

# GPS상대측위 정확도 향상을 위한 한반도 지각변동모델 개발

## Improvement of GPS Relative Positioning Accuracy by Using Crustal Deformation Model in the Korean Peninsula

조재명<sup>1)</sup> · 윤홍식<sup>2)</sup> · 이미란<sup>3)</sup>

Cho, Jae Myoung · Yun, Hong Sik · Lee, Mi Ran

### Abstract

As of 2011, 72 Permanent GPS Stations are installed to control DGPS reference points by the National Geographic Information Institute in South Korea. As the center of the Earth's mass continues to move, the coordinates of the permanent GPS stations become inconsistent over time. Thus, a reference frame using a set of coordinates and their velocities of a global network of stations at a specific period has been used to solve the inconsistency. However, the relative movement of the permanent GPS stations can lower the accuracy of GPS relative positioning. In this research, we first analyzed the data collected daily during the past 30 months at the 40 permanent GPS stations within South Korea and the 5 IGS permanent GPS stations around the Korean Peninsula using a global network adjustment. We then calculated the absolute and relative amount of movement of the GPS permanent stations. We also identified the optimum renewal period of the permanent GPS stations considering the accuracy of relative GPS surveying. Finally, we developed a Korean crustal movement model that can be used to improvement of accuracy.

Keywords : Permanent GPS Station, Crustal Deformation Model, Precise Baseline Analysis, GPS Relative Positioning

### 초 록

우리나라의 GPS상시관측소는 1995년 국토지리정보원내에 최초로 설치된 이후, 2011년 현재 72개가 측량과 항법의 기준점으로 설치되어 활용되고 있다. GPS의 기준좌표계는 지심좌표계로써 그 중심은 1년에 약 1mm내외로 극히 작지만 끊임없이 움직이고 있기 때문에 특정 시간에 고정된 좌표계와 GPS데이터로써 그 좌표를 설정하고 있다. 한 국가 내에서 측량과 지도제작 목적으로 사용되는 GPS상시관측소는 상대적인 측량의 기준이기 때문에 국가적인 규약에 따라서 특정 시간대의 좌표계를 설정하여 사용하는 것이 혼란을 방지할 수 있다. 그러나 지심의 변화가 아닌 지각변동에 의한 GPS상시관측소간 기선의 상대적인 변화는 GPS상대측위의 정확도를 저하시키는 원인이 된다. 우리나라는 비교적 안정된 지각으로 구성되어 있다고 판단되어 왔기 때문에 지각변동에 따른 국가 기준점의 성과 갱신을 고려하지 않았다. 본 연구에서는 우리나라 GPS상시관측소 중 40개와 우리나라 주변의 국제 GPS상시관측소 5개를 선정하여 30개월간의 일별 GPS 데이터에 대하여 정밀기선해석을 실시하고, 전세계 130개 IGS GPS상시관측소망과 결합 조정함으로써 우리나라 GPS상시관측소의 연간 변동량을 계산하였다. 이로부터 우리나라 지각변동량의 특성을 분석하고 GPS상시관측소 사이의 상대적인 변동량을 계산하여 GPS상대측위의 기준점 역할 수행을 위한 GPS상시관측소의 성과갱신 주기를 분석하고 정밀 GPS상대측위를 위한 한반도 지각변동모델을 개발하였다.

핵심어 : GPS상시관측소, 지각변동모델, 정밀기선해석, GPS상대측위

1) 주저자 · 정희원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 겸임교수(E-mail:jmcho@skku.edu)  
2) 교신저자 · 정희원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수(E-mail:yoons@skku.edu)  
3) 정희원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정(E-mail:rantal@nate.com)

## 1. 서론

우리나라의 GPS상시관측소는 1995년에 국토지리정보원 내에 최초로 설치(SUWN)된 이후 행정자치부(현 행정안전부), 해양수산부(현 국토해양부), 국방부, 천문연구원 등 각 기관에서 측량, 선박의 항해, 지구물리 연구 및 군사적인 목적으로의 활용을 위해 현재까지 약 90여개를 설치하여 운영하고 있다. 이 중 46개 GPS상시관측소(2011년 기준)는 2008년 정부조직 개편과 더불어 통합되어 현재 국토지리정보원에서 관리·운영하고 있으며, 26개 GPS상시관측소는 위성항법 중앙 사무소에서 관리·운영하고 있다. 따라서 국토해양부에서는 총 72개 GPS상시관측소에 대한 성과를 고시하고 기본측량 및 공공측량을 위한 GPS상대측위의 기준점 데이터와 실시간 GPS 보정 데이터(VRS), 항법용 데이터를 제공하고 있다. 국토지리정보원에서 고시한 GPS상시관측소의 측량 기준 및 정확도는 표 1과 같으며, 국토해양부에서 관리·운영하고 있는 72개 GPS상시관측소의 분포는 그림 1과 같다.

표 1. 국토지리정보원 GPS상시관측소의 측량 기준 및 정확도  
(국토지리정보원 고시 제2010-189호)

측량 기준			측량 정확도	
좌표계	타원체	epoch	평균	수직(타원체)
ITRF2000	GRS80	2002.00	± 5mm+0.5ppm	± 5mm+1ppm

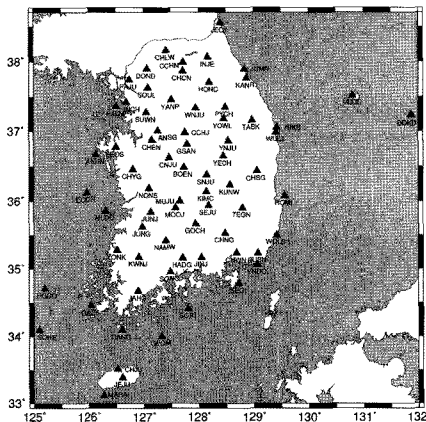


그림 1. 국토해양부 GPS상시관측소(2011년, 72개소)

GPS의 기준좌표계는 지심좌표계로써 그 원점은 지구 질량중심과 일치한다. 지구의 질량중심은 지구 내·외부의 끊임없는 변화와 더불어 지속적으로 변화하고 있기 때문에 지구기준좌표계(ITRF)는 정기적으로 수정되어 새롭

