한국측량학회지, 제 30권 제 3호, 2012. 6 : pp. 249~258

GPS 정밀단독측위 성과의 보정을 위한 기준시점 조정모델 개발

Development of Reference Epoch Adjustment Model for Correction of GPS Precise Point Positioning Results

성우진[1] · 윤홍식[2] · 황진상[3] · 조재명[4]
Sung, Woo Jin · Yun, Hong Sik · Hwang, Jin Sang · Cho, Jae Myoung

Abstract

In this study, the epoch adjustment model was developed to correct GPS precise point positioning result to be suitable for the current geodetic datum of Korea which is tied at past epoch statically. The model is based on the formula describing crustal movements, and the formula is composed of several parameters. To determine the parameters, the data gathered at 14 permanent GPS stations for 10 years, from 2000 to 2011, were processed using GIPSY-OASIS II. It was possible to determine the position of permanent GPS stations with an error range of 16mm and the position of check points with an error range of 12mm by appling the model to GPS precise point positioning result. It is considered that more precise model could be calculated by using GPS data of more permanent GPS stations.

keywords : GPS Precise Point Positioning, Crustal Deformation, Adjustment of Reference Epoch, Precise GPS Data Processing

초 록

본 연구에서는 정적 측지기준계를 채택하고 있는 우리나라에서 GPS 정밀단독측위 해석 결과에 정적 측지기준계의 기준시점으로부터 지진이나 지각변동에 의해 발생한 위치의 변동량을 보정함으로써 위치정확도를 향상시키기 위한 기준시점 조정모델을 개발하였다. 이를 위하여 우리나라 GPS상시관측소 중 14개소를 선정하여 2000년부터 2011년까지 약 10년간의 일별 GPS데이터에 대하여 GIPSY-OASIS II를 이용한 정밀단독측위 해석을 실시하고 이로부터 GPS상시관측소의 지각변동량을 결정하였다. 이로부터 SOPAC에서 채택하고 있는 지각변동모델식의 파라미터를 계산함으로써 기준시점 조정모델을 구하였다. 본 연구에서 구하여진 기준시점 조정모델을 적용한 결과 GPS상시관측소의 위치는 약 12mm의 정확도로 결정할 수 있었으며, 일반 측량점의 위치는 약 16mm의 정확도로 결정할 수 있다. 향후 보다 많은 GPS상시관측소의 데이터 처리를 통하여 기준시점 조정모델을 결정할 경우 지진이나 지각변동에 의하여 변동된 측량점의 위치를 실용적인 정확도 범위 내에서 GPS 정밀단독측위에 의하여 정적 측지계 기준의 좌표로 추정할 수 있을 것이다.

핵심어 : GPS정밀단독측위, 지각변동, 기준시점조정, GPS정밀해석

1. 서 론

GPS를 이용한 위치결정 기술의 발전으로 인하여 고정밀도의 위치정보 획득이 가능해짐에 따라 구조물의 변위측량 뿐만 아니라 지각변동과 같은 높은 정밀도(0.01ppm이상, Herring, 1999)가 요구되는 분야에서도 GPS를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 GPS 수신기의 소형화와 저가화로 인해 사용자와 활용범위가 급속히 증가되고 있으며, 보다 높은 정확도의 위치결정 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. GPS의 기준좌표계는 지심좌표계로서 그 원

1) 주저자 · 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사(E-mail:onize@skku.edu)
2) 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수(E-mail:yoonhs@skku.edu)
3) 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 겸임교수(E-mail:gpsboy@skku.edu)
4) 교신저자 · 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 겸임교수(E-mail:jmcho@skku.edu)

점은 지구의 질량중심을 기반으로 한다. 지구의 질량 중심은 지구 내 · 외부의 끊임없는 변화로 인해 위치가 지속적으로 변화되고 있는데, 그 변화량은 1년에 1mm 내외이다(조재명, 2011). 한편, 지구의 표면을 구성하고 있는 여러 개의 크고 작은 지각판(plate)들도 다양한 지구물리학적 현상으로 인하여 그 위치가 변화하고 있으며, 그 변화량은 1년에 수 cm 이상이다. 따라서 지표면 상의 제점의 위치는 기준좌표계와 지각의 변화에 의해서 실제로는 계속해서 변화되고 있다. 그러나 이러한 제점의 위치 변동량을 실제로 고려하게 된다면 끊임없는 좌표의 변화로 인해 혼란이 발생할 수 있으므로 대부분의 국가에서는 실용적인 정확도 범위 내에서 특정 시점(epoch)에 정의된 기준계와 좌표를 이용하는 정적좌표를 사용한다. 우리나라에서도 정적기준계(static datum)를 적용하고 있는데 좌표계로서는 ITRF2000을 사용하고 있으며, 시점(epoch)으로는 2002.000(2000년 1월 1일)를 사용하고 있다(국토지리정보원, 2010).

