

Performance Test of Broadcast-RTK System in Korea Region Using Commercial High-Precision GNSS Receiver for Autonomous Vehicle

Sang-Hoon Ahn, Young-Jin Song, Jong-Hoon Won[†]

Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

ABSTRACT

Autonomous vehicles require precise knowledge of their position, velocity and orientation in all weather and traffic conditions in any time. And, these information is effectively used for path planning, perception, and control that are key factors for safety of vehicle driving. For this purpose, a high precision GNSS technology is widely adopted in autonomous vehicles as a core localization and navigation method. However, due to the lack of infrastructure as well as cost issue regarding GNSS correction data communication, only a few high precision GNSS technology will be available for future commercial autonomous vehicles. Recently, a high precision GNSS sensor that is based on a Broadcast-RTK system to dramatically reduce network maintenance cost by utilizing the existing broadcasting network is released. In this paper, we present the performance test result of the broadcast-RTK-based commercial high precision GNSS receiver to test the feasibility of the system for autonomous driving in Korea. Massive measurement campaigns covering of Korea region were performed, and the obtained measurements were analyzed in terms of ambiguity fixing rate, integer ambiguity loss recovery, time to retry ambiguity fixing, average correction information update rate as well as accuracy in comparison to other high precision systems.

Keywords: commercial RTK, Network-RTK, PPP-RTK

1. INTRODUCTION

위성항법시스템 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 은 전지구상에 걸쳐 균일한 Position, Navigation, and Time (PNT) 정보를 제공하기에 다양한 측지/측량 응용 분야에 적용되고 있고 (Grejner-Brzezinska & Toth 2013, Kealy et al. 2015), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Autonomous Vehicle (AV), Autonomous Robotics (AR) 등 이동체 분야에 탑재되는 Navigation System (NS)의 실시간 이동 측위 기술로 위 기술을 활용하고 있다. 그러나 일반 사용자용 GNSS 서비스인 Standard Positioning Service (SPS)는 수 m의 정확도만 보장하기에 AV의 PNT 요구성능 (고속도로 0.5 m, 지방도로 0.3 m)을 충족하지 못하는 문제가 있다 (Hegarty & Chatre 2008, Reid et al. 2019).

Received Jul 05, 2022 Revised Sep 08, 2022 Accepted Oct 12, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: jh.won@inha.ac.kr

Tel: +82-32-860-7406

Sang-Hoon Ahn <https://orcid.org/0000-0002-9308-7349>

Young-Jin Song <https://orcid.org/0000-0002-0253-4802>

Jong-Hoon Won <https://orcid.org/0000-0001-5258-574X>

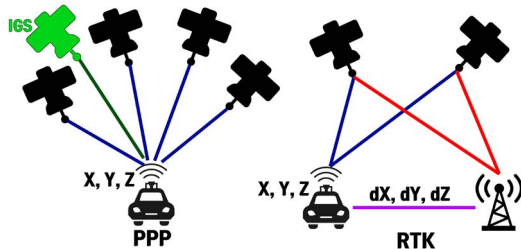
이를 극복하기 위해 Differential GNSS (DGNSS), Real Time Kinematics (RTK), Precise Point Positioning (PPP)와 같은 다양한 고정밀 위치정보 서비스가 접목되었으나, 각각 위치 정확도, 수렴 시간, 서비스 영역 측면에서 발생한 한계점으로 AV PNT 요구사항을 완전히 충족시키지 못하였다(Joubert et al. 2020, Neil et al. 2020). 이에 PNT 서비스 사업자들은 RTK, PPP의 한계점을 개량한 Network-RTK (N-RTK)와 PPP-RTK를 제안, AV에 개량한 서비스를 적용하려 하고 있다 (EGSA 2019, Nord et al. 2021).

개선된 Location Based Service (LBS)는 수렴 시간, 서비스 영역 등의 기존 문제점을 극복했으나 International GNSS service (IGS) 지원 위성, Continuously Operating Reference station (CORS), Radio Technical Commission for Maritime services (RTCM) 3.x 통신 프로토콜을 해석 가능한 고성능 GNSS 수신기, Network Transport of RTCM data over IP (NTRIP) 네트워크 통신망과 같은 다양한 인프라를 필요하기에 높은 시스템 운영비가 발생한다 (Kim & Bae 2013, 2015, Asari et al. 2017, Son et al. 2020, Lee & Park 2020, Lee & Oh 2020, Janos & Kuras 2021).

운영비 경감 방안을 찾던 민간 LBS 사업자 중 MBC는 방송망으로 보정정보를 전달해 네트워크 유지비를 저감하는 방식을 도입 (Namie et al. 2008), Digital Media Broadcasting (DMB) 망과

Table 1. RTK and PPP technologies (Geo++® SSR Brochure 2015).

	RTK	PPP
Approach	Observation state representation (OSR)	State space representation (SSR)
Accuracy	cm	< dm
Convergence time	< 5 s	~ 20 min
Service area	local	global
Required bandwidth	medium	low

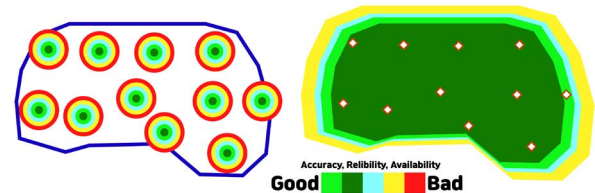
**Fig. 1.** PPP and RTK system diagrams.

전국에 분포한 방송 기지국을 CORS로 활용한 상용 Broadcast-RTK (B-RTK) 서비스를 제안했다 (Lee 2019). 이 상용 RTK 서비스는 MBC의 방송망 인프라, B-RTK 통신 서버, B-RTK 수신기를 같이 제공하는 Contents, Platform, Network, Device (CNPd) 형태의 End-to-End 토탈 서비스 플랫폼 형식으로 운영되며, 이를 통해 네트워크 운용비 및 GNSS 수신기 비용을 저감하였다.