게 정의되고 있다. 그러나 그 변화량은 1년에 1mm 내외로써(ITRF2000, ITRF2005기준) 매우 작기 때문에 이에 따른 좌표계 갱신 및 수정기간은 비교적 장기간의 간격을 갖을 수 있다. 기준좌표계가 변화되면 GPS상시관측소와 같이 기준좌표계에 존재하는 제점의 좌표들도 변화되어진다. GPS상시관측소의 좌표를 변화시키는 요인에는 기준좌표계의 변화 이외에 지각변동, 지반침하, 안테나 필라의 변동 등이 있다. 이러한 위치변화 요인 중 기준좌표계의 변화에 의한 것은 한 국가 또는 특정한 지역 내에서 특정한 시점 기준의 기준좌표계를 사용하는 규약을 정함(Leick, 2004)으로써 위치변화에 따른 혼란을 방지하고 있는데, 우리나라 GPS상시관측소의 성과가 ITRF2000 좌표계를 기준으로 2002.00 시점의 좌표로 계산(2011년 현재)되어 있는 것이 대표적인 예이다. 지반침하나 안테나 필라의 변동 등은 GPS상시관측소 설치의 불안정성에 의한 것으로써 정기적인 확인 측량이나 계측으로 그 변화량을 점검하여야 하며, 필요시 해당 상시관측소별로 측각 성과를 갱신하여야 한다. 그러나 지각변동에 의한 GPS상시관측소의 위치 변화는 지역적인 측량이나 계측에 의해서 확인할 수 없으며, 그 변화 양상이 시간 및 지역적으로 일률적이지 않기 때문에 쉽게 분석하고 예측할 수 없다.

1년동안 발생하는 지심의 변화나 지각변동의 크기는 매우 작기 때문에 특정 시점에 고정된 기준좌표계와 좌표를 한 국가 또는 특정 지역 내에서 단기적으로 활용하는 데는 문제가 없다. 또한 장기적으로 지각변동량이 누적되더라도 특정 지역 내에서 그 크기와 방향이 모두 일률적이라면 그 지역 내에 존재하는 제점들 사이의 상대적인 위치의 변화는 발생하지 않기 때문에 이를 활용하는데 큰 문제가 없을 수도 있다. 그러나 실제 지각변동은 불균등하게 발생하기 때문에 시간의 변화에 따라 제점들의 위치도 상대적으로 변화되게 되며, 이러한 이유로 GPS상시관측소간 기선의 거리도 변화하게 된다. 일정기간 동안 GPS상시관측소의 성과갱신이 이루어지지 않는다면 그 기간 동안에 발생한 상시관측소간의 상대적인 위치 변화량은 이들 상시관측소를 기준으로 위치가 결정되는 GPS 측량 점들의 위치 오차로 나타날 수 있다. 따라서 GPS상시관측소를 기준으로 한 GPS상대측위의 정확도를 일정 정도로 확보하기 위해서는 GPS상시관측소의 성과를 주기적으로 갱신할 필요가 있다. 그러나 너무 잦은 성과의 갱신은 성과의 활용에 혼란을 발생시킬 수 있으므로 GPS상시관측소들의 지각변동량에 대한 정밀한 계산과 이를 바탕으로 상시관측소들 사이의 상대적인 위치 변화량을 분석하여

적절한 성과갱신 주기를 설정하거나 이러한 변화량을 보정할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

GPS를 이용한 지각변동 연구는 1980년대부터 관련 하드웨어 및 소프트웨어의 발전에 힘입어 본격적으로 시작되었으며, 현재 세계 각 국에서 지각변동 및 지진에 의한 영향을 모니터링 하고 분석하는데 GPS상시관측소를 활발히 활용하고 있다. 미국의 SCIGN, BARD, 일본의 GRAPES, 캐나다의 WCDA 등이 대표적인 예이다. 국내에서는 1995년부터 1996년까지 국토지리정보원과 일본 국토지리원의 공동관측으로 수원~일본 서부지역의 지각변동량을 계산한 바가 있으며, 박필호(2001) 등은 한반도 내의 7개 GPS상시관측소에 대한 20개월간의 관측데이터를 이용하여 남한지역의 지각변동속도와 신기 지구구조의 해석을 실시한 바가 있다. 최근들어 송동섭(2006)은 국내 GPS상시관측소 8개의 3년간 관측데이터를 이용하여 PPP(Precise Point Positioning) 해석에 의하여 한반도의 지각변동량을 추정하였으며, 박관동(2007)은 국내 53개 상시관측소에 대하여 관측소별 2~5년 동안의 일별 GPS데이터를 PPP 해석하여 남한지역의 지각변동 속도를 계산한 바가 있다.

본 연구에서는 GPS상시관측소를 기준으로 하는 GPS상대측위의 정확도 향상을 위하여 지각변동에 의한 우리나라 GPS상시관측소의 변동 특성을 분석하고 이로부터 GPS상시관측소의 성과갱신 주기 및 지각변동량 보정을 위한 한반도 지각변동모델을 제시하였다. 이를 위하여 한반도 및 한반도 주변 45개 GPS상시관측소의 30개월간 데이터에 대하여 이중차(Double Differencing) 기법에 의한 일별 기선해석을 실시하고, 전세계 130개 GPS상시관측소와의 망조정을 통하여 정밀한 지각변동량의 크기 및 방향을 분석하였다.

## 2. GPS 데이터 처리

### 2.1 GPS상시관측소 및 데이터 처리기간 선정

지각변동은 크게는 대륙판의 움직임으로부터 작게는 단층의 움직임으로 나타나고 있다. 비교적 큰 대륙판의 상대적인 움직임도 수백km 기선에 대하여 수mm~수cm/yr(년) 정도로 매우 작게 발생하기 때문에 이를 검출하기 위해서는 1년 단위 이상 데이터의 정밀 분석이 필요하다(King 등, 2003). 본 논문에서는 우리나라 GPS상시관측소가 본격적으로 설치되어 비교적 안정적으로 운영되기 시작한 2002년 이후부터 고장이나 인위적인 이동이 발생

하지 않고 GPS 안테나의 교체가 없었으며, 데이터 손실이 비교적 적은 GPS상시관측소 40개를 선정하여 30개월간(2002년 1월 1일~2004년 6월 30일)의 일별 데이터를 처리하였다. 40개 GPS상시관측소 중에는 국제 GPS상시관측소와의 연계를 위하여 IGS(International GNSS Service)에 등록되어 있는 국토지리정보원의 수원(SUWN) 관측소와 천문연구원의 대전(DAEJ) 관측소를 포함하였다. 본 연구에서 사용된 국내 GPS상시관측소 40개의 분포는 그림 2와 같다.

