

Performance Evaluation of the Low-cost, High-precision RTK Device RTAP2U for GPS-based Precise Localization

Hye-In Kim¹*, Yeong-Guk Kim^{1,2}, Kwan-Dong Park^{1,2}

¹PP-Solution Inc., Seoul 08504, Korea

²Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

ABSTRACT

The need for precise location data is growing across numerous markets, and so is the number of affordable high-precision GPS receivers. In this paper, we validated the performance of RTAP2U, a low-cost high-precision RTK receiver that was recently released. Two positioning modes were tested: static and driving. The static test conducted Zero-Baseline Single-RTK and Network-RTK survey for 57 hours and 51 hours, respectively. For the driving test, Network-RTK survey was conducted using VRS services provided by NGII based on Trimble PIVOT and Geo++ GNSMART. The static test showed about 1 cm horizontal and vertical accuracies, which is very stable considering the test duration longer than 50 hours. The integer ambiguity FIX rate marked a solid 100%. The driving test result also reached a 100% FIX rate. Horizontal and vertical accuracies were better than 2 cm and 3 cm, respectively. Researchers can refer to this paper when considering affordable high-precision GPS receivers as an option.

Keywords: GPS, RTK, autonomous driving, drone, LBS

1. 서론

자율주행차, 드론 등 무인이동체를 위한 센서로는 레이더, 카메라, 라이다, 자력계, 가속계, 자이로스코프, Global Positioning System (GPS) 등이 있다. 완전한 자율주행을 위해서는 상호 보완할 수 있는 다수의 센서가 필요하고 이를 위해 기술 개발을 선도하고 있는 글로벌 제조사들은 각 사만의 전략을 가지고 최적의 센서 구성안을 마련하고 있다. 최적의 센서 구성을 위해서는 성능과 비용 두 가지 측면이 고려되어야 한다. 성능이 확보되지 않아 신뢰성 및 안정성에 문제가 생기는 것을 방지해야 하지만 반대로 고성능·고비용의 센서만을 고집한다면 현실적으로 소비자들을 만족시킬 수 없고 개발사의 수익성 부족으로 오히려 기술 발전에 장애가 될 수 있다. 이러한 이유로 무인이동체에 탑재되는 각종 센서들에 대하여 확장성 높고 합리적 가격의 고성능 기

술 개발이 요구되는 상황이다.

GPS는 인공위성 신호를 이용하여 3차원 좌표를 파악하는 기술로 상대위치가 아닌 절대위치를 측정할 수 있는 측위 기술이다. GPS를 이용한 측위는 사용 데이터, 위치 산출 방법 등에 따라 기술의 종류와 장비가 다양하다. 현재 자율주행차 등 무인이동체에는 Real-Time Kinematic (RTK) 기술 및 장비가 주로 활용되고 있다(Kim & Huh 2018). Kim & Bae (2020)와 Lee et al. (2013)에 따르면 RTK 기술의 위치 정확도는 cm급으로 매우 높지만 장비 가격이 고가여서 한계가 있다. RTK는 정밀좌표를 알고 있는 기준국(base station)으로부터 보정정보를 수신하고 이동국(rover)에서는 기준국으로부터 수신한 보정정보와 이동국에서 수신한 GPS 데이터를 차분기법으로 상대처리하여 정밀한 좌표를 산출하는 기술이다. Parkinson & Spilker (1996)과 El-Rabbany (2002)에 따르면 RTK 기술로 취득한 위치좌표의 수평방향 정확도는 일반적으로 정지 시 1-2 cm, 이동 시 3-4 cm이다.

시중에 판매되고 있는 RTK 수신기 종류는 다양하며, 가격 역시 제조사에 따라 수백만원부터 수천만원까지 다양하다. 특히 최근에는 GPS 관련 기술의 발전과 더불어 자율주행차, 드론, 각종 위치기반서비스 분야 등 고정밀 위치정보를 필요로 하는 시장이 확대됨에 따라 다양한 가격대의 제품들이 다수 출시되고 있으며, 제품 가격대도 불과 2~3년 전에 비해 매우 저렴해지고 있는 추세

Received Jan 31, 2021 Revised Mar 01, 2021 Accepted Mar 02, 2021

*Corresponding Author

E-mail: hikim@ppsoln.com

Tel: +82-2-6925-1516 Fax: +82-2-6455-4305

Hye-In Kim <https://orcid.org/0000-0002-3256-9037>

Yeong-Guk Kim <https://orcid.org/0000-0003-4770-813X>

Kwan-Dong Park <https://orcid.org/0000-0003-1538-8768>

Table 1. RTAP2U specification.

