

ITRF에 준거한 정밀 GPS 측위에 관한 연구 High Precision GPS Positioning Referred to ITRF

윤홍식* · 황진상** · 최윤수***

Yun Hong-Sic · Hwang Jin-Sang · Choi, Yun-Soo

요 旨

본 논문은 정밀한 기준좌표계인 ITRF96에 준거하여 GPS 측위를 수행하고 이에 따른 측위 정밀도를 분석하였으며, 여러 가지 방법에 따른 중, 장기선장의 데이터처리 결과를 제시하였다. 본 논문에서는 Jet Propulsion Laboratory에서 제공받은 정밀궤도력을 사용하여 GPS의 관측오차를 최소화하였으며, GIPSY-OASIS II 소프트웨어를 사용하여 관측기선의 비교 분석 결과를 제시하였다. 또한, 데이터 처리방법의 정확도를 검토하였다.

ABSTRACT

This paper deals with the precision analysis of GPS measurement referred to ITRF96 which is the new reference frame announced in 1996, and show the data processing results of short and long baselines with different methods. In this paper, we minimized the observation error of GPS using precise ephemerides which has provided by Jet Propulsion Laboratory and represents the comparative analysis results of baseline measurements using GIPSY-OASIS II software. Here, we also discussed the accuracy of data processing methods.

1. 서 론

1973년부터 사용되기 시작한 NAVSTAR GPS는 전 지구적인 3차원 위치결정을 목표로 개발되었으며, 초기에 의도한 정밀도는 1~2 m 수준이었으나 SA와 AS 같은 의도적인 오차와 이온층, 대기층으로 인한 전파의 편기 및 기준좌표계인 WGS84가 지니는 오차 등으로 인하여 일반 사용자들이 얻을 수 있는 정밀도는 단독측위의 경우, 100~150 m, 반송파를 이용한 상대측위의 경우에는 1 ppm 수준이었다.

GPS 측위의 정밀도를 향상시키기 위해서는 이들 오차를 모델링하여 제거해야 하는데 현재까지는 이온층과 대류층의 모델링 그리고 모호정수값의 결정(Ambiguity Resolution)을 위한 새로운 알고리즘의 도입이 대부분이었다. 이러한 연구의 결과로 인해 상대측위의 경우에는 정밀도가 0.01 ppm 수준으로 향상되었으나 정밀한 기선 해석의 범위는 100 km 미만으로 한정지어질 수밖에 없

었다.

1992년 이후, 정밀 GPS 측위를 위한 연구의 방향은 기준좌표계가 가지고 있는 오차의 제거로 바뀌게 되었고, 이의 적용을 통하여 1990년대 중반부터는 0.001 ppm 수준의 초정밀 GPS측위 시대가 열리게 되었다.¹⁾ 이것은 1,000 km당 1 mm 정도의 오차를 갖는 것을 의미하며, 이를 통해 국가간 GPS 측위가 가능하게 되었고, 지각변동 및 세계 측지계에 준거한 국가 기준점의 결정 등에 GPS 측위가 사용될 수 있게 되었음을 의미하는 것이다.

그러나, 국내에서는 아직까지 이러한 정밀한 기준좌표계에 준거한 정밀측위가 이루어지지 않고 있는 실정이며, 새로운 측지좌표계의 결정과 GPS전파 기준점의 운영과 같은 국가적인 요구에 부응하지 못하고 있다.

본 연구에서는 GPS측위를 위하여 최근에 정의된 정밀한 지구 기준좌표계인 IERS Terrestrial Reference Frame 1996(ITRF96)과 이에 준거하여 계산된 정밀궤도력을 채용하고, 정밀한 좌표계 모델링이 가능한 소프트웨어인 GIPSY-OASIS II를 도입하여 국립지리원에 설치된 상시관측점의 위치를 결정하였으며, 정밀1차기준점 16 점을 관측하여 위치를 결정하였다. 또한, 측위기법 별로

*성균관대학교 건축·조경·토목공학부 조교수

**밤이엔지니어링(주) 기술연구소 연구원

***국립 환경대학교 토목공학과 부교수

정밀도와 정확도를 분석하여 ITRF에 준거한 GPS측위의 필요성을 검증하고, 국가 기준점의 위치결정과 같은 정밀측위에 적합한 측위 기법을 제시하였다.

2. 지구의 운동과 기준좌표계의 결정

GPS 측위는 Earth Centered Inertial(ECI) 좌표계 상에서의 위성의 순간 위치벡터와 관측지역의 순간 위치벡터를 계산하여 실시된다.²⁾ 두 벡터는 동일한 좌표계로 기준하여야 하며, 정밀한 GPS 측위를 위해서는 먼저 Earth Centered Earth Fixed(ECEF) 좌표인 정밀한 지구 기준좌표계를 결정하여 ECI 좌표계로 변환하는 것과 이에 준거하여 계산된 위성의 궤도정보가 필요하다.

지구 기준좌표계를 정의하기 위해서는 원점에 대한 정의와 좌표축의 방향에 대한 정의가 필요하다. 그림 1에서 X_1^0 는 천구 기준좌표계이고, X_1 는 지구 기준좌표계이다. 지구 기준좌표계를 정의하기 위해서는 지심과 X_1 , X_2 , X_3 의 3개의 좌표축을 결정해야 하는데 X_1 의 경우는 그린위치 자오선과 적도의 교점을 향하게 설정하며, X_3 의 경우는 극운동을 해석하여 그 평균위치를 향하게 한다. X_2 는 X_1 , X_3 가 이루는 평면에 수직하게 설정한다.^{1,2)}

태양계 안에서 공전 및 자전을 하고 있는 지구는 태양 및 달의 인력에 영향을 받고 있고, 자체의 질량분포 또한 불균등하여 결과적으로 지축이 끊임없이 진동하고 있다. 여기서 지축이 의미하는 것은 지구 기준좌표계 및 천구 기준좌표계에서 사용하고 있는 X_3^0 및 X_3 축을 의미하며, 지축의 진동은 좌표계 자체가 계속해서 조금씩 변화하고 있다는 것을 의미한다.²⁾

