

GNSS 수신기 안테나의 PCV 보정 모델 산출을 위한 구면조화함수 최적차수 분석

Analysis of the Optimal Degree and Order of Spherical Harmonics for the GNSS Receiver Antenna's PCV Correction

김진이* · 원지혜** · 박관동*** · 서승우**** · 박흥원*****

Kim, Jin Yi · Won, Ji Hye · Park, Kwan Dong · Seo, Seung Woo · Park, Heung Won

요 旨

GNSS는 다양한 오차요소에 의해 좌표 정확도가 저하되는데, 그중 고정밀 측위에서 간과하기 쉬운 것이 안테나의 위상중심변동이다. 이를 보정하기 위해 IGS에서는 위상중심변동 보정정보를 기록한 ANTEX 파일을 제공하고 있다. 하지만 수신기 안테나의 경우 방위각과 고도각마다 5° 간격으로, 위성 안테나의 경우 천저각에 대해 1° 간격으로 PCV 보정정보가 제공되기 때문에 사용자 입장에서는 충분하지 않다. 따라서 어떠한 각도에서도 PCV 보정정보를 정확하게 보간하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 방위각과 고도각을 모두 변수로 사용할 수 있는 구면조화함수를 수신기 안테나 PCV 보정정보를 보간하는데 사용해 최적차수를 구하였다. 그 결과 정확도를 우선적으로 고려한다면 구면조화함수 8차가 최적차수가 되며, 구동시간을 우선적으로 고려한다면 허용되는 오차 내에서 구면조화함수 1차와 5차를 제외한 가장 낮은 차수가 최적차수가 된다.

핵심용어 : GPS, GLONASS, 위상중심변동, 구면조화함수

Abstract

The positioning accuracy of GNSS surveys deteriorates due to various error factor, and many users sometimes ignore Phase Center Variation (PCV) of antennas. IGS provides an ANTEX file which contains PCV correction information to correct for PCVs. But it is not directly applicable because PCV correction information is provided at 5-degree intervals in the azimuth and elevation directions for the case of receiver antennas, and at 1-degree intervals in the nadir angle for the case of satellite antennas. So, we devised new and optimal ways of interpolating PCV in any desired line of sight to the GNSS satellite. We used spherical harmonics fitting methods in terms of the azimuth and elevation angle for interpolation, and found an optimal degree and order. It is shown that the best accuracy was obtained from the 8 by 8 spherical harmonics. If one requires lower burden on computing resources, the order and degree less than 8 could produce reasonable accuracy except for 1st and 5th order.

Keywords : GPS, GLONASS, PCV, Spherical Harmonics

1. 서 론

GNSS(Global Navigation Satellite System)는 미국의 GPS(Global Positioning System)나 러시아의 글로나스(GLONASS) 등과 같이 각국의 인공위성을 이용

한 위치결정시스템을 통칭하는 용어이다. GNSS는 전리층 지연, 대류권 지연 등 다양한 오차 요소에 의해 좌표 정확도가 저하되는데 고정밀 측위를 위해서는 cm 수준의 오차도 반드시 보정해야 한다. 그 중 간과하기 쉬운 오차 요소가 안테나의 위상중심변동(PCV, Phase

Received: 2014.08.08, revised: 2014.09.17, accepted: 2014.09.4

* 교신저자 · 정회원 · 인하대학교 지리정보공학과 석사과정(Corresponding author, Member, Master candidate, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University, kimjinny1216@naver.com)

** 정회원 · (주)지평스페이스 기술연구소 소장(Member, Director of Research Institute, Jipyong Space Inc., jhwon@jpspace.kr)

*** 정회원 · 인하대학교 지리정보공학과 부교수(Member, Associate professor, Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha University, kdpark@inha.ac.kr)

**** 국방과학연구소 3본부 4부 연구원(Researcher, The 3rd R&D Institute, Agency for Defence Development, mcnara82@add.re.kr)

***** 국방과학연구소 수석연구원(Chief researcher, The 3rd R&D Institute, Agency for Defence Development, hwpark@add.re.kr)

Center Variation)이다. PCV는 수신기 안테나와 위성 안테나에서 모두 발생하며 그 크기는 최대 수 cm에 이른다(Hatanaka et al., 2001).

