

Geodetic Survey Campaigns and Maintenance Plan for KASS Reference Station Antenna Coordinates

Hwanho Jeong, Hyunjin Jang[†], Youngsun Yun, ByungSeok Lee



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Geodetic Survey Campaigns and Maintenance Plan for KASS Reference Station Antenna Coordinates

Hwanho Jeong¹, Hyunjin Jang^{1†}, Youngsun Yun¹, ByungSeok Lee²

¹SBAS System Engineering & Integration Team, SBAS Program Office, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

²SBAS Program Office, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

The Korea Augmentation Satellite System (KASS) system is a Satellite Based Augmentation System (SBAS) under development to provide APV-I SBAS service in the Republic of Korea. The KASS ground segment generates correction and integrity information for GPS measurements of KASS users using the accurate positions of KASS Reference Station (KRS) antenna phase centers. For this reason, the accuracy of KRS reference points through geodetic survey campaigns is one of the important factors for providing the KASS service in compliance with the required navigation performance. In order to obtain accurate positions, two geodetic survey campaigns were performed at several reference points, such as Mark, Center of Mast at Ground Level (CMGL), and Center of Hole in Top Plate (CHTP), of each KRS site using three different survey methods, the Virtual Reference Station (VRS), Flächen Korrektur Parameter (FKP), and raw data post-processing methods. By comparing and analyzing the results, the computed coordinates of the reference points were verified and Antenna Phase Center (APC) positions were calculated using KRS Antenna Reference Point (ARP) data, and the first KASS Site Acceptance Test (SAT#1) was performed successfully using the verified APC coordinates. After the first site survey activities, the KASS operators should maintain the coordinates with the required performance such that the overall KASS navigation performance commitment is guaranteed during the lifetime of 15 years. Therefore, the maintenance plan for the KRS antenna coordinates should be developed before the commissioning of KASS operation planned after 2023. Therefore, this paper presents a geodetic survey method selected for the maintenance activities and provides the rationale for using this method.

Keywords: KASS, SBAS, reference station antenna, geodetic survey, maintenance

1. 서론

한국형 정밀 Global Positioning System (GPS) 위치보정시스템인 Korea Augmentation Satellite System (KASS)는 국제민간 항공기구 (ICAO, International Civil Aviation Organization)에서 정의한 SBAS 서비스를 국내 인천 비행정보구역 (FIR, Flight

Information Region)에 제공하기 위하여 개발되고 있다. KASS는 7기의 기준국 (KRS, KASS Reference Station), 2기의 중앙처리국 (KASS Processing Station), 2기의 통합운영국 (KASS Control Station), 3기의 위성통신국 (KASS Uplink Station) 및 각 하위시스템 간의 통신을 위한 통신네트워크와 2기의 정지궤도위성 (GEO, Geostationary Earth Orbit)으로 구성된다. 2022년 10월 현재 모든 하위시스템의 개발이 완료되어 국내 각 사이트에 설치되었으며, 첫 번째 KASS 탑재체가 설치된 정지궤도위성인 MEASAT-3D 위성이 2022년 6월에 발사되고 궤도에 안착하여 금산 및 영주에 위치한 위성통신국과 연동 시험을 수행 중이다. 2022년 12월부터는 모든 하위시스템과 정지궤도위성 1기의 연동이 완료되어, KASS 시험 신호의 방송이 개시될 예정이며 2023년에 수행될 전체 시스템 통합 검증 시험 및 성능적합증명 획득을 통하여 2023년 말 이후에는 정식 항공용 서비스가 제공될 예정이

