

GPS 안테나 위상중심변동 보정모델 비교

Comparison of Calibration Models for GPS Antenna Phase Center Variations

박관동¹⁾ · 원지혜²⁾

Park, Kwan-Dong · Won, Jihye

Abstract

To get the highly-accurate and precise position of a GPS receiver, they should consider the state-of-the-art GPS force and measurement models. Especially, the phase center variations (PCV) of a GPS antenna can cause several centimeters of positioning errors in the vertical direction. In this study, we implemented four different models of PCV and evaluated their impact on the computed coordinates. The test data were taken from the 14 National Geography Information Institute permanent GPS stations and 30 Ministry of Government Administration and Home Affairs sites. For different combinations of calibration methods, an average of 1.3-2.6 cm of height difference was observed. Also, we found a maximum error of ~4 mm in the estimates of the precipitable water vapors.

Keywords : Phase Center, PCV, GPS, GPS Errors, GIPSY

초 록

GPS 장비를 이용하여 특정 지점의 정확한 좌표를 계산하려면 다양한 GPS 측위오차 유발요인에 대한 최신 모델이 필요하다. 특히 GPS 안테나 기준점에 대한 위상중심변동을 고려하지 않으면 고가의 측지용 GPS 안테나의 경우에도 수 cm 수준의 수직좌표 오차가 발생한다. 이 연구에서는 국제적으로 널리 쓰이는 네 가지 위상중심변동 보정모델을 국내 상시관측소 데이터 처리에 적용하고 선택된 모델에 따른 좌표 차이를 분석하였다. 국토지리정보원과 행정자치부 GPS 상시관측소 전체 44개소를 대상으로 실험한 결과 기존의 상대보정법과 최신 절대보정법을 비교했을 때 평균 1.3-2.6cm의 수직 좌표 차이가 관측되었다. 수신기 좌표뿐만 아니라 GPS로 산출한 가강수량에서도 최대 4mm 차이가 발생하였다.

핵심어 : 위상중심, PCV, GPS, GPS 오차, GIPSY

1. 서 론

현재 GPS(Global Positioning System)는 전 세계적으로 측량과 측지관련 분야에서 매우 중요한 역할을 하고 있으며, 국내에서도 활용분야가 점차 확대되고 있다. GPS의 활용도와 산업·경제적 파급효과가 높아짐에 따라 보다 정확한 위치정보에 대한 요구 또한 증대되고 있다. 특히 실시간 측량을 위한 RTK(Real-Time Kinematic), Network RTK, VRS(Virtual Reference Station) 기술 개

발을 통해 수 cm 수준의 측위 정확도를 달성하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(박운용 등, 2004; 최윤수 등, 2004). 이런 수준의 높은 정확도를 달성하기 위해서는 모든 GPS 측위오차 유발요인에 대한 정확한 분석과 모델링이 반드시 필요하다. 고가의 측지용 GPS 안테나의 경우에도 위상중심변동(PCV, Phase Center Variations)은 수 cm 가량의 수직방향 오차를 유발하기 때문에 상시관측소의 정확한 좌표를 계산할 때 무시할 수 없는 중요한 오차요인이다(Hatanaka et al., 2001).

1) 연결저자 · 정희원 · 국민대학교 삼림과학대학 조교수(E-mail:kdpark@kookmin.ac.kr)

2) 정희원 · 국민대학교 삼림과학대학 석사과정(E-mail:saecheemi@hanmail.net)

GPS를 이용한 기상학 응용에서는 대기 중의 가강수량(PWV, Precipitable Water Vapor)을 준·실시간으로 계산한 뒤 전산일기예보(Numerical Weather Prediction)에 자료동화하여 일기예보의 정확도를 향상시킬 수 있다(송동섭 등, 2004). 전산일기예보에 사용되기 위해서는 가강수량을 약 1-2mm 정확도로 계산해야한다. 이 경우 2cm의 수직방향 측위오차는 대략 3mm의 가강수량 오차로 직결되므로(Bevis et al., 1992), 전산일기예보에 활용될 수 있는 GPS 가강수량의 정확도 수준을 달성하지 못하게 된다. 그리고 국토지리정보원에서 관리·운영 중인 국가 기준점의 정확한 좌표를 획득하기 위해서는 해양조석하중(ocean tide loading)에 의한 지각변위와 PCV처럼 1-3cm 수준의 측위오차를 유발하는 원인에 대한 철저한 분석과 모델링이 시급하다(Hatanaka et al., 2001).