PCV 보정을 위해 IGS(International GNSS Service)에서 채택한 모델은 지금까지 총 두 가지이다(IGS Mail, 2005). 하나는 1996년에 채택된 NGS(National Geodetic Survey)에서 제공하는 상대보정모델(relative calibration)이며, 다른 하나는 2006년에 채택된 Geo++사에서 개발한 절대보정모델(absolute calibration)이다. 상대보정모델은 보정모델 산출의 기준으로 사용하는 안테나에 포함되어 있는 PCV가 보정 대상이 되는 안테나에도 나타날 수 있는 심각한 문제와, PCV 보정정보에 다중경로 오차가 포함될 가능성 등의 문제를 가지고 있다(Park and Won, 2006). 따라서 절대보정모델의 필요성이 제기되었고, 지금은 절대보정모델을 표준으로 채택하고 있다(IGS Mail, 2006).

현재 IGS에서는 다양한 수신기 안테나와, GPS와 GLONASS의 모든 위성에 대한 PCV 보정정보를 ANTEX(ANTenna EXchange) 파일로 제공한다. 수신기 안테나의 경우 방위각(azimuth)과 고도각(elevation)마다 5° 간격으로, 위성 안테나의 경우 천저각(nadir angle)에 대해 1° 간격으로 PCV 보정정보를 제공하나, 사용자 입장에서는 관측된 위성의 시선방향에 대하여 PCV를 보정하기 위해 ANTEX 파일에서 제공하는 값의 보간이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 위성이 어떤 위치에 있든지 PCV 보정정보를 정확하게 산출하기 위한 연구를 수행하였다.

PCV와 관련하여 국내에서는 절대보정모델의 효과에 관한 연구가 주로 행해지고 있지만(Baek et al., 2006; Cho et al., 2013), PCV 보정정보의 보간과 관련된 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 해외에서는 본 연구와 관련하여 Dawidowicz(2010)가 선형보간법(linear interpolation)을 이용하여 수신기 안테나 PCV 보정정보를 보간하는 방법을 언급하고 있다. 선형보간법은 가장 간단한 형태의 보간법이기에 때문에 사용자 입장에서는 이를 이용하면 쉽게 PCV 보정정보를 보간할 수 있다. 하지만 데이터가 큰 곡률을 가질 때에는 적합하지 않으므로 본 연구에서는 Rothacher(1995)가 사용한 방위각과 고도각 모두 변수로 설정할 수 있는 구면조화함수(spherical harmonics)를 대표 모델로 선정해 구면조화함수 차수에 따른 정확도를 분석하는 연구를 수행하였다. 위성 안테나는 천저각에 대한 PCV 보정정보만을 제공하기 때문에 구면조화함수를 적용할 수 없고, 선형보간법으로도 충분하여(Leandro, 2009) 본 논문에서는 위성 안테나의 PCV 보정정보를 보간하는 것을 다루지

않았다.

본 논문에서는 먼저 PCV의 개념과 수신기 안테나의 PCV 보정정보 모델로 선정할 구면조화함수에 대해 설명한다. 그리고 PCV 보정정보 모델링 방법과 차수분석 방법을 설명한 후, 차수별 정확도를 분석해 최적 차수를 선정하였다. 최적 차수를 선정할 때에는 실제 PCV 보정정보와 가장 유사한 차수를 구하는 것뿐만 아니라 오차의 허용범위와 프로그램 구동시간을 고려하여 실제로 사용하기에 보다 효율적인 차수를 선정하는 것을 고려하였다.

