

GNSS 안테나 위상중심변동에 레이돔이 미치는 영향 Influence of Radome Types on GNSS Antenna Phase Center Variation

윤성현¹⁾ · 이흥규²⁾

Yun, Seonghyeon · Lee, Hungkyu

Abstract

This paper deals with the impact of a GNSS (Global Navigation Satellite System) antenna radome on the PCV (Phase Center Variations) and the estimated kinematic coordinates. For the Trimble and Leica antennas, specially set up CORS (Continuously Operation Reference Stations) in Korea, the PCC (Phase Center Corrections) were calculated and compared for NONE, SCIS, SCIT, and TZGD radome from the PCV model published by the IGS (International GNSS Services). The results revealed that the PCC differences compared to the NONE were limited to about 1mm in the horizontal component while those of the vertical direction ranged from a few millimeters to a maximum of 7mm. Among the radomes of which PCV were compared, the SCIT had the most significant influence on the vertical component, and its GPS (Global Positioning System) L2 and L2 PCC (Phase Center Corrections) had opposite direction. As a result of comparing the kinematic coordinates estimated by the baseline processing of 7 CORSs with an application of the PCV models of the various radomes, the SCIS which was actually installed at CORS in Korea showed 3.4mm bias, the most substantial impact on the ellipsoidal height estimation whereas the SCIT model resulted in relatively small biases.

Keywords : GNSS (Global Navigation Satellite System) Antenna, Radome, PCV (Phase Center Variations), PCC (Phase Center Corrections), Ellipsoidal Height

초 록

본 연구는 위성기준점 안테나 보호를 위해 설치한 레이돔이 GNSS (Global Navigation Satellite System) 안테나 위상중심변동과 정밀 기선해석으로 추정된 동적 좌표에 미치는 영향을 분석하였다. 국내 위성기준점에 설치된 Trimble과 Leica 계열 안테나를 대상으로 레이돔 미설치(NONE)를 포함해 SCIS, SCIT, TZGD에 대한 IGS (International GNSS Services) 변동모형으로부터 위성 신호 입사 방향에 따른 위상중심 변동 보정량을 계산해 그 차이를 비교하였다. 그 결과 NONE을 기준으로 레이돔을 적용한 변동 보정량 차이는 수평 방향에서는 1mm 내외로 제한적이었지만 높이 방향은 수 밀리미터에서부터 최대 7mm까지 나타났다. 비교 대상 레이돔 중 SCIT가 높이 방향 위상중심 변동에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 레이돔 미설치와 비교한 GPS (Global Positioning System) L1과 L2 신호의 보정량 차이 방향이 반대되는 특징을 보였다. 위성기준점 7개소 관측데이터의 기선해석에 각기 다른 레이돔 변동모형 적용으로 동적 좌표를 추정·비교한 결과 최근 위성기준점에 설치한 SCIS가 비교 대상 레이돔 중 가장 큰 영향인 평균 3.4mm 편의를 나타내었다. 반면, IGS 모형 비교에서 레이돔 미설치 대비 높이 방향에 가장 큰 보정량 차이를 나타낸 SCIT 모형은 타원체고 추정에 상대적으로 낮은 평균 1.4mm 편위의 경향을 보였다.

핵심어 : GNSS 안테나, 레이돔, 위상중심변동, 위상중심보정, 타원체고

Received 2020. 01. 29, Revised 2020. 02. 17, Accepted 2020. 02. 24

1) Member, Ph.D. Student, Department Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Graduate School of Changwon National University (E-mail: shyun92@changwon.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Professor, 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

GNSS(Global Navigation Satellite System) 높이측량은 기선해석으로 추정된 타원체고에 지오이드고를 차감해 정표고를 취득하는 것으로 측점 사이 시통(line-of-site)에 영향을 받지 않아 레벨에 의한 직접 수준측량과 비교할 때 비용 대비 효용이 높은 것이 특징이다. 또한, 이 측량은 추정 타원체고와 지오이드고에 기반한 간접 수준측량이므로 정표고 정확도는 그 계산에 사용하는 타원체고 추정과 지오이드 모형의 정확도에 영향을 받는다. 국토지리정보원은 2008~2017년 육상과 2009~2010년 취득 항공 중력자료 그리고 국립해양조사원 선상 중력자료에 기반해 한반도 전역에 대해 절대 정확도 $\pm 2.33\text{cm}$ 수준의 국가 고정밀 지오이드 모형(KNGeoid18)을 구축하였다(NGII, 2018). 반면, GNSS 높이측량에서 타원체고는 기선해석으로 추정하며, 그 정확도는 '상대대류권지연' 그리고 '안테나위상중심변동(PCV: Phase Center Variation)'과 밀접한 관계를 갖는다. 전자는 경험적모형식 적용과 관측데이터의 차분 그리고 미지수로 추정해 그 영향을 줄일 수 있다(Lee, 2018). 이에 반해, 후자는 안테나 자체와 이를 보호하기 위해 설치한 레이돔(radome)에 대해 그 특징이 다르므로 캘리브레이션(calibration)에 의한 모형을 적용해 최소화해야 한다.

Shin *et al.* (2014)은 기지점 표고에 KNGeoid13 모형의 지오이드고를 가산한 보정 타원체고를 통해 수직 기준과 지오이드 모형의 지역적 편의 제거가 가능함을 확인하고, GNSS 높이망 조정으로 관측 시간에 따른 표고 정확도가 신뢰수준 95%에 대해 4~10cm 수준이라 분석하였다. Kim *et al.* (2014)은 방위각과 천정각에 대해 5° 간격으로 제공되는 IGS PCV 모형을 보완하고자 구면 조화함수에 의한 보간법을 제안하고, 이를 통해 최적 차수로 8차를 제시한 바 있다. Lee and Park (2018)은 상용 및 과학기술용 소프트웨어를 활용해 GNSS 관측 시간과 기선장에 따른 타원체고 추정 정확도를 비교하였다. 타원체고 정확도는 관측 시간이 짧고 기선장이 긴 조건에서 상용과 과학기술용 소프트웨어 각각 수십 cm, 수 cm 수준이었으나 8시간 관측자료를 처리해 전자는 2cm, 후자는 1cm 수준으로 향상 가능함을 보였다. Lee (2018)는 위성기준점 88개소에 의한 247개 기선을 구성하고 7일 분량의 데이터를 경험적 모형, 추정 등 대류권 지연 보정 방법별로 처리하여 GNSS 높이측량에서 관측점 사이 표고차와 기선장에 따라 적용할 수 있는 대류권지연 보정 방안을 제안하였다. 이상과 같이 GNSS 높이측량과 관련해 다양한 연구가 수행되었으나 대부분 정확도 최대화를 위한 데이터 취득과 처리에 초점을 맞추고 있으며, Kim *et al.* (2014)은 PCV 모형을 보간해 타원체고 추정 정

확도를 향상하고자 했으나 실제 측위에 미치는 영향에 대한 고찰을 수행하지 못하였다.