정적기준계는 지구상에 위치하는 제점의 위치가 특정 시점을 기준으로 변화되지 않고 고정된 것으로 가정하는 것이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 지심 및 지각은 지속적으로 변화되고 있기 때문에 이러한 가정은 엄밀하게는 잘못된 가정이다. 즉, 특정시점으로부터 시간이 변함에 따라 제점의 위치는 실제로는 점점 변화되기 때문에 위치 오차가 발생하는 단점이 있다. 이러한 정적기준계의 단점을 보완하기 위한 것으로서 동적기준계(dynamic datum)가 있다. 동적기준계는 지심과 지각의 변화로 인한 제점의 위치 변화량을 시간의 함수로서 정의하는 것이다(Tregoning, 1999). IERS(International Earth Rotation Service)에서는 1990년대부터 국제적으로 통일된 고정밀 범지구 기준 좌표계인 ITRF(International Terrestrial Reference Frame)을 제공하고 있다. ITRF에서 정의하고 있는 지심의 변화량은 1년에 1mm 내외로서 그 변화량이 매우 작기 때문에 ITRF는 수년에 한 번씩 지심의 변화량을 고려하여 새롭게 정의하고 있으며, 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서는 ITRF가 새롭게 정의될 때마다 국가좌표계를 갱신하는 것이 아니고 혼란을 방지하기 위하여 5~10년 이상의 간격을 두고 필요에 따라 국가좌표계를 갱신하고 있다. 그러나 지각판 경계에 위치한 뉴질랜드 및 일본 등은 지각변동량이 비교적 크게 발생하기 때문에 이로 인한 제점의 절대적, 상대적 변화량도 크게 발생하며, 따라서 기준계나 제점의 위치를 자주 갱신해야할 필요성이 있다. 그러나 지나치게 잦은 기준계 및 제점 위치의 재정의는 이용자의 혼란을 발생시킬 수 있으므로 정적기준계와 동적기준계의 장점들을 결합한 준동적 기준계(semi dynamic datum)를 적용하고 있다(Tregoning, 1999).

준동적 기준계는 시간변화에 따른 좌표의 변동량을 고려함에 있어서 기준계의 변화에 의한 것보다는 지각의 변화에 초점을 두게 된다. 즉, 기준계의 원점인 지심은 정적인 것으로 가정하지만 지각변동에 의한 제점의 위치 변화는 동적인 것으로 가정하는 것이다. LINZ(Land Information New Zealand)에서는 NGZD2000 측지기준계를 정의하여 사용하고 있는데, 이는 준동적 기준계로서 기준좌표계와 시점은 고정되어 있으나 지진이나 지각변동으로 인한 지역적인 좌표의 변동량은 고려하는 측지기준계이다(Blick, 2007).

우리나라에서는 ITRF2000 기준계, 2002.00 시점에 고정된 GPS상시관측소의 좌표를 각종 측량의 상대적인 기준으로 사용하는 정적기준계를 국가 측지기준으로 채택하고 있다. 그러나 이는 2012년 현재를 기준으로 기준계 및 기준시점에 있어서 모두 10년 이상이 경과되었기 때문에 GPS상시관측소의 실제 위치와는 상당한 차이가 있다. GPS 상대측위에 있어서 측량의 기준은 GPS상시관측소의 좌표 성과이기 때문에 GPS상시관측소의 절대적, 상대적 위치 정확도는 모든 측량성과의 정확도에 영향을 미친다. 일반적인 측지측량에 있어서의 GPS 측량은 상대측위로서 GPS상시관측소와 측점을 동시 관측한 후 후처리를 통하여 mm~cm 정확도의 상대적인 위치성과를 획득하는데 이때, 측점의 위치는 특정 시점에 고정된 GPS상시관측소의 좌표를 기준으로 상대적으로 결정된다. GPS 상대측위 기법에 있어서 현 시점에 관측된 GPS 데이터로부터 특정시점 기준의 위치성과를 계산하는 것은 GPS상시관측소라는 특정시점에 고정된 성과 기준이 존재하기 때문에 크게 문제될 것이 없다. 그러나 최근들어 GPS 측위 기술 및 해석 소프트웨어의 발전으로 인해 가능해진 GPS 고정밀 단독측위(precise point positioning)에서는 계산된 현 시점의 측점 위치를 특정시점으로 조정하기 위한 상대적인 기준이 계산과정에서 고려되지 않기 때문에 별도의 조정과정과 방법이 고려되어져야 한다(Khan, 2005). 따라서 본 연구에서는 후처리 및 실시간 단독측위에 있어서 지각변동량을 고려한 기준시점 기반의 좌표로 조정하기 위한 방안에 대하여 연구하였으며, 우리나라에서 활용 가능한 조정모델을 개발하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 단독측위 정밀해석 소프트웨어인 GIPSY-OASISII를 이용하여 국내 GPS상시관측소 14점에 대한 약 10년 간의 GPS 데이터를 해석하

고 이로부터 GPS상시관측소의 년간 변동량을 계산하고, 우리나라의 기준시점 조정모델을 구하였다.