2. PCV의 개념

안테나의 위상중심(phase center)은 GNSS 신호가 수신되는 위치를 나타내는데, 위성의 방위각과 고도각에 따라 그 위치가 변하게 된다(Menge et al., 1998). 이러한 변동을 안테나의 위상중심변동(PCV) 이라고 하며, 평균치를 산출한 값을 위상중심 오프셋(PCO, Phase Center Offset)이라고 한다. ANTEX 파일은 PCO 보정정보 값을 수신기 안테나의 경우 North, East, Up 방향에 대한 값으로 제공하며 위성 안테나의 경우 위성의 질량중심 좌표계를 기준으로 X, Y, Z 방향에 대한 각각의 값으로 제공하는데, 이들은 하나의 고정된 값으로 제공된다. 그러나 PCV 보정정보는 방위각과 고도각에 따라 여러 개의 값으로 제공되기 때문에 이를 보간하는 과정이 필요하다.

Fig. 1은 ANTEX 파일에서 제공하는 수신기 안테나(TRM14177.00 GPS L1)의 PCV 보정정보를, Fig. 2는 GPS 위성 안테나(PRN 02 [SVN 61])의 PCV 보정정보를 나타낸 것이다. 수신기 안테나의 PCV는 방위각과 고도각에 따라 값이 변동하고, 위성 안테나의 PCV는

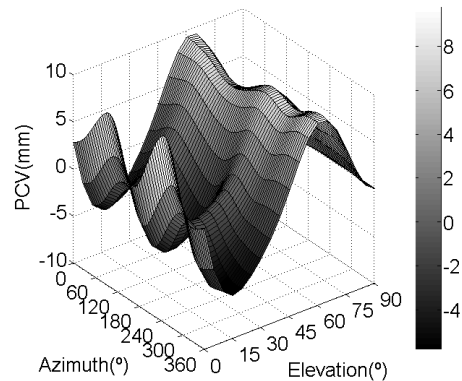


Figure 1. The PCV values of receiver antenna (TRM14177.00 GPS L1)

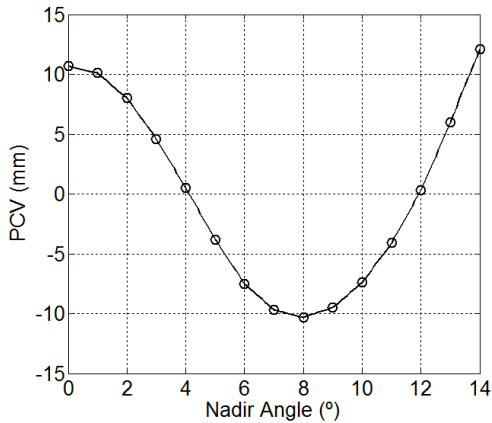


Figure 2. The PCV values of satellite antenna(GPS PRN 02 [SVN 61])

방위각으로의 변동이 없는 것으로 가정하기 때문에 천저각에 따라 값이 변동한다. 이들 값은 보통은 수 mm 수준이나 최대 최소 변동 폭을 고려할 경우 2~3cm 수준으로 고정밀 자료처리를 위해 반드시 보정해야 한다.

위성 안테나의 PCV 보정정보는 ANTEX 파일에서 천저각에 대한 단일 값으로 제공되기 때문에 Fig. 2와 같이 단순 곡선 접합으로 충분히 보간이 가능하나, 수신기 안테나의 PCV 보정정보는 방위각과 고도각에 의한 값으로 제공되기 때문에 Fig. 1과 같이 방위각과 고도각 모두 변수로 설정할 수 있는 구면조화함수를 사용해 보간하였다.