국내 연구진에 의한 PCV 관련 연구는 미진하였지만, 해외에는 1990년 대 초부터 다양한 연구가 진행되었다. 특히 2004년 IGS(International GNSS Service) 워크숍에서는 당시까지 시도된 여러 PCV 보정 방법에 관한 논문이 다수 발표되었고, Shumid et al.(2005)은 각 방법의 특징과 장단점을 비교·분석하였다. 2006년 말경에는 현재 사용되고 있는 ITRF2000(International Terrestrial Reference Frame)을 개선한 ITRF2005가 발표될 예정이며, ITRF2005가 발표된 직후 IGS는 PCV 모델링의 새로운 기법인 절대보정 방법을 국제표준으로 채택할 예정이다(IGS Mail, 2006). 지금까지 국내에서는 GPS 상시관측소 데이터 처리를 위해 PCV 보정모델 중에서 상대보정 모델을 적용해왔다는 사실을 고려한다면 절대보정 모델 채택에 따른 GPS 상시관측소 좌표의 변화 양상을 분석하고 적절한 대책을 수립해야할 것이다.

이 논문에서는 먼저 안테나 PCV에 대한 개념을 소개하고 보정에 사용되는 모델의 기본 원리를 설명한다. 그리고 절대보정 모델을 적용할 경우 국내 GPS 상시관측소의 3차원 좌표와 가강수량 추정결과가 어떻게 변하게 될 것인가를 분석한 결과를 기술한다.

2. PCV의 개념과 보정 방법

이 절에서는 먼저 안테나 기준점(ARP, Antenna Reference Point)과 PCV를 도식적으로 설명하고 PCV 보정 방법에 관한 국제표준을 기술한다.

2.1 ARP와 PCV

ARP란 GPS 안테나의 기준점을 칭하는 것으로 측지용 안테나의 경우 그림 1과 같이 안테나 지저부의 한 점을 ARP로 설정한다. 대부분의 경우 GPS 데이터 처리를 통해 산출되는 좌표는 ARP의 좌표이다. 하지만 안테나에서 신호가 수신되는 지점은 ARP가 아니라 안테나 위상중심이다. 흔히 안테나 상단부의 기하학적 중심이 안테나 위상중심이라고 생각하지만 실제로 신호가 수신되는 지점은 GPS 위성의 위치(고도각과 방위각)에 따라 변하게 된다. 이렇게 GPS 위성의 고도각과 방위각에 따라 위상중심이 변하는 것을 PCV라고 한다. 그리고 PCV는 이중주파수 안테나의 경우 L1과 L2 신호에 따라 다르게 나타난다. 각 고도각과 방위각에 따라 변하는 PCV의 평균치를 산출한 값을 위상중심 오프셋(offset)이라 한다. 그림 1은 TRM29659.00 안테나의 ARP와 L1/L2 위상중심 오프셋의 위치를 보여준다.

그림 2는 ARP와 위상중심 오프셋 그리고 PCV의 기하학적 관계를 도식적으로 보여준다. 위상중심 평균 오프셋은 ARP를 기준으로 남·북·동·서, 수직(North, East, and Up) 방향으로 나타낸다. PCV는 앞서 언급한대로 GPS 위성의 고도각과 방위각에 따라 변하지만, 주로 고도각 방향으로의 변동량이 크기 때문에 PCV 보정모델은 일반적으로 고도각의 함수로 제공된다. PCV 보정치 적용은 데이터 처리 시 GPS 위성의 좌표를 결정한 이후에 그 방향에 해당되는 보정치를 보간법에 의해 계산하고 산술적으로 더하거나 빼주면 된다.

