궤적을 얻은 뒤 기준으로 사용하였다. 간헐적으로 전송되는 MSM Correction Message는 GPS와 GLONASS의 조합으로 구성하였다.

본 연구에서 고려한 바와 같이 5초 간격으로 간헐적으로 전송되는 MSM 보정정보를 사용하는 경우, 사용자는 최소 1초에서 최대 4초 늦은 시간의 보정정보를 적용한다. Fig. 17은 본 실험에서 시간 지연이 없는 경우와 5초 간격으로 보정정보를 전송한 경우에 고정해 전환에 걸리는 시간에 대한 그래프이다. 일반적인 RTK의 경우 고정해 전환 시 86초의 시간이 소요된 반면, 5초 간격으로 보정정보를 전송한 경우 102초가 소요되어 약 15초 이상의 추가적인 시간이 소요되는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 16. Dynamic test constructions.

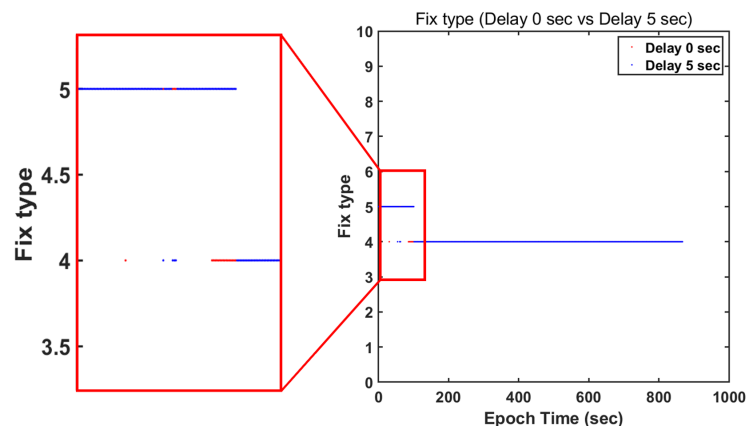


Fig. 17. Time history of dynamic test fix type.

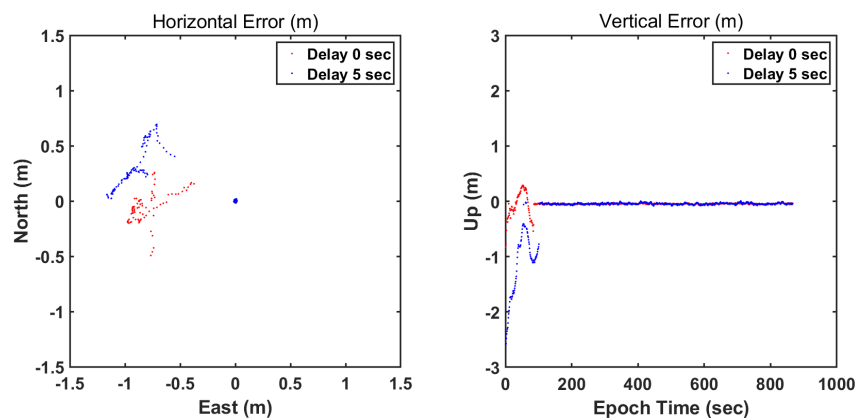


Fig. 18. Dynamic test position error.

또한 Fig. 18에서 확인할 수 있는 것처럼 보정정보 지연이 없는 유동해의 경우 수평방향으로 0.83 m, 수직방향으로 0.27 m의 오차가 발생하였으나, 5초의 보정정보 전송 지연이 있는 경우에는 수평방향으로 0.99 m, 수직방향으로 1.3 m의 오차가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 즉, 정적사용자와 달리 동적사용자에게 간헐적으로 전송되는 MSM 보정정보는 RTK 고정해의 미지정수 결정속도와 미지정수 미결정시 고정해 정확도에 영향을 끼칠 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 고정해의 경우 Fig. 19와 Table 8에서 확인할 수 있는 것처럼 고정해의 경우 기존 RTK와 5초 간격으로 보정정보를 전송한 RTK 성능 간 차이는 RMS 2 mm 정도로 매우 작음을 확인하였고 이는 정적 측위 사례와 같은 결과이다. 따라서 Fixed mode가 적용된 이후에는 동적 사용자의 경우에도 5초 이하의 간헐적 보정정보 전송이 측위 성능에 끼치는 영향은 매우 적다는 것을 확인할 수 있었다.