3. PCV 보정정보 분석방법

앞서 언급한 바와 같이 수신기 안테나 PCV 보정정

보는 방위각과 고도각에서의 값으로 제공되며 이는 구면좌표계에서 표현하는 것이 편리하다. 어느 한 수신기 안테나의 모든 PCV 보정정보를 3차원 공간의 구면좌표계에 나타내고 이 점들을 접합(fitting)하는 모델을 구한다면, 임의의 방위각과 고도각에서 수신기 안테나 PCV 보정정보를 구할 수 있다. 따라서 PCV 보정정보들을 접합하는 모델을 구하기 위한 방법으로 구면조화함수를 사용하였다. 구면조화함수는 구면상에서 서로 직교하는 기저함수인데, 구면상의 데이터는 이 구면조화함수들을 이용해 분해될 수 있다. 그리고 분해될 때 각 구면조화함수에 곱해지는 계수의 값을 알면 데이터를 다시 복원할 수 있다(Han et al., 2013). 각 구면조화함수 계수의 값을 안다면, 임의의 방위각과 고도각을 입력할 때 해당 각에서 PCV 보정정보를 알 수 있다. 식 1은 위성의 방위각이 α , 고도각이 z 일 때 PCV 보정정보 d_{PCV} 를 구면조화함수들로 분해하는 식을 나타낸 것이다.

$$d_{PCV}(\alpha, z) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\alpha + B_{nm} \sin m\alpha) P_{nm}(\cos z) \quad (1)$$

식 1에서 n 은 차수(degree)이고 m 은 위수(order)이다. 차수가 높을수록 고도각 방향으로, 위수가 높을수록 방위각 방향으로 더 세밀한 표현이 가능하다. P_{nm} 은 정규화된 르장드르(Legendre) 함수인데, 이는 구면조화함수 차수를 알고 있으면 구할 수 있다. A_{nm} 과 B_{nm} 은 구면조화함수의 계수인데, 이들은 PCV 보정정보 d_{PCV} 와 구면조화함수 차수, 그리고 P_{nm} 으로부터

Table 1. The receiver antennas using for analysis of PCV correction information

GNSS	Antenna Model	Radome	Manufacturer	Offset Values (mm)		
				North	East	Up
GPS	TRM57970.00	NONE	Trimble	G01	: 0.58	/ -0.59 / 63.16
				G02	: 0.04	/ 2.02 / 56.57
	ASH701945E_M	NONE	Ashtech	G01	: 1.05	/ -0.12 / 90.51
				G02	: 0.02	/ 0.58 / 119.01
JAV_GRANT-G3T	NONE	Javad	G01	: 0.56	/ 1.16 / 50.28	
			G02	: -3.10	/ -1.38 / 46.83	
GLONASS	JAVRINGANT_DM	NONE	Javad	R01	: 1.05	/ 0.86 / 89.31
				R02	: 0.28	/ -0.07 / 119.64
	TRM57971.00	NONE	Trimble	R01	: 1.11	/ -0.32 / 66.77
				R02	: 0.07	/ 0.66 / 57.79
TRM29659.00	NONE	Trimble	R01	: 0.19	/ 0.23 / 90.99	
			R02	: -0.01	/ 0.00 / 120.40	

그 값을 추정할 수 있다(Wubbena et al., 1997). 본 연구에서는 ANTEX 파일에 기록된 PCV 보정정보가 d_{PCV} 이기 때문에 구면조화함수 차수를 알고 있으면 A_{nm} 과 B_{nm} 을 구할 수 있다.

본 연구에서는 각 차수에 맞는 구면조화함수 계수를 결정하기 위해 최소자승법(least squares method)을 사용하였다. 먼저 구면조화함수 1차부터 차수를 증가시키면서 계수를 산출하고, 모든 방위각과 고도각에 대하여 PCV 보정정보를 구하였다. 다음으로 여기서 구한 PCV 보정정보를 ANTEX 파일에서 제공하는 PCV 보정정보와 비교하여 해당 방위각과 고도각에서의 오차를 구하였다. 마지막으로 모든 오차들의 평균 제곱근 오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 구해 가장 작은 값을 가지는 차수를 최적 차수로 선정하였다. 또한 구면조화함수의 차수에 따른 계산 프로그램의 구동 시간을 측정하여 최적차수 선정에 참고하도록 했다. 이 연구에서 사용한 ANTEX 파일은 IGS08버전(igs08_1710.atx)이다.

수신기 안테나는 그 종류가 매우 다양하나 본 연구에

서는 국내에서 사용되는 수신기 안테나를 대상으로 GPS와 GLONASS로 나누어 최적 차수를 선정하기로 했다. 본 연구에서 수신기 안테나를 GPS와 GLONASS 별로 각각 3개씩 사용하였는데, 이는 Table 1과 같다. 해당 안테나의 정보는 ANTEX 파일 IGS08버전에서 참고하였다.