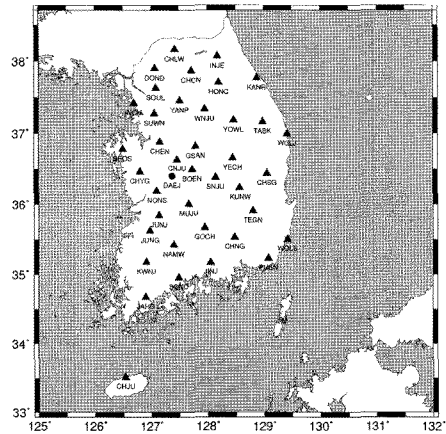


그림 2. 연구 대상 국내 GPS상시관측소(40개소)

### 2.2 기선해석 및 망조정

GPS 데이터의 기선해석 및 망조정을 위한 소프트웨어는 MIT대학에서 개발한 GPS 정밀기선해석 프로그램인 GAMIT/GLOBK를 이용하였고 처리 알고리즘은 기선거리 및 정밀도를 고려하여 「기준점 비고정 해석 후 전지구 망조정 방법」(2002, 윤홍식)을 사용하였다. 또한 한반도의

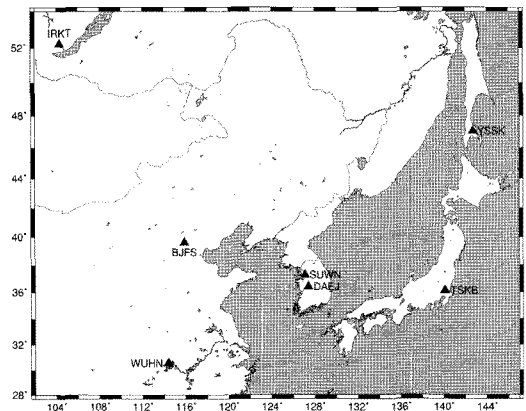


그림 3. 기선해석에 사용된 한반도 및 한반도 주변 IGS GPS상시관측소 분포(7개소)

전지구적 지각변동량 계산을 위하여 한반도 주변의 IGS GPS상시관측소 Core-Site 5개(IRKT, WUHN, BJFS, YSSK, TSKB)를 국내 GPS상시관측소와 연결하여 일별 기선해석을 실시한 후 전세계 IGS GPS상시관측소 중 130점을 연결하는 범지구적 망조정을 실시하였다.

### 2.3 기선해석 정밀도 및 망조정 정밀도

GPS 기선해석 처리결과와 정밀도는 독립 기선요소의 재현성(baseline repeatability)을 이용하여 평가하였다. 본 연구에서 bias-fixed 해석에 의한 일별 기선해석 결과의 평균 WRMS(Weighted Root Mean Square)는 그림 4와 같으며, 최대 기선길이 약 2,700km에 대하여 기선의 수평방향 WRMS는 최대 4.3mm, 전체 기선에 대한 평균 WRMS는 1.3mm로 나타났다.

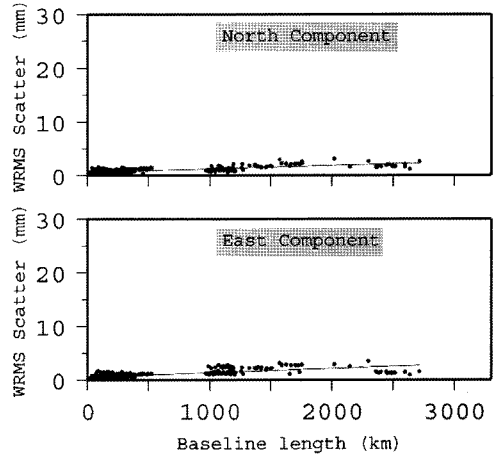


그림 4. GPS 기선해석(bias-fixed) 처리 정밀도

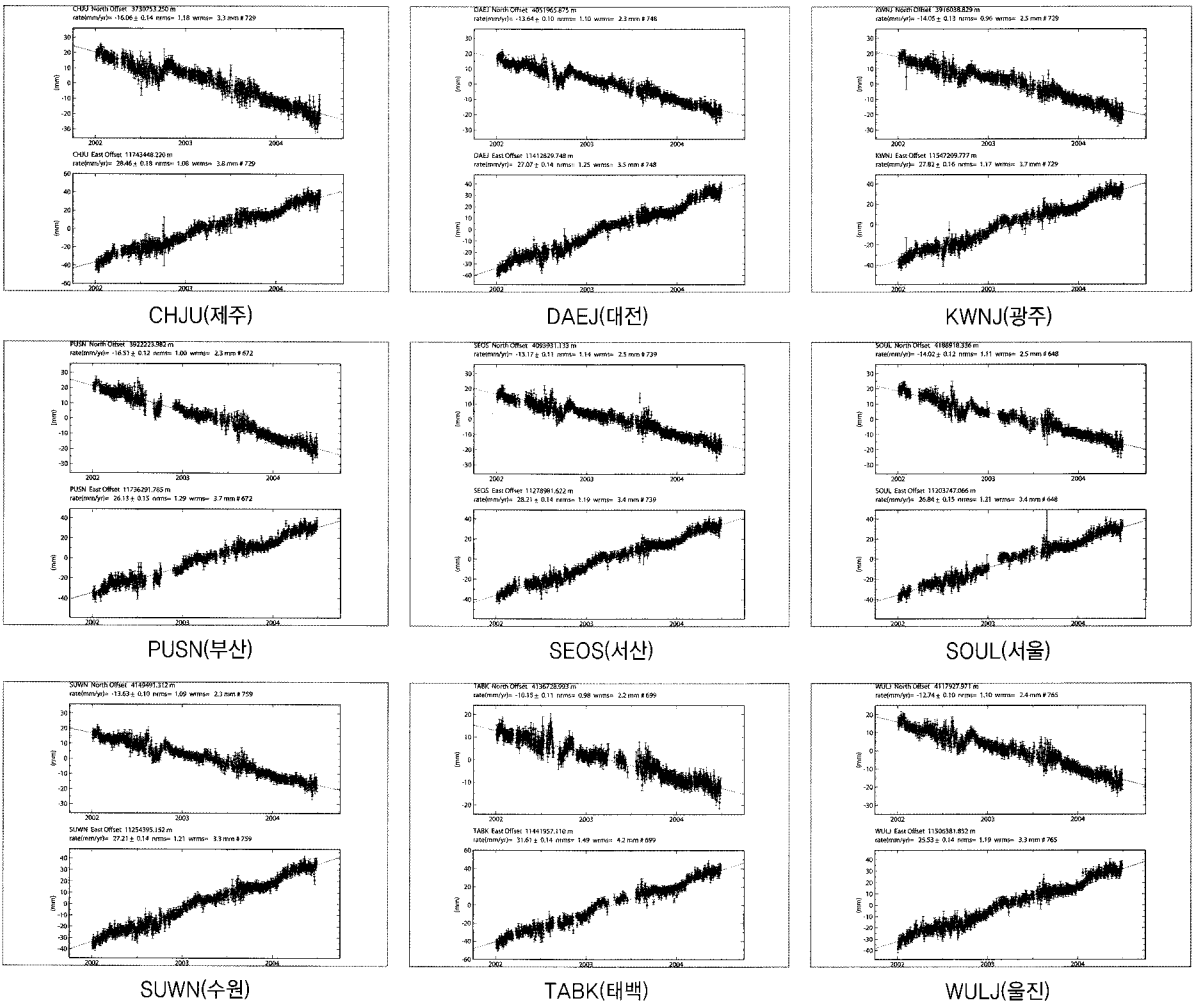


그림 5. 연구대상 GPS상시관측소의 변동량 시계열 그래프 중 일부(epoch:2002.000~2004.493, 위:North, 아래:East)

한편, 한반도 및 한반도 주변 GPS상시관측소에 대한 일별 기선해석 결과와 IGS Global Network 성과를 연결하기 위한 범지구적 망조정 결과의 품질은 관측값이 계산된 해에 대하여 얼마나 적합한가를 나타내는 기준분산(reference variance,  $\sigma_0^2$ )으로 평가하였는데 망조정 결과 기준값 평균이 1.29로써 1에 매우 가까워 결합 조정 결과가 우수한 것으로 나타났다.