GNSS 측량은 전 국토에 고루 분포한 위성기준점을 이용하는 것이 일반적이며, 높이측량에서는 안테나와 함께 레이돔을 동시에 캘리브레이션한 모형을 적용해야 정확도의 최대화가 가능하다. 특히, 국토지리정보원은 이에 대한 중요성을 인식하여 최근 Trimble 계열에 설치한 비캘리브레이션 레이돔을 캘리브레이션한 것으로 대부분 교체했으며, 이에 따라 GNSS 높이측량에서 위성기준점을 포함한 기선해석 시 실제 하드웨어에 부합하는 PCV 모형 적용이 중요해졌다. 본 연구에서는 국토지리정보원 설치 레이돔이 GNSS 안테나 PCV에 미치는 영향을 파악하기 위해 IGS(International GNSS Services) PCV 모형을 이용해 위성신호 취득 방향에 대한 위상중심 변동 보정량(PCC: Phase Center Correction)을 계산해 그 차이를 비교하였다. 이와 함께, 위성기준점 설치 레이돔을 반영하지 못한 PCV 모형 적용이 정밀기선해석의 타원체고 추정에 미치는 영향을 고찰하기 위해 동남권 지역 7개 위성기준점 관측데이터를 처리 분석하였다.

2. GNSS 안테나 위상중심 변동

2.1. 안테나 위상중심 변동

GNSS 측량에서 3차원 좌표는 '안테나 참조점(ARP: Antenna Reference Point)'에 대한 것으로 추정해야 하나, 실제 위성 신호는 Fig. 1과 같이 '순간위상중심(IPC: Instant Phase Center)'으로 취득된다. IPC는 위성 신호 주파수와 방위각 그리고 천정각에 따라 변하기 때문에 '안테나 위상중심변동(PCV)'이 발생한다. 따라서, ARP에 대한 3차원 좌표 결정을 위해서는 IPC 취득 관측데이터에 '위상중심변동보정(PCC)'이 이루어져야 한다. PCV는 동일 안테나를 사용하는 단기선 상대측위에서는 그 영향이 소거되나, 기선이 길어지거나 다른 형식의 안테나를 사용할 때에는 타원체고 추정에서 중요한 오차 요인이 될 수 있다(Seeber, 2003). 레이돔(radome)은 강수·먼지 등으로부터 안테나 보호를 위해 설치하는 구조물로 GNSS 위성기준점에 일반적으로 설치하고 있다. 이때 레이돔은 PCV에 영향을 미치게 되며, 이를 반영한 위상중심변동보정을 하지 않을 때는 높이 방향에 편이가 발생할 수 있다.

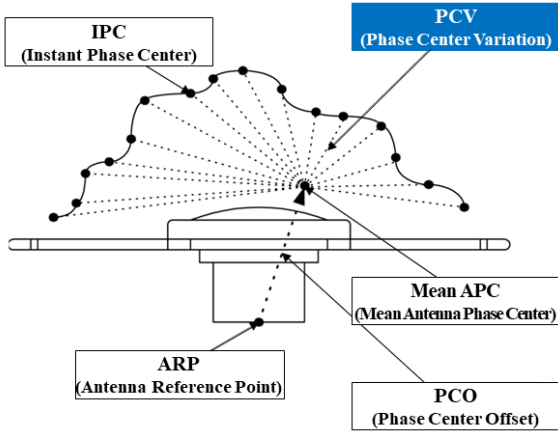


Fig. 1. The geometric relationship among ARP, IPC, PCO and PCV

2.2. 안테나 캘리브레이션 모형

GNSS 안테나 캘리브레이션은 위성 신호 입사 방향에 따른 PCV를 결정하는 것으로 상대와 절대 방식으로 구분하나, IGS는 2006년 11월부터 절대방식을 채택하고 있다(Dawidowicz, 2013). 이 방식은 프로그래밍한 로봇팔을 이용하는 것과 무반향실(anechoic chamber)에서 생성하는 반송파에 의한 것이 있다(Baire *et al.*, 2012). 전자는 실제 현장에서 위성이 전송하는 신호를 이용해 캘리브레이션을 수행하므로 안테나 설치대와 수풀 등 주변 환경을 고려한 실제와 가장 가까운 PCV 모형화가 가능하지만, 후자는 무반향실 내부에서 시뮬레이터가 생성하는 신호를 이용하므로 실제 환경에서 유발되는 오차의 영향을 반영할 수 없다는 제한이 있다. 또한, 안테나 캘리브레이션은 평균(mean)과 개별(individual) PCV로 나눌 수 있으며, 전자는 동일한 형식의 안테나와 레이돔에 대해 여러 대를 캘리브레이션한 후 평균값을 결정한 것이나, 후자는 동일한 형식이라 할지라도 실제 사용하는 장비를 별도로 캘리브레이션하는 것이다. 동일 안테나를 캘리브레이션 하더라도 높이 방향에 수 mm~cm 수준의 차이가 발생할 수 있음에 유의해야 한다(Schmitz *et al.*, 2008).