4. 연구 결과

본 연구에서는 GPS와 GLONASS를 대상으로 각각 총 3개의 안테나를 분석하였으며, 두 개 주파수별로 RMSE를 산출하였기 때문에 각각의 시스템에서 총 6개의 구면조화함수의 차수에 따른 RMSE가 생성되었는데, Table 2는 이 RMSE 값을 각 차수별로 나타낸 것이다. Fig. 3은 Table 2의 각 차수별 6개의 RMSE의 평균(Mean)과 표준편차(Standard Deviation)를 나타낸 것이다. 실제 구면조화함수 분석은 15차까지 수행하였으나 10차 이후부터 평균값과 표준편차가 불규칙하게 커지는 경향을 보여 그림에는 10차 결과까지만 나타내었다. 또한, 구면조화함수 1차 결과는 GPS가 61mm,

Table 2. The RMSE for each degree of the receiver antennas

(a) GPS

Antenna	TRM57970.00		ASH701945E_M		JAV_GRANT-G3T	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
1st order	18.00 mm	11.43 mm	196.78 mm	118.41 mm	19.45 mm	6.36 mm
2nd order	0.45 mm	1.11 mm	0.62 mm	0.35 mm	0.94 mm	2.02 mm
3rd order	0.54 mm	1.77 mm	0.50 mm	0.33 mm	0.85 mm	1.51 mm
4th order	0.98 mm	0.54 mm	0.22 mm	0.91 mm	0.70 mm	0.82 mm
5th order	2.03 mm	5.80 mm	0.68 mm	0.37 mm	1.74 mm	1.59 mm
6th order	0.24 mm	0.14 mm	0.17 mm	0.08 mm	0.23 mm	0.49 mm
7th order	0.02 mm	0.03 mm	0.03 mm	0.04 mm	0.05 mm	0.08 mm
8th order	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.00 mm	0.01 mm
9th order	0.10 mm	0.03 mm	0.06 mm	0.06 mm	0.04 mm	0.04 mm
10th order	0.01 mm	0.02 mm	0.01 mm	0.01 mm	0.02 mm	0.01 mm

(b) GLONASS

Antenna	JAVRINGANT_DM		TRM57971.00		TRM29659.00	
	L1	L2	L1	L2	L1	L2
1st order	208.80 mm	120.26 mm	59.20 mm	82.06 mm	208.25 mm	126.91 mm
2nd order	0.66 mm	0.39 mm	0.25 mm	0.31 mm	0.69 mm	0.36 mm
3rd order	0.62 mm	0.37 mm	0.20 mm	0.22 mm	0.69 mm	0.33 mm
4th order	0.34 mm	0.26 mm	0.28 mm	0.23 mm	0.15 mm	0.56 mm
5th order	2.55 mm	0.40 mm	1.38 mm	2.14 mm	2.30 mm	0.26 mm
6th order	0.15 mm	0.14 mm	0.11 mm	0.09 mm	0.19 mm	0.23 mm
7th order	0.04 mm	0.09 mm	0.04 mm	0.04 mm	0.03 mm	0.03 mm
8th order	0.01 mm	0.09 mm	0.04 mm	0.02 mm	0.01 mm	0.01 mm
9th order	0.06 mm	0.19 mm	0.11 mm	0.83 mm	0.05 mm	0.04 mm
10th order	0.02 mm	0.10 mm	0.12 mm	0.10 mm	0.01 mm	0.05 mm