Received Nov 07, 2022 Revised Dec 09, 2022 Accepted Dec 13, 2022

†Corresponding Author

E-mail: hjjang@kari.re.kr

Tel: +82-42-870-3524 Fax: +82-42-860-2789

Hwanho Jeong <https://orcid.org/0000-0001-8891-893X>

Hyunjin Jang <https://orcid.org/0000-0002-5740-3658>

Youngsun Yun <http://orcid.org/0000-0001-8710-1143>

ByungSeok Lee <https://orcid.org/0000-0003-3964-0139>

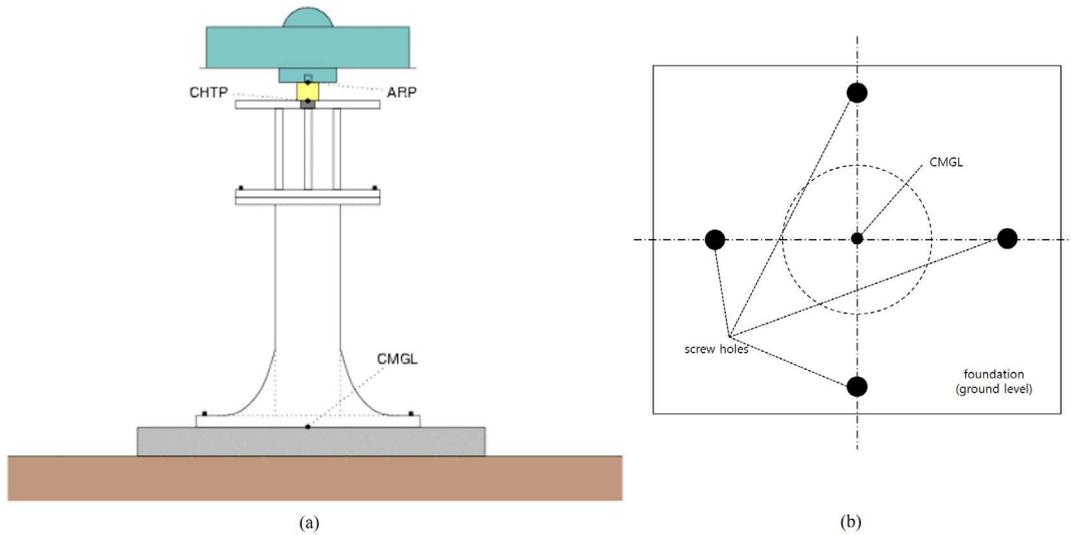


Fig. 1. (a) Schematic location of the reference points, (b) Determination of CMGL based on its surrounding screw holes.

다.

KASS 개발·구축의 최종 시험검증 단계를 수행함과 동시에 서비스 개시를 위한 운영유지보수 체계 구축 작업도 진행되고 있다. 국토교통부에서는 2021년 2월에 항공교통본부 산하에 항공 위성서비스 운영 전담 조직인 항공위성항법센터를 설립하여 본격적인 운영 준비에 착수하였으며, 2022년 말에는 위탁운영기관을 선정하여 실제 KASS 서비스 제공을 위한 운영유지보수자를 훈련하고 운영유지보수 절차를 완비함으로써 2023년 말 이후 정식 서비스 개시를 위한 준비 활동을 계획 중이다.

현재 개발 및 구축중인 KASS 시스템은 ICAO에서 정의하고 있는 Approach Procedure with Vertical guidance (APV)-I급 항법 성능을 만족하는 것을 목표로 하고 있으므로, 개발·구축 과정에서 이를 위한 다양한 요구사항을 정의하고 이에 대한 만족 여부를 검증하는 과정을 수행하게 된다. KASS 항법 성능 만족을 위하여 필요한 요구사항 중 하나는 각 기준국에 설치된 두 개의 GPS 안테나 좌표를 4 cm (2σ) 이내의 정확도로 측량하여야 한다는 것이다. 각 기준국은 P 채널 및 I 채널로 정의된 두 개의 GPS 안테나를 통하여 GPS 및 GEO 위성으로부터 방송된 GPS 및 KASS 신호를 수신하여, 필요한 항법 데이터 및 측정치를 생성하고 이를 통신네트워크를 통해 중앙처리국으로 전달하게 된다. 중앙처리국은 처리부 (processing set)와 체크부 (check set)로 구성되며, 처리부에서는 정확하게 미리 측량된 기준국 P 채널 안테나 위치 좌표를 이용하여 GPS 측정치의 오차 요소 보정을 위한 KASS 보정 메시지를 생성한다. 중앙처리국 중 체크부에서는 기준국 I 채널 안테나 위치 좌표를 이용하여 처리부에서 생성된 보정정보의 무결성 확인하고 그 결과를 바탕으로 무결성 메시지를 생성한다. 따라서, 중앙처리국에서 생성되는 위성항법 보정 및 무결성 정보의 성능은 측량된 기준국 GPS 안테나 위치의 정확도에 따라 영향을 받게 된다. 정밀 기준국 GPS 안테나 좌표는 기준국 및 중앙처리국 소프트웨어의 설정 파일에 입력하게 되어 최종 사용자 성능에 영향을 줄 수 있으므로 엄격한 절차를 통하여 관리되어야 한다.

KASS 서비스의 성능을 결정하는 보정 및 무결성 정보의 품질을 확보하기 위해서는 시스템 개발·구축 과정 중에 각 기준국의 GPS 안테나 기준점에 대한 정밀한 측지측량이 필요하며, 시스템 운영 기간 중에도 지속적으로 안테나 기준점의 좌표를 모니터링함으로써 기준점 좌표의 변경으로 인한 KASS 시스템의 성능 저하를 예방할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 GPS 안테나 정밀 좌표 산출하기 위한 측량법을 정의하고, 좌표 산출 절차를 확립하여야 하므로 본 논문에서는 KASS 시스템에 적용된 안테나 정밀 좌표 초기 측량 방법 및 결과와 향후 KASS 운영 중 수행할 정밀 위치좌표 유지보수 계획을 기술하였다.

2장에서는 KASS 기준국 안테나 정밀좌표 획득을 위한 측지측량 활동에 대한 설명과 적용된 방법을 제시하며, 3장에서는 KASS 개발·구축을 위해 수행한 초기 측지측량 결과와 분석 내용을 제시한다. 4장에서는 초기 측지측량 분석을 바탕으로 KASS 운영 기간 동안 수행할 정밀 좌표 측량 계획을 설명한다.