지축의 운동은 세차운동, 강제장동, 자유장동으로 나뉘어지는데 세차운동은 태양과 달의 인력으로 인해 발생하

는 운동으로 25,756년의 주기를 가지고 있으며, 지축은 50.3"의 사이각을 가지는 고깔 모양을 그리며 진동한다. 강제장동은 태양과 달의 인력 자체의 변동으로 인해 일어나는 운동으로 지축은 18.6년을 주기로 하여 9.2"의 사이각을 가지면서 진동한다. 세차운동과 자유장동의 운동량을 계산한 값은 관측 당시의 천구 기준좌표계를 협정 천구 기준 좌표계로 변환할 때 사용된다. 자유장동은 극운동이라고도 하며, 지구의 질량분포의 불규칙성으로 인한 운동으로 지구의 자전으로 인해 발생하는데 지각 자체가 조금씩 움직이는 것으로서 430일을 주기로 하여 0.4"의 사이각을 가지며 진동한다. 자유장동은 관측 당시의 지구 기준좌표계를 특정 시간에 고정된 협정 지구 기준좌표계로 변환할 때 사용된다.⁴⁾

지축을 진동시키는 요소 중 극운동은 협정 지구 기준좌표계와 실제 지구 사이의 차이를 증가시키기 때문에 기준좌표계는 지속적으로 계산되고 갱신되어 왔다. 지구 기준좌표계는 각종 우주 측지 기술을 이용하여 지구상에 분포된 기준 관측점들의 위치를 결정하고 역 계산을 통해 좌표계의 원점과 좌표축들의 방향을 결정하는 방법을 통해 결정된다.³⁾

최초로 계산된 지구 기준좌표계는 미국의 National Imagery and Mapping Agency(NIMA)에서 계산한 World Geodetic System 1960(WGS60)이며, 이후 WGS66, WGS72 등이 계산되었고, WGS84부터는 GPS 위성의 운용과 함께 전 지구적인 위치결정 좌표계로 사용되었다. WGS84는 1980년대 초에 TRANSIT 위성을 통해 Doppler 측정방법을 사용하여 관측된 데이터들을 이용하여 결정되었으며 지심오차가 1~2m 정도 존재하는 기준 좌표계이다. 이 오차로 인해 WGS84가 정의하고 있는 중력상수에 심각한 오차가 발생하였으며, 중력상수의 오차는 위성궤도의 정밀도를 크게 저하시켰다.

따라서 NIMA와는 별개로 International Earth Rotation Service(IERS)에서는 1990년부터 우주측지기술인 SLR, VLBI, DORIS 등을 이용하여 정밀한 지구 기준좌표계를 계산하였다. IERS에서 계산한 지구 기준좌표계를 ITRF(IERS Terrestrial Reference Frame)이라 하여, 현재까지 ITRF90, ITRF91, ITRF92, ITRF94, ITRF96, ITRF97 등이 발표되었고, ITRF2000을 발표할 예정이다.

ITRF가 GPS에 사용되기 시작한 것은 1994년으로서 GPS 제어부분에 해당하는 Monitor Station들의 좌표를 ITRF91(Epoch1994)에 준거한 좌표로 전환하였고, 중력

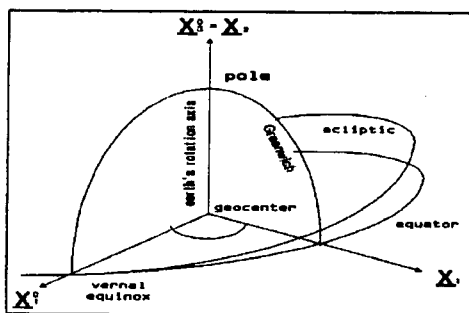


그림 1. 지구 기준좌표계 (적도좌표계)

표 1. ITRF92와 좌표계간의 변환파라미터

Ref. Frame	DX	DY	DZ	RX	RY	RZ	SCR	RMS
		(cm)			(mas)		(ppm)	(cm)
NAD83	-94	198	54	27.5	15.5	10.7	-0.005	2
WGS84	-6	52	22	18.4	0.3	-7.0	0.011	<200
WGS84(GPS)	-4	1	-28	4.2	4.0	-15.6	0.218	94
WGS84(G730)	0	3	4	2.6	2.5	-0.4	0.000	6
ITRF93	0.2	0.7	0.7	0.39	0.80	-0.96	-0.0012	<1

상수를 IERS가 정한 표준값(1992)으로 전환하였다. ITRF를 채용하여 강화된 WGS84를 WGS84(G730)이라 하며, 1996년에 11월에 다시 한번 갱신된 WGS84 기준좌표계를 WGS84(G873)이라 한다.⁶⁾ 표 1은 WGS84 좌표계와 ITRF92, 93과의 관계를 정리한 것으로서 ITRF92와 다른 기준좌표계간의 변환 파라미터들을 표시한 것이다.

3. GPS측위를 위한 궤도와 좌표계 모델링

정밀하게 계산된 기준좌표계에 준거한 GPS 측위를 수행하려면 관측 지점의 위치와 GPS 위성의 위치를 동일한 ECI 좌표계에 위치하게 해야 한다. 먼저 정밀한 ITRF를 채용하고, 이를 기준으로 지축의 진동과 지구의 자전량을 고려하여 매일의 정밀한 좌표계를 계산하고 이 좌표계에 준거하여 위성의 궤도를 정밀하게 모델링하여야 한다.

3.1 ITRF에 준거한 좌표계의 모델링

GPS 관측값을 정밀하게 해석하기 위해서는 측위 기준 좌표계를 Conventional Terrestrial System(CTS)에서 Interim True Celestial System(ITS)으로 변환한 후에 다시 ECI 좌표계인 Conventional Inertial System(CIS)로 변환해 주어야 한다. 여기서 CTS는 WGS84와 같은 과거의 어떤 순간에 고정된 좌표계를 말하며, ITS는 실제 계상에서의 관측 순간의 좌표계를 말한다.⁷⁾ 이러한 변환을 위해 보정하여야 하는 요소들과 공식은 다음과 같다.

$$r_{ITS} = UW r_{CTS} \quad (1)$$

$$r_{CIS} = PN r_{ITS} \quad (2)$$

여기서 U는 지구의 자전으로 인한 회전량을 계산하기 위한 회전행렬이고, W는 극 운동량, P는 세차운동량, N은 강제장동으로 인한 운동량을 계산하기 위한 행렬이

다. 각각의 변환요소를 다음과 같이 자세히 정리할 수 있다.