국내의 GPS 상시관측소는 대략 다섯 종류의 안테나 기종을 사용하고 있는데, 대다수는 Trimble사의 TRM29659.00

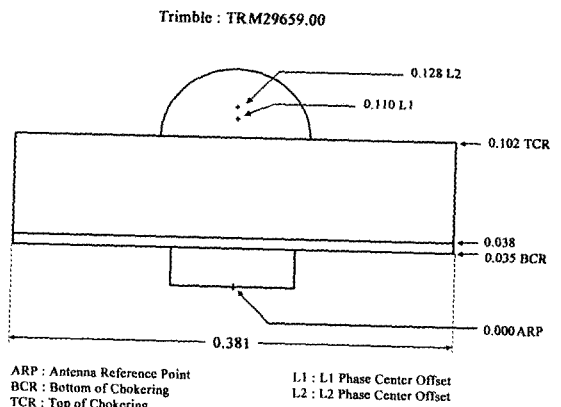


그림 1. TRM29659.00 안테나의 ARP와 L1/L2 위상중심 오프셋

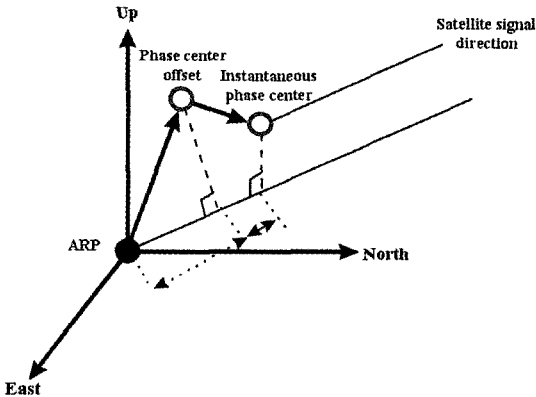


그림 2. GPS 안테나의 ARP, 위상중심 오프셋, 그리고 PCV (Mader and Czopek, 2002)

과 TRM33429.00+GP이다. 현재 국토지리정보원 상시관측소는 TRM29659.00, 행정자치부는 TRM33429.00+GP 안테나를 가지고 있다. 표 1은 두 안테나의 위상중심 오프셋 값을 보여준다. 표에서 보는 바와 같이 오프셋 값은 두 종류가 제공되는데 상대 오프셋(relative offset)과 절대 오프셋(absolute offset)에 대해서는 다음 절에서 상세히 설명한다.

2.2 PCV 보정 방법

PCV를 보정하는 방법은 여러 연구그룹에 의해 다양하게 제시되었지만, 국제적으로 채택된 모델은 두 가지이다 (IGS Mail, 2005). 1996년에 채택된 미국의 NGS(National Geodetic Survey)의 상대보정(relative calibration)과 2006년 채택될 예정인 독일의 절대보정(absolute calibration)이 그 것이다.

2.2.1 상대보정

상대보정 실험은 NGS Corbin Facility에서 행해지는데

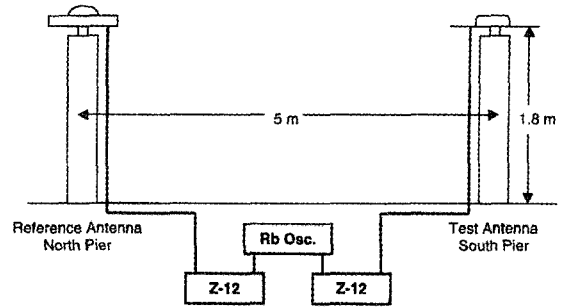


그림 3. NGS Corbin Test Facility 실험 환경(출처: Mader, 1999)

주요 실험 환경은 다음과 같다(그림 3 참고). 두 개의 콘크리트 지주(pillar)를 1.5m 높이로 설치하고 각 지주 위에 GPS 안테나를 설치하는데, 두 지주 사이의 거리는 약 5m로 주변은 풀밭이며 가장 가까운 건물은 21m 정도 떨어진 1층 건물이다(Mader, 1999). 이러한 실험환경은 다중경로 오차를 최소화하여 PCV 현상만을 정확하게 규명하기 위해 설계된 것이다. 한 쪽 지주에는 PCV가 없는 것으로 판단되는 Allan Osborne Associates사의 Dorne-Margolin, type T(AOAD/M_T) 안테나를 설치하고 다른 쪽에는 보정 대상이 되는 안테나를 설치한다. 두 지주의 좌표는 정확히 측량되어 있으므로 GPS 데이터를 취득한 후 L1과 L2 관측치를 각각 처리하여 좌표를 산출한 다음 매 순간 관측치의 잔차(residual)를 PCV로 간주한다. 잔차는 GPS 위성의 고도각과 방위각의 함수로 표현될 수 있지만, 상대보정에서는 방위각에 따른 변동은 무시한다. 이렇게 추출된 잔차를 고도각을 독립변수로 하는 4차 다항식에 곡선적합(curve fitting)시켜서 PCV 모델을 만든다(Mader, 1999). 이 때 두 지주간의 거리가 매우 짧으므로 이온층과 대류층 신호 지연 오차는 상대측위 방법으로 완전히 제거된 것으로 가정한다.