2. KASS 기준국 측지측량 방법

2.1 기준국 측지측량 기준점 정의

일반적으로 위성항법시스템 기준국에 대한 측지측량 기준점은 Fig. 1과 같이 정의된다 (Plag et al. 2007). Center of Mast at Ground Level (CMGL)은 기준국 안테나 설치를 위한 기초 콘크리트 구축된 후 안테나 마스트를 설치하기 위한 나사구멍의 중심점을 의미하며, Center of Hole in Top Plate (CHTP)는 마스트 설치 후 안테나 장착을 위한 기구물 상단부의 중심을 의미한다. Antenna Reference Point (ARP)는 위성항법 안테나 상의 기준점으로 육안으로 확인할 수 있는 부분이며, 안테나 제조사에서 제공하는 안테나 위상 중심 (APC, Antenna Phase Center)과의 변위 데이터를 이용할 경우 GPS 데이터 처리를 통해 산출되는 좌표를 이용하여 계산할 수 있다 (Park & Won 2006). Fig. 1에는 표

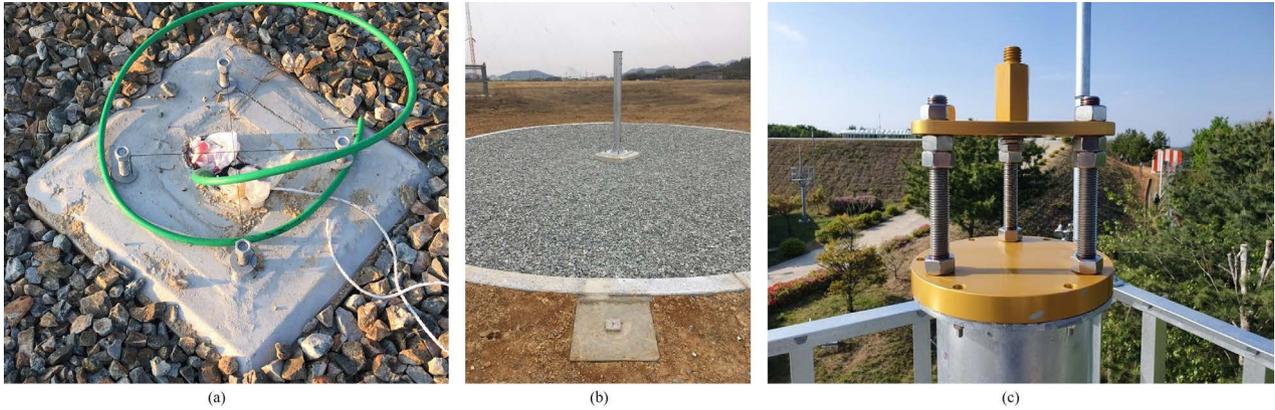


Fig. 2. (a) Picture of CMGL, (b), Mark, (c) Antenna adapter.

시되어 있지 않지만 기준국 안테나 설치장소와 인접한곳에 물리적인 마크 (Mark)를 설치하고 필요 시 측지측량을 수행하여 해당 사이트 지반의 위치변화 유무를 확인할 수 있도록 한다. 각각의 기준점은 KASS 시스템이 운용되는 15년동안 좌표 유지보수를 통해 좌표 변화추이를 확인할 수 있는 기준점으로 사용되며 공공측량 또는 위성 기준점으로 활용하지는 않는다.

Fig. 2는 KASS 기준국 설치에 사용된 CMGL, Mark, 안테나 기구물 형상의 예시이며, Fig. 2b에서 보듯이 안테나 마스트가 설치된 CMGL과 인접한 곳에 Mark가 위치한 것을 알 수 있다.

2.2 기준국 측지측량 방법

기준국 기준점인 Mark, CMGL, CHTP의 좌표는 위성항법 보정신호 성능에 영향을 미치기에 2-sigma 4 cm 수준의 정확도를 확보해야 하며 측정된 좌표는 WGS84 X, Y, Z 좌표와 위경도의 절대 좌표로 산출되어야 한다. 또한 측정 좌표값의 신뢰성을 확보하기 위해 3가지 이상의 측량방식을 통해 좌표를 산출해야 한다. 이에 따라 KASS 사업에서는 위성항법 기반 정밀 측위 기법 중 Precise Point Positioning (PPP), Virtual Reference Station (VRS), Flächen Korrektur Parameter (FKP), Raw data post-processing (RAW)의 총 4가지 측량방식의 적용 가능성을 검토하였다. 각각의 측량방식을 적용하는데 사용한 장비 구성은 Table 1과 같으며 CHTP의 경우 APC 좌표를 산출하는 기준점이므로 장시간 멀티패스를 측정할 장비의 Raw data를 사용하였다.

PPP 측량방식은 International GNSS Service (IGS) 같은 전문적인 기관에서 제공하는 보정신호를 수신하여 사용자의 위치와 수신기 시각 오차를 계산하는 방식으로 위성과 관련된 오차정보가 제거되면 전리층 오차는 이중주파수 수신기를 사용하여 제거하며, 대류권오차는 사용자의 추정치를 적용하여 정밀 좌표를 획득하는 방식이다. VRS와 FKP 측량방식은 네트워크 Real Time Kinematics (RTK)를 이용한 측량방식으로 하나의 네트워크로 연결된 기준국들의 보정정보를 수신하여 사용자 위치에서의 보정정보를 추정하고 이를 이용하여 사용자의 정밀 위치정보를 획득하는 방식이다. VRS는 위치를 측정하는 사용자 근처에 가상의 기준국을 생성하고 기준국 위치를 기반으로 보정신호를 생성하여 측정하는 사용자에게 보정신호를 전송하여 정밀좌표를 획득

Table 1. Geodetic survey equipment.