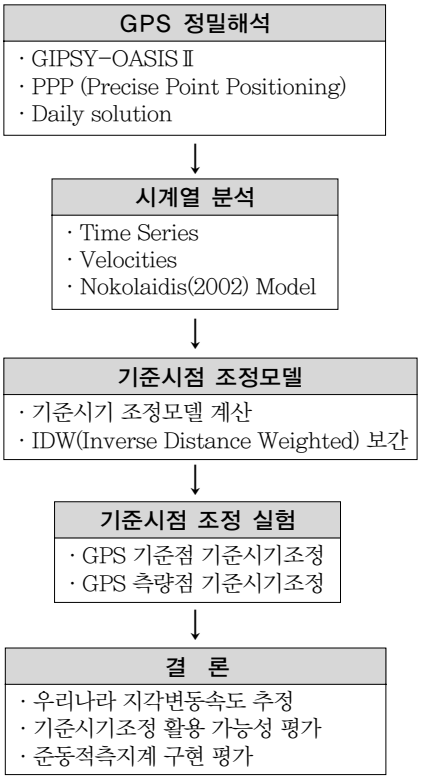

그림 1. 연구순서도

2. GPS 정밀해석 소프트웨어 및 처리대상 GPS상시관측소의 선정

GPS 정밀해석 소프트웨어에는 대표적으로 NASA JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 GIPSY-OASISII, MIT에서 개발한 GAMIT/GLOBK, 스위스 Bern대학에서 개발한 BERNESE 등이 있다. 이 중 GAMIT/GLOBK 및 BERNESE는 상대측위에 의한 기선해석에 의하여 좌표를 계산하기 때문에 본 연구에서는 단독측위 해석이 가능한 GIPSY-OASISII를 이용하여 GPS 데이터를 처리하였다. GIPSY-OASISII는 24시간 이상 관측된 GPS 단독측위 데이터를 이용하여 mm 수준의 정밀도로 위치를 추정할 수 있다. 정밀 단독측위 해석에서는 모든 측점들이 독립적으로 처리되기 때문에 GPS상시관측소와 같은 기준점에 의존하지 않으며, 비교적 단시간내에 측점의 좌표 계산이 가능하다는 특징이 있다.

유라시안판에 속한 우리나라는 지각판 경계에서 비교적 멀리 떨어져 있기 때문에 일본이나 뉴질랜드와 달리 한반도 내에서 전반적으로 균질한 크기와 방향으로 지각 변동이 발생하고 있다. GPS를 이용하여 우리나라의 지각변동량을 연구한 사례 중 박필호(2001) 등은 한반도 내의 7개 GPS상시관측소에 대한 20개월간의 관측데이터를 이용하여 남한지역의 지각변동속도를 추정하였으며, 조재명(2006)은 우리나라 및 우리나라 주변의 45개 GPS상시관측소에 대한 30개월간의 관측데이터를 이용하여 한반도의 지각변동량 및 지각구조적 특성을 분석한 바 있다. 또한 박관동(2007)은 국내 53개 상시관측소에 대한 2~5년 동안의 관측데이터를 이용하여 정밀단독측위 해석을 실시하여 남한지역의 지각변동 속도를 추정하였다.

본 연구에서는 우리나라의 지각변동 속도를 계산하고 이로부터 기준시점 조정모델을 결정하기 위하여 국내 GPS상시관측소 14개소에 대한 약 10년간(2000년 1월 1일 2011년 5월 31일)의 일별 데이터를 처리하였다. 연구에 사용된 GPS상시관측소는 국토지리정보원에서 1995년부터 구축 운영하기 시작한 GPS상시관측소 중 지각변동에 의한 변화량을 제외한 인위적 또는 물리적 변동요인

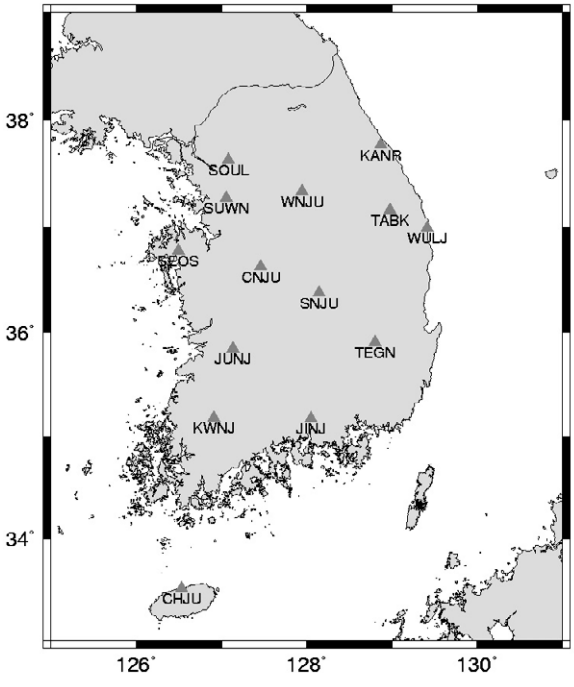

그림 2. 연구대상 GPS상시관측소(14개소)

이 없었고 데이터 손실률이 적은 14개소를 선정하였다(그림 2).

3. 기준시점 조정 모델

본 연구에서는 SOPAC(Scripps Orbit Permanent Array Center)에서 사용하고 있는 기준시점 조정 모델 중 Nikolaidis(2002)에 의해 개발된 모델을 적용하여 우리나라 GPS상시관측소의 변동량을 기반으로 한 기준시점 조정 모델을 추정하였다. Nikolaidis의 조정 모델은 지각변동의 선형 요소, 연주기(annual periodic) 요소, 준 연주기(semi-annual periodic) 요소 및 지진이나 장비 교체 등으로 인한 불규칙적이고 급격한 변동 요소들의 영향을 고려한 모델이다(식 (1)).

$$y(t_i) = a + bt_i + csin(2\pi t_i) + dcos(2\pi t_i) + esin(4\pi t_i) + fcos(4\pi t_i) + \sum_{j=1}^{n_g} g_j H(t_i - T_{gj}) + v_i \quad (1)$$

식 (1)에서 t_i 는 연 단위 시간(decimal year), a는 초기 변동속도, b는 선형 변동 계수이고, c와 d는 연주기 변동 계수, e와 f는 준 연주기 변동 계수를 나타낸다. 마지막 항은 급격한 변화 및 물리적 변동 요소 등에 대한 것으로써 지진, 장비교체와 같은 인위적인 변동뿐만 아니라 백색잡음(white noise) 등이 발생하였을 경우 지속적인 데이터 관측을 유지하기 위한 보정 항이다(Nikolaidis, 2002). 마지막 항에서 g_j 는 지진과 같이 불규칙하고 급작스럽게 발생한 변동량의 크기를 나타내며, H는 단위계단함수(heaviside step fuction)이고 T_{gj} 는 변동이 발생한 연 단위 시간을 나타낸다.

