

ISO 17123-8 표준에 의한 GNSS-RTK 수신기 정확도 평가 Field Tests for Accuracy of GNSS-RTK Surveys by ISO 17123-8 Standard

이흥규¹⁾
Lee, Hungkyu

Abstract

This paper has theoretically and practically reviewed the ISO (International Standard Organization) 17123-8 standard not only to raise the appropriateness for introducing performance criteria of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) surveying equipment based on RTK (Real-Time Kinematic) accuracy but also to derive its proper test procedure by introducing the international standard. Field experiments have been performed to appreciate the GNSS-RTK accuracy of five selected receivers via the full testing procedure of the ISO standard, which statistically compares the so-called experimental standard deviations with themselves and with the reference accuracy. A series of statistical tests have revealed that the RTK accuracy of the same class receivers is not identical, whereas that of the different classes can be equivalent. Such a result evidences the urgency of adopting an RTK accuracy-based specification of the GNSS equipment to the performance standard, currently referenced to the static observation technique only. It is believed that this transition helps the maximization of a new generation of cost-effective receivers to legal surveying applications. Finally, this study proposes the ISO full test, comparing an experimental standard deviation with its referenced value, for a potential field verification procedure of the new performance standard.

Keywords : Global Navigation Satellite System, Real-Time Kinematic Positioning, Accuracy, Field Tests, Statistical Test, ISO 17123-8

초 록

본 논문에서는 GNSS-RTK 정확도에 근거한 측량기 성능 기준 마련의 당위성 제기와 국제표준을 적용한 정확도 성능검사 방안 모색하기 위해 「ISO 17123-8」에 의한 현장시험 절차와 방법을 고찰하고 이 표준을 적용한 관측 실험을 수행하였다. ISO 표준에 따라 간이시험과 완전시험 절차를 적용해 5개 기종 GNSS 수신기가 RTK 방식으로 취득한 수평·높이 좌표가 기준정확도 이상이 되는지와 이들 좌표 정확도의 동등 여부를 통계검정 하였다. 그 결과 동일 등급 GNSS 수신기라 할지라도 RTK 정확도가 통계적으로 차이가 있을 수 있고 상이한 등급 수신기들도 그 정확도는 동등할 수 있는 것으로 나타났다. 이로부터 본 연구에서는 GNSS 상시관측 인프라의 고도화로 급증하는 실시간 측량 수요 대처 및 새로운 형태와 특징을 갖는 GNSS 수신기 활용성 제고를 위해 RTK 정확도 기반 측량기 성능 기준 마련과 검사 방법의 도입 필요성을 제기하였다. 여기서, GNSS-RTK 정확도 평가에는 「ISO 17123-8」 따른 관측 시험 중 완전시험법의 두 분산의 비를 비교해 시험정확도가 기준정확도 이상임을 검사하는 방법이 적합한 것으로 판단하였다.

핵심어 : 전지구위성항법체계, 실시간이동측위, 정확도, 현장평가, 통계검정, ISO 17123-8

Received 2022. 08. 02, Revised 2022. 08. 08, Accepted 2022. 08. 11

1) Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon National University (E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

전지구위성항법체계(GNSS: Global Navigation Satellite Systems)는 높은 관측 효율성과 정확도로 지구상 위치 결정이 가능해 각과 거리 관측에 기초한 전통적 측량을 대부분 대체하고 있다. GNSS에서는 위치추정 시점과 기간, 관측자료 종류, 오차 보정 방법에 따라 측위 기법을 구분하며, 사용자는 요구정확도와 관측 환경 등 특징, 관련 규정에 따라 적합한 방식을 적용한다. 「공간정보 구축 및 관리 등에 관한 법률(공간정보관리법)」에 따른 측량에 활용 가능한 GNSS 관측방식에는 '정적 상대 관측에 의한 후처리(정적간섭측위)', '이동상대 관측에 의한 후처리(PPK: Post-Processed Kinematic)', '이동상대 관측에 의한 실시간측위(RTK)'가 있다. 이들 세 가지 모두는 GNSS 상대측위 방식이나 공간정보관리법에 따른 측량 규칙과 규정에는 약간 다른 용어를 사용하고 있다. 정적간섭측위는 통합기준점 등 국가기준점과 지적삼각점, 1·2급 공공삼각점 성과 결정을 위한 기준점측량에 적용하는 반면, PPK와 RTK는 상대적으로 요구정확도가 낮은 3·4급 공공기준점, 지적도근점, 공공·지적 세부측량과 각종 건설공사 측량에 사용한다. 특히, RTK는 고밀도 GNSS 상시관측점 기반 VRS (Virtual Reference Station)와 FKP (Flächen Korrektur Parameter) 보정 서비스를 국토지리정보원이 2009년과 2012년부터 각각 시작한 이후 측량 분야 활용이 급증해 2020년 기준 접속 건수가 약 1.5백만 회에 달하고 있다(NGII, 2021).

「공간정보관리법령」에서 규정하는 절차와 방법에 따라 측량기기는 주기적으로 성능검사를 받아야 한다. 측량기기별 성능 기준을 규정하고 있는 「공간정보관리법 시행규칙」 별표9에는 GNSS 측량기가 신호 수신 대역 수, 관측 거리, 정밀도에 따라 1·2급으로 구분하고 있다. 이들 중 정밀도 충족 여부는 「측량기기 성능검사 규정(성능검사 규정)」에 따라 정적 측량 결과의 3차원 좌표와 기선장 교차 그리고 환폐합차를 계산해 검사한다. 「국가기준점측량 작업규정」의 GNSS 관측, 「공공측량 작업규정」에서 거리가 10km 이상 삼각점 측량, '네트워크-RTK 측량', 「GNSS에 의한 지적측량규정」의 '정지측량'은 1급 수신기를 사용해야 한다. 여기서, 공공측량 GNSS-RTK 수신기는 그 정확도와 등급이 규정에 따라 정적간섭측위로 구분한 것을 그대로 사용한다는 것과 지적측량의 GNSS 이동측량에는 수신기 정확도 기준만 제시되어 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 이것은 과거 GNSS-RTK 수신기 대부분이 측지측량 등급(geodetic-grade) 이었다는 사실에 기인하는 것으로 보인다. 한편, 최근에는 다중 GNSS 환경 도래와 수신기 관련 전자·컴퓨터 기술의 급격한 진보로 RTK 엔진을 탑재한 칩셋

트(chipset) 기반 저가 수신기들이 개발되었다(Cozzens, 2017, 2021). 이에 따라, GNSS-RTK 측위 기술의 측량 분야 활용도와 저가·고성능 수신기 개발 동향을 고려할 때 기존 정적간섭측위 위주의 측량기기 성능 기준과 검사 방법에 RTK에 대한 것을 추가하는 것이 바람직할 것이다.