### 3. GPS상시관측소의 변동량 분석

#### 3.1 GPS상시관측소의 변동량

국내·외 GPS상시관측소 45개(국내 40개, 국외 5개)에 대한 일별 기선해석 결과에 대하여 선형 회귀분석을 실시하여 각 점의 연간 변동속도(mm/yr)와 방향을 계산하였다. 그림 5는 연구대상 GPS상시관측소의 시계열 그래프 중 일부를 나타낸 것이며, 그림 6, 7 및 표 2는 전체 연구대상 GPS상시관측소의 연간 변동량을 나타낸 것이다.

GPS기선해석 결과 한반도를 포함하는 유라시아판에 속한 IGS GPS상시관측소들의 지각변동 속도는 평균  $32.79(\pm 4.88)$ mm/yr, 방위각은 평균  $109.5(\pm 1.35)^\circ$ 로 거동하고 있으며, 환태평양 지진대에 속하는 일본의 TSKB 관측소는  $13.86$ mm/yr,  $219.9^\circ$ 로 거동하고 있어 유라시아판과 태평양판이 서로 부딪혀 태평양판이 침강하는 구조의 일반적인 지각변동 메커니즘을 잘 나타내고 있는 것으로 나타났다. 한편, 우리나라 GPS상시관측소의 지각변동 속도는 평균  $28.99(\pm 1.47)$ mm/yr, 방향은 평균  $119.9(\pm 3.13)^\circ$ 로써 TABK(태백) 및 CHSG(청송) 관측소를 제외하고는 대부분 관측소들의 지각변동량이 고르게 분포하는 것으로 나타났다. 한편, 유라시아판에 속한 IGS GPS상시관측소의 지각변동 방향과 한반도의 평균 지각변동 방향이  $10^\circ$  이상

차이가 발생하는 것은 한반도가 판의 경계부에 위치하기 때문에 지각판의 충돌에 의한 영향을 더 많이 받는 지각판 운동의 메커니즘(Choi 등, 1997) 때문으로 판단된다.

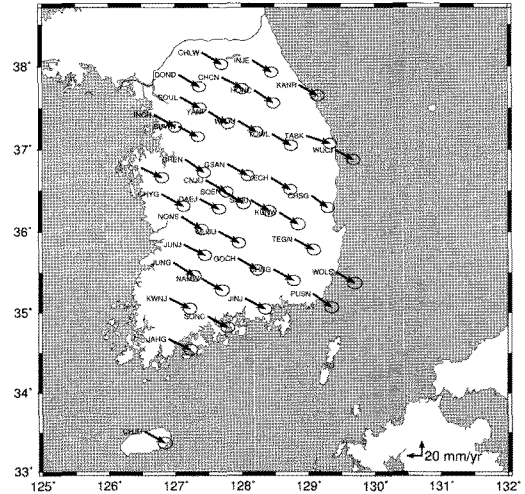


그림 7. 국내 GPS상시관측소의 연간 변동벡터(오차타원:95%신뢰도)

표 2. 한반도 및 한반도 주변 GPS상시관측소의 연간 변동량

상시관측소명	변동속도 (mm/yr)	방위각 (deg.)	상시관측소명	변동속도 (mm/yr)	방위각 (deg.)
BOEN	29.65	121.02	MUJU	29.68	120.44
CHAN	29.09	124.61	NAMW	30.34	119.55
CHCN	28.99	121.11	NONS	30.86	122.29
CHJU	30.02	119.62	PUSN	29.27	125.67
CHLW	28.66	121.33	SEOS	29.11	115.30
CHNG	29.17	118.52	SNJU	26.80	120.03
CHSG	25.54	126.00	SONC	29.44	119.15
CHYG	31.74	118.99	SOUL	28.43	119.52
CNJU	30.58	119.52	SUWN	27.67	117.72
DAEJ	27.95	117.56	TABK	31.76	107.73
DOND	29.95	121.57	TEGN	27.33	118.79
GOCH	28.59	120.80	WNJU	27.48	119.78
GSAN	29.60	119.18	WOLS	27.71	120.70
HONC	29.01	124.01	WULJ	25.86	117.65
INCH	30.86	120.89	YANP	28.87	122.22
INJE	28.52	122.28	YECH	28.61	121.06
JAHG	31.13	115.96	YOWL	27.93	121.13
JINJ	28.91	117.26	IGS상시관측소		
JUNG	31.23	122.95	BJFS	35.33	109.1
JUNJ	29.60	117.61	IRKT	27.17	108.4
KANR	26.66	119.75	TSKB	13.86	219.9
KUNW	27.97	121.85	YSSK	19.00	154.5
KWNJ	29.16	116.39	WUHN	35.88	111.0

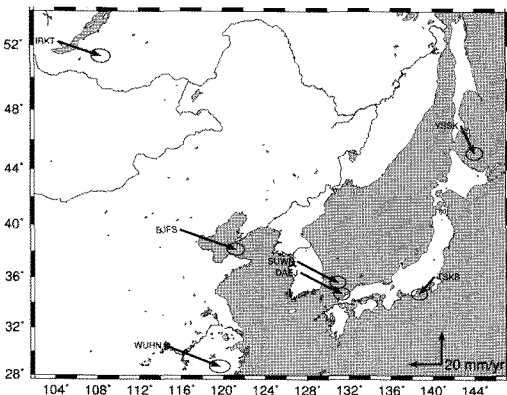


그림 6. 한반도 및 한반도 주변 IGS GPS상시관측소의 연간 변동벡터 (오차타원:95%신뢰도)

### 3.2 GPS상시관측소 사이의 상대적인 지각 변동량 분석

일반적인 GPS상대측위에서는 GPS상시관측소와 GPS측량점에 대하여 기선해석을 실시한 후 GPS상시관측소의 성과를 고정점 좌표로 하여 망조정을 실시함으로써 측량점에 대한 좌표를 계산한다. 즉, GPS상시관측소의 성과를 기준으로 측량점의 상대적인 좌표가 결정되는 것이다. 만약 우리나라 GPS상시관측소의 지각변동량이 모두 동일한 크기와 방향을 갖는다면 GPS상시관측소 사이의 상대적인 거리 변동량이 0이므로 GPS상대측위에 의한 상대적인 측량점의 좌표에는 변화가 없다. 그러나 GPS상시관측소의 실제 지각변동량은 그 크기와 방향에 있어서 서로 조금씩 차이를 나타내고 있으며, 이로 인해 GPS상시관측소 사이에는 상대적인 거리 변동이 발생한다. 이러한 변

동량을 고려하지 않고 상대측위 성과계산을 실시한다면, 변동량은 곧 측량의 오차로 간주되기 때문에 결국 GPS상대측위의 정확도를 저하시키게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 GPS상시관측소 사이의 상대적인 변동량을 각 상시관측소의 연간 지각변동량의 상대적인 차이로부터 다음과 같이 분석하였다.