3.1.1 극 운동과 지구의 자전

극운동과 지구의 자전으로 인한 지축의 회전량을 보정하기 위해서는 다음과 같은 회전행렬을 사용한다.

$$UW = R_z(h_r)R_y(x_p)R_x(y_p) \quad (3)$$

여기서 x_p 와 y_p 는 극 운동량이며, h_r 은 Greenwich Apparent Sidereal Time(GAST)에 해당하는 지구 자전량이다. 이러한 값들은 IERS에서 매달 계산하여 배포하고 있는 IERS Bulletin B 파일이나 JPL에서 배포하고 있는 TPEO 파일에 기록된 정보들을 이용하여 계산한다.

3.1.2 강제장동

극 운동과 자전으로 인한 회전량을 보정한 좌표계는 강제장동과 세차운동으로 인한 영향을 보정하여 연 통산일 2451545.0(J2000) 기준의 협정 천구 좌표계로 변환해야 한다. 강제장동으로 인한 변화량을 보정하기 위한 회전행렬식은 식 (4)와 같다.

$$N = \begin{Bmatrix} \cos\Delta\psi & \cos\epsilon\sin\Delta\psi \\ -\cos\bar{\epsilon}\sin\Delta\psi & \cos\bar{\epsilon}\cos\epsilon\cos\Delta\psi + \sin\bar{\epsilon}\sin\epsilon \\ -\sin\bar{\epsilon}\sin\Delta\psi & \sin\bar{\epsilon}\cos\epsilon\cos\Delta\psi - \cos\bar{\epsilon}\sin\epsilon \\ & \sin\epsilon\sin\Delta\psi \\ & \cos\bar{\epsilon}\sin\epsilon\cos\Delta\psi - \sin\bar{\psi}\cos\epsilon \\ & \sin\bar{\epsilon}\sin\epsilon\cos\Delta\psi + \cos\bar{\epsilon}\cos\epsilon \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 ϵ 는 X축 회전량이며 협정 좌표계상의 황도면과 실제 황도면간의 경사각을 의미한다. $\Delta\psi$ 는 Z축 회전량이며, $\bar{\epsilon}$ 은 18.6년이란 강제장동의 주기의 변화로 인한 영향을 제거해 주기 위한 인자이다.

본 연구에서는 이상의 세 가지 인자들을 계산하기 위해 1980년에 IAU에서 발표한 모델을 사용하였다.

3.1.3 세차운동

세차운동의 영향을 보정하기 위하여는 식 (5)와 같은 회전행렬 P 를 이용하여 ECEF 좌표계에서 ECI 좌표계로 변환한다.

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서

$$\begin{aligned} P_{11} &= \cos\zeta_A \cos\Theta_A \cos Z_A - \sin\zeta_A \sin Z_A \\ P_{12} &= \cos\zeta_A \cos\Theta_A \sin Z_A + \sin\zeta_A \sin Z_A \\ P_{13} &= \cos\zeta_A \sin\Theta_A \\ P_{21} &= -\sin\zeta_A \cos\Theta_A \cos Z_A - \cos\zeta_A \sin Z_A \\ P_{22} &= -\sin\zeta_A \cos\Theta_A \sin Z_A + \cos\zeta_A \cos Z_A \\ P_{23} &= -\sin\zeta_A \sin Z_A \\ P_{31} &= -\sin\zeta_A \cos Z_A \\ P_{32} &= -\sin\zeta_A \sin Z_A \\ P_{33} &= \cos\Theta_A \end{aligned}$$

이고, 각 축 방향의 회전인자인 ζ_A , Θ_A 및 Z_A 는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \zeta_A &= 2306.2181T + 0.30188T^2 + 0.017998T^3 \\ Z_A &= 2306.2181T + 1.09486T^2 + 0.018023T^3 \\ \Theta_A &= 2004.3109T - 0.42665T^2 - 0.041833T^3 \end{aligned} \quad (6)$$

보다 정밀한 좌표계의 모델링을 위해서는 이상과 같은 지구의 섭동 회전으로 인한 영향과 지심오차를 제거하기 위한 변환도 수행되어야 한다.

3.2 ITRF에 준거한 위성 궤도의 모델링

GPS측위는 ECI 좌표계상에서 수행되어야 하며, 좌표계가 변환된 것처럼 위성의 궤도력 또한, ECI 좌표계상의 좌표로 변환되어야 한다.

정밀한 GPS위성의 궤도를 채용하는 데에는 두 가지 방법이 있는데 첫째는 GPS 위성으로부터 수신한 방송력을 정밀하게 모델링하는 것이며, 둘째는 국제적인 공동 관측망의 데이터를 통해 산출된 정밀력을 사용하는 것이다. 그림 2는 방송력을 정밀하게 조정하여 궤도모델링을 수행하는 절차를 표시한 것이다.

정밀력의 경우에는 International GPS Services(IGS), JPL, NIMA 등과 같은 기관들에서 자체적으로 계산하여

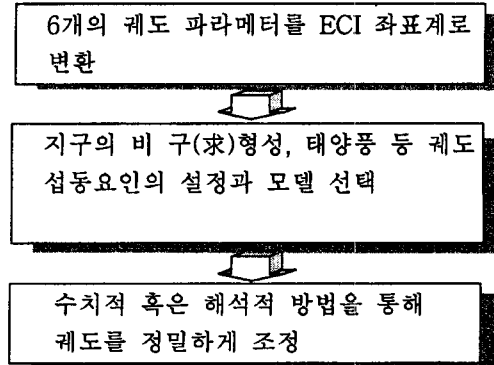


그림 2. 궤도 모델링의 절차

무료로 배포하고 있는데 이러한 대부분의 기관들은 전 지구적인 분포의 상시관측망을 보유하고 있으며, 미리 결정된 각 상시관측소의 좌표를 기준으로 하여 위성의 궤도를 역으로 계산한다. IGS의 경우는 현재 ITRF96에 준거하여 각 상시관측소의 좌표를 결정하고, 이를 기준으로 한 정밀력을 배포하고 있으며, JPL의 경우는 ITRF97에 준거한 정밀력을 배포하고 있다. 본 연구에서는 ECI 좌표계에 준거하여 계산된 JPL의 정밀력을 채용하였다.

4. GPS 관측 및 데이터의 해석

4.1 관측점의 선정 및 GPS 관측

본 연구에서는 기준점으로 국립지리원내에 위치한 GPS 상시관측점을 사용하였으며, 기준 좌표값의 결정 및 1,000 km 이상의 장기선장 해석에 대한 정밀도 평가를 위해 중국, 일본, 대만 등지에 설치된 상시관측소들의 데이터들을 이용하였다.