Seo *et al.* (2009)는 「(구)측량기기 성능검사 요령 규정」에서 GPS 측량기 정확도 성능을 망폐합차와 검기선과 교차를 임계값과 단순히 비교하는 방법의 문제점을 지적하고 가설검정 기법으로 정확도를 검사하는 방안을 제시하였으나 정적간섭측위에 의한 기준점측량에 관한 것으로 RTK 정확도 검사는 다루지 못하였다. Lee *et al.* (2008)은 초판에 해당하는 「ISO 17123-8:2007 (ISO, 2007)」를 적용해 2개 기종 GNSS-RTK 수신기 정확도 등 성능을 평가한 것으로 보고하였으나, 자세한 관측실험 절차와 결과를 분석한 내용을 충분히 제시하지 못하였다. Heister (2008)은 「ISO 17123-8:2007」을 개발하고 안테나 캘리브레이션 등 추후 반영이 필요한 부분을 제시한 바 있다. 이후 ISO는 기존 「ISO 17123-8:2007」의 취소·대체를 위해 「ISO 17123-8:2015」를 공표하였다(ISO, 2015).

본 연구는 위성기준점 기반 보정 서비스 고도화로 현장에서 광범위하게 활용하는 GNSS-RTK 측량기기의 정확도 평가에 국제표준을 적용한 제도화 등을 위한 기초자료 확보를 목적으로 수행하였다. 이를 위해 「ISO 17123-8:2015」에서의 GNSS-RTK 측위 정확도 평가를 위한 관측 절차 그리고 기준 정확도와 수신기들 사이 정확도에 대한 통계검정 절차를 고찰하고 측지측량용 GNSS 수신기 3개 기종과 저가·고성능 칩셋을 장착한 평가키트(evaluation kit) 2개 기종을 ISO 표준에 따라 관측해 그 정확도 특징을 분석하였다. 이를 통해 국제표준에 의한 GNSS-RTK 측량기기 성능검사의 제도화 방향과 기기별 정확도 특성을 고려한 등급 구분과 저가·고성능 장비의 측량 분야 활용 가능성을 제시하고자 하였다.

2. GNSS-RTK 정확도 시험 절차 및 방법

2.1 개요

국제표준기구(ISO) 제172 기술위원회(ISO/TC 172)는 광학 및 광자학(optics and photonics) 분야의 용어, 요구사항, 인터페이스(interface), 시험 방법 등의 표준화를 담당하고 있다. ISO/TC 172는 총 9개의 분과위원회(SC: Subcommittee)로 구성되어 있으며, 이들 중 6 분과(SC6)가 '측지 및 측량기기(geodetic and surveying instruments)'이다. SC6은 측지 및 측량기기 용어 관련한 「ISO 9849」, 수준척과 삼각대 등 측량기구에 대한 「ISO 12858」, 측량기기 현장시험 절차인 「ISO 17123

」등 총 14건의 표준을 제정·공표해 왔다.

「ISO 17123」은 Table 1에 보이는 바와 같이 이론 포함 8가지 종류의 측량기기에 대한 현장시험 표준으로 이중 「17123-8」이 GNSS-RTK에 관한 것이다. ISO 표준은 갱신이 지속되고 있으므로 공표 연도를 참조해 그 유효성을 확인할 필요가 있다. ISO/TC 172의 6분과는 2007년 「ISO 17123-8:2007」을 최초 공표한 후 2015년에 관측 절차를 간소화하여 「ISO 17123-8:2015」로 갱신하였다. 이들 두 판(edition)의 차이는 Galileo와 Beidou 등 개발에 따른 GNSS로의 명칭 변경과 3개 관측 점을 2개로 축소해 절차를 간소화했다는 점이다(ISO, 2015). 「ISO 17123-8:2015」는 부록을 포함해 총 7개 절로 구성되어 있다. 1~3절은 범위, 참고문서, 용어와 정의를 다루고 4절은 GNSS-RTK 개념과 현장 관측 및 시험 절차를 개괄하고 있으며, 5·6절은 수식을 포함한 상세한 통계검정 방법을 기술하고 있다. 따라서, 본 절에서는 「ISO 17123-8:2015」 표준을 ‘관측 절차와 방법’과 ‘통계검정’으로 구분해 정리하였다(ISO, 2015).

Table 1. Parts of optics and optical instruments – field procedures for testing geodetic and surveying instruments (ISO 17123)

Standard I.D.	Subtitles	Published Year
ISO 17123-1	Part 1: Theory	2014
ISO 17123-2	Part 2: Levels	2001
ISO 17123-3	Part 3: Theodolites	2001
ISO 17123-4	Part 4: Electro-optical distance meters (EDM)	2012
ISO 17123-5	Part 5: Total stations	2018
ISO 17123-6	Part 6: Rotating lasers	2022
ISO 17123-7	Part 7: Optical plumbing instruments	2005
ISO 17123-8	Part 8: GNSS field measurement system in real-time kinematic (RTK)	2015
ISO 17123-9	Part 9: Terrestrial laser scanners	2018

2.2 관측 절차와 방법

GNSS-RTK 정확도 시험은 Fig. 1과 같이 2개의 이동국에서 관측한다. 이때 이동국 사이 거리는 2~20m이나 기준국과 이동국 사이의 거리는 2007년 판에서는 기준국 종류에 따라 10km와 40km로 제한했으나 현행 표준은 ‘네트워크-RTK’ 보정 서비스를 고려해 이를 특별히 규정하고 있지 않다. 간이시험(simplified test)과 과대오차 점검을 위해 RTK 이외의 측량

방법을 적용해 두 이동국 사이 수평거리와 높이차를 정밀도 3mm 이상으로 결정해야 한다.

관측은 수신기 제조사의 매뉴얼에 따라 최소 위성 수, 최대 PDOP (Position Dilution Of Precision), 최소 관측 시간을 적용해 수행한다. 관측 결과는 반송파 미지정수 결정 후 관측 기간 매 에포크(epoch) 추정 수평·높이 좌표 평균값이다. RTK 관측은 두 이동국에서 각각 1회 실시한 것을 세트(set)라 하고, 5개 세트(10회 관측)를 시리즈(series)로 구분한다. 이때 GNSS 다중경로의 전형적인 주기 20분을 반영해 각 세트 사이 간격을 약 5분으로 해 시리즈 관측을 약 25분 내외에 완료한다. 간이시험은 1개 시리즈 관측 결과에 대해 실시하나, 완전시험은 3개 시리즈를 사용한다. 주의해야 할 것은 복수의 시리즈 관측에서는 위성 기하구조 변화와 전리층과 대류권 변동을 측위 결과에 반영하기 위해 시리즈 관측 시작 간격을 최소 90분 이상 차이를 두어야 한다는 점이다. 따라서, 완전시험을 위한 GNSS-RTK 관측 절차에 필요한 총시간은 관측 시간과 시리즈 사이 간격을 합쳐 205분(약 3시간 30분)이 된다.