본 연구에서는 상용 B-RTK 수신기가 국내에서 운용되는 자율차에 탑재되는 NS의 AV PNT의 성능 요구사항을 만족하는지 검증하고자 한다. 한국은 국토의 63%가 산림이고 인구의 94%가 도시에 거주해 도심 및 임야지역에서 빈번하게 위치정보 서비스의 성능저하 현상이 발생한다. 따라서 AV PNT 성능을 만족하기 어려워 Cooperative Intelligent Transport System (C-ITS) 인프라가 완비된 자율주행 시범운행지구에서만 제한적으로 실증이 이뤄지고 있다. 즉, 사방이 개방되어 위성-수신기간 Line-of-Sight (LOS)가 잘 유지되는 지역에서 고성능 측지·측량 실측을 수행하거나 일부 도심구간에서 제한된 범위의 측위 성능을 시험하는 실증 연구는 많이 보고된 바 있으나, 한반도 내륙지역 전체를 커버하는 광범위한 지역에서 고성능 AV PNT 성능 실측은 보고된 바 없다. 이를 고정밀 위치정보 서비스를 통해 서비스 영역 및 안정성을 개선한다면 전 국토에서 자율주행차량의 운용이 가능함을 예상할 수 있다. 이 논문은 총 5개의 챕터로 구성되었다. 2장에서는 국내에서 서비스 중인 기존 N-RTK 및 PPP-RTK 서비스 인프라 구성 및 현황을 상용 B-RTK 인프라와 비교하였다. 3장에는 각각의 서비스가 국내의 다양한 주행 환경에 강인하고 신뢰성 있는 성능을 발휘하는지에 대해 설명할 수 있는 평가지표를 선정하고 이를 기술하였다. 4장은 앞서 선정한 평가지표를 기반으로 국내 지역에서의 이동 및 정지 측위 시험을 수행한 결과를 분석하고, 5장에서 상용 B-RTK의 이점에 대해 고찰하였다.

2. RELATED WORK

현재 주로 사용되는 고정밀 위치정보 서비스는 RTK와 PPP가 있으며 각 서비스는 Fig. 1의 방식으로 운용된다. RTK는 CORS

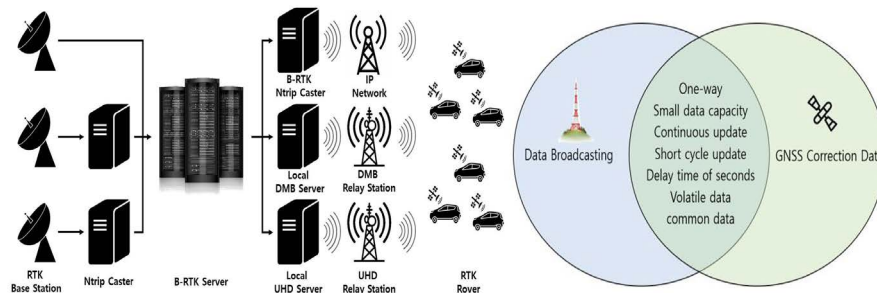
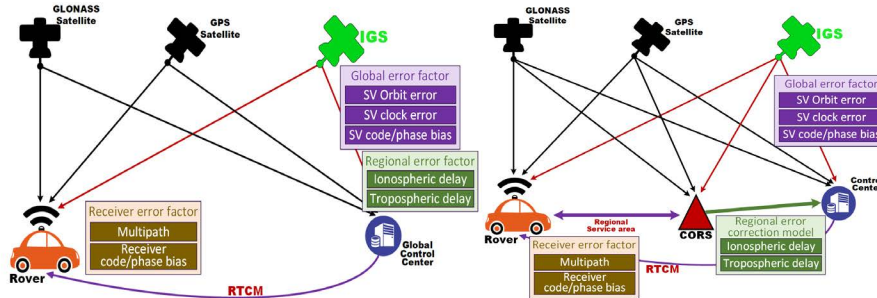
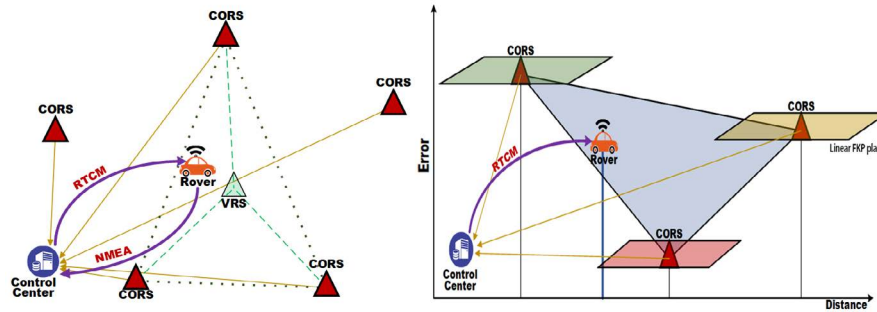
**Fig. 2.** RTK service area (left), Network RTK service area (right).

가 방송파 위성 보정치를 전송해 수신기의 관측치를 보정하는 방식이고, PPP는 관측치에 포함된 모든 오차요소를 IGS 지원 위성이 제공하는 정밀력으로 감소 또는 제거 후 모델링하여 관측정보를 보정하는 방식이다 (Teunissen & Montenbruck 2017). 각 서비스별 운용방식의 차이로 인해 서로 다른 장단점을 가지며, 이 중 PPP는 지역별로 설치해야 하는 CORS가 필요 없어 RTK 대비 넓은 지역에서 서비스가 가능하다 (Ceylan et al. 2006, Alkan et al. 2016). 그러나 PPP는 CORS가 수행하는 바이어스 추정에 관한 지원을 받지 않아 RTK 대비 서비스 구동에 더 많은 초기화 시간이 필요하다 (Wabben et al. 2005). 하여 각 서비스의 장단점은 Table 1과 같이 정리할 수 있고, 서비스 사용자들은 처한 상황에 맞게 각 기술을 활용한다.

하지만 각 기술의 한계점 (좁은 서비스반경, 오랜 수렴시간)으로 인해 AV PNT 요구사항을 완전히 충족하기 어려워, 이를 개선한 N-RTK와 PPP-RTK가 제안되었다. 첫번째로 RTK를 개선한 N-RTK는 Fig. 2와 같이 local 지역에 분포한 다수의 CORS를 네트워크로 연결해 CORS별 수집된 GNSS 방송파 측정치를 활용, 보정정보를 새로 모델링하여 서비스 반경을 확장하는 방식이다 (Stephenson et al. 2012, Song et al. 2013). N-RTK는 보정정보의 모델링 방식에 따라 Virtual Reference Station (VRS), Flächen Korrektur Parameter (FKP), Master Auxiliary Concept (MAC)로 나뉘며, MAC 방식은 보정신호 데이터량이 많고 높은 대역폭을 요구하는 단점이 있어 (Wuebbena et al. 2005, Lee 2014) 이 논문에서는 VRS와 FKP에 대하여 주로 서술하고자 한다.