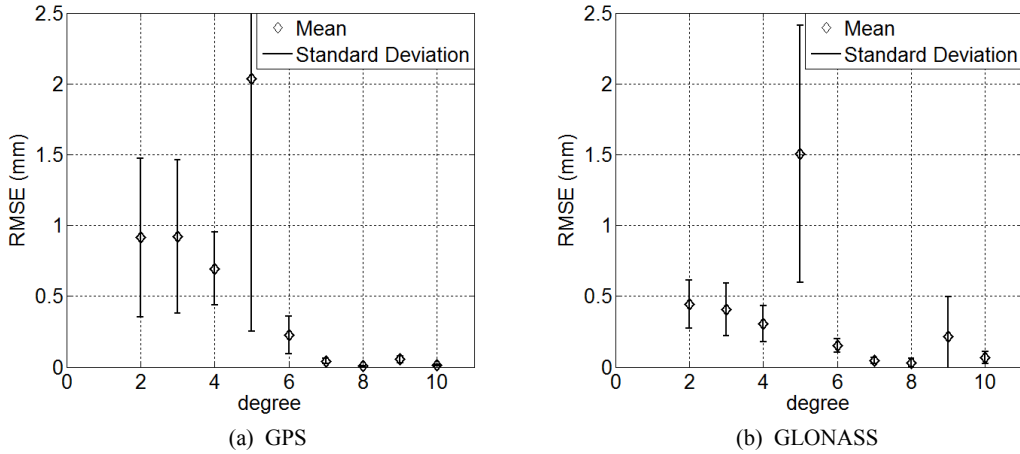


Figure 3. The PCV restoration errors of the receiver antennas for each degree

GLONASS가 134mm로 Y축 범위를 벗어나 Fig. 3에 나타내지 않았다. Fig. 3에서 GPS와 GLONASS는 모두 구면조화함수 8차에서 RMSE 평균값이 가장 작고, 1차부터 8차까지 차수가 증가할수록 RMSE가 점차 감소하나, 5차에서는 일시적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 구면조화함수 1차와 5차를 제외한 RMSE 평균값은 1mm를 넘지 않는 것도 알 수 있다.

Fig. 4는 차수에 따른 정확도 변화를 확인하기 위해 TRM57970.00(GPS L1) 안테나를 대상으로 구면조화함수의 차수에 따른 PCV 산출 결과를 위쪽에, 이 값을 ANTEX와 비교한 모든 각도에서의 오차 값을 아래쪽 그래프에 나타낸 것이다. Table 3은 Fig. 4 아래쪽 그래프의 RMSE와 최대 오차를 나타낸 것이다. 이에 따르면 구면조화함수 8차는 모든 각도에서 오차가 0.2mm