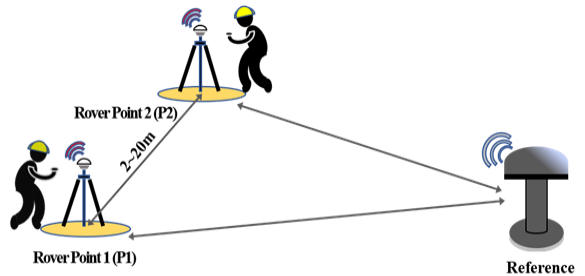


Fig. 1. Layout of GNSS-RTK field tests by ISO-17123-8:2015

2.3 통계시험

2.3.1 간이시험

간이시험은 1개 시리즈 관측한 이동국 3차원 좌표로부터 구한 수평·높이 거리 차이 $D_{i,j}$, $\Delta h_{i,j}$ 와 이들의 참값에 해당하는 기준거리 \bar{D} , $\Delta \bar{h}$ 차이를 Eqs. (1a) and (1b)와 같이 계산해 요구정확도와 비교하는 방법이다. 이를 통해 피시험 수신기의 GNSS-RTK 정확도가 요구 수준의 만족 여부를 개략적으로 평가하거나 완전 검정의 과대오차 규명에 사용할 수도 있다.

$$\epsilon_{D,i,j} = D_{i,j} - \bar{D} \tag{1a}$$

$$\epsilon_{\Delta h,i,j} = h_{i,j} - \Delta \bar{h} \tag{1b}$$

where $D_{i,j}$ and $\Delta h_{i,j}$ are the calculated horizontal distance and height difference in the set j in series i ; and \tilde{D} and $\tilde{\Delta h}$ are nominal values of the horizontal distance and height difference computed from the predetermined coordinates of the rover stations.

수평·높이 방향 관측 거리의 잔차($\epsilon_{D,i,j}$, $\epsilon_{h,i,j}$)를 Eqs. (2a) and (2b)와 같이 GNSS-RTK 목표정확도에 의해 계산하는 임계값과 비교해 그 충족 여부를 판정한다. 1개 시리즈 5회 관측으로 계산한 이동국 사이 수평·높이 방향 거리 성분이 간이시험 대상이나, ISO 표준은 이들 중 몇 개 이상의 결과가 임계값 이하일 때 기준정확도를 만족하는지에 대한 기준을 제시하고 있지 않다.

$$|\epsilon_{D,i,j}| = 2.5 \times \sqrt{2} \times s_{xy} \tag{2a}$$

$$|\epsilon_{h,i,j}| = 2.5 \times \sqrt{2} \times s_h \tag{2b}$$

where s_{xy} and s_h are the predetermined standard deviation according to the values specified by manufacturers or geodetic authorities.

2.3.2 완전시험

과대오차가 존재하지 않는다고 가정할 때 3개 시리즈 관측 30개 3차원 좌표 세트가 완전시험의 대상이다. 시험을 위해 먼저 두 이동국의 모든 측점 좌표의 평균과 잔차를 계산한 후 GNSS-RTK 측위 3차원 좌표와 수평 좌표에 대한 ‘시험표준편차(experimental standard deviation)’을 Eqs. (3) and (4)에 의해 계산한다.

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum r_x^2}{v_x}}, s_y = \sqrt{\frac{\sum r_y^2}{v_y}}, s_h = \sqrt{\frac{\sum r_h^2}{v_h}} \tag{3}$$

where r_x, r_y, r_h are the residuals of the measured 3-D coordinate components, and v_x, v_y, v_h are the degree of freedom, which is twenty eight if no outlier is identified.

$$s_{xy} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} \tag{4}$$

Eqs. (3) and (4)로 계산한 s_{xy} 와 s_h 를 ISO 표준의 GNSS-RTK 정확도 표현에서는 각각 ‘표준불확실도(standard uncertainties)’ $u_{\text{ISO-GNSS RTK-xy}}$ 와 $u_{\text{ISO-GNSS RTK-h}}$ 라고 한다. 이들 값은 Eqs. (5a) and (5b)에서 하드웨어 설치와 수학적 모형화 오차를 같이 고려해 피검정 GNSS 수신기의 RTK 측위 정확도인 ‘결합불확실도(combined uncertainties)’ 결정

에 적용한다.

$$U_{xy} = 2 \times \sqrt{u_{\text{ISO-GNSS RTK-xy}}^2 + u_{xy,rec}^2 + u_{xy,ant}^2 + u_{xy,mat}^2} \tag{5a}$$

$$U_h = 2 \times \sqrt{u_{\text{ISO-GNSS RTK-h}}^2 + u_{h,rec}^2 + u_{h,ant}^2 + u_{h,mat}^2} \tag{5b}$$

where $u_{xy,rec}$, $u_{xy,ant}$, and $u_{xy,mat}$ are the horizontal uncertainties of receiver, antenna and mathematical modelling, and $u_{h,rec}$, $u_{h,ant}$, and $u_{h,mat}$ are those of the height uncertainties.

시험표준편차 s_{xy} 와 s_h 는 Table 2와 같이 크게 2가지로 구분하는 가설에 대해 통계 검정한다. 첫 번째는 표에서 a)와 b)에 해당하는 것으로 s_{xy} 와 s_h 가 관련 규정 등에 의해 사전에 정의한 기준표준편차 σ_{xy} 와 σ_h 와 통계적으로 작다고 할 수 있느냐 하는 것이다. 즉, 피검정 수신기 RTK 정확도가 요구정확도 이상 여부를 통계적으로 판정하는 것이다. 반면, 두 번째는 Table 2에서 검정시험 c)와 d)로 각기 다른 2가지 피검정 수신기의 수평·높이 방향 시험표준편차 s_{xy} , \tilde{s}_{xy} 그리고 s_h , \tilde{s}_h 가 같은지 여부를 검정하는 것이다.