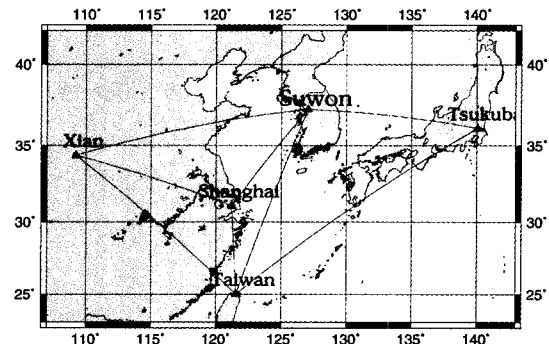


그림 3. 수원 상시관측점의 성과산출을 위하여 사용된 GPS 상시관측점망

표 2. 상시관측소의 명칭과 위치정보

SITE	지역	위도	경도	Antenna Height	관측시간(sec)
SHAO	Shanghai	31.099643	121.200441	0.1636	86400.00
SUWN	Suwonsi	37.275515	127.054238	1.6522	86400.00
TAIW	TAIPEI	25.021331	121.536540	1.8507	86400.00
TSKB	Tsukuba	36.105680	140.087496	0.0822	86400.00
XIAN	SHAANXII	34.368671	109.221490	0.4662	86400.00

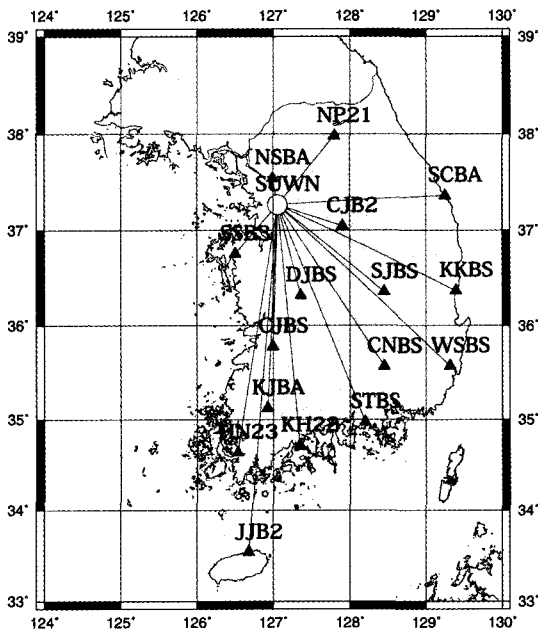


그림 4. 국내 관측점의 분포

그림 3은 수원 상시관측점의 성과를 산정하기 위해 아시아 지역을 중심으로 형성한 관측망을 표시한 것이며, 표 2에는 각 상시관측소의 명칭과 대략적인 위치를 나타낸 것이다. 각 관측소들은 IGS 국제 공동 관측망에 포함되어 있으며, 데이터의 수신간격은 30초로써 24시간동안 연속 관측을 수행하고 있는 관측소들이다.

표 2에 표시한 안테나 높이는 IERS 기준의 것으로서 표석으로부터 LC phase center까지의 높이이다. 그림 4는 전국에 걸쳐 분포된 정밀 1차 기준점들 중에서 접근이 용이하고 위성신호의 수신에 양호한 16점을 선정하여 관측한 점들을 표시한 것이다.

관측에 사용한 장비는 본 연구실에서 보유하고 있는 2주파용 수신기인 Ashtech사의 Z-Surveyor이고, 관측시간은 평균 14시간이며, 각 측정점의 위치와 수신시간 및 대략적인 위치들은 표 3에 표시한 바와 같다.

수원 상시관측점을 기준으로 하였을 때에 각 관측기선

표 3. 관측점의 위치, 안테나높이 및 관측시간

SITE	지역	위도	경도	안테나 높이(m)	관측시간 (sec)
NSBA	남산	37.54904	129.9908	1.233873	32860.00
SSB3	서산	36.75432	126.4998	1.380184	27370.00
CJB2	충주	37.04843	129.9037	1.456766	20880.00
DJBS	대전	36.31680	127.3603	1.313757	204340.00
NP21	춘천	37.98182	127.7961	1.304543	23870.00
SJBS	상주	36.35530	128.4527	1.390265	31510.00
CJBS	전주	35.78086	126.9943	1.304543	31260.00
SCBA	삼척	37.36518	123.2506	1.445658	34480.00
KKBS	강구	36.36889	129.3939	1.128722	32820.00
KJBA	광주	35.12166	126.9265	1.292434	32660.00
CNBS	창령	35.56710	128.4535	1.057816	31980.00
WSBS	울산	35.57289	129.3162	1.250033	27240.00
HN23	해남	34.64493	126.5331	1.224782	31960.00
KH22	고흥	34.72002	127.3454	1.263160	35590.00
STBS	진주	34.97350	128.2030	1.421506	114010.00
JJB2	제주도			1.199519	98350.00

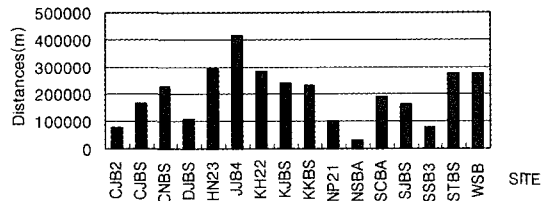


그림 5. 관측 기선장의 분포

의 분포를 살펴보면 기선장이 가장 짧은 것은 서울의 남산에 위치한 기준점까지의 거리가 약 31 km이고, 가장 긴 기선은 제주 기준점까지의 거리로서 약 415 km이다. 그림 5는 각 기선장의 분포를 표시한 것이다.

본 연구에서 기준점으로 채용한 수원 상시 관측점의 데이터 수신간격은 30초이고, 24시간 동안 연속 관측한 것으로서 약 24일, 576시간에 해당하는 분량이다. 정밀 단독측위 방법에 의한 위치결정에는 7일간의 데이터를 사용하였으며, 국제 관측망을 이용한 위치결정에는 1일 데이터 그리고 16점의 기준점의 위치결정을 위해서는 16일간의 데이터를 사용하였다. 본 연구에서 기준점으로 채

용한 수원 상시관측소의 제원은 다음과 같다.