3.1 GPS상시관측소 변동량의 시계열 분석

본 연구에서는 국토지리정보원에서 운영 중인 GPS상시관측소 중 14개소를 선정하여 약 10년간(2000년 1월 1일 2011년 5월 31일)의 일별 데이터에 대하여 정밀단독측위 해석을 실시하였다. GPS상시관측소의 변동량을 분석하기 위하여 정밀단독측위 해석 결과의 평면좌표에 대한 시계열 분석을 실시하였으며, 선형회귀분석에 의하여 변동 속도를 추정하였다. 선형회귀분석 시 이상값(outlier)을 제거하기 위하여 선형식으로부터의 차이가 3σ 이상 되는 좌표는 제거하였는데 상시관측소별 이상값의 분포는 전체 데이터의 약 3~5% 이었다. 그림 3은 본 연구에서 분석된 GPS상시관측소 평면좌표의 시계열 그래프이다.

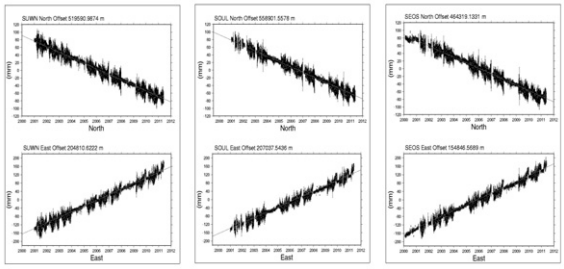

그림 3. 연구대상 GPS상시관측소의 시계열 그래프 중 일부(SUWN, SOUL, SEOS)

3.2 지진에 의한 변화량 분석

본 연구의 GPS 데이터 분석 기간 중 2011년 3월 11일 오후 2시 46분 일본 동북부지방 센다이 남동쪽 130km(위도 38 ° 06′ 12″ 경도 142 ° 51′ 36″), 해저 24km 지점에서 규모 9.0 강진이 발생하였다. 이 지진으로 인하여 일본뿐만 아니라 유라시안판에 속해있는 대부분의 지역에서 지각변동이 발생하였다. 이 지진으로 인한 우리나라 GPS상시관측소의 변동량을 분석하기 위하여 지진발생 전 · 후 각 7일간의 GPS상시관측소 데이터에 대하여 일별해석을 실시한 후 그 평균의 차로부터 변동량을 구하였다(그림 4, 표 1). 센다이 지진에 의해서 발생한 우리나라의 지각변동량은 지역에 따라 그 크기에 차이가 있었으며(15~35mm), 평균적으로 약 25mm의 변동이 발생한 것으로 나타났고, 그 방향은 진앙지인 동쪽 방향(방위각 87°)을 향하고 있는 것으로 분석되었다.

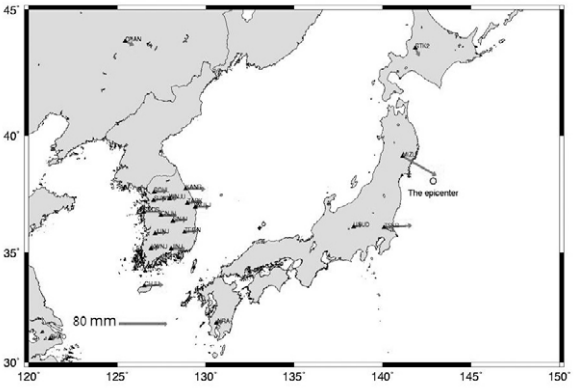

그림 4. 일본 센다이 지진에 의한 GPS상시관측소의 변동 벡터

표 1. 일본 센다이 지진에 의한 GPS상시관측소 변동량

상시 관측소	변동량 (mm)		수평변위 (mm)	방위각(°)
	N	E		
SUWN	0.39	24.93	24.93	89.10
KANR	-0.56	35.43	35.43	90.91
TEGN	2.51	24.86	24.99	84.23
SNJU	2.24	25.31	25.41	84.94
SEOS	0.97	21.69	21.71	87.44
SOUL	0.43	25.49	25.49	89.03
WULJ	2.01	34.29	34.35	86.65
WNJU	0.38	28.58	28.58	89.24
JUNJ	1.75	20.63	20.70	85.15
CHJU	1.95	14.16	14.29	82.16
TABK	0.35	33.48	33.48	89.40
CNJU	1.69	23.38	23.44	85.87
JINJ	2.59	22.51	22.66	83.44
KWNJ	1.89	19.74	19.83	84.53
평균	1.33	25.32	25.38	86.58

3.3 기준시점 조정모델 파라미터 계산

우리나라에 적용하기 위한 기준시점 조정모델을 구하기 위하여 앞에서 추정된 GPS상시관측소의 시계열 분석 결과와 센다이 지진에 의한 변동량으로부터 식 (1)의 Nikolaidis 모델에서 제시하고 있는 선형 변동, 연간 변동, 계절 변동 및 급격한 변동량 등에 대한 파라미터를 계산하였다. 표 2, 3은 각 상시관측소별로 N, E 방향에 대한 파라미터를 계산한 결과이다.