상대보정 방법은 AOAD/M_T 안테나를 기준 안테나로

표 1. TRM29659.00과 TRM33429.00+GP 안테나의 위상중심 오프셋

		Relative Offset(mm)		Absolute Offset(mm)	
		TRM29659.00	TRM33429.00+GP	TRM29659.00	TRM33429.00+GP
L1	North	1.2	-0.2	-0.06	-0.04
	East	0.5	1.2	-0.91	-0.50
	Up	109.8	74.0	91.95	69.66
L2	North	1.2	0.6	-0.16	0.14
	East	0.6	0.9	0.16	-0.05
	Up	128.0	70.3	120.49	62.32

사용하기 때문에 기준 안테나 자체의 PCV가 보정 대상 안테나의 PCV로 나타날 수 있다는 치명적인 단점이 있다. 또한 상대보정 모델은 고도각 10도 이하의 PCV 수치를 제공하지 않으며, 다중경로 오차가 완벽하게 제거되지 않아 PCV 보정치에 다중경로 오차가 포함될 가능성이 있다. 그리고 상대보정 방법은 단기선(short baseline)에서 측정된 결과이기 때문에 기선의 길이가 길어질수록 오차가 증가하게 된다(IGS Mail, 2005). 이러한 이유들 때문에 절대보정 방법의 필요성이 제기되었다.

2.2.2 절대보정

절대보정 방법은 1990년 대 말부터 독일의 하노버대학과 Geo++사의 공동연구로 개발되었다(Wübbena et al., 2000). 절대보정 방법은 그림 4에서 보는 것처럼 보정 대상이 되는 안테나를 로봇 팔에 설치한 다음 다양한 고도각과 방위각에서 GPS 신호수신이 가능하도록 로봇 팔을 기울이거나 회전시키면서 관측치를 기록한다. 관측을 통

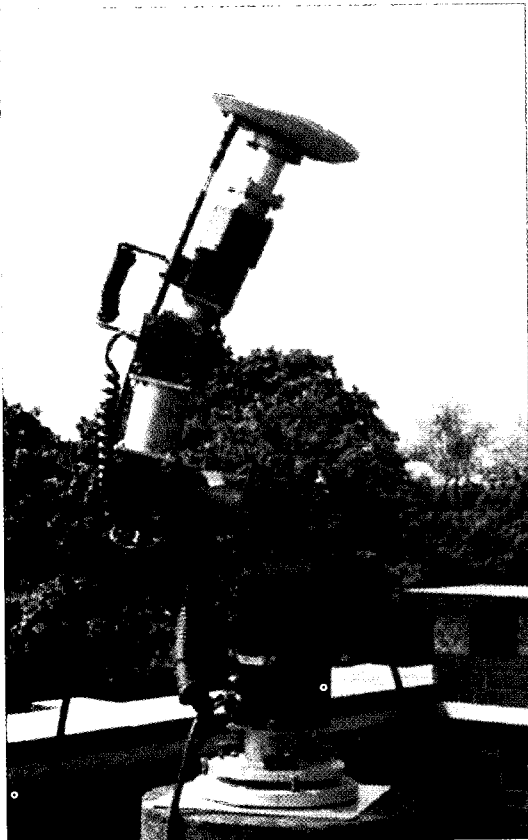


그림 4. 절대보정에 사용되는 로봇 팔

해 수집된 데이터를 처리하는 과정에서 Seeber et al.(1998)이 제안한 수식으로 다중경로 오차를 제거한 다음 PCV 보정치를 산출한다.

절대보정 방법의 가장 우수한 장점은 로봇 팔을 자유롭게 움직일 수 있기 때문에 고도각 10도 이하의 보정치도 계산할 수 있고 방위각 방향으로의 PCV를 매우 조밀하게 구할 수 있다는 것이다. 상대보정 방법과 마찬가지로 절대보정 방법도 L1과 L2 주파수 각각에 대한 PCV 보정치를 제공한다.

3. PCV 모델 비교 방법

앞서 언급한 바와 같이 국내 GPS 상시관측소의 안테나는 대부분 TRM29659.00과 TRM33429.00+GP이다. 이 두 안테나에서 발생하는 PCV를 상대보정 모델과 절대보정 모델을 적용하여 보정할 경우, 좌표 변동이 어느 정도 발생할 것인가를 고정밀 데이터를 통해 분석하였다. 고정밀 데이터 처리에는 NASA JPL(제트추진연구소, Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 GIPSY-OASIS II 소프트웨어의 정밀단독측위(Precise Point Positioning)의 표준기법을 채택하였다(Webb and Zumberge, 1993; Zumberge et al., 1997; 박관동 등, 2003). 이 소프트웨어의 대표적인 특징은 상대측위(relative positioning)가 아니라 단독측위(standalone positioning) 방법을 사용한다는 것이다.

고정밀 데이터 처리를 통한 보정모델 비교를 위해 PCV를 제외한 모든 데이터 처리 방법과 매개변수를 동일하게 하였다. 그러므로 데이터 처리에 의해 야기되는 좌표의 차이는 전적으로 채택된 PCV 모델 차이에서 기인하게 된다. 이 연구에서는 상대보정의 경우는 NGS 모델(Mader, 1999)을, 절대보정 모델은 igs05_1365.atx(IGS Mail, 2006)를 사용하였다.