· 좌표(Epoch 1999, ITRF97, 안테나 높이 1.6522 m 기준) :

X = -3062023.4156 m

Y = 4055449.1662 m

Z = 3841819.3768 m

· 수신기: Trimble, ROGUE SNR-8000, 95년 3월 15일부터 관측시작

· Antenna: ROGUE_T, AOAD/M_T 타입

· Antenna Height:

- 1.57 m(기둥 하반부터 ARP까지)

- 0.0822 m(ARP부터 LC Phase Center까지)

4.2 GIPSY-OASIS II에 의한 데이터의 처리

본 연구에서 사용한 GIPSY-OASIS II는 지구 궤도운동을 하는 위성들로부터 트래킹한 데이터의 분석을 위해 NASA의 Jet Propulsion Laboratory(JPL)에서 개발한 소프트웨어로서 GPS측위를 위한 특정한 모델링 기법과 추정기능을 제공하고 있는 정밀하고, 효율적이며, 다양한 기능들을 가진 궤도결정용 소프트웨어이다. 또한, 시스템 설계와 트래킹 정확도 분석에 사용되는 공분산 분석능력과 많은 특정한 시뮬레이션 기능들을 제공하고 있다. GIPSY-OASIS는 지구 저궤도 인공위성(500 km)으로부터 Geosynchronous 고도(36,000 km)위성의 트래킹 데이터 분석에 사용되고 있으며, 저궤도 위성의 궤도결정 정확도를 2 cm정도까지 결정할 수 있는 소프트웨어이다. GIPSY-OASIS II는 FLINN Network이라 불리는 정밀측지 관측 시스템을 이용하여 GPS 위성의 궤도를 정밀하게 계산할 수 있으며, JPL에서 제공하는 FLINN Network을 통해 계산된 GPS위성의 궤도와 지축의 변동량 및 각종 지각변동량을 이용하여 GPS 데이터의 정밀한 해석을 수행할 수 있다.⁵⁾

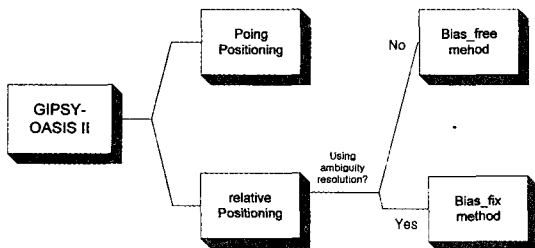


그림 6. GIPSY-OASIS II의 처리 모드

본 연구에서는 GIPSY-OASIS II가 지원하는 여러 데이터 해석기법들 중에서 비 고정점(non-fiducial) 방법을 사용하였으며, 비 고정점 방법 중에서도 정밀 단독측위 기법과 상대측위기법으로는 Bias-free기법, Bias-fix기법을 사용하였다(그림 6).

본 논문에서는 수원 상시관측점의 ITRF96에 기준한 성과산출과 수원 상시관측소 성과를 고정한 16점의 정밀 1차 기준점에 대한 관측 데이터 처리를 수행하였다. 수원 상시관측소의 성과산출은 7일간의 데이터를 사용하여 비 고정점 방법 중 정밀 단독측위 기법으로 해석하여 각각의 결과를 통계처리하여 대표값을 산출하였고, 또한, 4점의 아시아 지역의 상시 관측점과수원 상시관측소를 연결하는 삼각망을 형성하여 Bias-free기법과 Bias-Fix기법으로 해석하였다.

정밀 1차기준점에서 관측한 데이터의 처리는 수원 상시관측점을 기준으로 방사형태의 망을 형성하여 Bias-free 기법과 Bias-fix기법에 의하여 수행하였다.

정밀 해석을 위해 사용한 외부 데이터로는 FLINN Network에 속한 기준국들의 좌표를 통해 계산된 정밀궤도력, 좌표계 변화량 계산 파일 등을 사용하였다. 지구기준좌표계로는 ITRF 96을 사용하였으며, 사용된 파일들과 그 용도는 표 4에 표시한 바와 같다.⁷⁾

4.2.1 수원 상시관측점의 성과산출

정밀 단독측위 기법으로 매일의 데이터를 처리한 결과는 각각의 표준편차가 4 mm이하로 비교적 높은 정밀도를 보였으며, 좌표값들은 서로 1 cm 미만의 차이를 가

표 4. 데이터 해석에 사용된 파일들

File	내용과 용도
peci	GPS위성의 정밀궤도력, JPL제공
BulletinB	좌표계변화량, 지구모델링, IERS 제공
tpeo.nml	좌표계 변화량, 지구모델링, JPL제공
TDPfile	시간에 따른 측점의 변화량, 지구모델링, Filtering
XFILE	좌표계 변환파라미터, 비 고정점 방법에서의 변환부분

표 5. 7일 데이터의 처리결과(Epoch 99.5.23)

	Axis	Parameters(m)	STD(m)
Position	X	-3062022.7136	±0.00131
	Y	4055448.0777	±0.00138
	Z	3841818.3136	±0.00117
Velocity	Vx	-204.0653	±215.145
	Vy	63.5924	±230.824
	Vz	-394.2014	±194.803

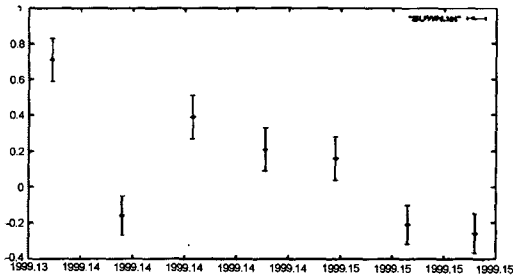
지고 있다. 7일간의 관측 결과를 조합하여 99년 2월 23일 기준의 상시관측점 좌표를 계산하였으며, 표 5는 계

산결과를 표시한 것이다. 표 5에서 좌표값의 계산결과는 기존의 성과와 비교하여 차이가 없지만 관측점의 이동속도는 처리한 데이터의 양이 충분치 않아 정확한 결과를 얻을 수 없었다.

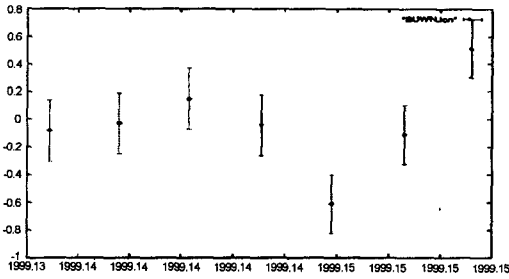
표 5의 결과를 기준으로 한 1일 관측데이터 처리결과들의 분포는 그림 7에 표시한 바와 같은 결과를 얻었다. 각 도표들에서 좌표는 측지좌표로 표시하였으며, 관측결과와 변화와 각각의 편차를 표시한 것이다.