Table 2. Null and alternative hypothesis for the statistical tests

Question	Null hypothesis	Alternative hypothesis	Remarks
a)	$s_{xy} \leq \delta_{xy}$	$s_{xy} > \delta_{xy}$	One tail test
b)	$s_h \leq \delta_h$	$s_h > \delta_h$	
c)	$s_{xy} = \tilde{s}_{xy}$	$s_{xy} \neq \tilde{s}_{xy}$	Two tail test
d)	$s_h = \tilde{s}_h$	$s_h \neq \tilde{s}_h$	

가설검정 a)와 b)의 귀무가설이 기각되지 않을 영역은 χ^2 분포에 신뢰수준 95%를 고려할 때 Eqs. (6a) and (6b)와 같다. 여기서 관측에 과대오차가 없다고 가정한다면 식들에서와 같이 3차원 좌표 성분의 자유도는 모두 28이 되어 유의수준 5%를 고려해 간단히 나타낼 수 있다.

$$s_{xy} \leq \sigma_{xy} \times \sqrt{\frac{\chi_{0.95}^2(v_x + v_y)}{v_x + v_y}} = \sigma_{xy} \times \sqrt{\frac{\chi_{0.95}^2(56)}{56}} = 1.15 \times \sigma_{xy} \tag{6a}$$

$$s_h \leq \sigma_h \times \sqrt{\frac{\chi_{0.95}^2(v_h)}{v_h}} = \sigma_h \times \sqrt{\frac{\chi_{0.95}^2(28)}{28}} = 1.22 \times \sigma_h \tag{6b}$$

한편, 통계검정 c)와 d)에서 귀무가설이 기각되지 않은 영역은 양쪽꼬리 검정에 대해 Eqs. (7a) and (8a)가 된다. 이후 Eq. (6)과 같이 30회 관측을 사용한 경우라면 F-비 값을 적용해

Eqs. (7b) and (8b)로 간단히 정리할 수 있다. 따라서, 이 검정에 서 귀무가설의 기각은 두 GNSS 수신기 RTK 측위 정확도가 통계적으로 같다고 할 이유가 없다는 것을 의미한다.

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(\tilde{v}_x + \tilde{v}_y, v_x + v_y)} \leq \frac{s_{xy}^2}{\tilde{s}_{xy}^2} \leq F_{1-\alpha/2}(v_x + v_y, \tilde{v}_x + \tilde{v}_y) \quad (7a)$$

$$0.59 = \frac{1}{F_{0.975}(56, 56)} \leq \frac{s_{xy}^2}{\tilde{s}_{xy}^2} \leq F_{0.975}(56, 56) = 1.70 \quad (7b)$$

$$\frac{1}{F_{1-\alpha/2}(\tilde{v}_h, v_h)} \leq \frac{s_h^2}{\tilde{s}_h^2} \leq F_{1-\alpha/2}(v_h, \tilde{v}_h) \quad (8a)$$

$$0.47 = \frac{1}{F_{0.975}(56, 56)} \leq \frac{s_h^2}{\tilde{s}_h^2} \leq F_{0.975}(56, 56) = 2.13 \quad (8b)$$

3. 관측실험 및 결과

GNSS-RTK 측량기 성능 평가에 「ISO 17123-8:2015」 표준 적용성 모색과 향후 제도화를 위한 기초자료 확보 그리고 최근 측량기 전문 제조사 이외의 업체들에서 출시하고 있는 다양한 종류의 저가의 고성능 수신기의 측량 분야 활용성 모색을 위해 관측실험을 수행하였다. 본 절에서는 실험에서의 관측망 구성과 피검점 수신기 종류를 소개한 후 표준에 따라 3개 시리즈 관측에 대한 정확도 검정과 그 결과를 비교하였다.

3.1 관측망과 장비

GNSS-RTK 측위 정확도 시험평가를 위한 관측망은 기

준국에 해당하는 위성기준점 창원(CHWN)과 이로부터 약 830m 떨어진 건물 옥상에 설치한 Fig. 2와 같은 이동국 필러 (pillar) 2점으로 구성하였다. 관측에서 CHWN은 기준국으로 국토지리정보원 위성기준점 서비스로부터 NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol)을 통해 관측데이터를 전송받아 피시험 수신기가 단일기준국 기반 RTK 측위를 수행하도록 하였다. 간시험을 위한 이동국 사이 수평 거리와 높이차 결정을 위해 GNSS 정적방식으로 4시간 관측하였다. 이후 Javad GEODIS와 Leica LGO 소프트웨어에 의해 P1점 기준으로 각각 기선해석한 결과의 성분별 차이가 1~2mm 수준임을 확인한 후 기선벡터 성분을 평균해 기준 수평거리(\tilde{D})와 높이차($\tilde{\Delta h}$)를 각각 3.681m와 -0.017m로 결정하였다.

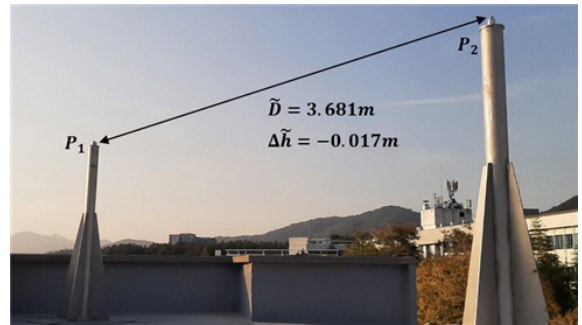


Fig. 2. Two observation pillars for the GNSS-RTK field tests

Table 3. Some major characteristics of the receivers tested in this study

Receiver I.D.	Characteristics	Manufacturer claimed accuracy	Remarks
SR-1	<ul style="list-style-type: none"> • A receiver integrated with a antenna • Most recently released product among the three geodetic-grade receivers, tracking modernized GPS, GLONASS, Galileo, Beidou 	Hor.: 10mm+1ppm Ver.: 20mm+1ppm (ISO17123-8)	Geodetic-survey grade
SR-2	<ul style="list-style-type: none"> • A receiver separated to a antenna • Multipath mitigation algorithm is not implemented • Tracking modernized GPS and Galileo 	Hor.: 10mm+1ppm Ver.: 15mm+1ppm (RMS, 1σ)	
SR-3	<ul style="list-style-type: none"> • A receiver integrated with a antenna • More than ten years since the product was released. • Tracking legacy GPS and GLONASS 	Hor.: 10mm+1ppm Ver.: 15mm+1ppm (RMS, 1σ)	
CR-1	<ul style="list-style-type: none"> • OEM chipset installed in a elevation kit • Product of a China based manufacture, tracking legacy GPS, GLONASS, and BeiDou • A calibrated antenna 	Hor.: 10mm+1ppm Ver.: 10mm+1ppm (CEP, R50)	Cost-effective high performance
CR-2	<ul style="list-style-type: none"> • OEM chipset installed in a elevation kit • Tracking modernized GPS, GLONASS, Galileo, Beidou • A calibrated antenna as the same as CR-1 	Hor.: 10mm+1ppm Ver.: 15mm+1ppm (RMS, 1σ)	