표 2. N방향 기준시점 조정모델 파라미터

상시관측소	선형 변동	연간 변동		계절 변동		지진 변동	결정계수
	b	c	d	e	f	g	R^2
SUWN	-0.0145	0.00125	0.00097	0.00016	-0.00046	0.00039	0.98423
KANR	-0.0142	0.00119	0.00034	0.00004	-0.00048	-0.00056	0.97798
TEGN	-0.0144	0.00182	0.00172	-0.00006	0.00013	0.00251	0.97685
SNJU	-0.0150	0.00193	0.00087	-0.00029	-0.00031	0.00224	0.98299
SEOS	-0.0146	0.00124	0.00118	-0.00018	-0.00062	0.00097	0.98637
SOUL	-0.0140	0.00175	0.00091	-0.00012	-0.00053	0.00043	0.98326
WULJ	-0.0140	0.00111	0.00122	-0.00066	-0.00069	0.00201	0.98190
WNJU	-0.0139	0.00201	0.00112	-0.00017	0.00002	0.00038	0.98278
JUNJ	-0.0153	0.00204	0.00051	0.00025	-0.00048	0.00175	0.97683
CHJU	-0.0182	0.00204	0.000142	0.00004	-0.00045	0.00195	0.97610
TABK	-0.0114	0.00179	0.00053	-0.00066	-0.00079	0.00035	0.97322
CNJU	-0.0159	0.00127	0.00090	-0.00001	-0.00001	0.00169	0.98514
JINJ	-0.0147	0.00203	0.00173	-0.00080	-0.00021	0.00259	0.97831
KWNJ	-0.0145	0.00274	0.00094	-0.00025	-0.00049	0.00189	0.97490

표 3. N방향 기준시점 조정모델 파라미터

상시관측소	선형 변동	연간 변동		계절 변동		지진 변동	결정계수
	b	c	d	e	f	g	R^2
SUWN	0.0270	0.00010	0.00402	0.00006	-0.00018	0.02493	0.97888
KANR	0.0258	0.00037	0.00292	-0.00035	0.00098	0.03543	0.97378
TEGN	0.0266	0.00061	0.00356	-0.00047	-0.00012	0.02486	0.97342
SNJU	0.0259	-0.00072	0.00421	-0.00116	0.00027	0.02531	0.97926
SEOS	0.0278	-0.00194	0.00508	-0.00064	0.00031	0.02169	0.98453
SOUL	0.0256	-0.00050	0.00370	-0.00143	0.00057	0.02549	0.97853
WULJ	0.0260	-0.00062	0.00357	-0.00070	0.00015	0.03429	0.97646
WNJU	0.0264	-0.00053	0.00439	-0.00166	0.00054	0.02858	0.98210
JUNJ	0.0276	-0.00084	0.00489	-0.00073	-0.00033	0.02063	0.97503
CHJU	0.0282	0.00011	0.00378	-0.00087	0.00043	0.01416	0.97012
TABK	0.0292	-0.00262	0.00295	-0.00122	-0.00009	0.03348	0.98095
CNJU	0.0272	-0.00070	0.00413	-0.00122	-0.00038	0.02338	0.97350
JINJ	0.0272	-0.00038	0.00355	-0.00118	-0.00064	0.02251	0.98141
KWNJ	0.0264	0.00196	0.00461	0.00096	0.00174	0.01974	0.97429

한편, 추정된 파라미터의 정확도는 결정계수(R^2)로부터 평가할 수 있는데 본 연구에서의 결정계수는 N, E방향 평균 0.97889로서 높은 정확도로 파라미터가 추정되었음을 알 수 있으며, 그림 5에 나타난 바와 같이 회기분석 실시 후 잔차는 정규분포의 형태와 등분산성의 이상적인 분포를 보이고 있는 것으로 분석되었다.

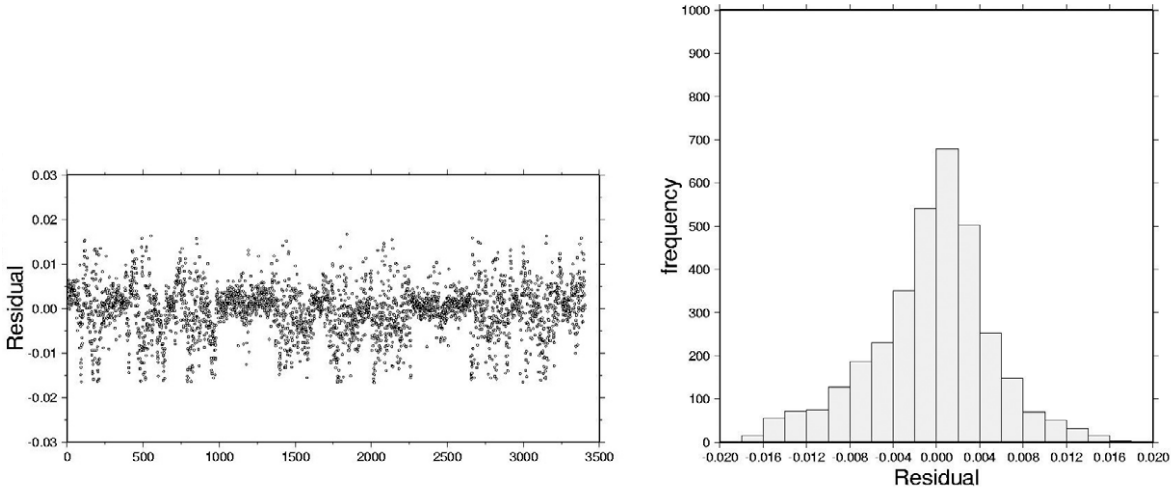

그림 5. SUWN 관측소의 N방향 잔차 및 도수분포도 (단위: m)