#### 3.2.1 지각변동량의 상대적인 차이에 의한 기선의 변동량 분석

우리나라의 기본측량 및 공공측량에서는 GPS상대측위의 기준점으로서 GPS상시관측소를 주로 이용하고 있으며, GPS상대측위에서 기선해석의 정밀도는 기선이 길수록 낮아지게 되므로 일반적인 GPS측량망의 구성은 측량점에 가장 인접한 GPS상시관측소를 이용하게 된다. 따라

표 3. GPS상시관측소 삼각망 기선의 연간 변동량

삼각망 기선	변동량 (mm/yr)	삼각망 기선	변동량 (mm/yr)	삼각망 기선	변동량 (mm/yr)	삼각망 기선	변동량 (mm/yr)
DOND-CHLW	1.3	SOUL-SUWN	1.2	YECH-SNJU	1.9	MUJU-GOCH	1.1
CHLW-CHCN	0.3	SUWN-INCH	3.6	CNJU-CHYG	1.2	GOCH-NAMW	1.9
CHCN-DOND	1.0	YANP-SUWN	2.5	CHYG-SEOS	3.3	TEGN-GOCH	1.6
CHLW-INJE	0.5	WNJU-SUWN	1.0	CNJU-DAEJ	2.8	TEGN-CHNG	1.8
INJE-CHCN	0.8	SEOS-INCH	3.4	DAEJ-CHYG	3.9	CHNG-GOCH	1.3
INJE-HONC	1.0	INCH-CHAN	2.6	BOEN-DAEJ	2.4	WOLS-CHNG	1.8
HONC-CHCN	1.5	CHAN-SEOS	4.7	YECH-KUNW	0.8	JUNG-JUNJ	3.3
INJE-KANR	2.2	SUWN-CHAN	3.7	KUNW-SNJU	1.5	NAMW-JUNG	2.0
KANR-HONC	3.1	WNJU-CHAN	2.9	CHSG-KUNW	3.1	CHNG-NAMW	1.3
INCH-DOND	1.0	WNJU-GSAN	2.1	DAEJ-NONS	3.8	KWNJ-JUNG	4.0
DOND-SOUL	1.8	GSAN-CHAN	2.8	NONS-CHYG	2.0	NAMW-KWNJ	2.0
SOUL-INCH	2.5	YOWL-GSAN	1.9	DAEJ-MUJU	2.3	NAMW-SONC	0.9
CHCN-SOUL	1.0	YOWL-YECH	0.7	MUJU-NONS	1.5	SONC-KWNJ	1.4
CHCN-YANP	0.6	YECH-GSAN	1.4	BOEN-MUJU	0.3	NAMW-JINJ	1.9
YANP-SOUL	1.4	TABK-YECH	7.7	SNJU-MUJU	2.9	JINJ-SONC	1.1
HONC-YANP	0.9	WULJ-YECH	3.2	KUNW-MUJU	1.9	CHNG-JINJ	0.7
HONC-WNJU	2.6	WULJ-CHSG	3.8	CHSG-TEGN	3.8	CHNG-PUSN	3.6
WNJU-YANP	1.8	CHSG-YECH	3.9	TEGN-KUNW	1.6	PUSN-JINJ	4.3
HONC-YOWL	1.8	CHAN-CNJU	3.0	CHSG-WOLS	3.3	WOLS-PUSN	2.9
YOWL-WNJU	0.8	CNJU-SEOS	2.6	WOLS-TEGN	1.0	JAHG-KWNJ	2.0
KANR-YOWL	1.4	GSAN-CNJU	1.0	MUJU-JUNJ	1.5	SONC-JAHG	2.4
KANR-TABK	7.9	GSAN-BOEN	1.0	JUNJ-NONS	2.8	CHJU-JAHG	2.2
TABK-YOWL	7.9	BOEN-CNJU	1.2	TEGN-MUJU	2.5	SONC-CHJU	0.6
KANR-WULJ	1.3	GSAN-SNJU	2.8	MUJU-NAMW	0.8		
WULJ-TABK	7.7	SNJU-BOEN	2.9	NAMW-JUNJ	1.3		

서 본 연구에서는 연구대상 국내 GPS상시관측소 40점에 대하여 인접 상시관측소를 연결하는 삼각망을 구성하고 앞에서 계산된 각 상시관측소 지각변동량의 크기와 방향을 이용하여 삼각망의 각 기선에 대한 상대적인 변동량을 계산하였다. 40개 GPS상시관측소를 이용하여 구성된 삼각망은 총 59개이고 기선은 총 98개(중복 변 제외)로써 각 기선의 변동량은 그림 8 및 표 3과 같다. 계산 결과 전체 삼각망 기선의 변동량은 평균  $2.3(\pm 1.5)$ mm/yr, 최대 7.9mm/yr, 최소 0.3mm/yr로써 평균 변동량은 매우 작으나 최대 변동량이 상대적으로 크게 나타났다. 가장 큰 기선의 변동량을 나타내는 지역은 태백지역으로써 이는 TABK(태백) 관측소의 지각변동 속도와 방향이 인접 상시관측소와 큰 차이를 나타내는데 그 원인이 있는 것으로 분석되었다. 또한 SEOS(서산), WULJ(울진), PUSN(부산) 지역이 큰 차이는 아니지만 다른 지역에 비하여 비교적 큰 변동량을 나타내고 있는데 이는 주로 이 지역에서의 지각변동 방향이 다소 복잡하게 발생하기 때문인 것으로 분석되었다.

TABK 관측소를 제외한 나머지 GPS상시관측소들로 구성된 삼각망 기선의 변동량을 계산한 결과는 평균  $2.0(\pm 1.0)$ mm/yr, 최대 4.7mm/yr, 최소 0.3mm/yr로 나타났으며, 대부분 3mm/yr 이내의 고른 크기의 변동량을 나타내는 것으로 분석되었다.