4.2.2 아시아 지역 상시관측점의 성과산출

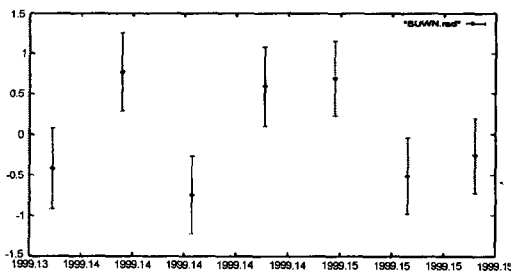
아시아 지역 5개 상시관측점의 24시간 관측데이터를



(a)



(b)



(c)

그림 7. (a) 위도의 변동과 편차, (b) 경도의 변동과 편차, (c) 표고의 변동과 편차

표 6. Bias-free 기법에 의한 기선해석 결과

기선장	길이(m)	표준편차(m)
SHAO ⇒ SUWN	870957.9624	0.0019
SHAO ⇒ TAIW	674099.6728	0.0015
SHAO ⇒ TSKB	1828915.6254	0.0017
SHAO ⇒ XIAN	1177366.4020	0.0015
SUWN ⇒ TAIW	1453039.6966	0.0023
SUWN ⇒ TSKB	1169433.4186	0.0025
SUWN ⇒ XIAN	1636354.3843	0.0026
TAIW ⇒ TSKB	2146125.8179	0.0039
TAIW ⇒ XIAN	1572905.5029	0.0038
TSKB ⇒ XIAN	2782017.0568	0.0019

표 7. 각 상시관측점의 계산된 ITRF96 좌표

위치	좌표축	좌표(m)	1σ(m)
SHAO	X	-2831733.2760	0.00231
	Y	4675666.0607	0.00345
	Z	3275369.5088	0.00233
SUWN	X	-3062022.6624	0.00300
	Y	4055448.1104	0.00328
	Z	3841818.3282	0.00274
TAIW	X	-3024781.9820	0.00476
	Y	4928936.8037	0.00447
	Z	2681234.4259	0.00228
TSKB	X	-3957199.2443	0.00291
	Y	3310199.6847	0.00255
	Z	3737711.6925	0.00252
XIAN	X	-1735212.5085	0.00181
	Y	4976840.1359	0.00359
	Z	3580538.3594	0.00257

표 8. 기선해석결과(Bais-fix 기법)

기선장	길이(m)	표준편차(m)
SUWN ⇒ CJBS	165616.5729	0.0021
SUWN ⇒ CJB2	79266.4721	0.0027
SUWN ⇒ CNBS	226940.2230	0.0031
SUWN ⇒ DJBS	109480.0208	0.0022
SUWN ⇒ HN23	295307.2106	0.0023
SUWN ⇒ JJB4	415144.6957	0.0017
SUWN ⇒ KH22	284387.3587	0.0022
SUWN ⇒ KJBS		
SUWN ⇒ KKBS	231378.3013	0.0044
SUWN ⇒ NP21	102270.3878	0.0022
SUWN ⇒ NSBA	31212.3477	0.0032
SUWN ⇒ SCBA	189475.2748	0.0081
SUWN ⇒ SJBS	160875.9818	0.0036
SUWN ⇒ SSB3		
SUWN ⇒ STBS	275168.9487	0.0031
SUWN ⇒ WSBS	276792.8474	0.0056

각각 Bias-fix상대측위 기법과 Bias-free상대측위 기법으로 해석하였으며, 표 6은 Bias-fix상대측위 기법으로 처리한 기선해석결과를 표시한 것이고, 표 7은 각 상시관측점의 계산된 ITRF96좌표를 표시한 것이다.

표 9. 결정된 ITRF96좌표(Bais-fix기법)

SITE	좌표축	dx, dy, dz(m)	좌표 (ITRF96)(m)	1σ(m)
CJB2	X	68895.0550	-3130917.7686	0.0061
	Y	33831.9330	4021616.1447	0.0065
	Z	19800.0614	3822018.2522	0.0057
CJBS	X	54886.2517	-3116908.9653	0.0049
	Y	-81990.7792	4137438.8569	0.006
	Z	133018.2270	3708800.0866	0.0051
CNBS	X	167866.4999	-3229889.2135	0.007
	Y	-12171.8107	4067619.8884	0.007
	Z	152231.8275	3689586.4861	0.0068
DJBS	X	60094.9178	-3122117.631	0.0056
	Y	-34294.3374	4089742.4151	0.0058
	Z	84843.2034	3756975.1102	0.0051
HNAM	X	64747.9860	-3126770.6996	0.0062
	Y	-165337.9187	4220785.9964	0.0062
	Z	235960.5525	3605857.7610	0.0051
JJB4	X	116494.9059	-3178517.6195	0.0046
	Y	-212343.9999	4267792.0776	0.0052
	Z	337170.5917	3504647.7219	0.0042
KH22	X	121441.7868	-3183464.5004	0.0053
	Y	-116887.4619	4172335.5396	0.0058
	Z	229053.1566	3612765.1570	0.0047
KKBS	X	201044.4152	-3263067.1288	0.0069
	Y	81744.4773	3973703.6004	0.0056
	Z	80217.7032	3761600.6104	0.0051
NP21	X	23009.7724	-3085032.4860	0.0052
	Y	77388.2997	3978059.7780	0.0058
	Z	-62776.0273	3904594.3409	0.0054
NSBA	X	-15745.7092	-3046277.0044	0.0067
	Y	11253.8784	4044194.1993	0.007
	Z	-24487.4104	3866305.7240	0.0069
SCBA	X	141187.2811	-3203209.9947	0.0081
	Y	125437.1708	3930010.9069	0.0097
	Z	-15248.9713	3857067.2849	0.0087
SJBS	X	135859.462	-3197882.1756	0.007
	Y	28026.7433	4027421.3344	0.0068
	Z	81472.562	3760345.7516	0.0057
STBS	X	173804.862	-3235827.5756	0.0069
	Y	-56428.4329	4111876.5106	0.0062
	Z	205731.9079	3636086.4057	0.0052
WSBS	X	-228545.7088	-3290568.4225	0.0097
	Y	-37153.3348	4018294.7429	0.0074
	Z	-151659.9389	3690158.3747	0.0063

4.2.3 정밀 1차기준점의 성과산출

1차 기준점 관측데이터를 Bias-fix기법과 Bias-free기법으로써 해석하였으며, 표 8과 9는 Bias-fix기법으로 해석한 기선해석 결과와 좌표 산출성과를 표시한 것이다. 방사형태로 관측되었기 때문에 전체적인 망조정은 하지 못하고 수원 상시기준점을 기점으로 한 기선해석만으로 관측점 위치를 산정하였다.