4. CONCLUSIONS

본 연구에서는 제한된 대역폭을 효과적으로 활용할 수 있는 방법으로 MSM Correction을 각 위성군 별로 주기적으로 제공할 수 있는 MSM Correction Message Scheduling 방안을 고려하였

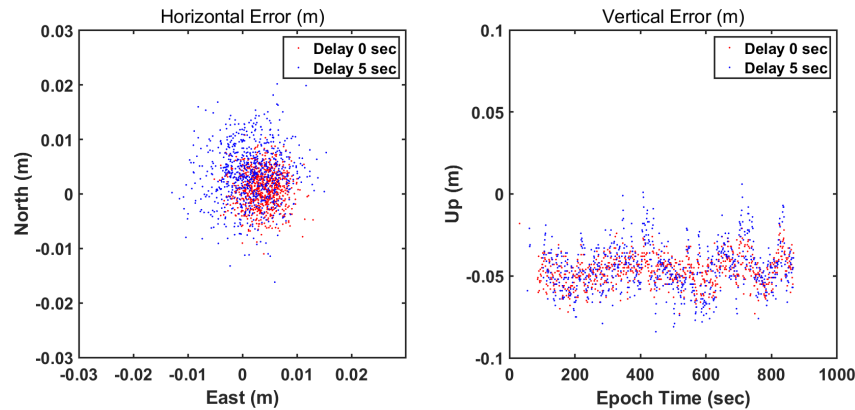


Fig. 19. Dynamic test position error in fixed solution.

Table 8. Dynamic test position error in fixed solution result.

GPS+GLONASS	Delay 0 sec		Delay 5 sec	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
RMS error (cm)	0.58	4.73	0.79	4.71
Mean error (cm)	0.52	-4.65	0.70	-4.48
Max error (cm)	1.38	7.30	2.39	8.40

다. 이를 통해 기존의 방법 대비 데이터양을 1/5 수준으로 크게 감소시켜 2400 bps의 대역폭으로도 다중 위성군 RTK 구현을 가능하게 하였다.

간헐적 보정정보 전송으로 인한 성능 저하 여부를 확인하기 위하여 개활지 환경과 위성 배치가 양호하지 않은 지역에서 기존 방법과 간헐적 보정정보 전송 시 RTK 측위 결과를 비교하였고, 두 방식간 RMS 차이가 3 mm 이하이므로 고정해 성능에 끼치는 영향이 미미함을 확인할 수 있었다. 그러나 측위에 사용되는 Multi constellation의 수가 적고 수직 방향의 위성 배치가 양호하지 않을 경우에는 간헐적 보정정보 전송으로 인해 고정해 산출에 영향을 끼칠 수 있음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 동적 환경에서 MSM 보정정보를 간헐적으로 전송하게 될 경우 RTK 고정해의 미지정수 결정속도와 미지정수 미결정시 유동해의 성능에 영향을 끼칠 수 있는 것을 확인하였다. 그러나 일단 미지정수가 결정되어 Fixed mode가 적용된 이후엔 동적 사용자의 경우에도 5초 이하의 보정정보 시간 지연이 측위 성능에 끼치는 영향이 매우 적음을 확인하였다. 하지만 본 연구에서 동적상황에서는 Open sky에서 저속으로 비행한 경우에 대한 실험 결과만 확인하였다는 한계점이 존재한다. 차후 연구에서는 더 다양한 케이스에 대한 실험을 통해 예외적인 상황을 고려하여 보완할 필요가 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea, under the Information Technology Research Center (ITRC) support program (IITP-2020-2018-0-01423) supervised by the Institute for Information

& communications Technology Promotion (IITP). This research was also supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), Unmanned Vehicle Advanced Research Center (UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea (No. 2020M3C1C1A01086407)

AUTHOR CONTRIBUTIONS

All the authors have contributed to the presented work. The first author, H.Y. suggested and embodied the methodology. C.L. developed the software. B.P. suggested the original concept of the system and supervised its development and the direction of the research.