VRS 방식은 Fig. 3(left)처럼 rover와 서버가 양방향 통신을 진행하여 위치보정을 수행한다. 위치 보정은 rover가 서버에 접속해 GNSS 관측 정보를 전송하면 서버는 rover 인접 CORS를 3개 이상 선정하여 rover 인근 지점에 가상 기준점을 만들고 가상 기준점 기반의 보정정보를 전송한다 (Hu et al. 2003).

반면, FKP 방식은 Fig. 3(right)과 같이 서버가 단방향으로 보정정보를 전송한다. 서버는 CORS에서 FKP 보정정보 평면이라 불리는 선형 보정면 계수를 데이터베이스화 하고 보정면 정보를 방송한다. rover는 데이터베이스에 접속해 인접한 CORS의 FKP 보정계수를 다운받아 위치 보정작업을 수행한다 (Gökdağ &



Özlüdemir 2020).

따라서 보정신호 연산은 VRS는 N-RTK 서버, FKP는 rover 수신기에서 수행된다. 이 차이로 인해 VRS는 종종 서버 용량에 따른 사용자 제한 및 통신 장애 현상이 발생한다. 반면, FKP는 서버 부하는 적으나, 위치 보정 정확도가 VRS 대비 낮고 수신기가 보정정보 연산이 가능할 정도로 충분히 고성능이어야 한다 (Jin et al, 2015).

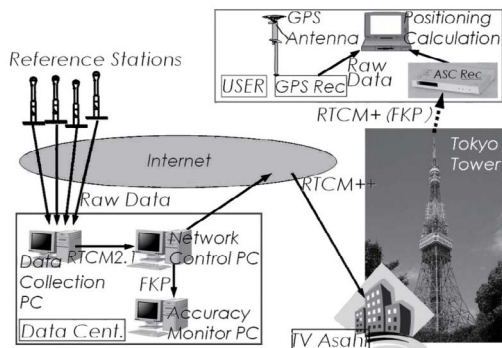
두번째로 PPP-RTK는 Fig. 4와 같이 RTK에 사용되는 CORS 망을 활용해 PPP의 긴 수렴시간을 개선한 서비스이다. PPP-RTK는 지역 CORS 망이 수집하는 전리층, 대류권 지연 보정정보를 조합해 오차 보정에 사용한다. 이를 통해 관측치의 모든 오차정보를 모델링하는 PPP 대비 PPP-RTK는 빠른 수렴시간 성능을 낼 수 있다. PPP-RTK는 통상 1분 이내의 수렴시간과 CORS 기준 200 km 정도의 서비스 권역을 갖는다 (Teunissen et al. 2010).

N-RTK, PPP-RTK 서비스는 국내에서는 국토지리정보원이 통합 운용하기에 일반 사용자의 경우 네트워크 사용료가 발생

하지 않는다. 하지만, 동시접속자 제한 및 빈번한 접속장애, 서비스 이용 절차의 복잡함으로 AV에 적용하는데 어려움이 있다. 하여 민간 서비스 사업자인 MBC는 방송망을 활용한 상용 고정밀 위치정보 서비스인 B-RTK 서비스를 제안한다 (Lee 2019). B-RTK는 Single-based RTK (S-RTK) 서비스의 일종으로 (Lee 2014), Fig. 5(left)와 같이 방송망을 포함한 3가지 전송망 (NTRIP, DMB, Advanced Television Systems Committee, ATSC 3.0)을 전용 B-RTK 서버를 통해 통신 대역폭을 확장하여 통신 부하를 경감시킨 서비스이다. 이는 Fig. 5(right)와 같이 CORS가 제공하는 GNSS 보정정보가 방송망을 통해 전송되는 데이터의 특성과 유사하기 때문이다. 위와 유사한 서비스를 Namie et al. (2008)이 Fig. 6과 같이 동경 지역에서 시범적으로 시도하였고, MBC는 동경지역의 운용 실적을 기반으로 국내에 서비스를 적용했다 (Park et al. 2019). B-RTK를 포함한 고정밀 위치정보 서비스는 Table 2와 같이 정리할 수 있고, B-RTK는 타 위치정보 서비스 대비 더 다양한 data 전송망을 활용하기에 더 다양한 주환경에서 안정

Table 2. Comparison of common representation techniques.

	RTK	PPP	N-RTK		PPP-RTK	B-RTK
			VRS	FKP		
Broadcast possible	O	O	X	O	O	O
Accuracy	~ cm	< dm	~ cm	~ cm	< cm	~ cm
Time required	< 5 s	~ 20 min	< 5 s	< 5 s	< 5 s ~ 1 min	< 5 s
Service area	Local	Global	Regional	Regional	Global	Regional
Required bandwidth	medium	low	medium	medium	Low- medium	medium
Data transmission method	NTRIP, Radio	NTRIP	NTRIP, Telephone	NTRIP, Telephone	NTRIP	NTRIP, DMB, ATSC 3.0

**Fig. 6.** Experimental diagram of the network-based RTK-GPS positioning system using area correction parameter (FKP) via the TV-ASC (Namie et al. 2008).

적으로 서비스 운용이 가능하다.

3. COMMERCIAL RTK-GPS EXPERIMENTAL SETUP

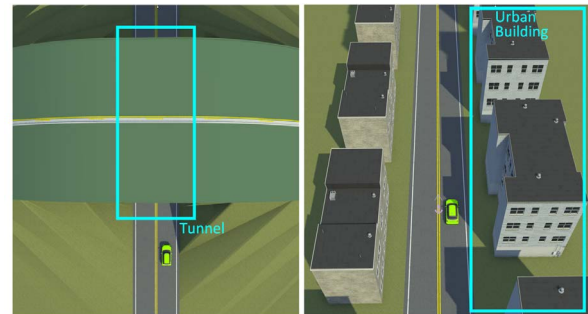
이번장에서는 B-RTK 서비스 플랫폼이 AV PNT 성능 요구사항을 충족하는지 검증하기 위한 평가지표를 선정한다. 실측 시험의 평가 지표는 Lee (2020)가 정의한 무인 이동체 분야 정밀 측위 성능 요구사항의 성능지표 항목을 기반으로 4가지 평가지표를 선정하였다.

3.1 Ambiguity Fixing Rate

고정밀 위치정보 서비스를 원활하게 이용하기 위하여 CORS와 rover 수신기 간의 통신 프로세스가 원활하게 수행되어야 한다. 이러한 통신 프로세스를 통하여 미지정수 (integer ambiguity)의 수렴이 이루어지고, 수렴이 완료된 시점이 곧 고정밀 위치정보 서비스 활성화 시점이다. Ambiguity Fixing Rate (AFR)은 주행시험 구간 중 RTK-GPS 서비스가 활성화된 비율에 해당한다. 그러므로 이는 서비스의 안정도를 평가하는데 사용될 수 있으며, 식 (1)과 같다.

$$AFR = \frac{N_{fix}}{N_{total}} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 N_{total} 은 주행시험 구간에 대한 전체 epoch의 수이며, N_{fix} 은 이 중 미지정수의 결정이 이루어진 epoch의 수이다.