	Description
Channels	184
Tracking	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS
Data rate	Up to 20 Hz
Mode	RTK, Network-RTK (VRS, FKP, MAC)
Memory	10 GB internal memory
Performance	0.01 m + 1 ppm CEP, Init < 10 s
I/O interface	USB, Bluetooth, Wi-Fi, 4 LEDs
Size	80×69×36 mm
Weight	160 g

이다. 대표적으로 국외의 경우 ARDUSIMPLE에서 저가의 u-blox 모듈을 탑재한 Original Equipment Manufacturing (OEM) RTK 수신기를 판매하고 있다.

이처럼 가격대가 낮은 RTK 수신기들이 보급되기 시작함에 따라 차량, 드론, 각종 위치기반서비스 시장 등 많은 사용자를 대상으로 하는 분야에서는 기존 대비 저렴한 가격대로 고정밀 위치정보를 확보할 수 있는 RTK 수신기 도입에 대한 관심이 높아지고 있다 (Jo et al. 2017, Yee et al. 2018). 다양한 분야에서 불특정 다수의 사용자를 대상으로 RTK 수신기를 활용하고자 하고 있기 때문에 무엇보다도 위치정보에 대한 정확도와 안정성 확보가 중요한데 이를 객관적으로 확인할 수 있는 데이터는 아직 부족한 실정이다. 일반적으로 RTK 수신기의 위치정보에 대한 정확도와 안정성은 위치오차와 모호정수 FIX 비율로 판단할 수 있다.

본 논문에서는 최근 출시된 저가의 고정밀 RTK 단말기 RTAP2U를 대상으로 성능 평가를 실시하고 그 결과를 제시한다. 성능평가를 위해 수평 및 수직 Root Mean Square (RMS) 오차를 정확도 평가의 지표로 사용하고 FIX 비율을 안정성 평가의 지표로 사용하였다. 먼저 RTAP2U 수신기 사양 및 특징, 동작 원리 등에 대해 설명한다. 그리고 제품의 성능 평가를 위해 장시간 정지 측위 테스트 한 결과와 주행 테스트 한 결과에 대하여 기술한다.

2. RTAP2U 수신기

RTAP2U는 최근에 출시된 (주)피피솔의 이중주파수 Multi-GNSS RTK 수신기이다. 기존의 RTK 수신기들에 비해 크기가 작고 가벼우며, 저전력으로 동작하는 것이 특징이다. 자세한 사양 및 특징, 그리고 동작 원리는 다음과 같다.

2.1 사양 및 특징

RTAP2U는 u-blox의 ZED-F9P 모듈이 탑재되어 있으며, u-blox ZED-F9P 모듈의 자료처리 엔진을 통해 RTK 결과가 출력된다. u-blox 칩셋을 기반으로 하는 제품이기 때문에 칩셋의 성능을 기본으로 하고 있지만, 제품별로 하드웨어 및 인터페이스 제작 기술이 다르기 때문에 이에 따라 신호 수신 감도, 통신 안정성 등이 달라질 수 있다. RTAP2U의 기본적인 사양은 Table 1에 나타낸 바와 같다. 위성항법시스템 중 GPS, GLObal Navigation Satellite System (GLONASS), Galileo, BeiDou, Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)를 이용할 수 있으며, 총 184개 채널을 지



Fig. 1. Pictures of RTAP2U and AMOTECH antenna.

원한다. 이용하는 위성항법시스템 개수에 따라 달라지지만 최대 20 Hz까지 위치측정이 가능하며, RTK와 Virtual Reference Station (VRS), Flachen Korrektur Parameter (FKP), Master-Auxiliary Concept (MAC)을 포함하는 Network-RTK 측위가 가능하다. 측위 정확도는 0.01 m + 1 ppm Circular Error Probability (CEP)이며, 초기화 시간은 10초 이내이다. 수신기 크기는 80×69×36 mm, 무게는 160 g으로 기존의 측지측량용 RTK 수신기에 비해 소형화, 경량화 되어 있다. Fig. 1은 이 연구에서 성능 평가를 위해 사용한 RTAP2U 수신기 및 안테나이다. 안테나는 AMOTECH Multi-band Active GNSS Antenna로 이중주파수 신호 수신기가 가능하다.