실험은 아래 표 2와 같이 네 가지의 경우로 나누어 데이터를 처리하였다. 위상중심 오프셋만 고려한 경우가 T1과 T2이다. 그리고 T3과 T4는 오프셋뿐만 아니라 해당

표 2. PCV 모델 비교 실험 방법

실험 방법	오프셋	PCV
T1	상대	×
T2	절대	×
T3	상대	상대
T4	절대	절대

보정모델에 따른 PCV도 같이 고려한 경우이다. 참고로, 현재 국내에서는 GPS 상시관측소 데이터를 처리할 때 대부분 T1 혹은 T3의 방법으로 PCV를 보정하고 있다.

실험에 사용된 데이터는 국내 GPS 상시관측소들 중 국토지리정보원 14개소와 행정자치부 30개소에서 매 30초 단위로 관측한 데이터이다. 데이터의 기간은 2003년 7월 19일에서 28일까지 총 10일간이다. 표 2에 주어진 각 경우의 모델을 적용하여 24시간 단위로 데이터를 처리하여 1일 평균 좌표를 산출하였다. 산출된 결과를 ITRF2000 좌표계로 변환한 뒤 좌표 차이를 남-북, 동-서, 그리고 수직 방향으로 분류하여 히스토그램(histogram)로 분석하였다. 국토지리정보원의 안테나 기종은 모두 TRM29659.00이며, 행정자치부 안테나 기종은 모두 TRM33429.00+GP이다. 따라서 기관별로 결과를 분석하고 비교하는 것은 결국 안테나 기종에 따른 특성을 파악하는 것과 같다.

4. 결과 및 토론

그림 5는 국토지리정보원 관측소 14개소의 위상중심 보정모델에 따른 좌표차이를 히스토그램으로 보여주고,

그림 6은 행정자치부 관측소 30개소의 경우이다. 두 그림에서 가로축은 좌표 차이(단위: mm)이며 세로축은 도수이다. T1-T3과 T2-T4는 상대보정과 절대보정 각각의 경우에 위상중심 오프셋만을 적용할 때와 PCV를 같이 적용했을 때의 차이를 보여주는 그림이다. T3-T4는 절대보정의 경우 위상중심 오프셋만을 적용할 경우와 PCV를 같이 적용할 때의 차이이다. 그리고 T1-T4는 가장 기본적인 상대보정 위상중심 오프셋만을 적용할 때와 절대보정의 위상중심 오프셋과 PCV를 같이 적용할 때의 차이이다. 국내 GPS 데이터 처리의 경우 현재 대부분 T1과 T3을 적용하고 있는 현실을 감안한다면 향후 절대보정 모델을 도입할 경우 GPS 상시관측소 좌표변동은 T3-T4와 T1-T4의 양상으로 나타날 것이다.

그림 5와 6의 히스토그램을 살펴보면 다소간의 편차가 발생하지만 모든 경우에 특정한 영역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 기관별로 다른 경향을 보이는 이유는 앞서 언급한 바와 같이 각 기관 상시관측소의 안테나 기종이 다르기 때문이다. 예를 들어 T1-T3의 경우를 보면 국토지리정보원의 경우 거의 좌표차이가 없는 반면, 행정자치부는 일정방향으로 치우침을 알 수 있다. 일정방향으로