**Fig. 7.** Various driving environments that affect RTK service stability - GNSS signal blocking area (left), GNSS and RTK weak signal reception area (right).

3.2 Integer Ambiguity Loss Recovery

고정밀 GNSS 위치 보정 서비스는 GNSS 음영이나 GNSS 보정정보 수신 장애로 인하여 서비스 안정성 및 가용성이 훼손된다. Integer Ambiguity Loss Recovery (IALR)은 RTK 수신기가 미지정수를 유실한 횟수에 해당한다. 주행시험 과정에서 GNSS 음영에 의하여 발생한 미지정수 유실은 각 RTK-GPS 서비스와 무관하게 환경적 요인에 의하여 공통으로 발생하지만, GNSS 보정정보 수신 장애에 의한 미지정수 유실은 RTK CORS 통신망의 성능에 따라 상이하게 발생한다. 따라서 IALR은 각 RTK-GPS 서비스의 접속 안정성 평가지표로 활용된다.

3.3 Time to Retry Ambiguity Fixing

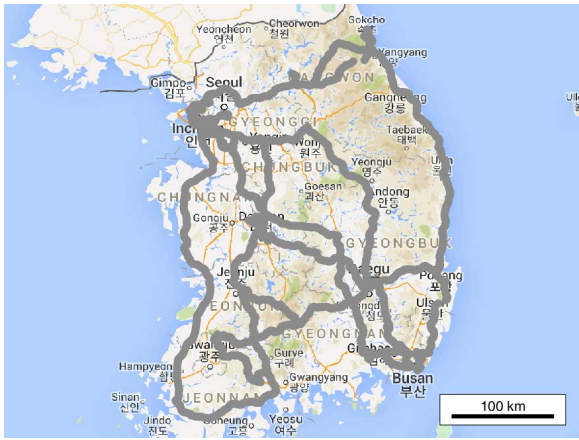
AV는 Fig. 7(left)의 tunnel 및 underground road와 같은 GNSS 신호차단 지역, Fig. 7(right) urban building으로 인한 GNSS 및 RTK 보정정보 난 수신 지역과 같은 다양한 주행환경에 의해 RTK-GPS 서비스의 접속 안정성이 훼손되며 접속 안정성의 훼손 정도는 Fig. 7(left)의 경우 GPS Quality Indicator이 fix not available로 측정되고, Fig. 7(right)의 경우 Differential GPS fix 혹은 RTK floating ambiguity solution로 측정된다. 이후 GNSS 수신기는 훼손된 접속 안정성의 복원 및 미지정수의 재결정을 위한 프로세스를 진행한다. 측위 분야에서는 위 과정에 대한 평가지표로 Time-To-First-Fix (TTFF)가 있으며, 해당 지표의 세부 지표로 수신기의 현재 위성 궤도 및 시각 정보량에 따라 Cold, Warm, Hot Start의 3가지 모드로 분류된다. 주행중인 AV의 GNSS 수신기는 주행환경에 따라 접속 안정성이 훼손되는 정도가 다르며, 훼손 정도에 따른 Warm Start 또는 Hot Start 프로세스가 진행

Table 3. NGII N-RTK Service information.

	VRS	FKP	PPP-RTK
Access point	Vrs.ngii.go.kr:2101	Fkp.ngii.go.kr:2201	---:2101
Mount point	VRS-RTCM31	FKP_V31	SSRVRS_V32
Service satellites	GPS/GLONASS	GPS/GLONASS	GPS/GLONASS/Galileo
Concurrent connected user (CCU)	1225	Unlimited	-

Table 4. GNSS receiver and calibration information receiver specifications.

	MBC MBD-1000T	MBC MRP-2000	Trimble BD982	Ublox ZED-F9P
Receiver type	-	GPS/GLONASS/ Galileo/BeiDou	GPS/GLONASS/Galileo/ BeiDou/SBAS/QZSS	GPS/GLONASS/Galileo/ BeiDou/QZSS
Update rate	-	up to 20 Hz	up to 50 Hz	up to 20 Hz
RTK fix time	-	10~60 sec	< 1 min	< 10 sec
RTK protocol	RTCM 3.2	RTCM 3.x	RTCM 3.1	RTCM 3.3
Output protocol	RTCM 3.2	NMEA	NMEA, GSO	NMEA, UBX
Power	5 V / 1 A 12 V / 0.5 A	5 V / 2 A	3.3V (+5% ~ -3%) / 2.1~2.3 W	2.7 ~ 3.6 V / 68 mA @ 3 V

**Fig. 8.** Area for performing stationary and moving positioning.**Table 5.** GNSS antenna specifications.

	Novatel GNSS-502
Signal received	GPS L1/L2
Frequency band	1588.0 ± 23.0 MHz 1220.0 ± 31.0 MHz
LNA gain (dB)	29
Noise figure (dB)	2.5
Power (V/mA)	3.3 ~ 18 / 20
Weight (kg)	0.45
Connector	TNC

되는데 이를 항목별로 분류하기 어려워 주행시험 과정에서 발생한 TTFF 기록을 수집한 뒤 평균을 산출, 이를 Time to Retry Ambiguity Fixing (TTRAF)로 정의하였다.

3.4 Average Correction Information Update Rate

고정밀 위치정보 서비스의 구성요소인 CORS 통신 서버는 RTK 수신기로 GNSS 보정정보를 주기적으로 전송하며, 이러한 전송 주기가 짧을수록 안정된 서비스가 가능하다. Average Correction Information Update Rate (ACIU)는 주행시험 과정동안 RTK 수신기가 수신한 보정정보 수신 주기와 correction age 값을 합산한 평균값이다.

3.5 Evaluation System Configuration

RTK-GPS 서비스별 성능 평가를 위하여 Fig. 8과 같이 전국 고속도로 및 산간도로를 대상지역으로 선정하고, 총 4733 km에 걸쳐 주행시험을 실시했으며, 이를 회색 선으로 표기했다. 비교 분석에 사용되는 상용 및 공공 RTK-GPS 서비스는 민간사업자 MBC의 B-RTK와 Table 3에서 표기한 국토지리정보원에서 제공하는 서비스인 VRS, FKP, PPP-RTK이며, 이 중 PPP-RTK의 mount point는 SSR2VRS_V32이나 「SSR 서비스 최적화 연구」를 통해 해당 Mount Point로 PPP-RTK를 서비스하기에 서비스명을 PPP-RTK로 표기하였다 (Park et al. 2020).