4. 기준시점 조정모델의 정확도 평가

4.1 GPS상시관측소

본 연구에서 구하여진 기준시점 조정모델 파라미터를 이용하여 각 GPS상시관측소의 변동속도를 계산하고 이를 실제 데이터로부터 구한 변동속도와 비교하여 조정모델

의 정확도를 평가하였다. SOPAC에서 제공하는 SUWN 관측소의 년간 변동속도와 본 연구결과에서 계산된 SUWN 관측소의 년간 변동속도의 차이는 약 0.9mm/yr로서 그 차이가 매우 작은 것으로 나타났다. 본 연구에서 분석된 우리나라 GPS상시관측소 14개소의 연간 평균 변동속도는 N방향 -14.49mm/yr, E방향 26.84mm/yr, 수직방향 0.20mm/yr으로서 평균 변동속도는 30.50mm/yr, 평균 방위각은 118.4° 로 나타났으며, TABK를 제외하고는 그 크기와 방향이 지역별로 2~3mm 차이 내에서 비교적 고르게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

표 4. GPS 상시관측소별 변동속도 (단위 : mm/yr)

상시관측소		n_vel	e_vel	u_vel
연 구 결 과	SUWN	-14.50	27.00	-0.20
	KANR	-14.20	25.80	0.70
	TEGN	-14.40	26.60	0.30
	SNJU	-15.00	25.90	0.90
	SEOS	-14.60	27.80	1.00
	SOUL	-14.00	25.60	-0.20
	WULJ	-14.00	26.00	1.20
	WNJU	-13.90	26.40	0.00
	JUNJ	-15.30	27.60	-0.30
	CHJU	-18.20	28.20	0.90
	TABK	-11.40	29.20	-1.90
	CNJU	-15.90	27.20	-1.80
	JINJ	-14.70	27.20	0.10
	KWNJ	-14.50	26.40	0.40
평균		-14.49	26.84	0.20
SOPAC 결 과	SUWN	-13.90	26.30	0.50
	DAEJ	-13.40	26.30	1.60

일반적인 측지측량에서는 대부분 GPS상대측위를 통하여 기준점과 측량점을 동시관측한 후 기선해석을 실시하고 기준점의 고시성과를 고정점으로 하여 망조정을 실시함으로써 특정 시점 기준의 측량점 좌표를 계산한다. 그러나 단독측위는 측량점의 독립적인 관측 및 해석을 통해 좌표를 계산하기 때문에 특정시점에 일치시키기 위한 조정과정이 별도로 필요하다. 본 연구에서 계산된 기준시점 조정 모델의 정확도를 검증하기 위하여 GPS상시관측소 데이터에 대하여 GIPSY-OASISII를 이용한 정밀단독측위 결과에 기준시점 조정모델을 적용한 좌표와 GAMIT/GLOBK를 이용한 고정성과 기준의 상대측위 결과 좌표를 비교하였다(표 5). 한편, 지진에 의한 급격한 변동량의 영향을 평가하기 위하여 센다이 지진 발생 전 · 후로 구분하여 검증을 실시하였다. 본 논문의 기준시점 조정 모델을 적용하여 우리나라 GPS상시관측소 성과의 기준 시점인 2002년(2002.000)으로부터 현재 2012년 시점의 성과를 센다이 지진 발생 전 · 후에 대하여 계산한 결과, 각 GPS상시관측소의 평면오차는 4~33mm의 분포를 나타내고 평균 평면오차는 12mm로 나타났다. 최대오차를 나타내는 TABK를 제외하면 대부분 10mm 내외의 오차를 나타내고 있는데 이는 우리나라의 연평균 지각변동 속도가 약 29mm/yr(조재명, 2011)로서 10년간의 누적 변동량이 약 30cm임과 국토지리정보원의 GPS 측량작업 규정에서 제시하고 있는 GPS 측량 정확도가 ±3cm임을 감안한다면, 본 연구결과를 이용하여 비교적 적은 오차로 좌표를 추정할 수 있음을 알 수 있다.

표 5. 기준시점 조정모델 정확도 평가 (단위 : mm)

관측소명	2011년 3월 10일 기준 (epoch : 2011.186)		2011년 3월 18일 기준 (epoch : 2011.208)	
	ΔN	ΔE	ΔN	ΔE
SUWN	-4.6	7.7	-4.9	8.3
KANR	-8.3	6.5	-8.5	7.1
TEGN	-4.4	3.8	-4.7	4.4
SNJU	-9.8	6.0	-9.9	6.5
SEOS	-3.4	5.6	-3.6	6.2
SOUL	-2.9	2.9	-3.2	3.4
WULJ	-5.7	5.9	-6.1	6.4
WNJU	-6.5	3.3	-7.0	3.9
JUNJ	-5.9	5.4	-6.2	6.0
CHJU	-9.2	0.7	-9.5	1.3
TABK	17.8	27.3	17.6	27.9
CNJU	-8.9	6.2	-9.3	6.8
JINJ	-3.9	-2.0	-3.9	-1.5
KWNJ	-4.4	-2.0	-4.6	-1.5
평 균	-6.8	6.1	-7.1	6.5
RMSE	8.1	9.0	8.3	9.4

4.2 일반 측량점

본 연구에서 구하여진 기준시점 조정모델의 실제 활용 정확도를 평가하기 위하여 GPS상시관측소 이외에 일반적인 측량점에서 관측된 GPS데이터로부터 정밀단독측위 해석을 실시한 후 기준시점 조정모델을 적용한 결과와 상대측위 해석을 실시한 결과를 비교하였다. 앞에서 계산된 14개 GPS상시관측소를 이용한 기준시점 조정모델에 대하여 IDW(Inverse Distance Weighted) 보간법을 적용하여 특정 위치에 대한 조정값을 추정하였다. 평가에 사용된 GPS 관측데이터는 2008년부터 2011년 사이에 통합기준점 및 삼각점에서 실제 관측된 데이터이다.