본 연구의 관측실험과 「ISO 17123-8」 표준에 따른 RTK 시험에 사용한 GNSS 수신기는 Table 3과 같이 5개 기종이다. 이들은 측지측량용 수신기 3개 기종과 대당 가격이 수백 USD (U.S. Dollar) 수준인 저가·고성능 수신기 2개 기종으로 구분할 수 있다. SR-1은 이들 중 가장 최근에 출시된 일체형으로 RTK 측량에 주로 활용하는 장비이며, SR-2는 안테나 분리형 수신기이나 구매 당시 예산 등의 이유로 다중경로 저감 알고리즘을 탑재하고 있지 못하며, SR-3은 출시된 지 10년 이상 된 구형 GPS-GLONASS 수신기이다. 한편, CR-1·2는 이중주파수 수신기이나, OEM (Original Equipment Manufacturer) 칩셋이 통신과 전원 연결 등을 지원하기 위한 응용 보드(application board)에 장착된 평가키트이다. CR-1과 비교할 때 CR-2가 L2C 등 GPS 현대화 신호를 포함해 더욱 다양한 GNSS 신호를 추적할 수 있는 것이 특징이다. Table 3의 3열은 사양에 따른 RTK 측위 정확도를 나타낸 것으로 제조사에 따라 다른 정확도 기준을 사용하는 것을 볼 수 있다. 하지만, 보편적으로 사용하는 1σ 기준 RMS (Root-Mean-Squares error)로 환산하면 수평은 10mm+1ppm 그리고 높이는 15mm+1ppm 수준으로 5개 기종이 대체로 동등하다.

3.2 관측과 정확도 평가

3.2.1 관측 및 간이시험

관측실험에 사용한 수신기는 Table 3에 나타난 바와 같이 각기 다른 특징을 갖는 5개 기종이며, 표에서와 같이 수신 가능한 GNSS 종류가 달라 동일 조건에 대한 정확도 비교를 위해 GPS 데이터만을 RTK 측위에 사용하였다. 「ISO 17123-8:2015」의 방법과 절차에 따라 5일 동안 매일 오후 1시~6시에 3개 시리즈 관측을 위성 수 6개 이상 그리고 PDOP 3.0 이하 조건으로 수행하였다. SR-1과 SR-3은 휴대용 컨트롤러(controller) 그리고 나머지 수신기는 노트북 PC에 의해 GNSS 통합데이터센터의 실시간 데이터 서비스에 접속해 NTRIP으로 기준국 CHWN 데이터를 취득해 블루투스 혹은 RS-232 통신 케이블에 의해 수신기로 전송해 RTK 측위를 수행하였다. 측위 결과인 평면직교좌표와 타원체고는 컨트롤러 혹은 PC에 세트와 시리즈로 구분해 저장한 후 스프레드시트(spreadsheet)에 입력해 간이·완전시험 절차를 자동 실행하였다.

GNSS-RTK 정확도의 간이시험에서는 사전에 정밀하게 결정해둔 두 이동국 사이 수평·높이 방향 거리와 각 관측 세트의 추정 3차원 좌표로부터 계산한 거리의 차이를 임계값과 비교한다. 표준에 따르면 간이시험에는 1개 시리즈 관측 결과를 사용하나 본 연구에는 완전시험을 위해 이미 3시리즈 관측했

으므로 15개 세트 모두를 사용하였다. Fig. 3은 완전시험 결과에 해당하는 피검사 수신기 모두에 대한 Eqs. (1a) and (1b)의 거리 차이와 Eqs. (2a) and (2b)의 임계값 범위를 도시한 것이다. 간이시험 기준표준편차는 수신기 사양에 명시된 정확도에 기준국과 이동국 사이 거리 약 1km와 수평·높이 설치 오차를 반영해 $\pm 1.2\text{cm}$ 와 $\pm 1.7\text{cm}$ 로 설정해 임계값은 각각 $\pm 4.243\text{cm}$ 와 $\pm 6.010\text{cm}$ 가 되었다. Fig. 3의 그래프에서 임계값을 초과하는 관측이 나타나지 않았기 때문에 5가지 GNSS-RTK 수신기 정확도는 기준표준편차와 동등하거나 그 이하가 되는 것으로 판정할 수 있다. 주목할 것은 저가형 수신기들에 관한 결과로 측량용에 비해 다소 큰 편차를 보이기는 하나 시험을 통과했다는 점이다.

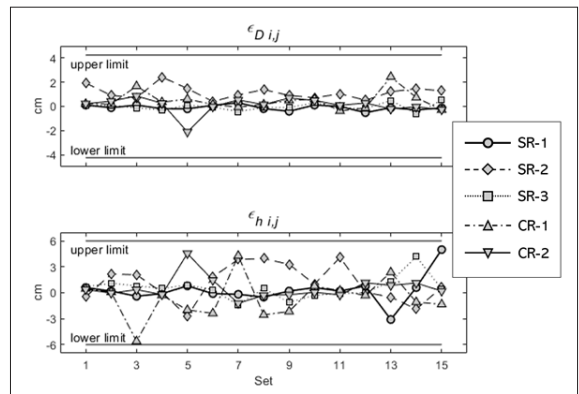


Fig. 3. Results of the simplified tests which depicts the test statistics and the upper and lower limit of the critical values

3.2.2 완전시험

5개 기종 수신기의 3개 시리즈 관측 모두 간이시험을 통과했으므로 이들 모두에 대해 완전시험을 실시하였다. Fig. 4는 각 수신기의 15세트 측정 결과를 평균한 3차원 좌표와 매 세트 관측 차이에 해당하는 잔차를 도시한 것이다. 또한, Eqs. (3) and (4)에 의해 계산한 수신기별 표준편차를 Fig. 5에 막대그래프로 나타내었으며, 이들 값은 완전시험에서의 검정통계값이면서 ISO 표준불확실도에 해당한다. 측량용 수신기의 수평성분 표준편차는 저가형 그것과 비교해 대체로 작은 값을 나타내나 높이 성분은 SR-1을 제외하고는 모든 결과가 유사한 경향을 보인다.