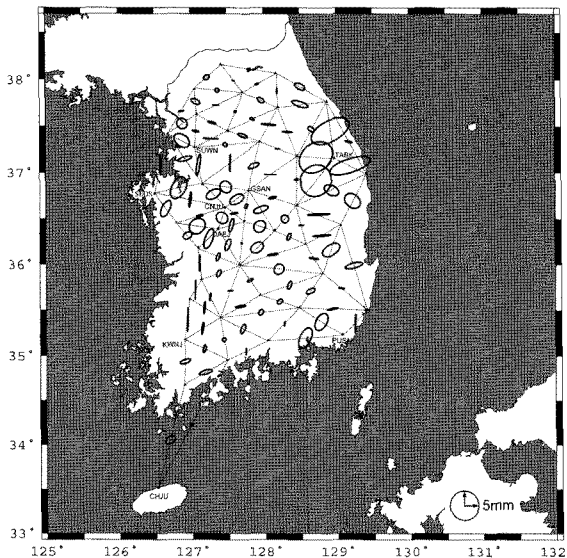


그림 8. 인접 GPS상시관측소간 기선의 연간 변동량

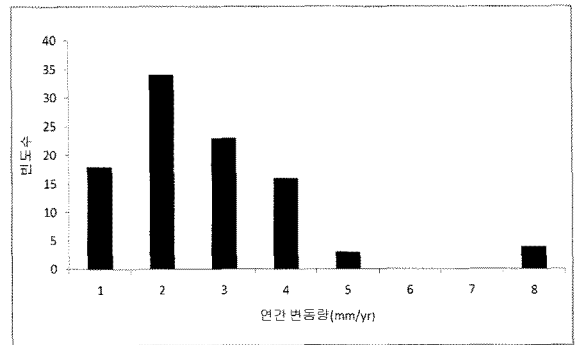


그림 9. 인접 GPS상시관측소간 기선의 연간 변동량 분포

### 3.2.2 기선해석 결과의 시계열 분석에 의한 기선의 변동량 검증

본 연구에서는 GPS상시관측소간 기선의 상대적인 변동량을 각 GPS상시관측소의 연간 변동량의 상대적인 차이로부터 계산하였다. 이러한 분석결과의 검증에 위하여 본 연구에서 구성한 GPS상시관측소 삼각망 중 일부를 대상으로 일별 GPS 기선해석에서 얻어진 데이터를 이용하여 기선 거리 변화의 시계열 분석을 실시하였다. 그림 10은 INCH, SOUL, SUWN 관측소로 이루어진 삼각망과 KANR, TABK, WULJ 관측소로 이루어진 삼각망의 기선에 대한 시계열 분석 결과이다. 6개 기선의 시계열 데이터에 대하여 선형회귀 분석을 실시하여 계산한 기선의 변동량과 앞서 각 상시관측소 변동량의 상대적인 차이로부터 계산한 기선의 변동량을 비교한 결과는 표 4와 같다.

표 4에 나타낸 바와 같이 시계열 분석에 의해 추정된 삼각망 기선 변동량의 표준편차는  $0.7\sim 2.2$ mm/yr로써 매우 정밀하게 추정된 것으로 나타났으며, 두 가지 방법에 의하여 각각 계산된 기선 변동량의 차이는 평균  $0.05(\pm 0.05)$ mm/yr로써 그 차이가 매우 작아 상대적인 지각변동량 차이에 의한 기선의 변동량 계산 결과 역시 매우 정밀함을 알 수 있다.

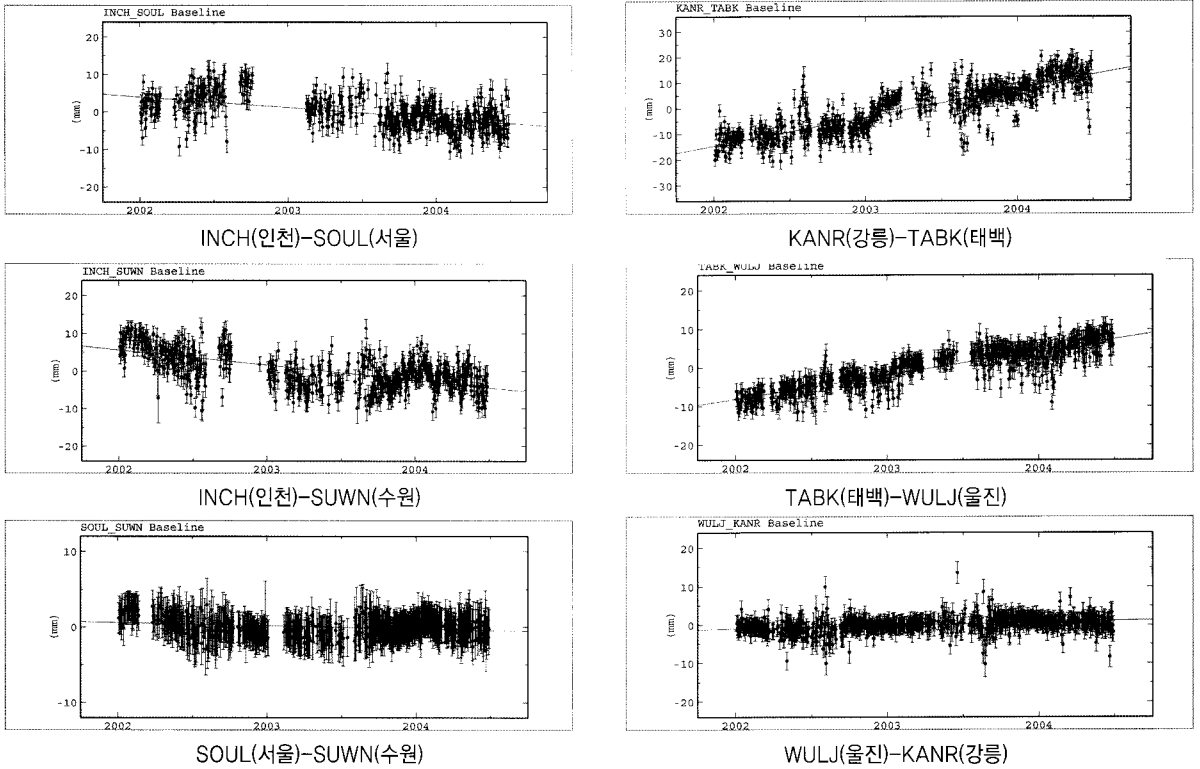


그림 10. GPS상시관측소간 기선 변동량 시계열 그래프

표 4. 시계열 분석에 의한 기선 변동량과 상대적인 지각변동량 차이에 의한 기선 변동량의 비교

상시 관측소	삼각망 기선	기선 변동량(mm/yr)		차이 (A-B)
		시계열 분석 (A)	상대적인 변동량 차(B)	
INCH	INCH-SOUL	2.4(±0.8)	2.5	0.1
SOUL	INCH-SUWN	3.7(±0.7)	3.6	0.1
SUWN	SOUL-SUWN	1.2(±0.8)	1.2	0.0
KANR	KANR-TABK	7.9(±2.2)	7.9	0.0
TABK	TABK-WULJ	7.8(±1.8)	7.7	0.1
WULJ	WULJ-KANR	1.3(±0.7)	1.3	0.0