2.2 동작 원리

RTAP2U는 Wi-Fi를 통해 Radio Technical Commission for Maritime service (RTCM) 형식의 보정정보를 수신하여 수신기의 좌표를 정밀하게 산출한다. RTK 측위의 경우는 보정정보를 특정 기준국으로부터 수신하고, Network-RTK 측위의 경우는 보정정보를 제공하는 중앙서버로부터 수신한다. Network-RTK 보정정보 서비스는 국토지리정보원에서 무료로 제공하고 있다.

RTAP2U는 웹 인터페이스를 통해 간단하게 수신기 설정 및 관리가 가능하다. 장치상태, 위성수신, 측위결과, 측위오차 정보 등을 확인할 수 있으며 The National Marine Electronics Association (NMEA) 형식으로 출력되는 위치정보를 저장하고 지도상에서 수신기의 위치를 확인할 수 있다.

3. RTAP2U 성능 평가

RTAP2U의 성능 평가는 정지측위 테스트와 주행 테스트로 구분하여 진행하였다. 정지측위 테스트의 경우 정밀좌표를 알고 있는 상시관측소를 대상으로 장시간 정지측위를 실시하고 이를 통해 측위 성능과 함께 제품의 동작 안정성을 확인하였다. 또한 도로 주행 테스트의 경우 고정밀 측지측량용 수신기와의 동시 좌표 비교를 통해 동적 환경에서의 측위 성능 및 안정성을 평가하였다.

3.1 정지 테스트

정지 테스트는 서울특별시 금천구에 위치한 30층 건물 대성디폴리스지식산업센터 A동 옥상에 설치된 기준국(PPDP)과 연결된

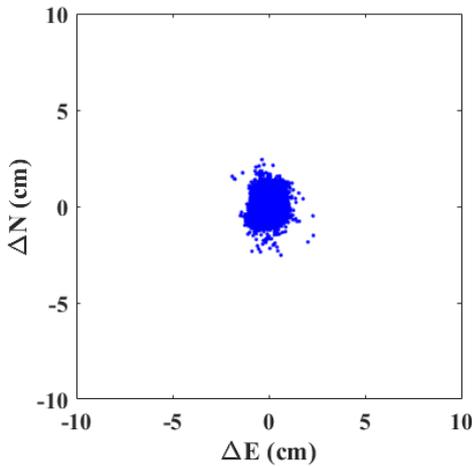


Fig. 2. Horizontal accuracy of the static Zero-Baseline Single-RTK test.

신호 방사기를 통해 GNSS 데이터를 수신하는 방식으로 진행하였다. PPDP 기준국은 30층 건물 옥상에 설치되어 있기 때문에 신호차폐요소가 없는 개활지 환경이다.

정지 테스트는 두 가지 시나리오로 진행했는데 첫 번째는 Single-RTK 측위방식으로, 두 번째는 Network-RTK 측위방식으로 테스트하였다. Single-RTK의 경우 PPDP 기준국에서 생성되는 보정정보를 수신하여 Zero-Baseline 측위를 실시하였으며, Network-RTK는 국토지리정보원의 VRS 서비스를 이용하여 보정정보를 수신 및 적용하였다.

성능평가에는 RMS 오차와 FIX 비율을 지표로 사용하였다. RMS 오차는 RTAP2U 좌표를 참값 좌표와 비교하여 좌표차이를 계산하고 이를 기반으로 산출하였다. FIX 비율에 대한 설명은 다음과 같다. RTK 측위를 하게 되면 보정정보 수신 및 적용이 불가능한 경우 수신기는 Standard Point Positioning (SPP) 모드로 측위를 수행한다. 그리고 코드 관측치 기반의 m 급 보정정보 수신 및 적용만 가능한 경우 Differential GPS (DGPS), RTK 보정정보 수신 및 적용은 했으나 모호정수를 결정하지 못했을 경우 FLOAT, 모호정수 결정까지 완료된 경우 FIX 순서로 모드가 전환되며 측위 정확도가 향상된다. 이러한 측위 모드는 관측환경 및 보정정보 수신 상태 등에 따라서 수신기에서 자동으로 전환된다. 이 논문에서는 테스트를 진행하면서 전체 측위 결과 중 FIX 좌표의 비율을 확인함으로써 성능을 평가하였다.