완전시험 첫 번째 가설검정은 Table 2에서의 a)와 b)에 대한 것으로 Fig. 5의 실험표준편차가 기준표준편차 이하인지를 통계적으로 검사하는 것이다. 5개 기종 피검정 수신기의 귀무가

설, 대립가설, 검정통계치, 기각영역을 Table 4에 요약했으며, 임계값은 간시시험과 동일한 기준표준편차를 적용해 1.308과 2.074로 설정하였다. 검정통계값의 임계값 초과로 귀무가설이 기각되는 경우는 CR-1 수신기의 수평 좌표에 대한 것이었다. 이와 같은 결과는 CR-1 이외의 GNSS 수신기 RTK 측위의 수평·높이 좌표 정확도(1σ)는 유의수준 5%에 대해 통계적으로 각각 $\pm 1.2\text{cm}$ 와 $\pm 1.7\text{cm}$ 이상이 된다는 것을 의미한다. 한편, 향후 ISO 표준에 의한 GNSS-RTK 정확도 검정 방안 제도화 등의 기초자료 축적을 위해 Table 4의 귀무가설이 기각되지 않는 최소 표준편차를 반복 검정시험을 수행해 Fig. 6와 같이 결정하였다. 이들 값을 기준표준편차로 적용할 때 Table 4의 모든 귀무가설이 기각되지 않았으므로 유의수준 5%에 대해 통계적으로 유의미한 5가지 피검사 수신기의 RTK 측위 결과에 대한 최소한 정확도(1σ)라 할 수 있다. Figs. 5 and 6에서 SR-1을 제외한 나머지 수신기의 높이 방향 ISO 표준 불확실도와 최소정확도는 대체로 비슷하나, CR-1 수신기 수평 좌표의 그것은 다소 불량함을 알 수 있다. 하지만 이와 같은 정확도 차이에 대한 통계적 유의미성은 Table 2의 c)와 d)에 대한 가설검정으로 평가할 수 있을 것이다.

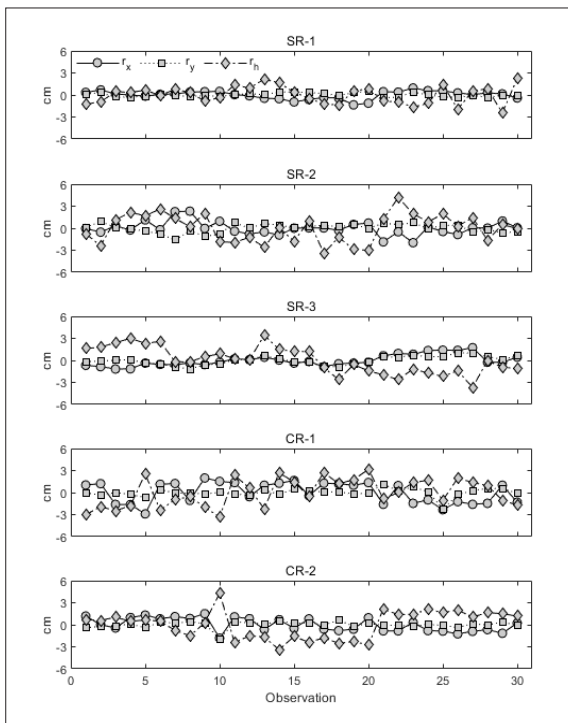


Fig. 4. Residuals of northing, easting, and height components for all the measurements in the three series

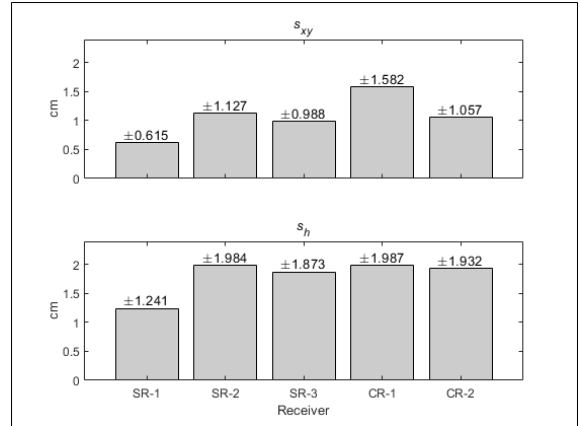


Fig. 5. Experimental standard deviations for the full tests

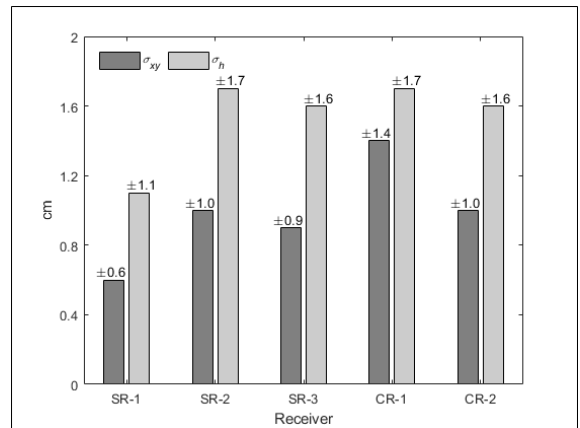


Fig. 6. Minimum referenced standard deviations in which the null hypotheses in Table 4 are not rejected

Table 2의 귀무가설 c)와 d)는 피시험 수신기들의 실험 표준편차가 통계적으로 차이가 없다는 것이다. 귀무가설은 Eqs. (7b) and (8b)에서 검정통계값에 해당하는 실험분산의 비가 임계값 미만이거나 초과할 때 기각되며, 이것은 두 수신기 RTK 정확도가 통계적으로 차이가 있다는 것을 의미한다. Table 5는 이와 같은 통계시험에서의 귀무·대립 가설과 검정통계값 그리고 결과를 수평과 높이 방향에 대해 구분해 요약한 것이다. 해당 시험에서는 ‘측지측량용 수신기들 사이’와 ‘저가·고성능 수신기들 사이’ 그리고 ‘측지측량용과 저가·고성능 수신기들 사이’의 RTK 측위 정확도의 통계적 차별성을 확인하고자 하였다. 우선, 측지측량용 수신기들 사이 시험은 SR-1의 정확도가 SR-2과 SR-3의 그것과 통계적인 차이가 있지만 SR-2과 SR-3에 대한 3차원 좌표 성분은 정확도는 동