#### 4. 한반도 지각변동모델

앞에서 언급한 바와 같이 GPS상시관측소 사이에 상대적인 위치의 변동이 발생하였으나 이러한 변동량을 고려하지 않고 GPS상시관측소를 기준으로 GPS상대측위에 의하여 GPS측량점의 성과를 계산하였다면 이러한 변동량은 측량결과의 오차로 나타나게 된다. 우리나라 GPS상시

관측소 사이의 상대적인 기선 변동량은 연평균 2.0mm/yr 로써 매우 작지만 이것이 장기적으로 누적될 경우 이는 GPS측량점의 오차가 될 수 있으므로 상대적인 지각변동량을 고려하여 GPS상시관측소의 성과를 주기적으로 갱신할 필요가 있다. 그러나 지각변동은 연속적(continuous)인 형태로 발생하기 때문에 불연속적(discrete)인 형태의 주기적 성과 갱신만으로는 그 위치를 보정하는데 한계가 있다.

또한 주기적인 성과 갱신은 지각변동량 뿐만 아니라 기준좌표계의 변화 등 다양한 요인에 대한 분석이 필요하고 갱신주기 설정에 있어서 성과 활용의 혼란을 방지하고 규정된 측량정확도를 만족할 수 있는 최적 주기를 결정하여야 하는 등 매우 복잡한 분석을 필요로 한다. 따라서 본 연구에서는 지각변동에 의한 영향을 보정하기 위하여 주기적인 성과 갱신 이외에 지각변동모델에 의한 보정방법을 제시하고 효용성을 평가하였다.

##### 4.1 지각변동모델 개발

본 연구에서는 GPS상시관측소의 상대적인 기선변화에



의한 GPS상대측위의 오차를 보정하기 위하여 본 연구에서 계산된 우리나라 GPS상시관측소들의 연간 지각변동량으로부터 경·위도 2분(minute) 격자간격의 지각변동모델을 개발(그림 11)함으로써 GPS상시관측소 성과갱신 주기 사이의 상대적인 변동량을 보정하여 사용할 수 있도록 하였다. 지각변동모델은 본 연구결과로부터 얻어진 우리나라 GPS상시관측소의 평균 지각변동량(변동속도 : 28.99mm/yr, 변동방향 119.9°)을 기준으로 상대적인 변동량을 계산하고 이를 선형보간법에 의하여 경·위도 2분 격자 간격화 한 모델이다. 본 지각변동 모델은 경·위도 격자에 대한 모델로서 GPS상시관측소 뿐만 아니라 GPS 측량점 또는 특정 위치에 대한 보정이 가능하다.

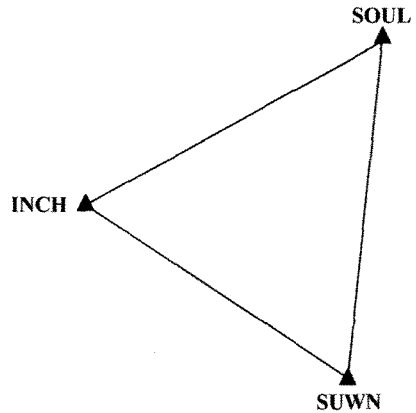


그림 12. 지각변동모델 적용 평가를 위한 실험망의 구성

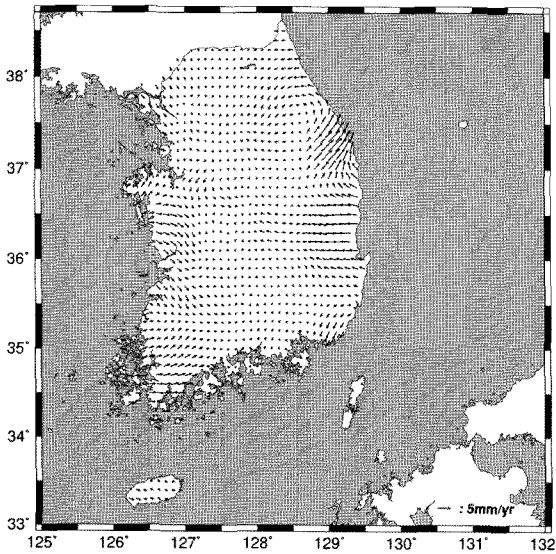


그림 11. 한반도 지각변동모델(경·위도 2분 간격)

표 5. 지각변동모델 적용 실험에 사용된 3개 GPS상시관측소의 좌표

	2002. 3. 1		2011. 3. 1	
	N	E	N	E
INCH	4165559.50109	11200426.87508	4165559.42712	11200427.07486
SOUL	4188918.33327	11203747.05306	4188918.26445	11203747.26800
SUWN	4149491.30160	11254395.15402	4149491.23412	11254395.38180

표 6. GPS상시관측소의 실제 기선 변동량과 지각변동모델에 의한 변동량 비교

	실제 기선 변동량 (mm)	지각변동모델에 기선 변동량 (mm, 9년 적용)	차이 (mm)
INCH-SUWN	24.4	32.4	-8.0
SUWN-SOUL	12.9	10.8	2.1
SOUL-INCH	11.8	13.5	-1.7

#### 4.2 지각변동모델의 적용 실험

본 연구에서 개발된 지각변동모델의 실제 적용 효과를 평가하기 위하여 2002년, 2011년 GPS상시관측소 데이터를 이용하여 계산된 실제 기선의 변동량과 본 연구에서 개발된 지각변동모델을 적용하여 계산된 기선 변동량을 비교·평가 하였다. 실험에 사용된 GPS상시관측소 망은 INCH, SOUL, SUWN 3개의 상시관측소 기선으로 이루어지는 망(그림 12)이며, 좌표 성과는 GAMIT/GLOBK를 이용하여 계산하였다. 3개 상시관측소의 2002년, 2011년 평면좌표(N/E) 성과는 표 5와 같으며, 각 기선의 변동량 및 본 연구에서 개발된 지각변동모델을 적용하여 계산된 동일 기선에 대한 변동량은 표 6과 같다.