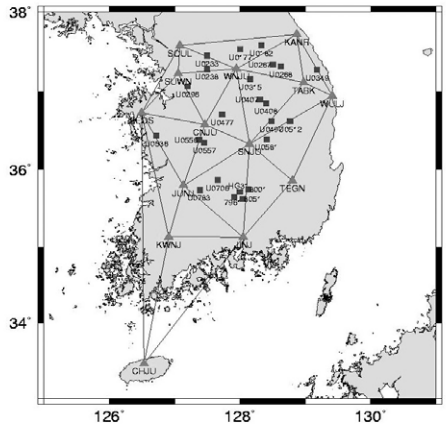

그림 6. 기준시점 조정모델 평가를 위한 GPS 측량점의 위치

표 6. GPS 측량점의 기준시점 조정결과 (단위 : m)

점명	관측시점	①단독측위 해석결과		②기준시점 조정결과		③상대측위 해석결과		차이 (②−③)	
		N	E	N	E	N	E	N	E
U0177	2008.849	548750.659	289019.487	548750.645	289019.491	548750.549	289019.671	0.0137	-0.0038
U0182	2008.842	554421.829	317317.866	554421.814	317317.859	554421.719	317318.043	0.0148	0.0068
U0233	2008.852	539271.147	243823.006	539271.131	243823.006	539271.036	243823.191	0.0160	0.0004
U0238	2008.852	520908.841	243893.240	520908.826	243893.243	520908.728	243893.429	0.0151	-0.0031
U0267	2010.600	527638.210	333290.464	527638.186	333290.436	527638.074	333290.674	0.0236	0.0277
U0268	2010.595	525151.094	344273.495	525151.065	344273.472	525150.953	344273.710	0.0293	0.0224
U0296	2008.863	495954.031	217370.203	495954.025	217370.187	495953.925	217370.377	0.0061	0.0161
U0315	2008.891	506866.454	302888.519	506866.442	302888.514	506866.352	302888.707	0.0123	0.0057
U0349	2010.595	521210.398	393234.028	521210.369	393234.000	521210.257	393234.238	0.0295	0.0287
U0407	2008.880	478014.595	316402.033	478014.577	316402.025	478014.488	316402.218	0.0182	0.0084
U0408	2008.880	472888.842	324449.142	472888.812	324449.137	472888.720	324449.328	0.0295	0.0054
U0477	2008.954	456720.998	264981.021	456720.997	264981.036	456720.894	264981.224	0.0010	-0.0144
U0497	2008.869	447871.922	332342.578	447871.905	332342.580	447871.807	332342.764	0.0166	-0.0020
U0512	2009.633	448233.259	358235.721	448233.253	358235.744	448233.144	358235.949	0.0056	-0.0231
U0536	2009.630	426561.257	175020.552	426561.288	175020.572	426561.174	175020.788	-0.0315	-0.0205
U0556	2008.877	424769.383	233573.444	424769.386	233573.435	424769.281	233573.626	-0.0028	0.0094
U0557	2008.877	416314.560	240746.855	416314.563	240746.846	416314.458	240747.037	-0.0029	0.0086
U0581	2008.872	421861.659	326274.481	421861.660	326274.475	421861.561	326274.659	-0.0009	0.0064
U0706	2009.630	363298.405	259105.312	363298.407	259105.293	363298.292	259105.504	-0.0021	0.0184
U0783	2009.641	348771.922	233488.373	348771.938	233488.381	348771.825	233488.589	-0.0165	-0.0080
HG31	2011.507	346640.705	290400.807	346640.843	290400.525	346640.831	290400.505	-0.0115	-0.0205
0796	2011.507	338927.749	282423.539	338927.887	282423.257	338927.864	282423.250	-0.0226	-0.0072
0800	2011.507	350802.744	302014.112	350802.882	302013.830	350802.871	302013.842	-0.0112	0.0115
0805	2011.507	337023.407	294461.767	337023.545	294461.485	337023.536	294461.503	-0.0086	0.0174
							평 균	0.0142	0.0123
							RMSE	0.0174	0.0151

일반 측량점에 대하여 본 연구에서 구하여진 기준시점 조정모델을 적용한 결과 상대측위 결과와 비교하였을 때 약 22mm의 평균오차를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 GPS상시관측소에서의 평균 차이인 12mm보다 큰 것으로서 보간법을 이용하여 특정점의 조정값을 구하는 과정에서 발생한 오차의 영향 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이러한 오차의 크기가 보간법의 한계에 의한 것이라기보다는 연구에 사용된 GPS상시관측소 지각변동량의 크기와 방향이 일부지역에서 불균질하게 발생하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉 GPS상시관측소 중 일부점(TABK, WNJU)의 변동량이 다른 GPS상시관측소와 다소 다른 크기와 방향으로 움직이고 있는데 이 때문에 실제 GPS상시관측소 사이에는 상대적인 위치 변동량이 발생하지만 기준시점 조정모델에서는 불균질한 지각변동량을 선형적인 보간법에 의하여 조정하기 때문에 비교적 큰 오차가 발생하는 것으로 분석된다.