각 서비스의 주행시험에 사용된 RTK-GPS 수신기는 총 4종으로 MBC B-RTK 전용 수신기 2종과 초저가 GNSS 수신기 (Ublox ZED-F9P)와 저가 GNSS 수신기 (Trimble BD982)이며, 각 수신기의 정보는 Table 4에 정리하였다. Ublox ZED-F9P와 Trimble BD982는 별도의 LTE 라우터를 연결하여 NTRIP 서버에 접속함으로써 B-RTK를 제외한 VRS, FKP, PPP-RTK 서비스를 이용한다. 이들은 단독으로는 B-RTK를 이용할 수 없으므로 MBC B-RTK 전용 수신기와의 결합 혹은 대체를 통하여 B-RTK 서비스를 이용한다. MBD-1000T는 RTK 보정정보만을 수신하기 위한 수신기로, Trimble BD982와 결합하여 B-RTK 보정정보를 수신하고 Trimble BD982의 B-RTK 이용을 가능케 한다. 반면, MRP-2000은 Ublox ZED-F9P를 기반으로 B-RTK 서버 접속 기능이 추가된 GNSS 수신기이므로 MRP-2000의 시험 결과는 Ublox ZED-F9P의 B-RTK 이용 결과로 사용된다. 주행시험에 사용한 GNSS 안테나는 Novatel GNSS-502로 해당 안테나 정보는 Table 5에 정리하였다.

Figs. 9와 10은 각각 이동측위 시험 구성 사진과 시스템 구성도이다. 1기의 Novatel GNSS-502가 4 Port Splitter를 통하여 각각의 Ublox 수신기와 연결된다. 반면, Trimble BD982 수신기는 듀얼 안테나 모드를 지원하므로 2기의 Novatel GNSS-502가 각각 4 Port Splitter를 통하여 연결된다. 따라서 모든 LTE 네트워크망의 경우에 대하여 GNSS 신호에 동일하게 6 dB 손실이 발생한다. 또한, 각각의 Ublox 및 Trimble 수신기는 특정 RTK 서비스를 고정적으로 사용하도록 설정되었다.



Fig. 9. Test road – mobile positioning system antenna setup.

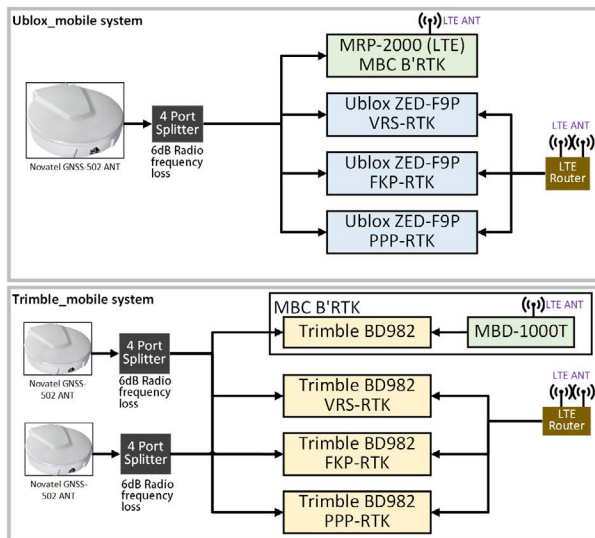


Fig. 10. Test road – mobile system.

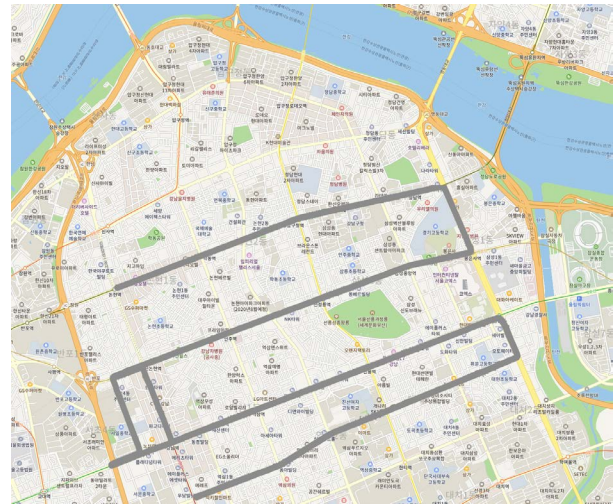


Fig. 11. Seoul Teheran road driving test driving trajectory.

Table 6. Mobile positioning test results in Teheran-ro, Seoul.

	MBC B'RTK	VRS	FKP	PPP-RTK
AFR (%)	94.38	84.58	46.45	19.35
IALR (count)	28	71	74	27
TTRAF (sec)	27.00	30.90	122.43	235.83
ACIU (sec)	1.003	1.016	1.007	1.002

Table 7. Mobile positioning test results in Teheran-ro, Seoul – MD.

		MBC B'RTK	FKP	PPP-RTK
Trimble BD982	ΔN (m)	0.0015	0.0201	-0.1427
	ΔE (m)	-0.0323	-0.0099	-0.0172
	$\Delta Ell.h$ (m)	0.0867	-0.0012	0.4431
Ublox ZED-F9p	ΔN (m)	-0.0002	0.0798	0.3248
	ΔE (m)	-0.0196	-0.0691	0.4528
	$\Delta Ell.h$ (m)	0.0172	-0.3611	-0.4595

Table 8. Mobile positioning test results in Teheran-ro, Seoul – SD.