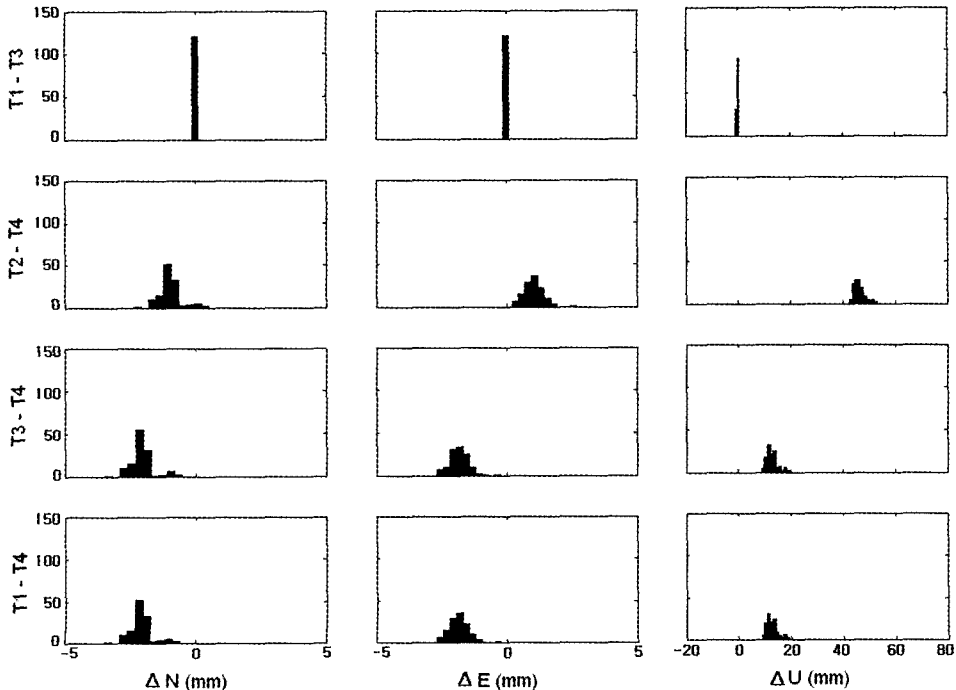


그림 5. 국토지리정보원 GPS 상시관측소의 PCV 모델에 따른 3차원 좌표차이 히스토그램

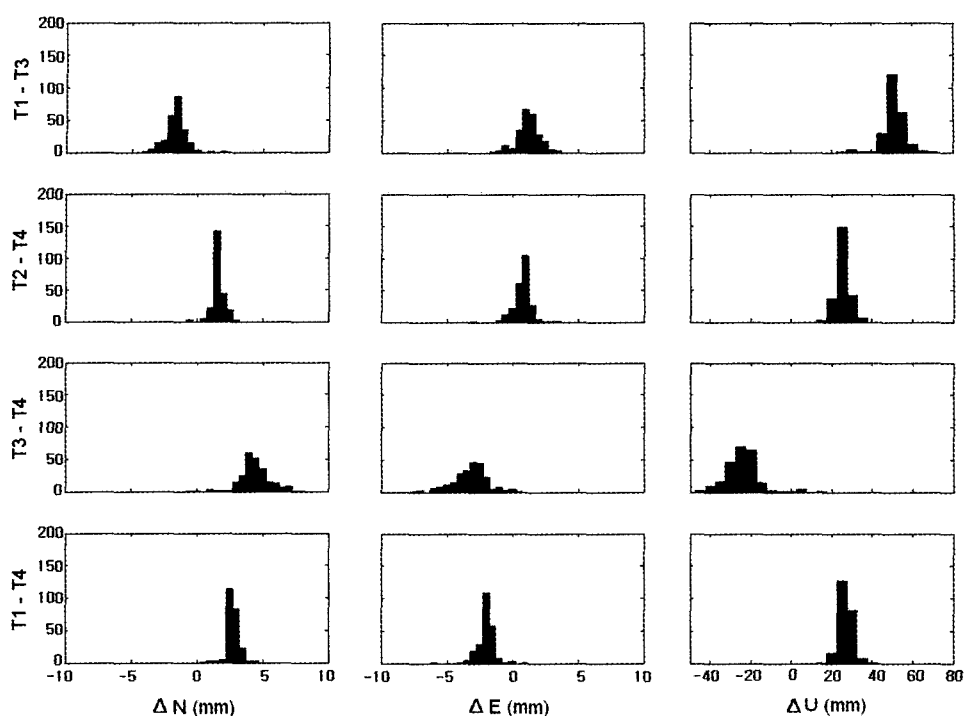


그림 6. 행정자치부 GPS 상시관측소의 PCV 모델에 따른 3차원 좌표차이 히스토그램

표 3. PCV 모델에 따른 국토지리정보원과 행정자치부 GPS 상시관측소 좌표 추정치 차이

	국토지리정보원			행정자치부		
	ΔNorth (mm)	ΔEast (mm)	ΔUp (mm)	ΔNorth (mm)	ΔEast (mm)	ΔUp (mm)
T1-T3	0.0	0.0	-0.2	-1.7	1.2	51.0
T2-T4	-0.9	1.0	46.4	1.6	0.8	25.3
T3-T4	-2.0	-1.9	12.8	4.5	-3.2	-24.2
T1-T4	-2.0	-1.9	12.6	2.8	-2.0	26.7

치우쳐있는 히스토그램에 다소간의 편차가 발생하는 이유는 각 관측소의 주변 환경이 다르기 때문이다. 그러나 44개소에 달하는 많은 수의 관측소와 10일간의 데이터가 분석에 사용되었고 더욱이 각 관측소의 주변 환경이 모두 다름에도 불구하고 일정한 경향을 나타내는 것은 PCV 모델이 좌표 결정에 일관된 영향을 준다는 사실을 입증하는 것이다.