IGS는 GNSS 측량에 주로 사용하는 안테나에 대한 평균 PCV 모형을 레이돔 타입과 위성 신호에 따라 구분하여 제공한다. PCV 모형에는 남북, 동서, 높이 방향으로 구분한 위상중심 오프셋(PCO: Phase Center Offset)과 위성 신호 주파수 그리고 입사 방향(방위각과 천정각)에 따른 PCV 값을 mm 단위로 포함하고 있다. PCV는 행렬 형태로 방위각(행)과 천정각(열)에 대한 IPC와 평균 APC 사이 거리(Fig. 2)로 주어진다. Fig. 2는 안테나 PCO, PCV, ARP 그리고 IPC 사이 기하 관계

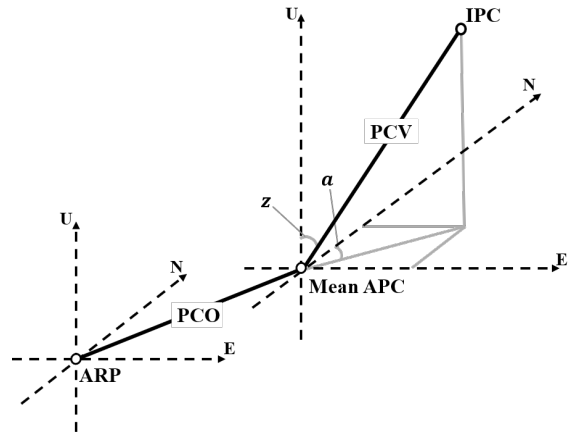


Fig. 2. The geometric relationship among ARP, IPC and PCV on the local level coordinate frame

를 지역 수준 좌표계에 대해 나타낸 것으로 이를 고려할 때 위 성분별 PCC는 Eq. (1)을 이용해 계산할 수 있다.

$$PCC_n = PCO_n + PCV(a, z) \cdot \sin(z) \cdot \cos(a) \quad (1a)$$

$$PCC_e = PCO_e + PCV(a, z) \cdot \sin(z) \cdot \sin(a) \quad (1b)$$

$$PCC_u = PCO_u + PCV(a, z) \cdot \cos(z) \quad (1c)$$

Where, a and z denote azimuth and zenith angle, respectively. The lower subscript is the component of the local level coordinates.

2.3. 위성기준점 안테나 현황

국토지리정보원은 GNSS를 활용한 국가 측지기준프레임 유지·관리와 고정밀 측위 지원을 위해 62개 위성기준점을 설치·운영 중이다. 2019년 12월 기준 위성기준점 안테나와 레이돔 종류 및 개수를 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 Trimble 계열 안테나 중 TRM59800.00과 TRM59800.80은 IGS PCV 모형이 동일해 TRM59800.00으로 통일해 나타내었다(NGS, 2020). Table 1에 따르면 46개 기준점에 Trimble 계열, 14개 기준점에 Leica 계열 그리고 나머지 2개소에 Harxon 계열 안테나가 설치되어 있다. 국토지리정보원은 최근 레이돔이 PCV에 미치는 영향을 인식하여 비캘리브레이션 레이돔을 SCIS로 대부분 교체하였다.

Table 1. The types of antennas and radomes equipped on NGII CORS in December, 2019

Antenna	Radome	The number
TRM59800.00	SCIS	45
TRM55971.00	NONE	1
LEIAR25.R3	LEIT	5
LEIAR25.R4	LEIT	9
HXCCGX601A	HXCS	2

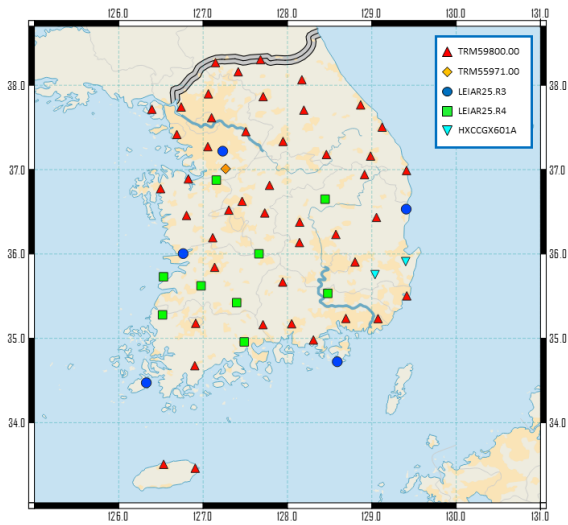


Fig. 3. Types of GNSS antennas installed on NGII CORS in December, 2019

3. IGS 안테나 모형 차이 분석

3.1. 개요

GNSS 정밀 측위에서 PCV 모형이 타원체고 추정에 미치는 영향 분석에 앞서 IGS PCV 모형 자체를 비교해 레이돔에 따른 PCC 차이를 고찰하였다. PCC 비교에 활용한 PCV 모형은 국토지리정보원 위성기준점 안테나 5종 중에서 최근 설치된 위성기준점 경주(GYJU)와 포항(POHG)의 안테나 HXCCGX601A를 제외한 4종과 이들에 대해 IGS에서 제공하는 레이돔별 모형으로 Table 2에 나타낸 것과 같다. 안테나

HXCCGX601A는 PCV 모형으로 NONE과 HXCS가 제공되나, 이 중 전자가 상대 방식으로 캘리브레이션 되어 모형 자체 비교에 적절하지 못해 제외하였다. IGS PCV 모형으로부터 추출한 PCO와 PCV를 Eq. (1)에 적용해 위성 신호종류와 입사 방향에 따른 PCC 산출 후 동일 안테나의 각기 다른 레이돔 사이 차이를 계산하였다.

3.2. Trimble 계열 안테나

Trimble 계열 비교 대상 안테나는 위성기준점 현황에서 살펴본 바와 같이 TRM59800.00과 TRM55971.00 2가지이며, IGS는 전자와 후자에 대해 각각 3가지, 2가지 레이돔에 대한 PCV 모형을 제공한다. Fig. 4는 PCC 비교 결과 중 GPS L1 주파수에 대한 TRM59800.00 NONE와 SCIT 모형의 높이 방향 PCC 차이를 신호 수신 방향에 따라 도시한 것이다. 전체적으로 방위각에 비해 천정각 변화에 PCC 차이가 민감하게 변하는 경향을 보이며, 특히 천정각 30° 주변에서 그 차이가 가장 크다. 천정각이 커질수록 이에 대한 변화의 폭이 줄어드나 방위각 변화에 의한 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 높은 천정각 즉, 낮은 고도각에서 취득되는 위성 신호가 다중경로, 대류권 지연 등에 상대적으로 큰 영향을 받기 때문으로 판단된다.