3.1.1 Single-RTK 테스트

Zero-Baseline 측위로 진행한 Single-RTK 테스트는 약 57시간, 2.4일 연속으로 진행하였으며, 1초 간격으로 RTK 측량을 실시하였다. RTK 보정정보는 PPDP 기준국에서 생성되는 보정정보를 이용하였으며, PPDP에서는 GPS와 GLONASS 보정정보가 제공된다. PPDP 기준국은 Javad Sigma-G3T 수신기와 Javad GrAnt-G3T 안테나로 구성되어 있다.

이 연구에서 약 57시간 동안 Single-RTK 정지 측위를 실시한 결과, RTK FIX 비율을 100%로 확인되었다. 57시간 동안 한 번도 끊김 현상이나 FIX가 풀리는 현상 없이 연속적으로 안정적인 측

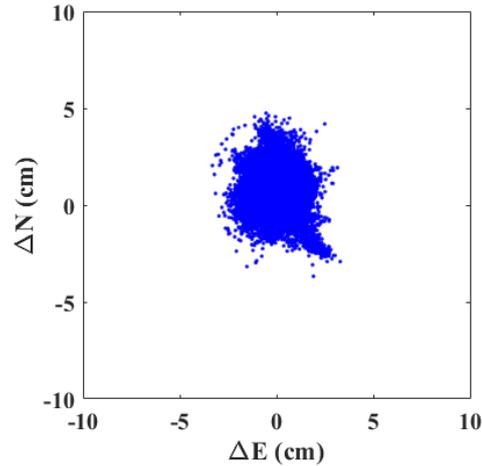


Fig. 3. Horizontal accuracy of the static Network-RTK test.

Table 2. Ratios of positioning modes from the Network-RTK static test.

Mode	Rate (%)
FIX	99.66
FLOAT	0
DGPS	0.01
SPP	0.33

위가 가능하였다. Fig. 2는 수평오차를 나타낸 것으로 가로축은 동서 방향, 세로축은 남북 방향 오차를 cm 단위로 나타낸 것이다. 수평방향 RMS 오차는 0.4 cm, 수직방향 RMS 오차는 0.6 cm로 산출되었으며, 3차원 RMS 오차는 0.8 cm로 나타났다. Zero-Baseline 측위이기 때문에 Table 1에 나타난 제품 정확도 사양에 부합하는 1 cm 이하의 정확도를 나타내었으며, 57시간 장시간 테스트에도 100% FIX 비율을 나타내 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

3.1.2 Network-RTK 테스트

Network-RTK 정지측위를 위한 테스트 시간은 약 51시간, 2.1일 연속으로 진행하였으며, 1초 간격으로 RTK 측량을 수행하였다. RTK 보정정보는 국토지리정보원의 Trimble PIVOT 기반 VRS 서비스를 이용하였으며 이 서비스에서는 GPS와 GLONASS 보정정보가 제공된다.

이 연구에서 약 51시간 동안 정지 테스트를 실시한 결과 Table 2에 나타난 바와 같이 전체 시간 중에서 99.66%가 FIX 좌표를 산출하였으며, SPP는 0.33%, DGPS 0.01%로 확인되었다. 대부분 안정적으로 FIX 좌표를 산출하지만 간혹 VRS 보정정보를 제공하는 서버와의 접속이 불안정할 경우 보정정보를 일시적으로 수신하지 못하는 경우 발생하게 되고 이런 과정에서 간혹 DGPS 또는 SPP 모드로 전환되는 경우가 있는 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 51시간 동안 진행한 RTAP2U 정지 테스트 결과를 수평 방향 오차를 나타낸 것으로 가로축은 동서방향, 세로축은 남북방향의 좌표오차를 cm 단위로 나타낸 것이다. 오차 분석에는 FIX된 결과만을 나타내었다. Table 3에 나타내었듯이 수평방향 RMS 오차는 1.2 cm, 수직방향 RMS 오차는 1.4 cm로 산출되었으며, 3

Table 3. RMSE (cm) and FIX rate (%) of static tests.