		MBC B'RTK	FKP	PPP-RTK
Trimble BD982	ΔN (m)	0.1660	0.2020	0.2829
	ΔE (m)	0.1954	0.1821	0.3530
	$\Delta Ell.h$ (m)	0.2550	0.3465	0.6386
Ublox ZED-F9p	ΔN (m)	0.0912	0.2198	0.4457
	ΔE (m)	0.1242	0.2295	0.3820
	$\Delta Ell.h$ (m)	0.1561	0.5829	0.7105

4. COMMERCIAL RTK–GPS SERVICE TEST RESULTS

4.1 Urban Driving Test Result

이동측위 성능평가 지역은 첫번째로 Fig. 11과 같이 서울의 테헤란로를 선정하였다. 이 지역은 5개 지하철 노선이 교차하고 코엑스, 아셈타워 등이 위치한 대표적인 고층빌딩 밀집지역 및 도심 혼잡지역으로, 도심지 내 AV PNT 성능을 비교분석하기 용이한 지역이다. 주행시험은 해당 구간을 2회 반복하여 주행했으며, 시험 결과는 Table 6과 같다. 시험지역의 RTK-GPS 활성화 정도를 나타낸 지표인 AFR은 MBC B'RTK, VRS, FKP, PPP-RTK 순으로 좋은 성능을 보였으며, 이는 Fig. 12에서 AFR 지표를 근거로 service stability를 시각적으로 표기하였다. 이때, service stability의 bad에서 good까지의 분류는 AFR 지표의 계산에 활용한 GPS quality indicator 정보를 기반으로 한다. IALR과 TTRAF 측면에서도 MBC B'RTK가 VRS 대비하여 성능이 더 좋다.

주행시험에서 RTK-GPS 서비스 별 측위 정확도 평가는 VRS 서비스 결과를 기준 값으로 설정하여 타 RTK-GPS 서비스 대비 상대적인 정확도 및 안정성 평가를 위해 Mean deviation (MD)

와 Standard deviation (SD)를 분석했으며, 그 결과는 Tables 7, 8과 같다. VRS 서비스의 경우 정지측위 시험에서 가장 좋은 측위 정확도 성능을 냈기에 VRS 서비스 결과와 가장 유사한 결과치를 내는 RTK-GPS 서비스는 충분히 AV PNT 성능을 충족할 것으로 판단된다. 표에서 확인할 수 있듯이 MBC B'RTK, FKP, PPP-RTK 순으로 VRS와의 상대오차가 작았다.

4.2 National Driving Test Result

국내 지역에 대한 이동측위 성능 평가는 Fig. 8에 표기한 전국 고속도로 및 산간도로 지역을 대상으로 주행시험을 진행했으며, 시험과정은 도심지 주행시험과 동일하다. 시험 결과는 Table 9

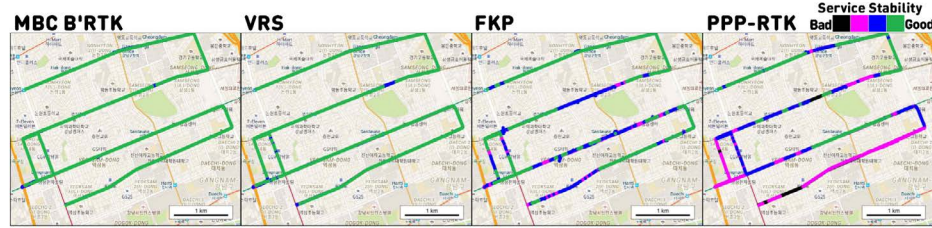


Fig. 12. Mobile positioning test results in Teheran-ro, Seoul – AFR.

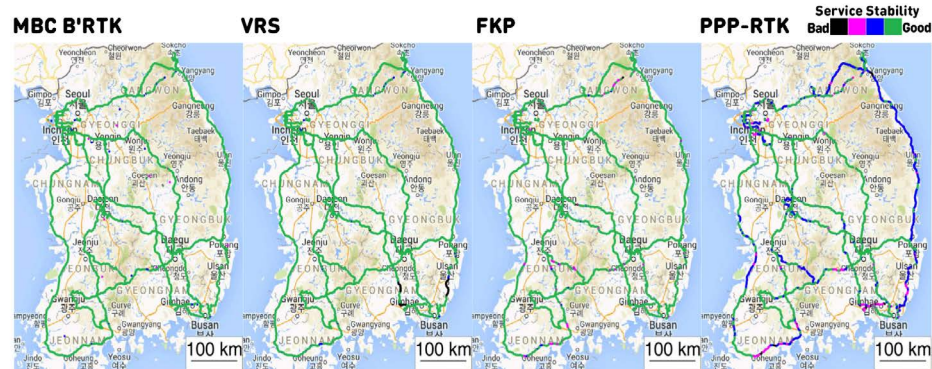


Fig. 13. Mobile positioning test results in Korea – AFR.

Table 9. Mobile positioning test results in Korea.

	MBC B'RTK	VRS	FKP	PPP-RTK
AFR (%)	84.43	81.00	77.51	38.76
IALR (count)	1246	2248	1584	1290
TTRAF (sec)	38.87	45.50	74.79	122.45
ACIU (sec)	1.076	1.108	1.110	1.151

Table 10. Mobile positioning test results in Korea – MD.

		MBC B'RTK	FKP	PPP-RTK
Trimble BD982	ΔN (m)	-0.0102	-0.0027	-0.0489
	ΔE (m)	-0.0145	-0.0015	-0.0115
	ΔELL.h (m)	0.0056	-0.0047	0.0242
Ublox ZED-F9p	ΔN (m)	-0.0022	0.0275	-0.0261
	ΔE (m)	-0.0257	-0.0161	-0.0421
	ΔELL.h (m)	0.0520	0.0453	0.0365

Table 11. Mobile positioning test results in Korea – SD.

		MBC B'RTK	FKP	PPP-RTK
Trimble BD982	ΔN (m)	0.1026	0.0445	0.2489
	ΔE (m)	0.1660	0.0532	0.2392
	ΔEll.h (m)	0.2036	0.0893	0.4521
Ublox ZED-F9p	ΔN (m)	0.1054	0.2024	0.3019
	ΔE (m)	0.1445	0.1983	0.3078
	ΔEll.h (m)	0.1720	0.3766	0.5640

와 같다. 전체구간의 AFR 성능은 MBC B'RTK, VRS, FKP, PPP-RTK 순으로 좋았으며, MBC B'RTK가 VRS보다 약 3% 정도 더 많은 지역에서 안정적인 RTK-GPS 성능을 보여주고 있다. 전국 구간에 대한 AFR 지표는 Fig. 13을 통하여 시각적으로 확인할 수 있다. 또한, IALR 수치로도 MBC B'RTK가 미지정수 유실 횟수가 가장 적어서 서비스 안정도 면에서도 우수한 모습을 보이고 있다. TTRAF와 ACIU 성능면에서 MBC B'RTK는 빠르게 유실된 미지

정수를 다시 고정하여 정상 RTK-GPS 서비스 상태로 진입하고 보정정보의 수신주기도 가장 빠르기에 B'RTK의 성능이 타 RTK-GPS 대비 양호한 서비스를 제공하고 있다고 판단된다.