Survey method	Antenna	Receiver
PPP	GrAnt-G5T	PwrPak7
VRS	GrAnt-G5T, GrAnt-G3T	DURO, PolaRx3e
FKP	GrAnt-G5T, GrAnt-G3T	DURO, PolaRx3e
RAW (Mark, CMGL)	GrAnt-G5T, GrAnt-G3T	DURO, PolaRx3e
RAW (CHTP)	GNSS-850	ProPak6

하는 방식이며, FKP는 전리층 오차와 비 전리층 오차, 위도와 경도에 대한 오차를 산출하고 각각의 오차성분을 포함하는 보정 파라미터를 사용하여 정밀좌표를 획득하는 방식이다 (Lim & Park 2020). RAW 측량방식은 기준점에서 장시간 누적된 GPS 원시 측정치를 Receiver Independent Exchange (RINEX) 포맷으로 변환 후 호주 Geoscience에서 운영하는 Global Navigation Satellite System (GNSS) 온라인 데이터 처리 서비스인 Australia Online GPS Processing Service (AUSPOS) 서비스를 통해 정밀좌표를 획득하는 방식으로 측정 위치에서 가까운 International GNSS Service (IGS) 상시관측소를 선정하고 상대 측위하여 정밀좌표를 획득하는 방식이다. 각각의 방식으로 측정된 좌표 비교를 위해 VRS와 FKP의 경우 한반도 지각변동을 고려하여 관측일 기준점으로 변환 후 좌표산출을 하였다.

2.3 기준국 측지측량 활동

KASS 개발·구축 단계에서의 기준국 안테나 정밀 측지측량 활동은 KASS 시스템 마일스톤 중 첫 번째 사이트 수락 시험 (SAT, Site Acceptance Test)인 SAT#1을 수행하기 위하여 필요하다. SAT#1은 전국 7개 기준국 사이트에 기준국 장비가 설치되고 통합운영국을 통해 모든 기준국 장비에 대해 상태정보 모니터링 및 제어 가능여부를 확인하는 시험이며 (Jeong et al. 2021), SAT#1을 수행하기 위해서는 기준국 소프트웨어 설정 파일에 입력하기 위한 모든 GPS 안테나 위상 중심에 대한 위치 좌표가 필요하다. 따라서, 2020년 12월로 예정된 SAT#1 수행 전에 모든 기준국 안테나에 대한 측지측량 수행이 필요하였으며, 앞서 진행된 기준국 사이트 구축 공사 공정을 고려하여 2차에 걸쳐 수행하는 것으로 계획하였다. 기준국 사이트 구축을 위한 기초 공사 수행 시 Mark와 CMGL 설치가 진행되며, 이후 강관주 또는 철타입이 설

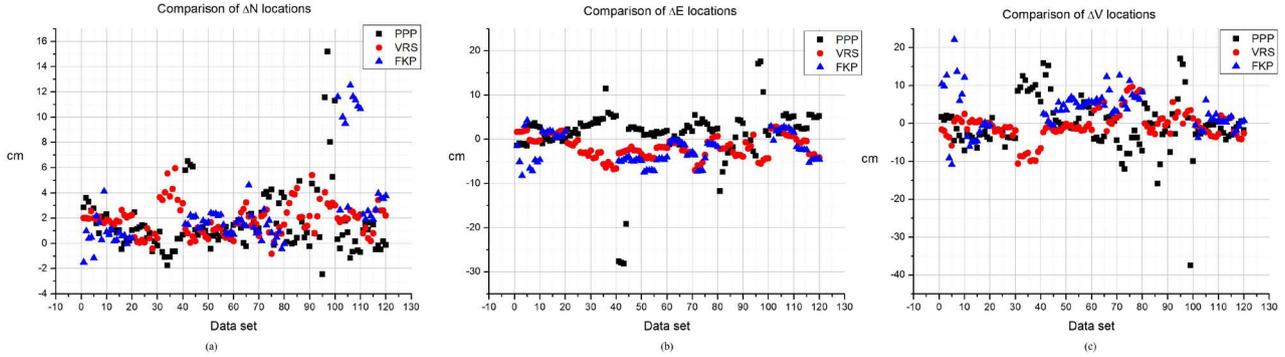


Fig. 3. First geodetic survey result.

Table 2. First geodetic survey plan and method.

Site name	1 st survey		
	Date	Point	Method
Yangju	2020.03.30		VRS, FKP, PPP, RAW
Gwangju	2020.02.24		VRS, PPP, RAW
Jeju	2020.03.16		VRS, FKP, PPP, RAW
Seogwipo	2020.03.15	Mark, CMGL	VRS, FKP, PPP, RAW
Yeongdo	2020.02.23		VRS, PPP, RAW
Ulleung	-		-
Yangyang	2020.03.20		VRS, FKP, PPP, RAW

Table 3. First geodetic survey data set.