5. 결 론

지구상에 위치하는 제점의 실제 위치는 측지기준계의 변동 및 지각변동으로 인하여 끊임없이 변화되고 있다. 그러나 국가단위 또는 일정 지역단위 내에서의 상대적인 변동량이 매우 작기 때문에 이용자의 혼란을 방지하기 위하여 특정 시점에 고정된 기준계와 좌표를 정의하여 사용하고 있다. 그러나 작은 변동량이라 하더라도 시간이 경과함에 따라 그 크기가 누적되면 이는 결국 위치 오차로 나타나기 때문에 정밀 측지측량을 위해서는 이러한 변동량을 보정하거나 기준계와 좌표에 대한 재정의가 필요하다. 본 연구에서는 우리나라에서 채택하여 사용하고 있는 정적 측지기준의 단점을 보완하기 위하여 지각변동 및 지진에 의한 위치의 변화를 고려한 기준시점 조정방법에 대하여 연구하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 첫째, GPS상시관측소 14개소의 10년간의 일별 정밀단독측위 해석 결과, 우리나라 지각변동량의 평균 속도는 30.6mm/yr, 평균 방위각은 118.5° 로 발생하고 있으며, 2002.000 시점을 기준으로 현재까지 위치가 평균 약 30cm 이동된 것으로 나타났다. 둘째, 14개 GPS상시관측소의 지각변동량을 SOPAC에서 사용하고 있는 기준시점 조정모델인 Nikolaidis 모델에 적용하여 기준시점 조정을 실시한 결과, 10년간의 지각변동량이 누적된 GPS상시관측소의 위치를 평균오차(RMSE) 12mm로 추정할 수 있었다. 셋째, 본 연구에서 구하여진 기준시점 조정모델을 일반 측량점에 적용한 결과, 평균오차 16mm로 추정할 수 있었는데 이러한 차이는 조정모델의 한계 보다는 일부 GPS상시관측소의 불균질한 변동량 때문인 것으로 판단된다. 넷째, 정밀단독측위 해석에 기준시점 조정모델을 적용할 경우, 일본 센다이 지진과 같은 급격한 지각변동 발생시 GPS 상대측위 및 해석에 의한 방법 보다 비교적 빠르고 간편하게 GPS상시관측소 및 측량점의 기준시점 좌표를 추정할 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 기준시점 조정모델을 계산하는데 있어서 14개의 GPS상시관측소를 이용하였으나 향후 우리나라 전체 GPS상시관측소 데이터를 이용하여 조정모델을 계산할 경우 보다 정밀한 조정모델 파라미터 계산이 가능하며, 이를 통하여 우리나라 지진 및 지각변동의 지역별 변동 특성을 보다 정확하게 추정함으로써 GPS 정밀 단독측위 해석과 기준시점 조정모델을 이용하여 보다 정확한 GPS측량 성과 계산이 가능할 것이다.

참고문헌

국토지리정보원 (2010), 국가기준점(위성기준점)의 측량성과, 국토지리정보원 고시 제2010-189호.

박관동 (2007), **한반도 지각변동 연구**, 발간등록번호 1-1500714-000054-01, 국토해양부 국토지리정보원.

박필호, 최위찬, 안용원, 임형철, 박종욱, 조정호 (2001), 남한지역 GPS 지각속도와 신기지구조의 예비적 해석, **한국지질학회지**, 한국지질학회, 제37권, 제3호, pp. 455-464.

송동섭 (2006), GPS로 추정한 지각변동 속도 및 판 거동 모델과의 비교, **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제 26권, 제 5호, pp. 877-884.

윤홍식 (2001), GPS 상시관측소의 절대좌표 산정에 관한 연구, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 19권, 제 4호, pp. 415-423.

윤홍식 (2010), **국가수직기준 체계 수립을 위한 연구**, 발간등록번호 11-1611265-000041-01, 국토지리정보원.

조재명 (2006), **GPS 상시관측소 데이터의 정밀해석 및 한반도 지각변동량 추정**, 박사학위 논문, 성균관대학교.

조재명 (2011), GPS상대측위 정확도 향상을 위한 한반도 지각변동모델 개발, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 29권, 제 3호, pp. 237-247.

황진상 (1999), **ITRF에 준거한 정밀 GPS 측위에 관한 연구**, 석사학위 논문, 성균관대학교.

Blick, Graeme (2007), Imlementing Localised Deformation Models into a semi-dynamic *datum, International Association*

of Geodesy Symosia, Vol. 130, Part V, pp. 631-637.

Herring, T. A. (1999). Geodetic aplications of GPS. *Proceeding of IEEE*, Vol. 87, Issue 1, pp. 92-110.

Khan, Shfaqat Abbas (2005), *Surface deformations analyzed using GPS time series*, PhD dissertation, University of Copenhagen, Copenhagen.

Nikolaidis, Rosanne (2002), *Observation of geodetic and seismic deformation with the global positioning system*, PhD dissertation, University of California, California.

Tregoning, P. and Jackson, R. (1999), The need for dynamic datum, *Geomatics Research Australasia*, No. 71, pp. 87-102.

Wolf, Paul R. and Ghilani, Charles D. (1997), *Adjustment computations*, 4th ed., John Wiley & Sons Inc., pp. 169-195.

(접수일 2012. 02. 22, 심사일 2012. 03. 27, 심사완료일 2012. 06. 27)