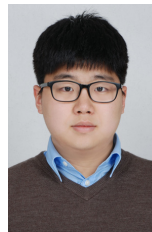
CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Cho, S. L., Han, Y. H., Choi, H. H., Heo, M. B., Park, C. S., et al. 2011, Improving the Performance of CDGPS using the Shaping Filter on Multipath, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, 60, 2318-2325. <https://doi.org/10.5370/KIEE.2011.60.12.2318>
- Kihara, M. 1994, Study of a GPS satellite selection policy to improve positioning accuracy, Proceedings of 1994 IEEE Position, Location and Navigation Symposium-PLANS'94. IEEE, 11-15 April 1994, Las Vegas, NV, USA. <https://doi.org/10.1109/PLANS.1994.303323>
- Lim, C. S. & Park, B. W. 2017, Comparative Analysis of

- Performance for DGPS and SBAS in Korea Region, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 21, 279-286. <http://doi.org/10.12673/jant.2017.21.3.279>
- Lim, C. S., Park, B. W., & Heo, M. B. 2018, Correlation between the Position Accuracy of the Network RTK Rover and Quality Indicator of Various Performance Analysis Method, *Journal of advanced navigation technology*, 22, 375-383. <http://dx.doi.org/10.12673/jant.2018.22.5.375>
- Lim, C. S., Yoon, H. J., Cho, A., Yoo, C. S., & Park, B. W. 2019, Dynamic Performance Evaluation of Various GNSS Receivers and Positioning Modes with Only One Flight Test, *Electronics*, 8, 1518. <https://doi.org/10.3390/electronics8121518>
- Odijk, D. & Teunissen, P. J. G. 2008, ADOP in closed form for a hierarchy of multi-frequency single-baseline GNSS models, *Journal of Geodesy*, 82, Article number: 473. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0197-2>
- Park, B. W., Kim, J. H., Kee, C. D., Cleveland, A., Parsons, M., et al. 2006, RRC unnecessary for DGPS messages, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 42, 1149-1160. <https://doi.org/10.1109/TAES.2006.248220>
- RTCM 2013, RTCM standard 10493.2 Differential GNSS Services – Version 3, pp.26-31
- Seok, H. J. & Park, B. W. 2016, Annual Prediction of Multi-GNSS Navigation Performance in Urban Canyon, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Catography*, 34, 71-78. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2016.34.1.71>
- Seok, H. J., Yoon, D. H., Lim, C. S., & Park, B. W. 2017, Suggestion on the SBAS Augmentation Message Providing System for the Low-cost GPS Receiver of Drone Operation, *Journal of Advanced Navigation Technology*, 21, 272-278. <http://doi.org/10.12673/jant.2017.21.3.272>
- Seok, H. J., Yoon, D. H., Lim, C. S., Park, B. W., Seo, S. W., et al. 2015, Study on GNSS constellation combination to improve the current and future multi-GNSS navigation performance, *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, 4, 43-55. <http://doi.org/10.11003/JPNT.2015.4.2.043>
- Son, P.-W., Rhee, J. H., Hwang, J., & Seo, J. 2019, Universal kriging for Loran ASF map generation, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, 55, 1828-1842. <https://doi.org/10.1109/TAES.2018.2876587>
- Subirana, J. S., Zornoza, J. M. J., & Hernandez-Pajares, M. 2013, *GNSS Data Processing, Volume 1: Fundamentals and Algorithms* (ESA Communications: Noordwijk)
- Wang, H., Zhan, X., & Zhang, Y. 2008, Geometric dilution of precision for GPS single-point positioning based on four satellites, *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 19, 1058-1063. [https://doi.org/10.1016/S1004-4132\(08\)60197-8](https://doi.org/10.1016/S1004-4132(08)60197-8)
- Yoon, H. J., Park, B. W., Lim, C. S., Shin, D. H., et al. 2018, System Development to Provide a Same GNSS Environment to the Various Receivers in order to Compare their Performance
- Yoon, M. & Lee, J. 2014, Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances in the Korean Region on 10 November 2004: Potential Impact on GPS-Based Navigation Systems, *Space Weather*, 12, 173-186. <https://doi.org/10.1002/2013SW001002>



Hyo-Jung YOON is a M.D. student of Navigation system lab in Department of Aerospace Engineering at Sejong University. He received B.S. degree in aerospace engineering from the same university. His research interests include GNSS, RTK, Time Latency Correction.



Cheol-Soon Lim is a Ph.D. student in School of Aerospace Engineering at Sejong University, South Korea. He received the B.S. degree from Sejong University in 2015. His research interests include GNSS, Multi-Constellation SBAS, RTK.



Byungwoon Park is an assistant professor of School of Aerospace in Sejong University. He worked as a senior researcher at Spatial Information Research Institute in Korea Cadastral Survey Corp. He received the B.S., M.S., and Ph. D degree from Seoul National University. His research interests include WAD correction generation algorithms, geodesy and RTK/Network RTK related algorithm.