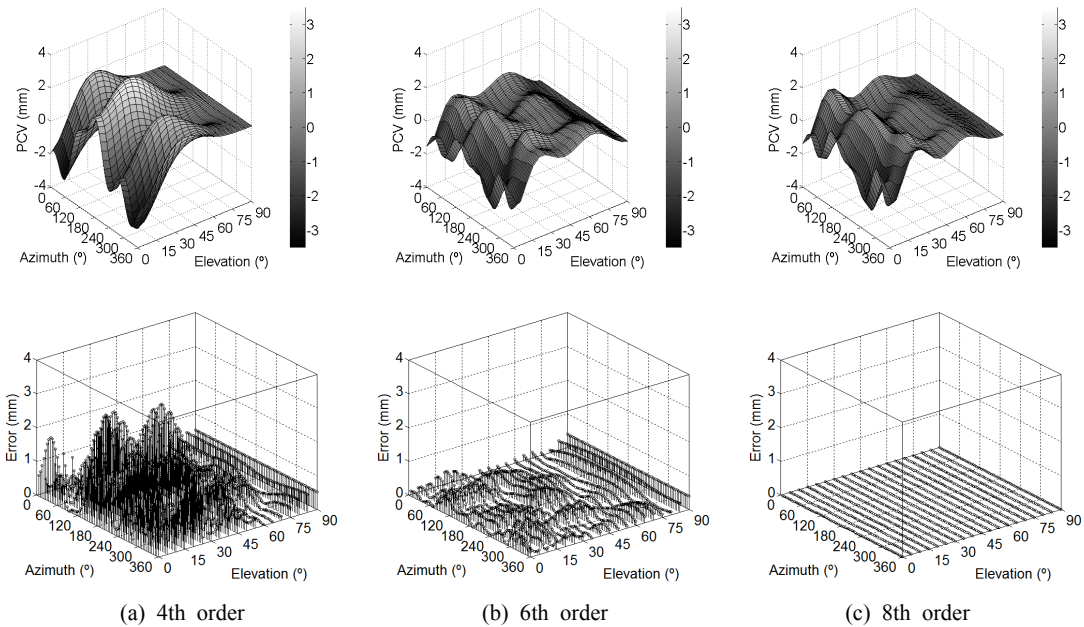


Figure 4. The PCV values for each degree of the GPS receiver antenna and their errors compared with the observed values(TRM57970.00 L1)

Table 3. The RMSE and max error for each degree of the GPS receiver antenna(TRM57970.00 L1)

	RMSE	Max error
(a) 4th order	0.98 mm	1.79 mm
(b) 6th order	0.23 mm	0.73 mm
(c) 8th order	0.01 mm	0.15 mm

를 넘지 않는 것으로 나타났으며 이는 실제 PCV 보정 정보를 가장 잘 복원한 결과로 보인다. 또한 구면조화함수 6차의 모델의 모양은 8차와 매우 유사하며, 오차 또한 1mm를 넘지 않기 때문에 이 또한 실제 PCV 보정 정보와 거의 유사할 것이라 판단된다. 마지막으로 구면조화함수 4차의 모델은 8차에 비해 단순한 모양을 띄고 있으며, 오차 중 일부는 1mm를 넘기 때문에 실제 PCV 보정정보와는 약간의 차이를 보일 것이라 판단된다.

여기서 생각해 볼 것은 구면조화함수 8차가 가장 최적의 PCV 보정정보 모델을 보여주고 있지만, 6차도 오차가 1mm를 넘지 않을 정도로 작기 때문에 PCV 보정 정보 모델로 사용하기에 충분하다. 구면조화함수 4차 또한 2mm 수준의 오차를 허용한다면 PCV 보정정보 모델로 사용하는데 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

또한 본 연구에서는 구면조화함수의 차수에 따른 프로그램의 구동시간을 측정하여 효율성을 평가하였다. 프로그램의 구동시간은 실시간으로 자료를 처리할 경우 또는 수신신호의 데이터 수신 간격이 짧아질 경우 매우 중요한 요인이 될 수 있기 때문에 반드시 고려를 해야 한다.

Fig. 5는 MATLAB 프로그램을 사용하여 방위각을 90°로 고정시킨 후 고도각 0°에서부터 90°까지의 5° 간격으로 계산하는데 소요되는 시간을 차수별로 측정

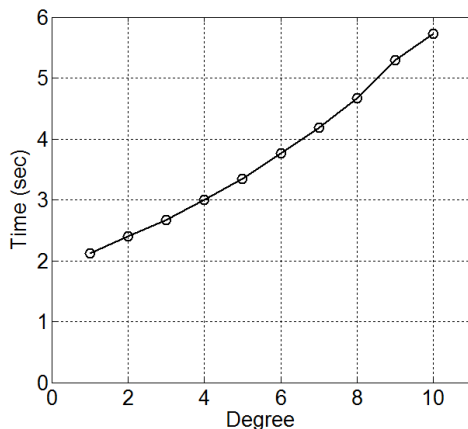


Figure 5. The computing time of MATLAB for each degree of the receiver antenna

한 것이다. 이 프로그램을 구동하는데 사용한 컴퓨터의 프로세서는 Intel Core i5-4670, CPU는 3.40GHz, RAM은 4.00GB, 운영체제는 Windows 7 Enterprise KN 64비트이다. 측정된 결과 차수가 증가할수록 구동 시간이 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

오차가 거의 존재하지 않는 8차에서의 구동시간이 2mm 수준의 오차를 가진 4차에서 비해 1.5배 정도 많이 걸린 것을 알 수 있다. 매우 정확한 PCV 보정정보를 산출해야 한다면 구면조화함수 8차를 사용하는 것이 가장 적절하며, 그렇지 않다면 구동시간을 고려해 보다 낮은 차수를 선정하는 것이 효율적이다.