그림 5와 6의 평균값을 산출하여 표 3에 나타내었다. 표 3에 따르면 국토지리정보원과 행정자치부의 경우 동일한 실험조합의 경우에도 평균값에서 다소 차이를 나타낸다. 그 이유는 양 기관에서 사용하는 GPS 수신기 모델

은 동일하지만 안테나 기종이 다르기 때문이다. PCV는 안테나 특성이므로 동일한 수신기라도 장착된 안테나 기종이 다르면 PCV 또한 다르게 나타나는 것이다.

우선 수평방향의 좌표 차이는 국토지리정보원의 경우 2mm 이하로 비교적 낮지만 행정자치부의 경우에는 최대 4.5mm의 차이가 발생한다. 모든 방향을 비교해보면 PCV는 수평방향보다 수직방향 좌표에 더 큰 영향을 준다는 사실을 알 수 있다. 그리고 특이한 사실은 T1-T3과 T2-T4의 경우를 볼 때 PCV 고려 여부가 매우 큰 수직좌표 오차를 유발한다는 것이다(행정자치부 T1-T3의 경우 51.0 mm, 그리고 국토지리정보원 T2-T4의 경우 46.4mm). 현

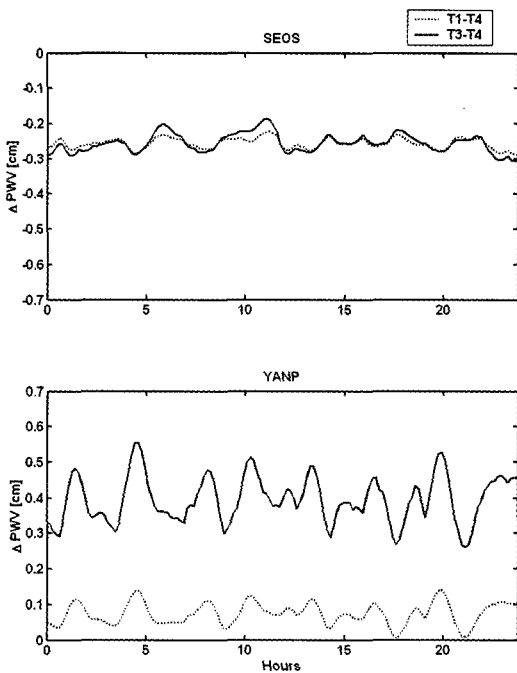


그림 7. PCV 모델 차이로 인한 가강수량 차이

재 국내 GPS 데이터 처리에 대부분이 T1과 T3 보정 방법을 채택하고 있는 사실을 감안한다면 2006년 말 IGS의 권고에 따라 T4 방법으로 PCV를 보정할 때 국토지리정보원의 경우 최대 12.8mm, 그리고 행정자치부의 경우 26.7mm의 좌표 차이가 발생할 것으로 예상된다.

앞서 언급한 바와 같이 선택한 PCV 보정모델에 따라 수신기의 좌표뿐만 아니라 가강수량 산출결과도 틀려질 수밖에 없다. 이를 분석하기 위해 국토지리정보원의 SEOS 관측소와 행정자치부의 YANP 관측소 두 곳을 선택하여 가강수량 변화 양상을 분석하였다. 이 분석에는 2003년 7월 19일 데이터를 사용하였다. 그림 7의 상단은 SEOS, 하단은 YANP의 경우로 시간에 따른 가강수량 차이를 보여준다. SEOS의 경우에는 T1-T4 그리고 T3-T4 두 경우 모두 RMS(Root-Mean-Square) 오차가 2.6mm로 매우 흡사한 경향을 보였다. 그러나 YANP의 경우는 전혀 다른 크기로 나타났다. T3-T4의 경우가 훨씬 높은 오차(RMS: 4.0mm)를 보인 반면, T1-T4의 경우는 RMS 오차가 0.8mm로 매우 낮았다.

앞서 살펴본 바와 같이 GPS 데이터 처리에 사용되는 PCV 모델에 따라 산출되는 좌표 추정치와 가강수량은 큰 차이가 발생한다. 이러한 큰 차이가 발생하는 이유 중

의 하나는 GPS 위성의 송신안테나 PCV 모델 오차에서 기인한 것으로 추정된다. 최근 Mader and Czopek(2002)은 지금까지 사용된 GPS 위성 안테나 PCV 모델에 오류가 있다고 밝혔다. 현재까지는 대부분 GPS 위성 블록(Block)에 따른 PCV 모델을 적용했지만, 최근 연구결과에 따르면 각 GPS 위성마다 다른 PCV 모델을 사용해야 한다(IGS Mail, 2006). 하지만 이 연구에서는 아직 확실한 GPS 위성 PCV 모델이 정립되지 않은 것으로 결론짓고 해당 모델을 적용하지 않았다. 하지만 2006년 말 ITRF2005가 발표되고 절대보정 모델이 국제표준으로 채택되는 시점에 더욱 철저한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