Type	H	V	3D	FIX rate
Single-RTK (Zero-Baseline)	0.4	0.6	0.8	100
Network-RTK	1.2	1.4	1.8	99.7

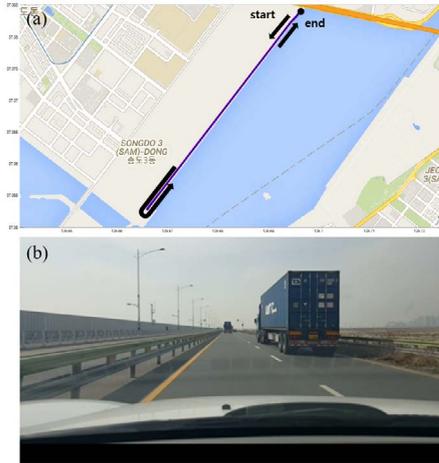


Fig. 4. Driving test routes (a) and the surrounding environment (b).

차원 RMS 오차는 1.8 cm로 계산되었다. RTAP2U의 RTK 측위 성능이 일반적으로 알려져 있는 RTK 측위의 정확도 수준에서 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있으며, 수 일 이상의 장시간 동안 측위를 하더라도 안정적으로 결과가 산출되는 것을 확인하였다.

3.2 주행 테스트

RTAP2U를 이용한 도로 주행 테스트는 인천광역시 송도동 인천신항대로에서 진행하였다. 주행 테스트 구간은 왕복 4차선의 직선도로이며 총 9 km로 구간 왕복에는 약 12분이 소요되었다. 주행 테스트는 평균 60 km/h 속도로 진행하였으며, 최대 속도는 약 100 km/h이다. Fig. 4는 주행 테스트 전체경로 및 주행 환경을 나타낸 것이다. Fig. 4b에서 확인할 수 있듯이 주행 도로 환경은 신호차폐요소가 거의 없는 개활지이긴 하나, 대형 트럭의 주행이 잦다는 특징이 있다.

성능 평가는 다음과 같은 방법으로 진행하였다. 안테나 한 대를 차량 위에 설치하고 신호분배기를 이용하여 성능평가 대상 수신기인 RTAP2U와 기준으로 활용하기 위한 고가의 측지측량용 수신기를 동시에 연결하였다. 이때 고가의 측지측량용 수신기는 Septentrio 사의 AsteRx4를 사용하였으며, 안테나는 정지측위와 마찬가지로 AMOTECH Multi-band Active GNSS Antenna를 사용하였다. Fig. 5는 성능 평가 실험 장비 세팅을 나타낸 것이다.

RTK 측량에는 국토지리정보원 VRS 서비스를 이용하였다. 국토지리정보원의 VRS 서비스는 현재 두 가지 솔루션을 통해 제공되고 있는데 하나는 Trimble PIVOT 기반의 VRS 서비스이고 또 다른 하나는 Geo++ GNSMART 기반의 VRS 서비스이다. 국토지리정보원에서는 Trimble PIVOT 기반의 VRS 서비스를 2007년에 시작하여 지금까지 제공해오고 있다. 그런데 현재 PIVOT VRS



Fig. 5. Setup of test equipment for the driving test.

의 동시 접속자 수는 1,225명으로 제한적이어서 서비스 이용자가 많을 경우에는 서비스 이용이 불가능하다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 GNSMART VRS 서비스를 제공하기 시작하였으며 해당 서비스는 동시 접속자 수 제한이 없이 무제한 사용 가능하다. 또한 PIVOT 기반 VRS 서비스는 GPS와 GLONASS 보정정보만 제공되는 반면, GNSMART 기반 VRS 서비스는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou 보정정보가 제공된다. VRS 서비스에 관한 자세한 내용은 국토지리정보원 홈페이지를 참고할 수 있다 (NGII Network-RTK Service 2020). 또한 고정밀 측지측량용 장비를 이용하여 PIVOT과 GNSMART의 VRS 서비스 성능을 비교한 연구는 Seok et al. (2020)에서 참조할 수 있다.

이 연구에서는 현재 이용 가능한 두 가지 서비스를 각각 이용하여 주행테스트를 진행하였다. 이 논문에서는 PIVOT을 이용한 주행 테스트를 Test 1, GNSMART를 이용한 주행 테스트를 Test 2 라고 칭한다.