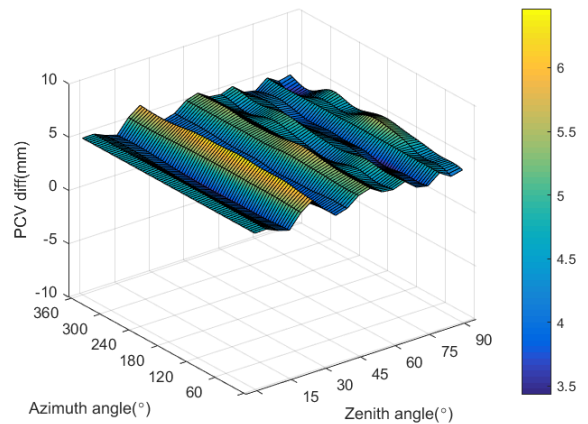


Fig. 4. 3 dimensional PCC differences of TRM59800.00 NONE and SCIT (GPS L1-frequency)

Table 2. Types of GNSS antennas and radomes to be compared in this study

Antenna	TRM59800.00	TRM55971.00	LEIAR25.R3	LEIAR25.R4
Radome	NONE, SCIS, SCIT	NONE, TZGD	NONE, LEIT	NONE, LEIT, SCIT

Table 3. Statistical summary of 3 dimensional PCC differences of Trimble GNSS antenna (unit: mm)

Antenna	Radome	Frequency	North	East	Up
TRM59800.00	NONE-SCIS	L1	0.38±0.61	0.51±0.61	3.07±0.82
		L2	-0.02±0.29	0.15±0.29	1.31±0.35
	NONE-SCIT	L1	-0.28±0.46	-0.18±0.46	4.62±0.64
		L2	-0.90±0.30	0.32±0.30	-0.94±0.41
	SCIS-SCIT	L1	-0.66±0.45	-0.69±0.45	1.55±0.59
		L2	-0.88±0.39	0.17±0.39	-2.25±0.49
TRM55971.00	NONE-TZGD	L1	0.16±0.30	-0.02±0.30	1.77±0.41
		L2	0.15±0.18	-0.23±0.18	0.23±0.24

Trimble 계열 안테나별 레이돔에 따른 PCV 모형의 PCC 차이를 좌표 방향별로 계산하고 그 통계값을 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다. 수평 방향 PCC 차이는 1mm 미만이지만 높이 방향에서 상대적으로 큰 차이를 보이며 때에 따라 5mm 수준에 달하였다. 표준편차 역시 높이 방향에서 크게 나타난 것을 확인할 수 있으며, GPS L1과 L2 반송파에 대한 통계량을 비교할 때 전자의 표준편차가 크게 계산되어 해당 데이터가 레이돔에 상대적으로 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. TRM59800.00에 대한 결과 중 SCIS와 SCIT 비교에 비해 NONE과 이들을 비교할 때 높이 방향에서 상대적으로 큰 PCC 차이를 보여 레이돔을 설치한 위성기준점을 기선해석에 사용할 때 이를 반영한 PCV 모델 적용의 중요성을 인식할 수 있다. 이와 함께, 레이돔 NONE-SCIT와 SCIS-SCIT의 GPS L1과 L2의 높이 방향 PCC 차이 부호가 서로 상반됨에 주목할 필요가 있다.

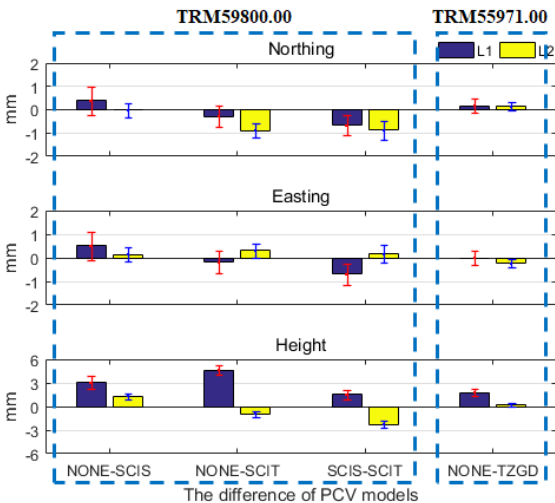


Fig. 5. Averages and standard deviations of Trimble antenna's PCC

3.3. Leica 계열 안테나

국토지리정보원 위성기준점에 설치된 Leica 계열 안테나는 LEIAR25.R3과 LEIAR25.R4로 각각 2가지, 3가지 레이돔 타입에 대한 PCV 모형이 제공된다. Fig. 6은 GPS L2 주파수에 대한 LEIAR25.R4 LEIT와 SCIT 모형의 높이 방향 PCC 차이를 도시한 것이다. Fig. 4에 나타난 Trimble 계열 PCC 차이와 유사하게 천정각에 변화에 더욱 민감하며, 천정각이 커질수록 방위각에 따른 변동 역시 증가하였다. 천정각 80~90° 사이에서 가장 큰 차이를 보이며 75°, 50° 그리고 30° 부근에서도 cm 수준에 달하는 것을 알 수 있다.