Table 4. Hypothesis testing results of the question a) and b) in Table 2

Question a) - Horizontal Component				Question b) - Height Component			
Hypothesis		Testing		Hypothesis		Testing	
Null	Alternative	Statistics	Results	Null	Alternative	Statistics	Results
$s_{xy, SR-1}^2 \leq \sigma_{xy}^2$	$s_{xy, SR-1}^2 > \sigma_{xy}^2$	0.615	NR	$s_{h, SR-1}^2 \leq \sigma_h^2$	$s_{h, SR-1}^2 > \sigma_h^2$	1.241	NR
$s_{xy, SR-2}^2 \leq \sigma_{xy}^2$	$s_{xy, SR-2}^2 > \sigma_{xy}^2$	1.127	NR	$s_{h, SR-2}^2 \leq \sigma_h^2$	$s_{h, SR-2}^2 > \sigma_h^2$	1.984	NR
$s_{xy, SR-3}^2 \leq \sigma_{xy}^2$	$s_{xy, SR-3}^2 > \sigma_{xy}^2$	0.988	NR	$s_{h, SR-3}^2 \leq \sigma_h^2$	$s_{h, SR-3}^2 > \sigma_h^2$	1.873	NR
$s_{xy, CR-1}^2 \leq \sigma_{xy}^2$	$s_{xy, CR-1}^2 > \sigma_{xy}^2$	1.582	R	$s_{h, CR-1}^2 \leq \sigma_h^2$	$s_{h, CR-1}^2 > \sigma_h^2$	1.987	NR
$s_{xy, CR-2}^2 \leq \sigma_{xy}^2$	$s_{xy, CR-2}^2 > \sigma_{xy}^2$	1.057	NR	$s_{h, CR-2}^2 \leq \sigma_h^2$	$s_{h, CR-2}^2 > \sigma_h^2$	1.932	NR
Rejection region	$s_{xy}^2 > 1.380$			Rejection region	$s_h^2 > 2.074$		

※ Note: NR and R stand for “Not Reject” and “Reject”, respectively.

Table 5. Hypothesis testing results of the question c) and d) in Table 2

Question c) - Horizontal Component				Question d) - Height Component			
Hypothesis		Testing		Hypothesis		Testing	
Null	Alternative	Statistics	Results	Null	Alternative	Statistics	Results
$s_{xy, SR-2}^2 = s_{xy, SR-1}^2$	$s_{xy, SR-2}^2 \neq s_{xy, SR-1}^2$	0.298	R	$s_{h, SR-2}^2 = s_{h, SR-1}^2$	$s_{h, SR-2}^2 \neq s_{h, SR-1}^2$	0.392	R
$s_{xy, SR-3}^2 = s_{xy, SR-1}^2$	$s_{xy, SR-3}^2 \neq s_{xy, SR-1}^2$	0.388	R	$s_{h, SR-3}^2 = s_{h, SR-1}^2$	$s_{h, SR-3}^2 \neq s_{h, SR-1}^2$	0.439	R
$s_{xy, SR-2}^2 = s_{xy, SR-3}^2$	$s_{xy, SR-2}^2 \neq s_{xy, SR-3}^2$	0.769	NR	$s_{h, SR-2}^2 = s_{h, SR-3}^2$	$s_{h, SR-2}^2 \neq s_{h, SR-3}^2$	0.892	NR
$s_{xy, CR-1}^2 = s_{xy, CR-2}^2$	$s_{xy, CR-1}^2 \neq s_{xy, CR-2}^2$	0.447	R	$s_{h, CR-1}^2 = s_{h, CR-2}^2$	$s_{h, CR-1}^2 \neq s_{h, CR-2}^2$	0.946	NR
$s_{xy, CR-1}^2 = s_{xy, SR-1}^2$	$s_{xy, CR-1}^2 \neq s_{xy, SR-1}^2$	0.151	R	$s_{h, CR-1}^2 = s_{h, SR-1}^2$	$s_{h, CR-1}^2 \neq s_{h, SR-1}^2$	0.390	R
$s_{xy, CR-1}^2 = s_{xy, SR-2}^2$	$s_{xy, CR-1}^2 \neq s_{xy, SR-2}^2$	0.507	R	$s_{h, CR-1}^2 = s_{h, SR-2}^2$	$s_{h, CR-1}^2 \neq s_{h, SR-2}^2$	0.996	NR
$s_{xy, CR-1}^2 = s_{xy, SR-3}^2$	$s_{xy, CR-1}^2 \neq s_{xy, SR-3}^2$	0.390	R	$s_{h, CR-1}^2 = s_{h, SR-3}^2$	$s_{h, CR-1}^2 \neq s_{h, SR-3}^2$	0.889	NR
$s_{xy, CR-2}^2 = s_{xy, SR-1}^2$	$s_{xy, CR-2}^2 \neq s_{xy, SR-1}^2$	0.339	R	$s_{h, CR-2}^2 = s_{h, SR-1}^2$	$s_{h, CR-2}^2 \neq s_{h, SR-1}^2$	0.413	R
$s_{xy, SR-2}^2 = s_{xy, CR-2}^2$	$s_{xy, SR-2}^2 \neq s_{xy, CR-2}^2$	0.881	NR	$s_{h, SR-2}^2 = s_{h, CR-2}^2$	$s_{h, SR-2}^2 \neq s_{h, CR-2}^2$	0.949	NR
$s_{xy, CR-2}^2 = s_{xy, SR-3}^2$	$s_{xy, CR-2}^2 \neq s_{xy, SR-3}^2$	0.873	NR	$s_{h, CR-2}^2 = s_{h, SR-3}^2$	$s_{h, CR-2}^2 \neq s_{h, SR-3}^2$	0.940	NR
Rejection region	$s_{xy}^2/\hat{s}_{xy}^2 \leq 0.590$ or $s_{xy}^2/\hat{s}_{xy}^2 \geq 1.670$			Rejection region	$s_h^2/\hat{s}_h^2 \leq 0.470$ or $s_h^2/\hat{s}_h^2 \geq 2.130$		

※ Note: NR and R stand for “Not Reject” and “Reject”, respectively.