4.2.4 정밀도 분석

GPS관측데이터 해석 결과의 정밀도를 위상파 측정치의 잔차들의 분포를 통해 표시하였다. 그림 8은 정밀 단독측위 기법으로 해석하였을 경우의 오차가 제거된 위상파의 잔차 분포를 표시한 것이고, 그림 9는 6시간 관측한 데이터를 사용, 수원 상시관측점을 기준으로 하여 상대측위 기법으로 해석한 결과를 표시한 것이다. 그림 8의 경우에는 잔차의 분포가 ±1 cm범위내에 집중되어 있으며, 반송파 위상의 경우에는 평균적으로 5.3692 mm의 편차를 가지고 있고, 코드 데이터의 경우에는 6.3452 cm의 편차를 보이고 있다.

그림 9에서 위상파를 이용한 해석결과 평균적으로

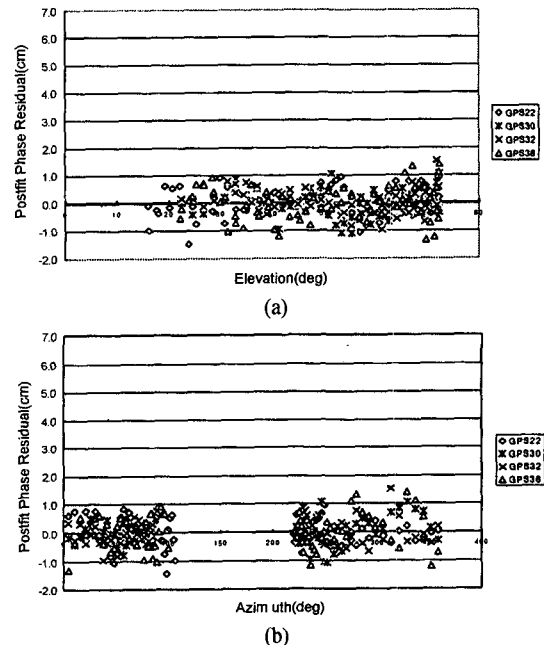
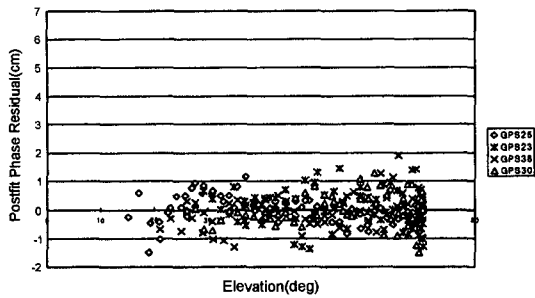
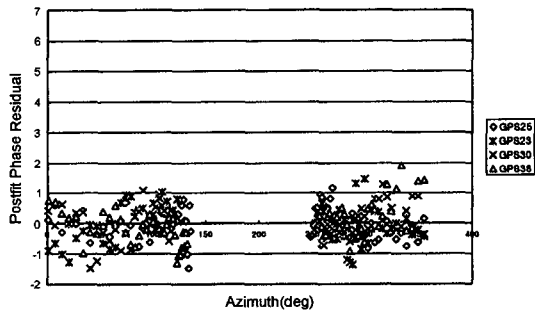


그림 8. a. GPS위성의 고도와 해당 위상파의 잔차 분포 (24시간관측, 정밀 단독측위), b. GPS 위성의 방위각과 해당 위상파의 잔차 분포 (24시간 관측, 정밀 단독측위)



(a)



(b)

그림 9. a. GPS위성의 고도와 해당 위상파의 잔차 분포 (6시간관측, 상대측위), b. GPS위성의 방위각과 해당 위상파의 잔차 분포 (6시간관측, 상대측위)

표 10. 처리기법 및 데이터별 측위 정밀도

데이터처리기법	Bias-fix (m)	Bias-free (m)	정밀도(측위(m))
7일관측데이터 (수원 상시관측점)			±0.0031
24시간 관측데이터 (아시아지역관측소)	±0.0030	±0.0031	
평균 14시간 관측데이터 (1차기준점측량)	±0.0062	±0.0086	

6.1377 mm의 편차를 가지고 있으며, 코드 데이터를 이용한 경우에는 5.973 cm의 편차를 보이고 있다. 대부분의 잔차들이 ±1 cm 범위내에 분포하고 있지만 상시관측점의 관측 데이터에 비하여 잔차가 비교적 넓게 분포되어 있음을 보이고 있는데 이러한 원인은 상대적으로 짧은

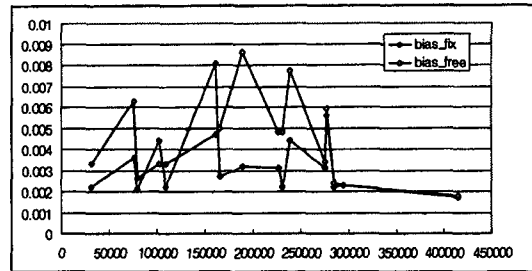


그림 10. 기선장에 따른 표준편차의 변화 (16점의 정밀 1차 기준점)

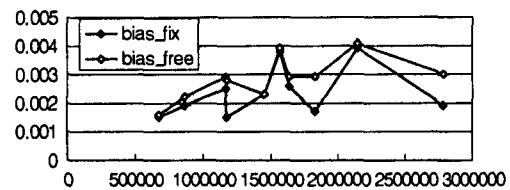


그림 11. 기선장에 따른 표준편차의 변화 (아시아 지역의 상시관측점 데이터)

관측시간과 수신지역이 수신 장애요소들이 많은 산악지역이었던 때문인 것으로 생각된다.

전체적인 데이터 해석 결과의 정밀도는 데이터의 종류와 처리기법에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있었으나 기선의 길이에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 처리데이터의 종류와 처리기법별 정밀도는 표 10에 표시하였다.

표 10에 표시한 결과에 의하여 Bias-free기법보다는 Bias-fix기법으로 해석한 결과가 정밀한 결과를 얻었으며, 데이터의 수신시간이 정밀도에 많은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

그림 10와 11은 각각 수원 상시관측점을 기준으로 16점의 정밀 1차기준점에 대한 기선해석 결과와 쓰구바, 상해, 타이완 및 시안을 연결하는 관측망의 기선해석 결과로부터 기선장에 따른 표준편차의 변화를 표시한 것으로서 기선장과 표준편차 간에는 상관관계가 성립하지 않음을 알 수 있다.