GPS를 이용한 정밀측위에 영향을 주는 PCV 모델의 기본 개념과 국제적으로 통용되는 표준 보정 방법을 소개하였다. 네 가지의 상대보정과 절대보정 모델을 국내 국토지리정보원 상시관측소 14곳과 행정자치부 상시관측소 30곳에 적용하고 보정모델에 따른 좌표 차이를 분석하였다. 그 결과 최대 51.0mm에 달하는 좌표 차이가 발생하였고, 2006년 말 채택될 절대보정 방법과 현재 국내에서 사용되는 보정 방법을 비교하였을 때 행정자치부의 경우 평균적으로 ~12.5mm, 국토지리정보원의 경우 ~26.5mm의 수직좌표 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 데이터 처리과정을 통해 산출된 가강수량 값도 보정모델에 따라 최대 4.0mm의 차이가 검출되었다. 이러한 연구결과들을 통해 PCV는 GPS를 이용한 정확한 좌표 산출에 무시할 수 없는 오차요인임이 증명되었다. 이 연구에서는 단독측위 방식을 채택하였기 때문에 이 연구결과의 좌표 차이가 상대측위 방법으로 산출된 기준점 성과에 직접적으로 반영되지는 않는다. 그러나 기준점 망조정과 단독측위 방법을 병행할 경우 PCV의 영향을 철저하게 분석할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한 GPS 위성의 PCV 모델도 최신 모델이 발표되는 즉시 데이터 처리에 적용하여, 2006년 말 국제표준으로 채택될 절대보정 방법에서의 전환에 대비해야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 박관동, 조정호, 하지현, 임형철 (2003), 초신속궤도력을 이용한 신속한 고정밀 GPS 데이터 처리, 한국측량학회지, 제 21권, 제 4호, pp. 309-316.
- 박운용, 송연경, 이현우 (2004), RTK GPS를 이용한 대형구조물의 실시간 경보 시스템, 한국측량학회지, 제 22권, 제 1호, pp. 11-19.
- 송동섭, 윤홍식 (2004), GPS PWV 추정을 위한 가중 평균 온도 식 결정, 한국측량학회지, 제 22권, 제 4호, pp. 323-329.
- 최윤수, 이용창, 권재현, 이재원 (2004), GPS 가상기준점 도입에 관한 연구, 한국측량학회지, 제 22권, 제 2호, pp. 105-116.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., and Ware, R. H. (1992), GPS Meteorology: Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, pp. 15,787-15,801.
- Hatanaka, Y., Sawada, M., Horita, A., and Kusaka, M. (2001), Calibration of antenna-radome and monument-multipath effect of GEONET - Part I: Measurement of phase characteristics, *Earth, Planets and Space*, Vol. 53, No. 1, pp. 13-21.
- IGS Mail (2005), IGS Mail 5189, <http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg00111.html>
- IGS Mail (2006), IGS Mail 5318, <http://igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00041.html>
- Mader, G. L. (1999), GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey, *GPS Solutions*, Vol. 3, No. 1, pp. 50-58.
- Mader, G. L. and Czopek, F. M. (2002), The Block IIA Satellites - Calibrating Antenna Phase Centers, *GPS World*, Vol. 13, No. 5, pp. 40-46.
- Schmid, R., Mader, G., and Herring, T. (2005). From Relative to Absolute Antenna Phase Center Corrections, In: Meindl (Ed.). *Celebrating a Decade of the International GPS Service - Workshop and Symposium 2004*, pp. 209-219, University of Berne, Switzerland, March 1-5, 2004, IGS
- Seeber, G., Menge, F., Völksen, C., Wübbena, G., and Schmitz, M. (1998). Precise GPS Positioning Improvements by Reducing Antenna and Site Dependent Effects. In: Brunner (Ed.). *Advances in Positioning and Reference Frames, IAG Symposia*, Vol. 118, pp. 237-244, Rio de Janeiro, Brasil, September 3-9, 1997, Springer Verlag.
- Webb, F. H. and Zumberge, J. F. (1993), *An introduction to the GIPSY/OASIS-II*, JPL Publ., D-11088, Pasadena, Calif.
- Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Boder, V., and Seeber, G. (2000), Automated Absolute Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time, In: *Proceedings of the 13th. International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000*, September 19-22, Salt Lake City, UT.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and Webb, F. H. (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5017.

(접수일 2006. 9. 8, 심사일 2006. 9. 24, 심사완료일 2006. 10. 12)