등하다는 결과를 나타내었다. 그뿐만 아니라 저가형 수신기들에 대한 시험은 Table 5에서 c) 가설은 기각되는 반면 d) 가설이 기각되지 않아 수평 좌표 정확도는 통계적 차이가 있거나 높이 방향은 그렇지 않다는 결과를 보여주고 있다. 마지막으로 측량용과 저가형 수신기 사이 가설검정 결과는 SR-2와 SR-3의 수평 정확도는 CR-1과 차이가 있으나 CR-2와는 3차

원 좌표 성분 모두 통계적 차이가 없는 것으로 나타났다. 이와 같은 10가지 귀무가설에 대한 검정 결과를 3가지로 구분해 살펴본 결과 동등한 등급으로 구분할 수 있는 GNSS 수신기들의 RTK 정확도에 차이가 있을 수 있다는 점과 저가형 수신기 중에는 고가의 측량용과 통계적으로 동등한 정확도로 RTK 측위가 가능한 장비가 있을 수 있다는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 살펴본 GNSS-RTK 수신기 정확도 시험 결과를 고려할 때 현행 「공간정보 관리법 시행규칙」과 「측량기기 성능검사 규정」에서의 정적간섭측위에 기초한 GNSS 측량기기 성능 기준, 검사항목 및 방법을 RTK에 대해 그대로 적용하는 것은 적절하지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 관련 규정에 따라 정적관측 결과에 대한 검사로 1급 판정받은 수신기라 할지라도 RTK 측위 정확도가 다를 수 있고 관측데이터 저장 장치가 탑재되지 못해 성능검사를 받을 수 없는 저가형 RTK 전용 수신기도 측량용의 그것과 동등한 정확도로 측위할 수 있기 때문이다. 따라서, GNSS 측량기기 성능 기준에 RTK를 별도 항목으로 구분해서 제시하고 정확도에 따른 등급과 시험 방법을 규정해 제도화하는 방안을 고려할 필요가 있다. 이때 GNSS-RTK 수신기 정확도 시험법을 새로 도출하는 것보다 본 연구에서 고찰한 ISO 표준의 활용을 검토해 볼 수 있을 것이다.

4. 요약 및 결론

본 논문은 GNSS-RTK 측량기기 정확도 검사에 국제표준 도입 검토 등을 위한 기초자료 확보를 목적으로 「ISO 17123-8:2015」에 따른 시험 절차와 방법을 고찰하고 이 표준을 적용해 각기 다른 특징을 갖는 5개 기종 수신기의 정확도를 비교·분석한 것으로 그 주요한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, ISO 표준은 GNSS-RTK 수신기 현장검사를 간이시험과 완전시험으로 구분하고 있으나, 측량기기 성능검사에는 다중경로, 전리층과 대류권 상태, 위성 기하구조 등의 변동 영향을 반영해 정확도를 점검할 수 있는 후자를 적용하는 것이 타당할 것으로 보인다. 이를 위해 필요한 기준표준편차는 GNSS-RTK 응용 분야의 요구정확도와 본 연구에서와 같이 다양한 제조사의 여러 기종의 수신기를 시험 평가한 결과를 반영해 결정할 수 있을 것이다.

둘째, 측지측량용 수신기 3대의 완전시험 절차에 따른 검사로부터 이들의 RTK 측위의 수평·높이 방향 정확도(1 σ)는 유의수준 5%에 대해 통계적으로 각각 $\pm 1.2\text{cm}$ 와 $\pm 1.7\text{cm}$ 이상인 것으로 평가할 수 있었다. 여기서, SR-1 정확도가 나머지 두 수신기의 그것과 차이가 있는 것으로 분석되어 향후 GNSS-RTK 측량기기 성능 기준과 시험 방법의 제도화에서는 정확도 등급 구분방안을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.

셋째, 저가·고성능 수신기의 RTK 정확도 평가·분석 결과 CR-2는 측량용 SR-2와 SR-3와 통계적으로 동등하나 CR-1은 수평성분이 이들에 미치지 못했다. 이것은 수백 USD인 저가 GNSS 칩셋 기반 수신기 중에는 「공간정보 관리법」에 따른

측량이 가능한 수준의 RTK 정확도 확보가 가능한 것도 있다는 것을 의미한다. 그럼에도 불구하고 현행 GNSS 수신기 성능과 검사 기준은 정적간섭측위법을 기준으로 규정하고 있기 때문에 저가·고성능 수신기를 측량 실무에 활용하는데 제한이 있다. 따라서, 최근 우리나라 GNSS 상시관측망 고도화에 따라 급증하는 RTK 측량 수요에 적극적으로 대처하기 위해 저가형 수신기의 성능을 객관적으로 평가해 측량 현장에 활용할 수 있는 제도를 마련해야 할 것으로 사료된다.

마지막으로 본 연구에서 도출한 결론들은 5개 기종 GNSS 수신기의 GPS 데이터 기반 RTK 시험에 기초한 것에 유의할 필요가 있으며, 향후 측량기기 성능 기준과 검사 방법 등의 제도화를 위해서는 최신 기종의 저가형을 포함해 다양한 종류의 수신기를 대상으로 GLONASS, Galileo, Beidou 등 다중 GNSS 환경을 반영한 시스템 조합에 대한 실험·분석으로 획득 가능 정확도 등 근거자료를 축적할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임,

References

- Cozzens, T. (2017), Surveying and mapping RTK survey systems using smartphone, *GPS World*, <https://www.gpsworld.com/launchpad-new-rtk-system-for-surveyors/> (last date accessed: 18 July 2022).
- Cozzens, T. (2021), U-blox upgrades GNSS receivers for faster cm accuracy, *GPS World*, <https://www.gpsworld.com/u-blox-upgrades-gnss-receivers-for-faster-cm-accuracy/> (last date accessed: 18 July 2022).
- Heister, H. (2008), The new ISO standard 17123-8 for checking GNSS field measuring system, *Proceedings of FIG Working Week 2008*, 14-19 June, Stockholm, Sweden, unpaginated CD-ROM.
- NGII (2021), *A study on establishment of unified control points for South and North Korean SOC projects and transition of height system to global standard*, National Geographical Information Institute, Suwon, Korea, 263p.
- Lee, Y.J., Jo, J.R., Ryu, S.H., and Jung, R.J. (2008), Testing in GNSS RTK of ISO standard 17123-8, *Proceedings of the*

Korean Association of Geographic Information Studies Conference, 10th October, Goyang, Korea, pp. 352-353.

Seo, W., Lee, H., Lee, K., and Lee, H.J. (2009), A study on field validation tests for survey-grade GPS receivers, *Journal Of the Korean Society of Cadaster*, Vol. 25, No. 2, pp. 33-45. (in Korean with English Abstract)
<https://doi.org/10.22988/ksc.2009.25.2.003>

ISO (2007), *Optics and Optical Instruments – Field Procedure for Testing Geodetic Surveying Instruments – Part 8: GPS Field Measurement Systems in Real Time (RTK)*, International Standard Organization.

ISO (2015), *Optics and Optical Instruments – Field Procedure for Testing Geodetic Surveying Instruments – Part 8: GPS Field Measurement Systems in Real Time (RTK)*, International Standard Organization.