표 11. 수원 상시점 좌표의 정확도 검증

	A(ITRF97)	B(98,02,23)	C(99,02,23)	A-B	B-C	A-C
X(m)	-3062022.658	-3062022.687	-3062022.714	0.029	0.027	0.056
Y(m)	4055448.096	4055448.092	4055448.078	0.004	0.014	0.018
Z(m)	3841818.327	3841818.326	3841818.314	0.001	0.012	0.013

표 12. 상대측위 성과의 정확도 검증(단위:m)

위 치	좌표축	A(IERS성과)	B(산출성과)	A-B
SHAO	X	-2831733.266	-2831733.276	0.0101
	Y	4675666.049	4675666.061	-0.0117
	Z	3275369.508	3275369.509	-0.0008
SUWN	X	-3062022.658	-3062022.662	0.0044
	Y	4055448.096	4055448.110	-0.0144
	Z	3841818.327	3841818.328	-0.0012
TAIW	X	-3024781.984	-3024781.982	-0.0019
	Y	4928936.829	4928936.804	0.0253
	Z	2681234.445	2681234.426	0.0191
TSKB	X	-3957199.24	-3957199.244	0.0043
	Y	3310199.676	3310199.685	-0.0087
	Z	3737711.695	3737711.692	0.0025
XIAN	X	-1735212.505	-1735212.509	0.0035
	Y	4976840.13	4976840.136	-0.0059
	Z	3580538.365	3580538.359	0.0056

4.2.5 정확도 분석

단독측위 기법으로 해석한 결과의 정확도를 검증하기 위해서 IERS 1997년에 발표한 수원 상시관측점의 성과(ITRF97에 기준한 결과)와 비교하였다. ITRF97과 ITRF96과의 차이가 수mm에 지나지 않음을 감안하여 그대로 사용하였다. Epoch의 차이로 인한 측점의 이동량을 고려하기 위하여 98년 2월 23일을 기준으로 한 6일간의 데이터를 추가로 계산하여 함께 비교하였다.

표 11에서 99년 2월 23일의 좌표는 ITRF 97좌표와 X축 방향으로 5.6 cm, Y축 방향으로 1.8 cm, Z축 방향으로 1.3 cm의 차이를 보이고 있으나, 98년 2월 23일의 좌표는 X축 방향으로 2.9 cm Y축 방향으로 0.4 cm, Z축 방향으로 0.1 cm의 차이를 보이고 있다. 이러한 변화율을 볼 때에 상시관측점의 97년 데이터를 처리한다면 IERS 성과와 거의 같은 성과가 산출될 것이라 사료된다.

상대측위 기법의 정확도를 검증하기 위해 아시아 지역의 상시관측점 데이터들의 성과를 IERS성과와 비교하였다.

표 12는 IERS에서 계산한 결과와 본 논문에서 계산한 결과를 비교한 것으로서 평균 7 mm의 차이가 나는 것을 알 수 있으며, 이것은 1,000 km 정도의 거리에 있는 각 국가간에 분포한 기선장의 해석에서 1 cm미만의 정확도로 성과를 산출할 수 있음을 의미한다. 타이완과 수원 상시관측점의 경우에는 타 상시관측점에 비하여 큰 편차를 보이고 있는데 이것은 관측시간의 차이로 인하여 지각변동과 같은 변위들이 발생하였기 때문이며, 이 변위

량들은 IERS에서 제공하고 있는 각 측점의 연간 이동속도를 고려한 값과 비슷한 결과이다.

5. 결 론

정밀한 지구 좌표계에 기준하여 GPS 데이터를 해석할 때에 얻게 되는 정밀도와 정확도 분석하기 위하여 GIPSY-OASIS II 프로그램으로 데이터를 처리하여 얻은 결과를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 24시간 연속 측정데이터를 정밀한 기준좌표계에 기준하여 정밀 단독측위 기법으로 해석한 결과는 표준편차가 평균 3.1 mm로 높은 정밀도를 가지는 측위결과를 얻을 수 있었다.

(2) 국립지리원 상시관측점의 24시간 연속측정 데이터를 정밀 단독측위 기법에 의하여 해석한 결과와 IERS가 제공하는 ITRF97을 기준한 성과와의 좌표차이가 X축 방향으로 28.5 mm, Y축 방향으로 3.7 mm 및 Z축 방향으로 1.2 mm로서 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

(3) 정밀한 기준좌표계를 사용하여 국내 16점의 정밀 1차기준점의 관측 데이터를 수원 상시관측점을 고정하여 상대측위 기법으로 해석한 결과로는 표준편차가 평균 6.1 mm로 높은 정밀도로 기선을 해석할 수 있었다.

(4) 아시아지역에 분포한 5개 상시관측점의 24시간 연속측정 데이터를 상대측위 기법으로 해석한 결과는 표준편차가 평균 3 mm로 높은 정밀도로 장기선을 해석할 수 있었다.

(5) 관측 데이터를 해석함에 있어서 정밀 단독측위 기법과 Ambiguity Resolution을 사용하는 상대측위 기법을 모두 이용하여 해석한 결과로는 상대측위 기법을 사용하여 해석한 결과가 평균 3 mm 정도가 정밀하게 나타났으나 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Alfred K., P. J. G. Teunissen, "GPS for Geodesy", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
2. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenger, J. Collins, "Global Positioning System", Springer-Verlag, Wien, New York, 1997.
3. Boucher C, Z. Altamimi, P. Sillard, "The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF1997)", IERS, "IERS Technical Note 27, 1999.

4. Schwarz, K. P., "Fundamentals of Geodesy", University of Calgary Department of Geomatics Engineering, 1997.
5. Stephen M. L., Y. B. Sever, W. I. Bertiger, M. Heflin, K. Hurst, R. J. Muellerschön, S. C. Wu, T. Yunk, J. Zumberge, "GIPSY-OASIS II: A High Precision GPS Data Processing System and General Satellite Orbit Analysis Tool".
6. Stephen M., J. A. Slater, R. W. Smith, L. E. Kunz, C. Steven, Kenyon, "Refinements to The World Geodetic System 1984", in Proc. Institute of Navigation ION GPS-97, Kansas City, Missouri, 1997, 841-850.
7. Thierry G., "GIPSY-OASIS II: How it works", Jet Propulsion Laboratory, 1996.