5. 결론

GNSS의 오차 요소 중 하나인 PCV를 보정하기 위한 연구를 수행하였다. 수신기 안테나의 PCV 보정정보는 선형보간법으로 간단히 보간할 수도 있지만, 데이터의 곡률에 따라 오차가 크게 발생할 수 있기 때문에 방위각과 고도각을 모두 변수로 설정할 수 있는 구면조화함수를 PCV 보정정보의 대표 모델로 선정하고 이의 최적 차수를 구하였다.

그 결과 GPS와 GLONASS 모두 구면조화함수 8차에서 RMSE 평균값이 가장 작고, ANTEX 파일과 비교한 오차가 모든 각도와 모든 안테나에서 GPS는 0.2mm, GLONASS는 1.5mm를 넘지 않는 것으로 나타나 가장 정확한 것으로 확인되었다. 하지만 일부 차수를 제외하고 오차가 수 mm 수준이고, 차수가 증가할수록 프로그램 구동시간이 늘어나기 때문에 사용자는 정확도와 구동시간을 동시에 고려해 효율적인 최적차수를 선정할 필요가 있다.

정확도를 우선적으로 고려한다면 구면조화함수 8차를 최적차수로 선정하는 것이 가장 적절하며, 구동시간을 우선적으로 고려한다면 허용되는 오차 내에서 1차와 5차를 제외한 가장 낮은 차수를 선정하는 것이 가장 효율적이다.

본 연구를 통하여 위성이 어떤 위치에 있든지 PCV 보정정보를 정확하게 산출할 수 있기 때문에 높은 정확도를 요구하는 고정밀 분야의 관측에서 활용성이 높을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방위성항법특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Baek, J., Lim, H. C., Jo, J. H., Cho, S., and Cho, J. H., 2006, An analysis of the effect on the data processing of Korea GPS network by the absolute phase center variations of GPS antenna, *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 23, No. 4, pp. 385-396.
2. Cho, J. M., Choi, M. J., Yun, H. S., Lee, D. H., Cho, J. H., Ahn, K. D., and Kim, J. W., 2013, The effect analysis of GPS antenna absolute calibration, *Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography 2013*, Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography, pp.105-109.
3. Dawidowicz, K., 2010, Antenna phase center variations corrections in processing of GPS observations with use of commercial software, *Technical Sciences*, No. 13, Y. 2010, pp. 120-132.
4. Han, D., Yun, H., and Kee, C., 2013, Ionosphere modeling using spherical harmonics and its applicability in SBAS, 2013 KSAS Spring Conference, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, pp. 641-644.
5. 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*, Springer Berlin Heidelberg, Vol. 53, No. 1, pp. 13-21.
6. IGS Mail, 2005, IGS Mail 5189, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg00111.html>
7. IGS Mail, 2006, IGS Mail 5318, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2006/msg00041.html>
8. Leandro, R. F., 2009, Precise point positioning with GPS: A new approach for positioning, atmospheric studies, and signal analysis, PH.D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, Technical Report No. 267, University of New Brunswick, p. 40.
9. Menge, F., Seeber, G., Volksen, C., Wuebbena, G., and Schmitz, M., 1998, Results of absolute field calibration of GPS antenna PCV, *Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS-98*, The Institute of Navigation, pp. 31-38.
10. Park, K. D., and Won, J., 2006, Comparison of calibration models for GPS antenna phase center variations, *Journal of the Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography*, Korean Society of Surveying Geodesy Photogrammetry and Cartography, Vol. 24, No. 4, pp. 1-8.
11. Rothacher, M., Schaer, G., Mervart, L., and Beutler, G., 1995, Determination of antenna phase center variations using GPS data. Paper presented at the 1995 IGS Workshop, International GPS Service for Geodynamics, pp. 205-220.
12. Wubben, G., Menge, F., Schmitz, M., Seeber G., and Volksen C., 1997, A new approach for field calibration of absolute antenna phase center variations, *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, ION Publications, Vol. 44, No. 2, pp. 247-256.