RTK-GPS 서비스 별 측위 정확도 평가는 4.1절과 동일하게 VRS 측위 결과값을 기준 지표로 설정 후 시험을 진행했으며, 그 결과는 Tables 10과 11에 나열되어 있다. 결과적으로 4.1절과 마찬가지로 MD 및 SD 측면에서 MBC B'RTK, FKP, PPP-RTK 순으로 VRS와 상대오차가 작은 값을 가졌다. 따라서 MBC B'RTK가 다른 RTK 서비스보다 좋은 성능을 가진다고 판단된다.

5. CONCLUSIONS

본 논문에서는 상용 RTK-GPS 서비스인 MBC B-RTK와 국토지리정보원에서 서비스하는 공공 RTP-GPS인 VRS, FKP, PPP-RTK가 AV PNT 성능을 충족하는지를 평가하였다. 평가는 전국 권역 및 혼잡 도심지에 대한 이동 측위 시험으로, 4가지 평가지표를 선정하여 비교 분석했다. 평가 결과 도심지 및 이동 측위 주행시험에서 MBC B-RTK는 VRS 대비 3~6% 더 높은 Ambiguity fixing rate를 보여주었으며, 이는 MBC B-RTK 서비스 사업자가 방송망을 활용해 네트워크 Capacity를 확대한 전용 CORS 서버가 공공 CORS 서버 대비 더 양호한 서비스를 제공함을 나타낸다. 또한 MBC B-RTK의 DMB 방송망의 가시청권 영역은 전국 90% 이상이기 때문에 도서산간지역에서 타 RTK 서비스 대비 서비스 영역이 촘촘한 장점이 있다 (MBC 2019). TTRA 또한 VRS 대비 3~7초 더 빠르게 미지정수를 고정하여 HAV NS를 설계하는데 요구되는 Return time 성능도 더 뛰어난 복원력을 보여준다. 측위 정확도 성능은 VRS RTK를 Reference로 선정하여 타 RTK 서비

스를 평가했기에 VRS와의 정합성을 평가하는 의미가 있다. AV PNT가 요구하는 7가지 성능지표 중 평가하기 난해한 지표로는 사용 편의성 및 경제성이 있다. 위 두가지 지표는 정량적으로 분석하기 어렵고, 사용자의 주관이 개입되는 지표이다. 하여 본 논문의 결과물과 각각의 상용 RTK 제품군에 대한 판매전략을 고려하여 AV 설계자가 시스템에 적합한 제품군을 선택하는 것이 적절하다 생각한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Korea Institute of Police Technology (KIPoT) grant funded by the Korea government (KNPA) (No.092021D75000000).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ahn S. H. & Won, J. H. contributed to the design and implementation of the research, to the analysis of the results and to the writing of the manuscript. Conceptualization, Ahn S. H. and Won J. H.; methodology, Ahn S. H. and Won J. H.; software, Ahn S. H.; hardware, Ahn S. H.; validation, Song, Y.-J. and Won J. H.; formal analysis, Ahn S. H. and Won J. H.; investigation, Ahn S. H.; resources, Ahn S. H. and Won J. H.; data curation, Song, Y.-J.; writing—original draft preparation, Ahn S. H.; writing—review and editing, Ahn S. H. and Won J. H.; visualization, Ahn S. H.; supervision, Won J. H.; project administration, Won J. H.; funding acquisition, Won J. H.

CONFLICTS OF INTEREST

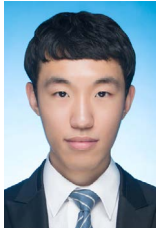
The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Alkan, R. M., Ozulu, İ. M., & Ilci, V. 2016, Precise Point Positioning (PPP) Technique versus Network-RTK GNSS, FIG Working Week 2016, May 2-6, 2016, Christchurch, New Zealand, pp.1-10.
- Asari, K., Saito, M., & Amitani, H. 2017, SSR assist for smartphones with PPP-RTK processing, In Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), September 25-29, 2017, Portland, Oregon, pp.130-138. <https://doi.org/10.33012/2017.15147>
- Ceylan, A., Mutluoglu, O., & Yigit, O. 2006, Cost and accuracy analysis of detail measurements by real-time kinematic GPS (RTK-GPS), In XXIII FIG Congress Munich, Germany, October 8-13, 2006.
- EGSA 2019, PPP-RTK Market and Technology Report [Internet], cited 2019, available from https://www.euspa.europa.eu/simplecount_pdf/tracker?file=calls_for_proposals/rd.03_-_ppp-rtk_market_and_technology_report.pdf
- Geo++® SSR Brochure for Network-RTK, PPP and PPP-RTK [Internet], cited 2015, available from https://www.geopp.de/wp-content/uploads/2020/09/SSR_Flyer_v3.pdf
- Gökdaş, Ö. & Özlüdemir, M. T. 2020, A variance model in NRTK-based geodetic positioning as a function of baseline length, *Geosciences*, 10, 262. <https://doi.org/10.3390/geosciences10070262>
- Grejner-Brzezinska, D. A. & Toth, C. K. 2013, GPS-Challenged Environments: Can Collaborative Navigation Help?, *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation. Series A*, 45, 241-248. <https://doi.org/10.6125/13-0902-766>
- Hegarty, C. J. & Chatre, E. C. 2008, Evolution of the global navigation satellitesystem (GNSS), *Proceedings of the IEEE*, 96, 1902-1917. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2006090>
- Hu, G. R., Khoo, H. S., Goh, P. C., & Law, C. L. 2003, Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning, *Journal of Geodesy*, 77, 292-302. <https://doi.org/10.1007/s00190-003-0327-4>
- Janos, D. & Kuras, P. 2021, Evaluation of Low-Cost GNSS Receiver under Demanding Conditions in RTK Network Mode, *Sensors*, 21, 5552. <https://doi.org/10.3390/s21165552>
- Jin, S., Yeh, T. K., Cina, A., Dabove, P., Manzano, A. M., et al. 2015, *Satellite Positioning: Methods, Models and Applications* (London, UK: BoD-Books on Demand).
- Joubert, N., Reid, T. G. R., & Noble, F. 2020, Developments in modern GNSS and its impact on autonomous vehicle architectures, In 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), IEEE, 19 October 2020 - 13 November 2020, Las Vegas, NV, pp.2029-2036. <http://doi.org/10.1109/IV47402.2020.9304840>
- Kealy, A., Retscher, G., Toth, C., Hasnur-Rabiain, A., Gikas, V., et al. 2015, Collaborative navigation as a solution for PNT applications in GNSS challenged environments—report on field trials of a joint FIG/IAG working group, *Journal of Applied Geodesy*, 9, 244-263. <https://doi.org/10.1515/jag-2015-0014>
- Kim, M. H. & Bae, T. S. 2013, Stability assessment of FKP system by NGII using long-term analysis of NTRIP correction signal, *Journal of the Korean Society of Sur-*