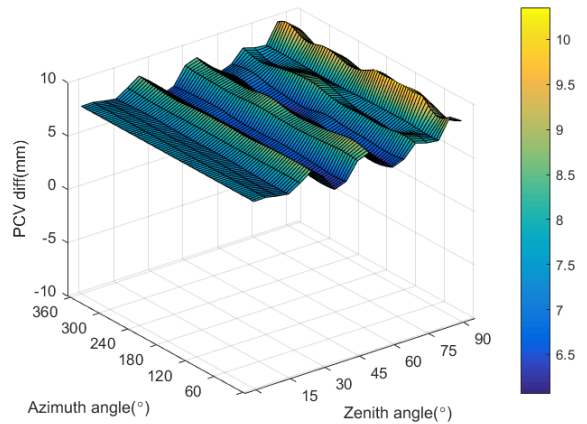


Fig. 6. 3 dimensional PCC differences of LEIAR25.R4 LEIT and SCIT (GPS L2-frequency)

Leica 계열 안테나와 레이돔에 따른 PCV 모형의 천정각과 방위각에 대한 PCC 산출 후 안테나별 레이돔 모형 사이 차이를 계산하고 그 통계값을 Table 4와 Fig. 7에 나타내었다. 수평 방향 PCC 차이는 1mm 내외에 불과하나 높이 방향에서 최대

Table 4. Statistical summary of 3 dimensional PCC differences of Leica GNSS antenna (unit: mm)

Antenna	Radome	Frequency	North	East	Up
LEIAR25.R3	NONE-LEIT	L1	0.73±0.36	0.17±0.36	-0.35±0.51
		L2	0.25±0.18	0.24±0.18	1.07±0.24
LEIAR25.R4	NONE-LEIT	L1	0.06±0.14	0.01±0.14	-0.34±0.20
		L2	0.11±0.15	-0.03±0.15	-0.25±0.20
	NONE-SCIT	L1	-0.17±1.07	1.22±1.07	-5.62±1.33
		L2	0.13±0.71	1.28±0.71	7.43±0.96
	LEIT-SCIT	L1	-0.23±1.05	1.21±1.04	-5.28±1.26
		L2	0.02±0.58	1.31±0.58	7.68±0.79

7.7mm 달하였으며, 이는 정밀 타원체고 추정에서 정확도에 영향을 미칠 수 있는 수준이다. 앞서 비교한 결과와 같이 높이 방향 표준편차가 수평 방향에 비해 크게 계산되었고, L1 반송파에 대한 PCC 차이의 정밀도가 L2에 비해 낮게 계산되어 해당 관측데이터가 레이돔 타입에 상대적으로 민감한 것을 확인할 수 있다. 특히, Trimble 계열 PCC 비교 결과와 달리 SCIT 모형을 PCC 차이 계산에 포함할 때 그 통계량이 비교적 매우 크게 계산되어, LEIAR25.R4가 설치된 위성기준점을 사용한 높이 측량 시 PCV 모형 적용에 세심한 주의가 필요할 것이다. Leica 계열 안테나에서 LEIAR24.R4의 NONE-LEIT를 제외하고는 레이돔 형식에 따른 GPS L1과 L2의 높이 방향 PCC 차이의 부호가 서로 반대이며, 두 안테나에 관한 결과에서 동일한 레이돔(LEIT)을 적용하더라도 안테나에 따라 PCV에 미치는 영향은 미소하게 달라지는 경향을 보였다.

4. 정밀 기선해석에서 PCV 모형 영향 분석

IGS PCV 모형 자체를 비교해 적용하는 모형에 따라 높이 방향에서 수 밀리미터에서 센티미터 수준의 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 차이는 GNSS 정밀 기선해석에서 타원체고 추정 정확도를 저하시키는 요인으로 작용할 수 있어 PCV 모형이 실제 정밀기선해석에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

본 연구의 대상 기준점은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 부산, 경남-북 일원에 위치한 국토지리정보원 5개소, 한국천문연구원과 국립해양측위정보원 각각 1개소이며, GNSS 데이터 통합센터(<http://gnssdata.or.kr>)로부터 이들의 2017년 9월 11일 GPS 시간 기준 24시간 관측데이터(저장 간격 30초)를 RINEX(Receiver Independent Exchange Format) 형식으로 취득하였다. 대상 안테나는 Table 1과 같이 국토지리정보원 위성기준점 대부분을 차지하는 Trimble 계열의 TRM59800.00와 TRM55971.00이었다. 취득 데이터는 과학기술용 GNSS 자료처리 소프트웨어 Bernese를 활용해 Fig. 9에 나타난 절차에 따라 처리하였으며, 이때 동일 안테나에 대해 레이돔 형식에 따른 PCV 모형을 각기 다르게 적용하였다. PCV 모형이 동적 측위에 미치는 영향을 살펴보기 위해서는 높이 방향 고 정밀 결과 산출이 필요했으며, 이에 따라 정적모드 처리로 대류권 지연 추정 후 동적모드에서 이를 적용한 초기좌표 구속 재처리를 통해 좌표를 추정하였다(Cho and Lee, 2016). 동적 좌표 추정에서는 TEGN과 CHWN을 각각 기지점으로 고려했으며, Table 5와 같이 동일 안테나에 대해 각기 다른 레이돔의 PCV 모형을 적용해 미지점 좌표 6세트를 추정하고 그 차이를 계산하였다.

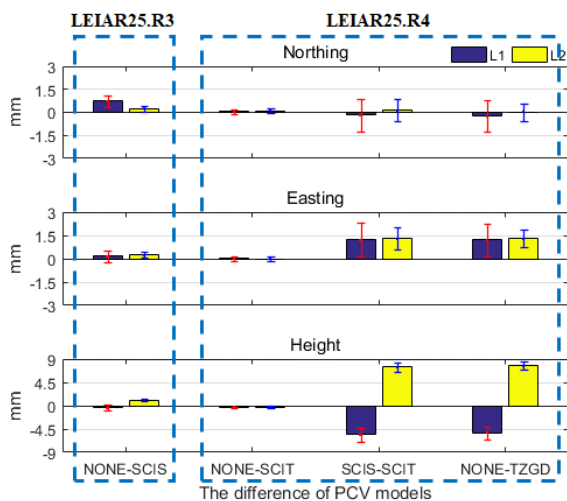


Fig. 7. Averages and standard deviations of Leica antenna's PCC

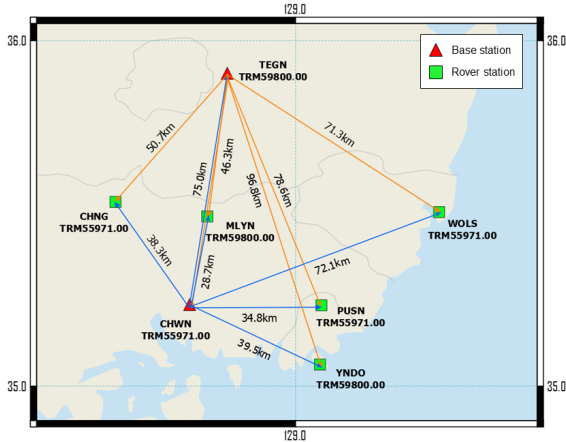


Fig. 8. An experimental GNSS network of baseline processing

Table 5. GNSS antennas and radomes considered in baseline processing

Station	CHWN	TEGN
Antenna	TRM55971.00	TRM59800.80
Radome	NONE, TZGD	NONE, SCIS, SCIT