테스트 구간을 주행하면서 VRS 서비스를 이용한 RTK 측량을 실시하였으며, 측량결과 1초 간격으로 출력되는 기준 수신기 좌표와 RTAP2U 좌표를 비교하여 두 좌표 간의 좌표차이를 계산하고, 이를 기반으로 RMS 오차를 계산하였다. 정지테스트에서 참값과 비교한 것과 달리 고정밀 수신기 기반의 RTK 결과와 비교한 결과이기 때문에 기준 좌표에도 기본적인 RTK 오차가 포함되어 있음은 감안해야 한다. Fig. 6은 RTAP2U로 산출한 좌표와 기준 수신기로 산출한 좌표를 동시에 지도에 표출한 결과 중 일부 구간을 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 두 결과가 경로를 따라 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Figs. 7과 8은 Test 1과 Test 2의 수평 오차를 나타낸 것이며, RMS 오차와 FIX 비율은 Table 4에 정리하였다. Figs. 7과 8에서 보듯이 VRS 서비스 종류와 무관하게 모든 측위 결과는 수평 정

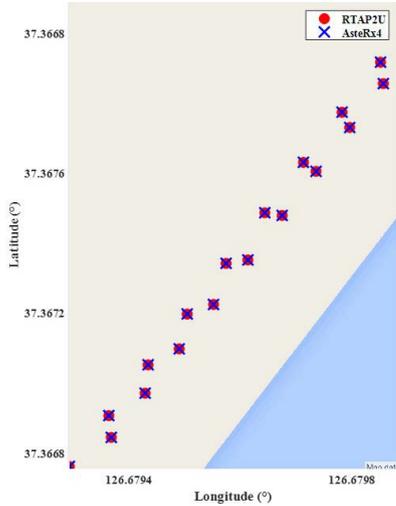


Fig. 6. Visual comparison of obtained positions from the driving test #1.

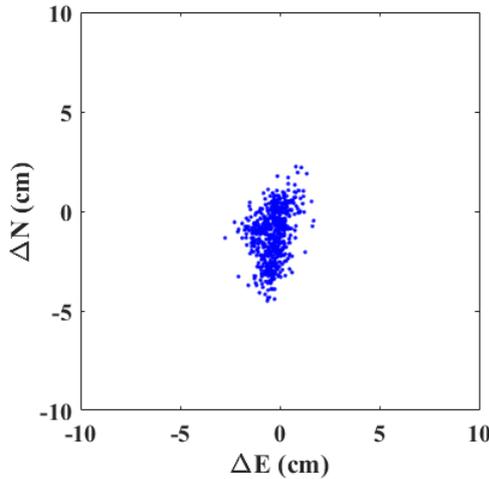


Fig. 7. Horizontal accuracy of the driving test #1.

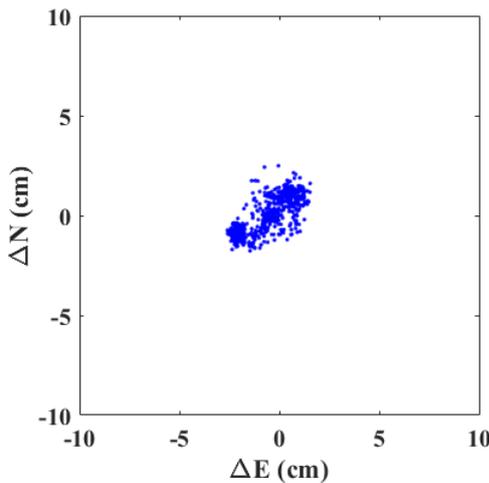


Fig. 8. Horizontal accuracy of the driving test #2.

Table 4. RMSE (cm) and FIX rate (%) of driving tests.