표 5에서 보는 바와 같이 3개 GPS상시관측소는 9년간 각각 다른 크기의 지각변동량이 발생하였기 때문에 각 상시관측소를 연결하는 기선의 길이에는 표 6에서와 같은 변동량이 발생하게 된다. 본 연구에서 개발된 지각변동모델을 이용하여 동일 기선에 대하여 기선 변동량을 계산하여 비교한 결과 실제 기선의 변동량은 평균 16.4mm이고, 지각변동모델에 의한 기선의 변동량은 평균 18.9mm로써 절대값 평균 3.9mm의 차이를 나타내었다. 이는 본 연구에서 개발한 지각변동모델이 실제의 지각변동량을 약 76%의 정확도로 재현하고 있음을 나타낸다. 지각변동모델과 실제 변동량에 약간의 차이가 발생하는 것은 지각변동 속도와 방향이 항상 일정한 크기를 갖는 것이 아니고 크고

작은 지진이나 다양한 지구 역학적 요소에 의하여 지속적으로 변화되고 있기 때문에 분석된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 우리나라 GPS상시관측소의 장기간 정밀기선해석을 통하여 지각변동에 의한 GPS상시관측소의 변동량을 계산하였으며, 이로부터 우리나라 지각변동의 특성을 분석하고 GPS상시관측소 사이의 상대적인 변동량을 비교·분석하였다. 국내·외 GPS상시관측소 45개에 대한 30개월 간의 일별 기선해석 결과, 우리나라 지각변동의 평균 속도는 28.99mm/yr이고 평균 방향은 방위각 119.9°로 계산되었다. 한편, 국내 40개 GPS상시관측소를 인접점으로 연결하는 삼각망을 구성하고 지각변동량의 상대적인 차이에 의한 삼각망 기선의 변동량을 계산한 결과, 평균 2.3mm/yr, 최대 7.9mm/yr의 크기를 갖는 것으로 분석되었다. 최대 변동량이 크게 나타난 것은 TABK(태백) 상시관측소의 지각변동속도와 방향이 주변 GPS상시관측소와 많은 차이를 나타내기 때문인데, 그 원인이 실제 지역적인 지각변동에 의해서 발생하는 것인지 아니면 GPS상시관측소 설치환경의 불안정성(지반침하 등)에 의한 것인지는 보다 자세한 조사와 분석이 필요할 것이다. 다만 TABK 상시관측소의 변동량이 전체 기선의 평균 변동량에 매우 큰 영향을 미치므로 이를 이상값으로 판단하고 TABK 상시관측소를 제외한다면 기선의 변동량은 평균 2.0mm/yr, 최대 4.7mm/yr이며, 전체 기선의 80% 이상이 3.0mm/yr 이하의 기선 변동량을 나타내고 있어서 비교적 작고 고른 분포의 매우 안정적인 지각변동 형태를 갖는 것으로 분석되었다.

그러나 이러한 기선 변동량의 누적은 결국 GPS상시관측소를 기준으로 한 GPS 상대측위에 있어서 측량의 오차로 나타날 수 있다. 본 연구에 사용된 GPS상시관측소간 평균 기선장(약 33km)을 GPS상시관측소 성과고시(국토지리정보원고시 제2010-189호)에 명시된 기선 정확도( $\pm 5\text{mm}+0.5\text{ppm}$ )에 적용하였을 경우의 기선 정확도는 21.5mm이며, 이를 본 연구에서 분석된 GPS상시관측소 기선의 연간 변동량과 비교한다면 최대 변동량 기준 5년, 평균 변동량 기준 11년이 지나면 GPS상시관측소 기선 사이의 상대적인 거리 변화가 정확도 규정을 초과하는 것으로 분석된다. 따라서 GPS상시관측소를 기준으로 한 GPS 상대측위의 정확도를 향상시키기 위해서는 지각변동에 의한 영향을 보정하기 위하여 성과를 주기적으로 갱신하거

나 지각변동모형을 적용할 필요가 있다.

본 연구에서는 성과 갱신 주기 사이에도 측량의 정확도를 더욱 높이고 지진과 같은 불연속적인 지각변동량에 의한 영향을 분석하여 이를 보정하기 위한 방법으로 지각변동모형에 의한 방법을 제시하고 이의 효용성을 평가하였다. 본 연구에서 개발된 경·위도 2분 간격의 우리나라 지각변동모형을 실제 GPS상시관측소에 적용하여 실험한 결과, 약 76%의 정확도로 실제 기선 변동량을 재현할 수 있었으며, 이로부터 GPS상시관측소를 기준으로 한 GPS 상대측위의 정확도를 향상시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 개발된 지각변동모형은 GPS상시관측소 뿐만 아니라 GPS측량점에 대하여서도 적용이 가능하며, 특히 이번 일본 토호쿠 대지진과 같은 급작스러운 지각변동이 발생하였을 경우, 그 영향을 분석하고 보정하는데 있어서 매우 효과적인 방법이라 판단된다.

## 감사의 글

본 논문에 사용된 우리나라 GPS상시관측소 데이터를 제공하여준 국토지리정보원 및 관계자께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박관동 (2007), 한반도 지각변동 연구, 발간등록번호 1-1500714-000054-01, 국토해양부 국토지리정보원.
- 박필호, 최위찬, 안용원, 임형철, 박종욱, 조정호 (2001), 남한 지역 GPS 지각속도와 신기지구조의 예비적 해석, 한국지질학회지, 제37권, 제3호, pp. 455-464.
- 송동섭, 윤홍식 (2006), GPS로 추정된 지각변동 속도 및 판거동 모델과의 비교, 대한토목학회지, 제26권, 제5D호, pp. 877-884.
- 윤홍식 (2000), 지각변동 파라미터의 정밀계산을 위한 2차원 필터링 기법의 적용, 한국측량학회지, 제18권, 제1호, pp. 75-83.
- 윤홍식 (2000), 최소자승 스펙트럼 분석을 통한 GPS 상시관측소의 안정성 평가, 한국측량학회지, 제18권, 제4호, pp. 379-386.
- 윤홍식, 황진상 (2002), 초장기선 해석을 위한 GPS데이터 처리 소프트웨어의 위치 결정 알고리즘 비교, 대한토목학회지, 제22권, 제3-D호, pp. 571-582.
- 조재명 (2005), GPS상시관측소 데이터의 정밀해석 및 한반도 지각변동량 추정, 박사학위논문, 성균관대학

교, pp. 76-121.  
Choi, J. H. and Sato, H. (1997), Horizontal Strain of the Crust in Korea inferred from Geodetic Data, *Journal of Geodetic Data, Journal of Geodetic Society of Japan*, Vol. 43, No. 3, pp. 159-180.

King, R. W. and Bock, Y. (2003) *Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software*, release 10.1, MIT, Cambridge.

Leick, A. (2004), *GPS Satellite Surveying*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 13-15.

---

(접수일 2011. 04. 19, 심사일 2011. 04. 28, 심사완료일 2011. 06. 21)