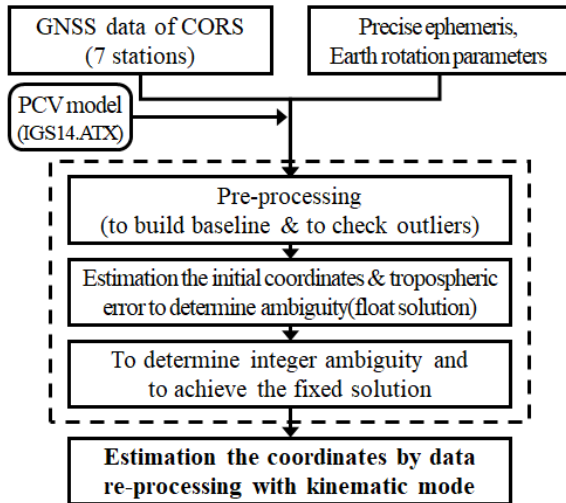


Fig. 9. A general procedure of GNSS baseline processing

4.1. 안테나 TRM59800.00에 대한 결과

기지점 TEGN의 안테나 TRM59800.00에 대해 레이돔 형식 NONE, SCIT 그리고 SCIS를 적용해 추정된 3차원 동적좌표 차이의 전형적인 예를 미지점 PUSN에 대해 Fig. 10에 나타내었다. IGS 모형 차이 분석에 의해 예상한 바와 같이 높이 방향에 큰 편의를 확인할 수 있다. 또한, SCIS와 SCIT 적용 결과 차이보다 SCIS와 NONE에 대한 것이 큰 것으로 나타났다. 하지만 SCIT와 NONE 모형을 적용한 추정좌표 차이는 IGS 모형 자체 비교 결과와 달리 SCIT와 SCIS 차이와 유사한 크기로 발생했으며, 이는 GPS L1과 L2 높이 성분 PCC 차이의 부호가 달라 그 영향이 일부 상쇄됨에 의한 것으로 보여진다(Table 3).

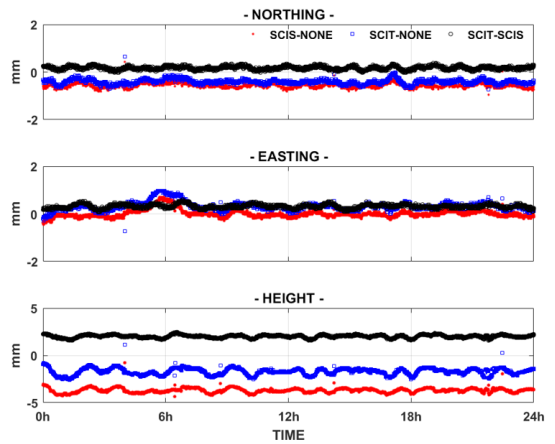


Fig. 10. Estimated coordinate differences of PUSN about TRM59800.00 antenna (i.e., TEGN) with NONE, SCIS, SCIT radome

Table 6, Table 7 and 8은 기지점 PCV 모형에 따른 6개 미지점 추정좌표 차이에 대한 통계량을 정리한 것이며, Fig. 11은 평균과 표준편차를 오차막대로 도시한 것이다. PCV 모형에 따른 수평 방향 좌표 차는 평균적으로 0.5mm 이내로 무시 가능한 수준이나, 높이 방향에서는 1.3~3.4mm 범위에서 편이가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 레이돔을 설치하지 않은 안테나에 대해 부적합한 PCV 모형을 적용하거나 혹은 그 반대 상황에서 기선 해석을 수행한 경우에 해당하는 NONE과 SCIS 그리고 SCIT를 각각 적용해 추정한 타원체고를 비교할 때(Tables 6 and 7), SCIS가 PCV에 보다 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 PCV 모형 비교에서와 다소 차이가 있는 것으로 SCIT의 L1과 L2 주파수 높이 방향 PCC 부호가 상이함에 따른 상쇄 효과로 보인다. 또한, 레이돔을 설치한 안테나에 대해 해당 레이돔을 반영하지 않은 PCV 모형 적용 상황(Table 8)을 고려한 SCIS와 SCIT에 의한 추정 타원체고 차이는 약 2mm 수준이었다.

Table 6. Statistical summary of the coordinate differences estimated by applying the TRM59800.00 models with SCIS and NONE radome (unit: mm)

Station	Northing	Easting	Height
CHNG	-0.1±0.1	-0.8±0.1	-2.9±0.3
CHWN	-0.6±0.1	-0.5±0.1	-3.4±0.2
MLYN	-0.2±0.1	-0.5±0.2	-3.3±0.3
PUSN	-0.6±0.1	0.0±0.2	-3.7±0.2
WOLS	-0.2±0.1	0.4±0.2	-3.6±0.2
YNDO	-0.9±0.1	0.0±0.2	-3.7±0.2
Average	-0.43±0.10	-0.23±0.17	-3.43±0.23

Table 7. Statistical summary of the coordinate difference estimated by applying the TRM59800.00 models with SCIT and NONE radome (unit: mm)

Station	Northing	Easting	Height
CHNG	0.1±0.1	-0.7±0.2	-0.7±0.4
CHWN	-0.4±0.1	-0.3±0.2	-1.4±0.4
MLYN	0.1±0.1	-0.2±0.2	-1.1±0.4
PUSN	-0.4±0.1	0.3±0.2	-1.7±0.3
WOLS	0.1±0.1	0.8±0.2	-1.3±0.3
YNDO	-0.8±0.1	0.3±0.2	-1.7±0.3
Average	-0.22±0.10	0.03±0.20	-1.32±0.35