	VRS type	H	V	3D	FIX rate
Test 1	PIVOT	1.9	3.1	3.6	100
Test 2	GNSMART	1.6	1.2	2.0	100

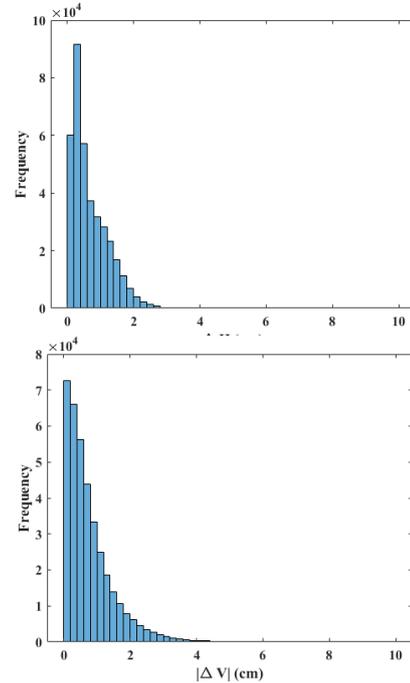


Fig. 9. Horizontal and vertical error histogram of two sets of the static test.

확도 5 cm 이내에 들어오는 것을 확인할 수 있으며, Table 4에서 보듯이 Test 1과 Test 2의 수평 RMS 오차는 각각 1.9 cm, 1.6 cm로 주행 환경에서도 정지 환경과 마찬가지로 2 cm 이내 정확도로 측위가 가능한 것을 확인할 수 있다. 또한 FIX 비율도 100%로 안정적으로 측위가 가능한 것을 확인하였다.

앞서 3.1절과 3.2절에 기술한 정지 테스트와 주행 테스트 결과의 오차 히스토그램을 Figs. 9와 10에 종합적으로 정리하였다. Fig. 9는 3.1절의 Single-RTK, Network-RTK 정지 테스트 결과 산출된 수평오차와 수직오차를 나타낸 것이며, Fig. 10은 3.2절의 주행 테스트 Test 1과 Test 2의 결과 산출된 수평오차와 수직오차를 나타낸 것이다. 정지테스트 수평 정확도의 경우 Fig. 9에서 보듯이 전체 데이터 중 98%가 2 cm 이내 오차를 나타냈으며, 3 cm 오차 범위 안에는 100%가 포함되었다. 정지테스트 수직 정확도의 경우 전체 데이터 중 98%가 3 cm 이내 오차범위 안에 들어왔으며, 99.5%가 4 cm 이내에 포함되었다. 주행테스트 수평 정확도는 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 전체 데이터 중 95%가 3 cm 이내 정확도를 나타냈으며, 99%가 4 cm 이내 오차 범위 내로 산출되었다. 수직 오차의 경우 90%가 4 cm 이내 정확도를 나타냈으며, 98%가 6 cm 이내 정확도를 나타냈다. 정지 테스트 결과에 비해 주행 테스트 결과가 동적환경이기 때문에 정확도가 비교적 낮고 오차 분포 범위가 크긴 하지만 고정밀 측지측량용 장비와 결과가 유사하게 나타나 정확성 및 신뢰성 측면에서 매우 안정적으로 활용 가능한 것을 확인하였다.

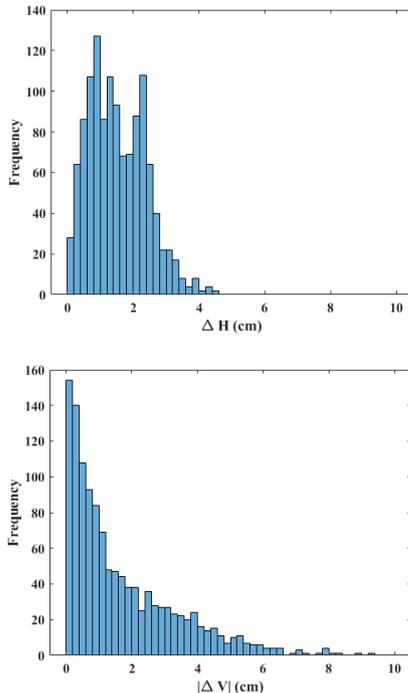


Fig. 10. Horizontal accuracy of two sets of the driving test.