- veying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 31, 321-329. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2013.31.4.321>
- Kim, M. H. & Bae, T. S. 2015, Preliminary analysis of network-RTK for navigation, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 33, 343-351. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2015.33.5.343>
- Lee, H. C. & Park, K. D. 2020, Development of Code-PPP Based on Multi-GNSS Using Compact SSR of QZSS-CLAS, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 38, 521-531. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.6.521>
- Lee, S. H. 2019, MBC precision positioning service and autonomous vehicle, Broadcasting and Media Magazine, 24, 56-62
- Lee, S. H. 2020, Broadcast RTK technology for autonomous driving of unmanned vehicles, KISA Report. <https://xn--3e0bx5e6xzfdae3gxzpskhile.xn--3e0b707e/20204/form?postSeq=83&page=8>
- Lee, Y. C. 2014, Comparison of Network-RTK Surveying Methods at Unified Control Stations in Incheon Area, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 32, 469-479. <https://doi.org/10.7848/KSGPC.2014.32.5.469>
- Lee, Y. C. & Oh, S. J. 2020, Availability Assessment of Single Frequency Multi-GNSS Real Time Positioning with the RTCM-State Space Representation Parameters, Journal of Cadastre & Land InformatiX, 50, 107-123. <https://doi.org/10.22640/lxsiri.2020.50.1.107>
- MBC B'RTK Service Accuracy Analysis Result Report [Internet], cited 2019, available from <https://www.synerex.kr/download/cd6491b1-a005-48e7-91ee-e85b81880424>
- Namie, H., Nishikawa, K., Sasano, K., Fan, C., & Yasuda, A. 2008, Development of network-based RTK-GPS positioning system using FKP via a TV broadcast in Japan, IEEE transactions on broadcasting, 54, 106-111. <https://doi.org/10.1109/TBC.2008.916988>
- Neil, J., Cosart, L., & Zampetti, G. 2020, Precise timing for vehicle navigation in the smart city: an overview, IEEE Communications Magazine, 58, 54-59. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900596>
- Nord, S., Tidd, J., Gunnarsson, F., Alissa, S., Rieck, C., et al. 2021, Network-RTK Positioning for Automated Driving (NPAD): public report [Internet], cited 2021, available from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1530169/FULLTEXT01.pdf>
- Park, D. K., Lee, S. H., & Shin, H. G. 2021, A Study on RTK Correction Signal Transmission Technology Based on ATSC3.0, 2021 IPNT Conference, Nov 3-5 2021, Gangneung, Korea, pp.95-98. <http://ipnt.or.kr/2021proc/84>
- Park, D. K., Lim, S. Y., Shin, H. G., & Lee, S. H. 2019, Broadcast-RTK Method for Large Scale Multi-user in National Area, ISGNSS 2019 in conjunction with IPNT Conference, Oct 29 - Nov 1 2019, Jeju, Korea, pp.387-390. <http://ipnt.or.kr/2019proc/43>
- Park, K.-D., Kim, M.-S., & Han, J.-S. 2020, SSR service optimization (Suwon, Korea: NGII), available from https://www.ngii.go.kr/other/file_down.do?sq=74260
- Reid, T. G., Houts, S. E., Cammarata, R., Mills, G., Agarwal, S., et al. 2019, Localization requirements for autonomous vehicles, SAE Intl. J CAV 2, 173-190 <https://doi.org/10.4271/12-02-03-0012>
- Shin, H. G., Lee, D. K., Lee, S. H., & Park, S. I. 2021, RTK Correction Data Transmission Service for Autonomous Driving via ATSC 3.0 in South Korea, In 2021 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), August 04-06, 2021, Chengdu, China, pp.1-3. <https://doi.org/10.1109/BMSB53066.2021.9547147>
- Son, E., Choi, H., Joo, J., & Heo, M. B. 2020, Accuracy Assessment of IGSO and GEO of BDS and QZSS Broadcast Ephemeris using MGEX Products, Journal of Positioning, Navigation, and Timing, 9, 347-356. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.4.347>
- Song, J. S., Park, B. W., & Kee, C. D. 2013, Study on generating compact Network RTK corrections considering ambiguity level adjustment among reference station networks for constructing infrastructure of land vehicle, Journal of Advanced Navigation Technology, 17, 404-412. <https://doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.4.404>
- Stephenson, S., Meng, X., Moore, T., Baxendale, A., & Edwards, T. 2012, Implementation of V2X with the integration of Network RTK: Challenges and solutions, In Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012), September 17-21, 2012, Nashville, TN, pp.1556-1567.
- Teunissen, P. J. & Montenbruck, O. (Eds.) 2017, Springer handbook of global navigation satellite systems, vol.10 (Switzerland AG: Springer Nature), pp.723-780.
- Teunissen, P. J. G., Odijk, D., & Zhang, B.-C. 2010, PPP-RTK: results of CORS network-based PPP with integer ambiguity resolution, J Aeronaut Astronaut Aviat Ser A, 42, 223-229. [https://doi.org/10.6125/JoAAA.201012_42\(4\).02](https://doi.org/10.6125/JoAAA.201012_42(4).02)
- Wabben, G., Schmitz, M., & Bagge, A. 2005, PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks, In Proceedings of the

18th international technical meeting of the satellite division of the Institute of navigation (ION GNSS 2005), September 13-16, 2005, Long Beach, CA, pp.2584-2594.



Sang-Hoon Ahn is M.S., Ph.D., Combined M.S., Ph.D. of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received B.S. degree from the same university in 2017. His research interests are autonomous driving.



Young-Jin Song is a Ph.D. student of the Autonomous Navigation Laboratory at Inha University, Korea. He received a B.S. and M.S. degree from the same university in 2020 and 2022. His research interests include GNSS software receiver, signal processing, realtime processing.



Jong-Hoon Won received the Ph.D. degree in the Department of Control Engineering from Ajou University, Korea, in 2005. After then, he had worked with the Institute of Space Application at University Federal Armed Forces (UFAF) Munich, Germany. He was nominated as Head of GNSS

Laboratory in 2011 at the same institute, and involved in lectures on advanced receiver technology at Technical University of Munich (TUM) since 2009. He is currently an associate professor of the Department of Electrical Engineering at Inha University. His research interests include GNSS signal design, receiver, navigation, target tracking systems and self-driving cars.