Table 8. Statistical summary of the coordinate difference estimated by applying the TRM59800.00 models with SCIT and SCIS radome (unit: mm)

Station	Northing	Easting	Height
CHNG	0.3±0.1	0.1±0.1	2.2±0.2
CHWN	0.2±0.1	0.2±0.1	2.0±0.2
MLYN	0.3±0.1	0.2±0.1	2.2±0.2
PUSN	0.2±0.1	0.3±0.1	2.0±0.2
WOLS	0.2±0.1	0.4±0.1	2.2±0.1
YNDO	0.1±0.1	0.3±0.1	2.0±0.2
Average	0.22±0.10	0.25±0.10	2.10±0.18

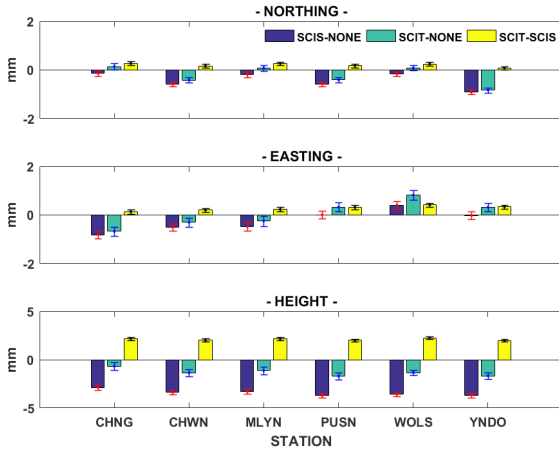


Fig. 11. Averages and standard deviations of the coordinate differences estimated by applying the TRM59800.00 models with NONE, SCIS, and SCIT radome

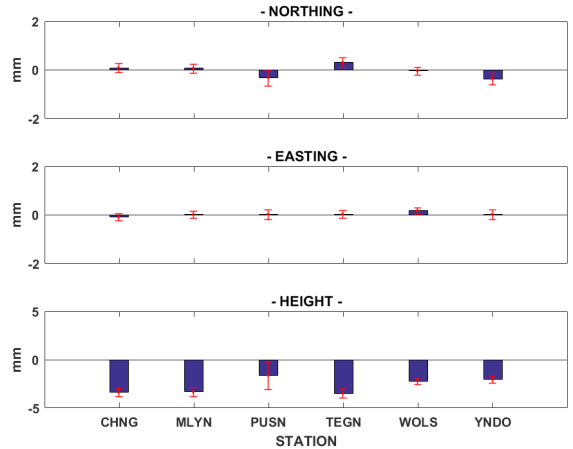


Fig. 12. Averages and standard deviation of the coordinate differences estimated by applying the TRM55971.00 PCV models with TZGD and NONE radome

4.2. 안테나 TRM55971.00에 대한 결과

기지점 CHWN에 설치된 안테나 TRM55971.00 PCV 모형 NONE과 TZGD를 적용해 각각 추정된 좌표 차이 통계값을 Table 9와 Fig. 12에 나타내었다. 이는 레이돔을 설치하지 않은 안테나 취득 관측데이터 기선해석에 TZGD를 적용하거나 반대로 TZGD를 설치한 것에 대해 레이돔을 반영하지 않은 PCV 모형을 적용한 경우에 해당하는 것으로, 수평 방향 좌표 차이는 평균 0.3mm 미만으로 무시할 수 있는 수준이나 높이 성분에서는 약 3mm 내외의 편이 경향을 보인다. 이는 IGS PCV 모형 비교보다 상대적으로 큰 차이로 TRM59800.00의 결과를 같이 고려할 때 GPS L1과 L2 PCC 차이 방향이 다를 때는 그 영향이 기선해석의 타원체고 추정에서 일부 상쇄되고 같을 때

는 다소 증가하는 것으로 이해할 수 있다.

5. 결론

GNSS 안테나 PCV는 타원체고 추정에 영향을 미치는 주요한 요인임으로 높이측량에서는 관측에 사용한 하드웨어에 가장 적합한 캘리브레이션 모형을 반영해야 한다. 레이돔은 기상 현상 등으로부터 안테나를 보호하기 위해 위성기준점에 설치하나, 이는 안테나 PCV에 영향 미치기 때문에 국토지리정보원은 최근 위성기준점 중 Trimble 계열 안테나에 설치한 비캘리브레이션 레이돔을 캘리브레이션된 SCIS로 교체하였다. 따라서, 본 연구에서는 국토지리정보원 위성기준점 안테나 설치 현

Table 9. Statistical summary of the coordinate difference estimated by applying the TRM55971.00 models with TZGD and NONE radome (unit: mm)

Station	Northing	Easting	Height
CHNG	0.1±0.2	-0.1±0.1	-3.4±0.5
MLYN	0.1±0.2	0.0±0.2	-3.3±0.5
PUSN	-0.3±0.3	0.0±0.2	-1.6±1.4
TEGN	0.3±0.2	0.0±0.2	-3.5±0.5
WOLS	0.0±0.2	0.2±0.1	-2.2±0.3
YNDO	-0.4±0.2	0.0±0.2	-2.0±0.4
Average	-0.03±0.22	0.02±0.17	-2.67±0.60

황을 조사한 후 레이돔이 GNSS 안테나 PCV에 미치는 영향 고찰을 위한 IGS 모형의 신호 방향별 PCC를 계산·비교했으며, 특히 위성기준점 대부분에 설치된 Trimble 계열 안테나를 운용하는 위성기준점을 대상으로 정밀기선해석을 수행해 추정 좌표 차이를 분석하였다. 이상과 같은 연구를 통해 얻어진 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 2020년 1월 현재 국토지리정보원은 위성기준점에 Trimble, Leica, Harxon 계열 안테나를 각각 46, 14, 2개소에 설치·운영 중이다. ANSG 기준점의 Trimble TRM55971.00 안테나를 제외한 나머지 위성기준점은 모두 SCIS, LEIT, HXCS와 같은 캘리브레이션 레이돔이 설치되어 있다. 이들 중 Harxon 안테나를 운용하는 GYJU와 POHG은 경주·포항 지진 이후 지각변동 감시를 위해 새롭게 설치한 위성기준점이다.