4. 결론

이 연구에서는 최근 자율주행차, 드론 등 다양한 분야에서 고정밀 위치정보의 수요가 급증하고 있는 환경변화에 따라 저가의 RTK 수신기 중 하나인 RTAP2U를 대상으로 고정밀 측지측량용 RTK 수신기에 준하는 성능과 안정성을 확보할 수 있는지 평가하였다. 정지테스트를 통해 정적환경에서의 활용을 위한 지표를 마련하고, 주행테스트를 통해 이동 및 고속 주행과 같은 동적환경에서의 활용을 위한 지표를 마련하고자 하였다. 정지테스트의 경우 약 57시간 연속으로 Zero-Baseline Single-RTK 측위를 실시하고 약 51시간 연속으로 Network-RTK 측위를 실시한 결과 FIX 비율이 약 100%임을 확인함으로써 안정성까지 확인하였다. 또한 주행테스트의 경우 현재 국내에서 무상으로 이용 가능한 국토지리정보원 VRS 서비스인 Trimble PIVOT 기반 VRS와 Geo++ GNSMART 기반 VRS를 모두 활용하여 성능을 평가하였다. 그 결과 정지테스트와 주행테스트 모두 수평 정확도는 2 cm 이내인 것을 확인하였으며, 수직정확도는 3 cm 내외로 고정밀 측지측량용 RTK 수신기와 유사한 수준의 성능을 나타내는 것을 확인하였다. 이 연구 결과는 최근 다양하게 출시되고 있는 저가의 고정밀 GPS 수신기 도입에 대한 의사결정시 성능을 확인할 수 있는 유용한 지표가 될 수 있으며, 향후에는 보다 다양한 관측환경에서의 성능평가 진행함으로써 활용분야에 따른 참조 지표를 다양화할 필요가 있다고 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Technology development Program (S2976246) funded by the Ministry of SMEs and Startups (MSS, Korea).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, K.D. and H.I.; methodology, Y.G. and H.I.; validation, Y.G.; formal analysis, Y.G.; investigation, H.I.; resources, Y.G.; data curation, Y.G.; writing—original draft preparation, H.I.; writing—review and editing, K.D. and Y.G.; visualization, Y.G.; supervision, K.D.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- El-Rabbany, A. 2002, Introduction to GPS: The Global Positioning System (Boston, MA: Artech House)
- Jo, H. J., Kwak, S. W., & Yang, J. M. 2017, Vehicle Localization Using Internal Sensors and Low-Cost GPS for Autonomous Driving, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 27, 209-214. <https://doi.org/10.5391/JKIS.2017.27.3.209>
- Kim, C. & Huh, K. 2018, Development of a Pose and Position Estimation Algorithm with Considering the Error and Latency from the GPS and In-vehicle Sensors, *Transaction of KSAE*, 26, 620-629. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2018.26.5.620>
- Kim, M. S. & Bae, T. S. 2020, Evaluation of N-RTK Positioning Accuracy for Moving Platform, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 38, 259-267. <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2020.38.3.259>
- Lee, K., Bak, J. H., & Lee, C. H. 2013, A Study on DGPS/GIS-based Vehicle Control for Safe Driving, *Transactions of KSAE*, 21, 54-58. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2013.21.5.054>
- National Geographic Information Institute (NGII) Network-RTK Service [Internet], cited 2020 Oct 22, available from: <http://map.ngii.go.kr/ms/mesrInfo/gnss/vrsUserView.do>
- Parkinson, B. W. & Spilker, J. J. 1996, *Global Positioning System: Theory and Applications*, Vol. 164 (Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics,

Inc.)

Seok, H. W., Park, K. D., Kim, Y. G., & Lee, H. C. 2020, Accuracy Evaluation of Multi-GNSS Network-RTK Surveys Operated by National Geographic Information Institute, in 2020 IPNT Conference, Yeosu, 11-13 Nov 2020

Yee, J., Kim, T., & Kim, H. 2018, Vehicle Position Estimation Using Low-cost RTK Module, Wheelpulse, and IMU Sensor, Transactions of KSAE, 26, 407-415. <https://doi.org/10.7467/KSAE.2018.26.3.407>



Hye-In Kim received her Ph. D. degree from the Geoinformatic Engineering at the Inha University, and she is currently at PP-Solution Inc. as a director. Her research interests include DGNSS/PPP-RTK, positioning and navigation systems, receiver.



Yeong-Guk Kim received M.S. degree in Geoinformatic Engineering from Inha University, Korea. He received B.S degree from the same university. His research interests include SBAS/PPP-RTK and self-driving cars.



Kwan-Dong Park received his Ph. D. degree from the Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics at the University of Texas at Austin, and he is currently at Inha University as a professor. His research interests include DGNSS/PPP-RTK algorithm development and GNSS geodesy.