Site name	Data set no.	Detailed data set order
Yangju	1 ~ 20	
Gwangju	21 ~ 40	
Jeju	41 ~ 60	1st to 5th data: Mark of Ant. P
Seogwipo	61 ~ 80	6th to 10th data: CMGL of Ant. P
Yeongdo	81 ~ 100	11th to 15th data: Mark of Ant. I
Ulleung	-	16th to 20th data: CMGL of Ant. I
Yangyang	101 ~ 120	

치되어야 CHTP가 설치된다. 이에 따라 1차 측량은 각 사이트 기초 공사가 완료된 2020년 2~3월 중에 Mark와 CMGL 기준점에 대하여 수행하였으며, 2차 측량은 GPS 안테나 장착을 위한 강관 주 및 브라켓 설치가 완료된 후인 2020년 5월 중에 CHTP를 대상으로 수행하였다.

Table 4. Second geodetic survey plan and method.

Site name	2 nd survey		
	Date	Point	Method
Yangju	2020.05.05	CHTP	VRS, FKP, RAW
Gwangju	2020.05.08	Mark, CHTP	VRS, FKP, RAW
Jeju	2020.05.12	CHTP	VRS, FKP, RAW
Seogwipo	2020.05.13	CHTP	VRS, FKP, RAW
Yeongdo	2020.05.10	Mark, CHTP	VRS, FKP, RAW
Ulleung	2020.05.18~19	Mark, CHTP	Single-RTK, RAW
Yangyang	2020.05.23	CHTP	VRS, FKP, RAW

3. KASS 기준국 측지측량 결과

3.1 1차 기준국 측지측량 결과

1차 기준국 측지측량은 Table 2와 같이 기준국 부대시설 기초 공사가 완료되는 순서대로 Mark와 CMGL 기준점에 대해 VRS, PPP, RAW 방식으로 측지측량을 시작했다. FKP 측량 방식은 동일한 네트워크 RTK 측량 방식인 VRS와 데이터 비교 분석을 위해 서귀포 기준국부터 측정하게 되었으며 측지측량 이후 부대시설 공사진행으로 영도 기준국과 함평 기준국에 대해서는 FKP 측량을 수행할 수 없었다. 울릉 기준국은 기한내 부대시설 구축 완료를 위해 1차 측지측량 일정에서 제외되었다. 각각의 기준점에 대해 VRS, FKP, PPP는 RTK fix와 PPP 모드 이후 1분씩 총 5회에 걸쳐 좌표를 획득(60개 좌표 x 5회 = 300개)하였으며 RAW 방식은 2시간동안의 좌표를 획득하였다.

1차 기준국 기준점에 대한 측지측량 완료 후 각각의 방식으로 측정된 좌표의 정확도를 분석하기 위해 비교적 정확한 좌표 측정값 확인이 가능한 온라인 처리방식인 AUSPOS 방식을 선정하고 기준점별 2시간동안 측정된 데이터를 기준으로 좌표 기준을 획득하였다 (Won et al. 2010). Fig. 3은 기준좌표 대비 측량방식에 따른 각각의 N, E, V 좌표차이를 보여주며 데이터 순서에 대한 세부 정보는 Table 3과 같다. Fig. 3에서 보듯이 AUSPOS로 처리된

좌표 대비 PPP 좌표의 변이의 오차가 10 cm를 넘어가는 경우가 많이 발생하여 VRS와 FKP에 비해 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 일반적인 측지측량에서는 높은 수준의 정확도로 판단되지만 4 cm급의 정확도를 보유해야 하는 KASS 시스템 기준점에 대한 측지측량에 적합하지 않은 것으로 판단되어 1차 기준국 기준점 분석결과에서 제외하기로 하였다.

3.2 2차 기준국 측지측량 결과

2차 기준국 측지측량은 1차 기준국 측량방식 중 PPP를 제외하고 VRS, FKP, RAW 측량 방법으로 CHTP를 측량하였고 1차 측지측량시 Mark에 대한 FKP 측지측량이 누락된 함평기준국과 영도기준국에 대해 추가 측지측량을 수행하였다. 세부적인 일정은 Table 4와 같으며 울릉기준국은 지리적 제한으로 국토지리정보원에서 제공하는 네트워크 RTK 서비스 영역에 포함되지 않아 VRS 및 FKP 측지측량 대신 울릉도 상시관측소를 기준점으로 사용한 Single-RTK 방식으로 좌표 측량을 수행하였다.

CHTP 기준점은 GNSS 안테나가 체결되는 부분이며 측지측량에 사용된 GNSS 안테나의 ARP 위치와 동일하다. 따라서 GNSS 안테나 제조사에서 제공하는 APC와 ARP의 물리적 위치 정보

Table 5. Uncertainty values of geodetic survey method (WGS84 position, cm).

Site name	Location	RAW			VRS			FKP			PPP			Single-RTK		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Yangju Ant#1 (P channel)	Mark	1.0	0.9	3.5	1.4	2.3	1.9	2.3	3.2	2.6	0.7	1.4	1.1	-	-	-
	CMGL	1.0	1.0	4.2	1.0	1.3	1.3	5.5	9.0	8.0	2.6	3.0	1.9	-	-	-
	CHTP	0.6	0.5	1.0	0.9	2.5	2.6	1.4	3.9	4.7	-	-	-	-	-	-
Yangju Ant#2 (I channel)	Mark	1.8	1.0	3.2	0.9	1.4	1.0	4.5	2.4	4.0	1.3	2.1	1.6	-	-	-
	CMGL	1.8	1.0	3.3	0.7	1.2	1.0	1.5	1.5	1.3	1.5	1.2	1.0	-	-	-
	CHTP	0.6	0.4	1.0	2.4	3.9	3.4	4.4	2.2	4.1	-	-	-	-	-	-
Gwangju Ant#1 (P channel)	Mark	1.2	0.9	3.0	0.9	1.7	1.4	5.7	5.0	2.8	2.0	1.9	2.5	-	-	-
	CMGL	1.2	0.9	3.8	1.6	1.4	1.3	-	-	-	1.2	2.3	1.6	-	-	-
	CHTP	0.6	0.4	1.0	1.6	2.1	1.5	2.6	3.4	2.9	2.0	1.9	2.5	-	-	-
Gwangju Ant#2 (I channel)	Mark	1.2	0.9	3.8	1.6	2.3	2.1	3.0	2.2	2.2	2.2	2.8	1.7	-	-	-
	CMGL	1.2	0.9	3.8	1.6	3.4	1.8	-	-	-	5.6	4.2	1.7	-	-	-
	CHTP	0.6	0.4	1.1	3.5	3.1	2.3	3.6	3.8	2.7	-	-	-	-	-	-
Jeju Ant#1 (P channel)	Mark	1.4	0.9	3.1	1.2	1.2	0.7	1.0	2.5	1.1	1.2	1.8	1.4	-	-	-
	CMGL	1.5	1.0	3.5	0.7	2.1	0.6	1.3	1.5	1.2	1.7	2.6	1.9	-	-	-
	CHTP	0.6	0.4	1.0	0.7	2.0	1.3	1.4	2.3	1.3	-	-	-	-	-	-
Jeju Ant#2 (I channel)	Mark	1.3	1.0	3.4	0.8	0.9	0.8	1.1	1.4	1.2	16.1	19.6	9.1	-	-	-
	CMGL	1.3	0.9	3.3	0.9	1.1	1.0	1.2	1.1	0.6	1.2	1.0	0.9	-	-	-
	CHTP	0.6	0.4	1.0	2.7	6.1	8.4	1.8	4.2	2.1	-	-	-	-	-	-
Seogwipo Ant#1 (P channel)	Mark	1.3	1.1	3.9	1.1	1.2	2.1	1.4	1.4	2.2	1.4	2.0	1.9	-	-	-
	CMGL	1.3	1.1	4.0	1.6	2.4	1.1	4.8	3.1	6.8	2.7	2.9	3.2	-	-	-
	CHTP	0.7	0.5	1.2	1.2	1.1	0.8	0.9	1.0	0.8	-	-	-	-	-	-
Seogwipo Ant#2 (I channel)	Mark	2.2	1.3	6.9	6.1	3.7	2.0	7.7	4.2	3.2	3.8	3.1	2.0	-	-	-
	CMGL	1.6	0.9	3.3	1.6	2.0	1.2	0.8	1.5	1.2	3.2	3.4	2.4	-	-	-
	CHTP	0.6	0.5	1.2	1.1	0.7	0.7	1.8	1.7	1.1	-	-	-	-	-	-
Yeongdo Ant#1 (P channel)	Mark	1.6	1.0	4.4	1.3	2.4	0.6	2.9	2.6	2.9	4.1	7.0	3.0	-	-	-
	CMGL	1.2	0.9	2.9	1.0	1.4	1.1	-	-	-	11.1	6.4	4.2	-	-	-
	CHTP	0.6	0.4	1.0	3.8	3.6	5.5	1.3	2.0	2.0	-	-	-	-	-	-
Yeongdo Ant#2 (I channel)	Mark	1.4	1.7	6.7	4.0	6.3	1.7	2.2	2.6	4.4	8.1	15.2	5.7	-	-	-
	CMGL	1.5	1.9	8.2	2.2	1.9	1.3	-	-	-	28.1	14.9	26.5	-	-	-
	CHTP	0.6	0.5	1.0	1.6	1.5	0.9	0.7	1.2	2.5	-	-	-	-	-	-
Ulleung Ant#1 (P channel)	Mark	3.8	2.6	9.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.0	1.8	2.5
	CMGL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CHTP	0.7	0.5	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.4	1.4	1.9
Ulleung Ant#2 (I channel)	Mark	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.6	2.9	2.1
	CMGL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CHTP	0.7	0.5	1.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8	1.0	0.9
Yangyang Ant#1 (P channel)	Mark	1.4	1.0	3.9	1.3	1.4	1.3	0.7	1.1	1.0	1.3	1.6	1.7	-	-	-
	CMGL	1.3	1.0	4.1	1.0	0.8	1.1	1.1	1.5	1.8	1.7	1.7	1.4	-	-	-
	CHTP	0.6	0.5	1.2	1.0	1.4	2.1	1.2	2.7	3.3	-	-	-	-	-	-
Yangyang Ant#2 (I channel)	Mark	7.3	1.4	5.4	1.0	0.5	1.1	0.9	1.3	0.9	1.5	1.2	1.5	-	-	-
	CMGL	7.3	1.4	5.3	1.2	1.2	1.4	1.6	1.4	2.2	1.0	1.4	1.7	-	-	-
	CHTP	0.7	0.5	1.2	1.6	1.6	1.2	1.2	1.2	3.4	-	-	-	-	-	-

를 기준으로 CHTP를 계산했다. CHTP에 대한 VRS 및 FKP 좌표는 RTK fix 후 총 300개의 획득된 데이터 평균값으로 산출하였으며 RAW 방법은 24시간 동안 획득된 데이터를 AUSPOS 서비스에 입력하여 획득하였다. 또 한 울릉기준국 Mark 좌표는 Single-RTK 방식으로 4시간동안 수집된 데이터를 기반으로 좌표를 획득하였으며, Table 5는 각 기준점 좌표에 대한 2-sigma uncertainty 값을 보여준다. 최종적으로 기준국 소프트웨어에 설정된 기준국 APC 좌표는 3가지 방식에 의해 측정된 CHTP 기준점 좌표값 중 2-sigma uncertainty가 작은 RAW 방법을 통해 획득된 좌표에 실제 장착된 안테나의 APC 보정값을 적용하여 APC 좌표를 획득하였고 SAT#1 수행을 위한 좌표로 사용하였다.

3.3 기준국 안테나 정밀 좌표 유지보수 계획

시스템 시험 검증 기간 및 운영 기간 동안의 안테나 정밀 좌표

유지보수를 위해서는 다음과 같은 사항들을 고려하여야 한다.

- 시스템 운영 성능 저하 없는 좌표 산출
- 좌표 산출 정확도 4 cm (2σ) 만족
- 자원 투입 최소화
- 좌표 산출 주기

앞 절에서 설명된 세 가지 방법 중 VRS와 FKP를 적용하기 위해서는 기존에 설치되어 있는 KASS 기준국 안테나를 제거하고 VRS 또는 FKP 용 안테나 및 수신기를 설치하여야 한다. 이 경우 KASS 기준국 각각에 대한 측량을 번갈아 가면서 수행하더라도 어느 정도의 항법 성능 저하는 불가피하므로 KASS 운영 성능의 저하가 발생하게 된다. 하지만 RAW 방법을 적용할 경우 기준국에서 지속적으로 수집된 데이터를 변환만 하면 그대로 활용할 수 있으므로 KASS 성능에 전혀 영향을 미치지 않는다.

좌표 산출 정확도 측면에서는 앞 절에서 확인한 바와 같이

RAW 방법이 VRS 및 FKP에 비해 안정적인 정확도로 좌표를 산출해 주기 때문에 가장 적절한 방식으로 판단된다.

VRS와 FKP 기법을 적용하기 위해서는 좌표 측량에 필요한 전용 장비를 전국 7개 사이트 총 14개의 안테나에 모두 설치하여야 한다. 이를 위해서는 최소 1~2명의 인력이 최소 8~9일 이상 투입되어야 하므로 인력, 비용, 시간 측면의 자원을 모두 상당량 소모하게 된다. 이에 반하여 RAW 기법을 적용하게 되면 운영유지보수자가 이미 저장되어 있는 데이터 파일을 변환하여 데이터 처리 사이트에 업로드 하게 되면 좌표 산출이 완료되기 때문에 1명의 인력이 1~2일 정도를 투입하면 정밀 좌표 획득이 가능하다.

국내 지각 변동 경향에 대한 연구 사례를 보면 한반도 지각은 매년 3 cm 정도의 이동이 발생한다고 알려져 있으며 (NII 2007, Kim et al. 2016), 이것만 고려한다면 최소 6개월에 한 번의 정밀 측량은 필요할 것으로 판단된다. 하지만 그 외에 지진과 같은 비규칙적인 지각 변동 활동 또는 안테나 설치 구조물의 기초 및 구조물 자체의 변형 등 예측하지 못한 변경 사항이 발생할 수도 있으므로, KASS 운영유지보수 기간에는 매월 1회씩 모든 기준국 안테나의 정밀 좌표를 측정하는 것으로 절차를 수립하였다. 이러한 주기로 측량을 수행하기 위해서는 앞에 언급된 대로 자원 투입을 최소화할 수 있는 RAW 기법을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

위의 고려사항들을 종합하여 KASS 기준국 안테나 별로 매월 1회 24시간 동안 수집된 기준국 측정치를 RAW 기법을 이용하여 처리함으로써 획득한 정밀 좌표를 안테나 좌표 유지보수에 적용하는 것으로 절차를 수립하였다.

이 과정에서 매월 측량한 안테나 APC의 좌표가 기존에 KASS 소프트웨어에 설정된 좌표에서 4 cm 이상의 변화를 나타낼 때에는 정밀 분석을 통하여 실제 안테나 좌표가 변동된 것인지 확인하고, 새로운 좌표로 설정을 업데이트할 예정이다. 이 때, 좌표 변동이 사이트 기초 또는 지각이 변경된 것인지 구조물이 변형된 것인지 판단하기 위하여, Mark 기준점에 대해 3가지의 방식으로 현장 측량을 수행하여 신뢰성과 정확도가 높은 좌표를 획득하고 그 결과에 따라 후속조치를 수행하게 된다.

4. 결론

KASS 시스템 기준국 기준점에 대한 측지측량은 초기 4가지 방식에서 VRS, FKP, Raw data post-processing 3가지 방식으로 수행되었고, AUSPOS를 통해 획득된 CHTP 좌표를 토대로 기준국 안테나의 APC 좌표를 획득하였으며, APC의 값은 SAT#1 수행을 위한 기준 좌표로 사용되었다.

기준국 기준점 좌표는 KASS 시스템 운용준비 단계를 거쳐 서비스가 제공되는 15년동안 주기적으로 좌표를 측정 또는 분석하여 기준점 좌표변화 유무를 지속적으로 확인해야 한다. 특히 국내 지각 변동 추이를 비추어 보면 연 2회의 정밀 측량이 필요하지만 지진, 자연재해, 물리적 접촉에 의한 기준점 훼손이 발생하여 좌표 변화가 예상된다면 정밀 측지측량을 수행하고 초기 좌표와 비교하여 좌표 변화유무를 확인해야 한다. 하지만 기준점 정밀좌표 측정은 KASS 성능에 영향을 미치지 않는 방향으로 유지보수

를 계획해야 하므로 향후 기준점 유지보수에 있어서 Mark는 현장 측정, APC 좌표는 기준국에 수신되는 GPS 신호 분석 및 변환을 통해 RAW 방식으로 측지측량 업무를 수행하면 된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 국토교통부 위성항법보정시스템 안전운용기술개발사업 (22KASS-C164208-02)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, B.S.; methodology, B.S. and H.H.; validation, H.H. and H.J.; formal analysis, H.H. and H.J.; investigation, H.H. and H.J.; resources, H.H.; data curation, H.H.; writing—original draft preparation, H.H.; writing—review and editing, H.J., Y.Y and B.S.; visualization, H.H.; supervision, B.S.; project administration, B.S.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Jeong, H., Jang, H., Kim, K., Lee, J., & Lee, B. 2021, SAT#1 (Preliminary Integration) test results of KASS system, JPNT, 10, 145-151. <https://doi.org/10.11003/JPNT.2021.10.2.145>
- Kim, D., Park, K.-D., Ha, J., Sohn, D.-H., & Won, J. 2016, Geodetic Analysis of Post-Seismic Crustal Deformations Occurring in South Korea due to the Tohoku-Oki Earthquake, KSCE Journal of Civil Engineering, 20, 2885-2892. <https://doi.org/10.1007/s12205-016-0086-4>
- Lim, C. & Park, B. 2020, Performance comparison of VRS and FKP network RTK user according to baseline length, JANT, 24, 540-548. <https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.540>
- National Geographic Information Institute 2007, Research of the Korean Peninsula, No. 1-1500714-000054-01, Ministry of Construction & Transportation
- Park, K.-D. & Won, J. 2006, Comparison of calibration models for GPS antenna phase center variations, JKSGPC, 24, 319-326.
- Plag, H.-P., Bockmann, L., Charlot, B., Brocard, D., Berenger, X., et al. 2007. Determination and maintenance of navigation systems reference frames: The EGNOS

example. In Proc. 1st Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, Toulouse, France, 1-4 Oct 2007.

Won, J.-H., Son, E.-S., & Park, K.-D. 2010, Coordinate accuracy comparison of online GPS data processing services, KOGGIS, 18, 31-39



Hwanho Jeong received the B.S. and M.S. degrees in Aerospace and Engineering from Chungnam National University in 2008 and 2010, respectively. His research interests include GNSS/SBAS and Unmanned Aerial Vehicle (UAV).



Hyunjin Jang received the B.S. and M.S. degrees in Aerospace and Engineering from Chungnam National University in 2008 and 2011, respectively. His research interests include GNSS/SBAS and SBAS ground system.



Youngsun Yun is a senior researcher in the SBAS System Engineering & Integration Team, SBAS Program Office, at Korea Aerospace Research Institute. He received his B.S., M.S., and Ph. D. degrees in mechanical and aerospace engineering from Seoul National University, Seoul, South Korea, in 2000, 2002, and 2007, respectively. He was a visiting researcher at the Stanford University GPS Laboratory in 2004 and has been a senior software engineer at Samsung Electronics since 2007. He joined Korea Aerospace Research Institute in 2010 and is currently involved in the Korean SBAS (KASS; Korea Augmentation Satellite System) development program. His research interests include GNSS ground- and space-based augmentation system implementation and the related algorithm development and safety assessment regarding certification for aviation.



ByungSeok Lee received the B.S. degree in Electric and Electrical Engineering, the M.S. degree and the Doctor's degree in Electrical and Computer Engineering from University of Seoul, Seoul, Korea, in 2002, 2009, 2015, respectively. He has been conducting research related to a Global Navigation Satellite System (GNSS) including the Satellite Based Augmentation

System (SBAS) in Korea Aerospace Research Institute (KARI) since 2011. He's currently in charge of Korea Augmentation Satellite System (KASS). His research interests are in the areas of Optimal & Robust Control, Swarm Control and Swarm Intelligence, GNSS.