둘째, 레이돔 미설치(NONE)를 포함해 Trimble 계열 안테나의 3가지(SCIS, SCIT, TZGD) 그리고 Leica 계열에 대해 2가지(LEIT, SCIT) 레이돔을 대상으로 IGS PCV 모형으로부터 PCC를 계산·비교하였다. 레이돔 반영 여부에 따라 PCC 차이는 수평 방향에서 1mm 내외로 제한적이지만, 높이 방향에서는 LEIAR25.R4 안테나에 SCIT를 적용할 때 평균적으로 최대 약 7mm까지 차이가 발생하였다. 특히 4가지 레이돔 중 SCIT가 Trimble과 Leica 계열 안테나에서 PCV에 가장 큰 영향이 있으나, GPS L1과 L2를 비교할 때 높이 방향 PCC 차이의 부호가 서로 반대되는 경향을 보였다. 반면, 실제 위성기준점에 설치한 레이돔인 SCIS와 LEIT는 SCIT와 TZGD에 비해 PCC 차이에 미치는 영향이 상대적으로 낮았으나, Trimble 계열 안테나에 대한 SCIS 포함 PCC 차이는 GPS L1과 L2의 높이 성분에 동일한 방향으로 나타났다.

셋째, 기선해석에서 위성기준점에 실제 설치되지 않은 레이돔의 PCV 모형을 적용했을 때 추정 동적 좌표에 미치는 영향을 살펴보기 위해 동남권 지역에 있는 7개 위성기준점을 대상으로 관측데이터 처리 실험을 수행하였다. 레이돔을 반영한 PCV 모형 적용 여부에 따라 수평 방향 추정좌표에는 평균적으로 0.5mm 내외 그리고 높이 방향에서는 SCIS와 TZGD가 평균적으로 각각 약 3.5mm와 2.6mm로 상대적으로 큰 편이 발생하였다. 이는 해당 레이돔이 설치되어 있음에도 불구하고 기선해석에 반영하지 않을 때는 이 정도 수준의 오차가 높이 방향에 발생할 수 있음을 의미한다. SCIT는 IGS PCV 모형 PCC 비교에서 GPS L1 주파수 높이 성분에 가장 큰 영향을 미쳤으나, 실제 기선해석 결과에는 이보다 작은 차이를 나타내었다. 이는 해당 레이돔이 L1과 L2에 주파수에 대해 상이한 방향으로 PCV를 유발해 실제 기선해석에서 일부 상쇄된 효과에 기인하는 것으로 보인다. 따라서, Leica 계열 안테나에 레이돔

이 PCV 높이 성분에 미치는 영향이 Trimble의 그것과 비교할 때 상대적으로 크나, L1과 L2 주파수에 대한 방향 차이로 인해 실제 기선해석에서는 제한적일 것으로 기대한다.

마지막으로 국토지리정보원에서는 PCV의 영향을 인식하고 위성기준점에 설치된 레이돔 교체를 추진하였으나, 이에 따른 성과 재계산과 고시는 이루어지지 않고 있다. 본 연구를 통해 PCV 모형 적용에 따라 높이 방향 좌표에 무시할 수 없는 수준의 편이 발생 가능성을 확인했으므로 이를 반영한 성과의 재산정과 향후 위성기준점을 포함한 GNSS 높이측량 기선해석에는 반드시 설치 레이돔을 반영한 PCV 모형을 적용해 타원체고 추정 정확도를 최대도 확보할 필요가 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2019년 국토지리정보원 「실시간 위치결정기술 발전에 따른 새로운 GNSS 보정신호 도입 기초연구」의 일환으로 수행된 것으로 위성기준점 관측데이터 제공 등 연구지원에 대한 관계자 여러분께 사의를 포함합니다.

References

- Baire, Q., Aerts, W., Bruyninx, C., Pottiaux, E., and Legrand, J. (2012), Differences between GPS receiver antenna calibration models and influence on geodetic positioning, *AGU Fall Meeting*, American Geophysical Union, 3-7 December, San Francisco, USA.
- Cho, I.S. and Lee, H.K. (2016), Experimental Assessment on Accuracy of Kinematic Coordinate Estimation for CORS by GPS Medium-range Baseline Processing Technique, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 34, No. 1, pp. 79-90. (in Korean with English abstract)
- Dawidowicz, K. (2013), Impact of different GNSS antenna calibration models on height determination in the ASG-EUPOS network: a case study, *Survey Review*, Vol. 45, No. 332, pp.386-394.
- Kim, J.Y., Won, J.H., Park, K.D., Seo, S.W., and Park, H.W. (2014), Analysis of the optimal degree and order of spherical harmonics for the GNSS receiver antenna's PCV correction, *The Korea Society For Geospatial Information System*, Vol. 22, No. 3, pp. 113-119, 2014. (in Korean with English abstract)

- Lee, H.K. (2018), Impact of tropospheric modeling schemes into accuracy of estimated ellipsoidal heights by GPS baseline processing : experimental analysis and results, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 245-254. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.W., and Park, J.H. (2018), Accuracy analysis of ellipsoid height for GNSS height determination, *Korean Association of Cadastre Information*, Vol. 20, No. 1, pp. 121-130. (in Korean with English abstract)
- NGII (2018), *Development of the 2017 Geoid Model and the Transformation Model of Land - Maritime Height*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, 167p.
- NGS, Access calibration for all antenna, *National Geodetic Survey*, USA, <https://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/LoadFile?file=ngs14.atx> (last date accessed 14 January 2020).
- Schmitz, M., Wübbena, G., and Propp, M. (2008), Absolute robot-based GNSS antenna calibration – features and findings – *International Symposium on GNSS*, International Symposium on GNSS, 11-14 November, Berlin, Germany.
- Shin, G.S., Han, J.H., and Kwon, J.H. (2014), Accuracy analysis of orthometric heights based on GNSS static surveying, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 32, No. 5, pp. 527-537. (in Korean with English abstract)
- Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin.