

# GPS 측지망 조정을 통한 국가기준점 성과의 상시 산정 체계에 관한 연구

## A Study on Continuous Management Strategy for Published Coordinates of National Geodetic Control Points using GPS Network Adjustment

정광호<sup>1)</sup> · 이흥규<sup>2)</sup>

Jung, Kwang-Ho · Lee, Hung-Kyu

### Abstract

This paper has focused on deriving a GPS based geodetic network adjustment strategy to continuously determine coordinate sets of the national geodetic control points. After domestic literature review on the topic and overseas case studies about countries that recently reformed their geodetic infrastructure have been carried out, a simplified geodetic network consisting of two layers, namely GPS active and passive network, has been proposed to maximize effectiveness of the network adjustment through reducing the number of the passive points. Furthermore, a GPS data processing and network adjustment procedure has been derived to support the continuous management scheme. While a scheme for the active layer adopts a sequential least squares adjustment based on a multi-baseline, that of the passive layer employs a multi-session adjustment technique with respect to 3-dimensional baseline vectors. Finally, experimental adjustment against a network comprising 24 active and 6,900 passive stations has been performed to demonstrate the efficiency and the effectiveness of the proposed method.

Keywords : Geodetic Datum, GPS Continuously Operating Station, GPS Observed Control Point, Geodetic Network Adjustment

### 초 록

본 논문에서는 지각판 운동, 지진과 같은 급격한 지각변동을 고려한 국가기준점의 상시적 성과 산정 체계 수립에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 GPS 기준점의 국내 현황 및 최근 국가기준점의 재정비가 이루어진 국외 사례 조사로부터 시사점을 도출하고 GPS 상시관측점으로 이루어진 위성기준점망과 6,900 여점으로 이루어진 단일 GPS망으로 단순화된 국가기준점의 계층 구조를 제안하였다. 또한 초고정밀 다중기선해석과 정규방정식의 누적에 의한 연속조정을 통한 단계별 위성기준점의 성과 산정 절차 및 다중 세션 조정에 의한 단일 GPS 기준망의 성과 산정 방안을 제시하였다. 또한, 시험 조정망을 구성하여 조정계산을 실시하고 결과 분석을 통해 상시적 성과 산정의 필요성과 제안한 성과산정 방법 및 절차의 타당성 등을 평가하였다.

핵심어 : 측지계, 위성기준점, GPS 관측점, 측지망 조정

## 1. 서 론

우리나라에서 사용하고 있는 세계측지계인 한국측지계 2002(KGD2002; Korean Geodetic Datum 2002)는 측지좌표가 기준시점(reference epoch) 2002년 1월 1일(2002.0)에 고

정되어 있는 정적측지계(static datum)이다. KGD2002는 1995년 10월~11월에 실시한 한·일 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 관측에 근거하여 IERS(International Earth Rotation and Terrestrial Reference Frame)에서 공표한 ITRF2000(International Terrestrial Reference Frame 2000)에

1) 정희원 · 경일대학교 건설공학부 조빙교수(E-mail:khjcong@kiu.ac.kr)

2) 교신저자 · 정희원 · 창원대학교 토목공학과 부교수(E-mail:hkyulec@changwon.ac.kr)

대한 관측점 좌표와 속도벡터를 이용하여 기준시점에 대해 재계산한 후 대한민국 경위도 원점과 GPS 위성기준점(또는 상시관측점, Continually Operating Reference Station) 연결 관측과 데이터처리를 통해 구현되었다. 또한 측지계의 고밀도화를 위해 설치한 기준점은 GPS 2·3등 관측점, EDM 관측점 및 최근에 설치가 이루어진 통합기준점으로 구성되어 있으며, 이들 성과는 기준점 수의 방대성과 관측데이터의 이질성으로 인하여 순차적 불룩망 조정을 통해 산정되었다(이영진 등, 2007-a; 이영진 등, 2007-b; Lee et al., 2007).

우리나라 국가기준점(삼각점) 고시성과는 기준시점 2002.0에 고정되어 있으나 최근 연구 결과에 따르면 지각변동으로 인하여 한반도 남부지역이 연간 약 30mm 정도 남동쪽으로 균일하게 이동하고 있는 사실이 알려져 있다(국토지리정보원, 2007; 국토지리정보원, 2010). 지각변동의 균일성으로 인하여 측지망에 유의미한 왜곡발생은 없는 것으로 보이나 지속적으로 갱신이 이루어지고 있는 세계측지계인 4차원 동적측지계인 ITRF와 시간에 따라 차이가 발생하고 있다. 또한 최근 측지 기준점 측량에 그 활용성이 증대되고 있는 GPS 고정밀절대측위(PPP: Precise Point Positioning) 기법은 가장 최신의 ITRF에 의해 표현되는 위성궤도에 대해 지상 관측점의 좌표가 산정되기 때문에 실제 KGD2002와 차이가 발생하게 된다. 뿐만 아니라 최근 일본 동북지역의 경우에서와 같이 지진의 발생은 수 센티미터에서 수 미터까지의 급격한 지각변위를 유발 할 수 있으며, 이러한 변위의 발생은 지구상 절대위치의 변동과 더불어 경우에 따라서 측지망을 왜곡 시킬 수 있다. 따라서 동적측지계인 ITRF와 KGD2002 사이의 호환성 확보를 통한 국제적 수준의 국가측지망 유지관리와 향후 지각변동을 고려하는 준동적(semi-dynamic) 혹은 동적(dynamic) 측지계 도입 그리고 지진과 같은 급격한 지각변동에 대비하기 위해서 상시적인 측지망 조정체계를 확립하여 그 성과를 관리 할 필요가 있다.

현재 우리나라의 국가기준점은 2.5km 배점 간격으로 약 16,000여 점의 GPS 2·3등 관측점과 10km 밀도의 통합기준점이 전국적으로 분포하고 있다(국토지리정보원, 2006). 이로 인하여 측지망 조정에서 소프트웨어 성능 제약과 방대한 관측데이터의 품질점검이 필요하여 순차적인 불룩망 조정을 실시했기 때문에 절차가 복잡하고 많은 시간이 소요되어 주기적인 조정을 통해 성과를 산정하여 관리하는데 어려움이 있다. 현재 대부분의 기준

점 측량에 사용되고 있는 GPS 방식은 관측점 사이의 시계 확보가 불필요하고 단일주파수 수신기를 사용하더라도 정지측위를 통해 약 10km 까지는 수 센티미터 수준의 정확한 위치의 결정이 가능하다. 이러한 GPS 측량 특성을 고려 할 때 현재 16,000 여점의 방대한 기준점의 수를 축소하고 측지망의 계층 구조를 단순화 하더라도 측지계 운영에 큰 무리가 따르지 않을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 국가기준점 수의 축소와 계층의 단순화를 위해 IGS(International GNSS Service) 관측점과 연결한 위성기준점망과 통합기준점을 포함하는 단일 GPS망으로 이루어진 새로운 2 계층 측지망 구성과 GPS 망조정에 의해 상시적 성과 산정 절차의 체계화 방안을 연구하였다. 그리고, 다중기선(multi-baseline) 해석을 통한 연속조정(sequential adjustment)과 단일기선(single-baseline) 해석에 의한 다중세션 조정(multi-session adjustment)에 의한 성과산정 절차를 제시하였다. 또한, 제안한 방법과 절차의 타당성 검토와 그 영향을 분석하기 위하여 14점의 위성기준점과 6,900 여점의 GPS 관측점으로 이루어진 시험망을 구성하여 조정계산을 실시하고 그 결과를 요약 하였다.

## 2. 우리나라 GPS 기준점 현황과 국외 사례조사

### 2.1 우리나라 GPS 기준점 현황

우리나라 GPS기준점망은 안테나와 수신기를 반영구적으로 설치하여 24시간 연속적으로 관측을 수행하는 GPS 위성기준점, GPS 관측이 이루어진 삼각점(GPS 2·3등 관측점)으로 이루어져 있다. 국토해양부 국토지리정보원에서는 한·일간 지각변동 조사를 위해 1995년 3월 처음으로 수원(SUWN)을 시작으로 14개의 위성기준점을 운영하다가 2008년 (구)행정자치부 기준점을 통합하여 2010년 45점의 성과를 고시하여 현재 우리나라 측지계 구축과 유지관리에 최상위 등급의 측지기준점 역할을 담당하고 있다.

또한, 삼각점의 유지관리와 갱신을 목적으로 1996년부터 삼변측량방식을 대신하여 GPS에 의한 관측사업을 2등과 3등으로 나누어 2008년 까지 실시하였다. 2003년 세계측지계가 도입됨에 따라 관측이 완료된 GPS의 데이터를 이용하여 전국단위의 측지망 조정을 실시하고 그 성과를 산정하여 고시하였다. 그림 1은 GPS 기준점의 분포를 도시한 것으로 경기, 충청, 대구, 경주, 부산, 광

양, 순천 등 배점 밀도가 낮은 지역은 EDM 관측지역으로 2007년~2008년에 5km 간격으로 GPS 방식에 의해 보강 관측이 이루어진 곳이다. 이와 함께 2008년 9월부터 기존의 삼각점, 수준점, 중력점을 통합하여 다차원의 위치 정보를 제공하기 위한 통합기준점을 2010년 까지 약 1,200점을 설치하였다(국토지리정보원 2008).

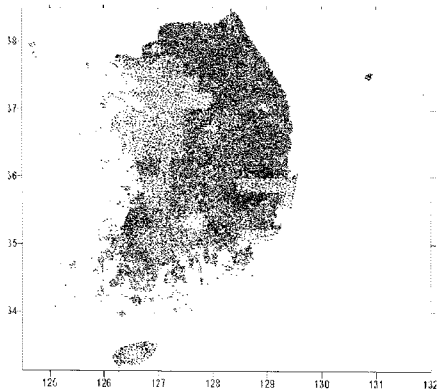


그림 1. GPS로 관측된 국가기준점 분포  
(이영진 등, 2011)

기준점 성과산정을 위한 측지망조정은 GPS 2등과 3등으로 구분하여 실시하였다. 2등 기준점망 조정은 총 7개의 사업지구별 기선해석 한 후 7개의 사업지구별 통합하는 3차원 기선벡터 단일망 조정을 GPS 위성기준점들을 고정점으로 사용하여 실시하였다(이영진 등, 2007-a). 이에 반해 3등 기준점망 조정은 3등기준점망에 포함된 2등 기준점의 성과를 고정점으로 사용하여 사업지구별 기선해석과 3차원 기선벡터의 결합에 의한 블록별 조정에 의해 그 성과를 산정 하였다(이영진 등, 2007-b; 이영진 등, 2008). 최근에는 블록망의 순차조정을 대신하여 우리나라에서 이루어진 모든 GPS 관측데이터를 2개의 블록망으로 나누어 조정 절차를 단순화된 절차에 의한 측지망 조정에 관한 연구가 이루어 졌다(정광호, 2009; 이영진 등, 2011).

## 2.2 국외 GPS 기준망 구축사례

영국은 최근 능동계측망(active layer)과 수동계측망(passive layer)으로 단순화 되어진 측지망을 구축/운영하고 있다. 능동계측망은 GPS 상시관측점으로 이루어져 있으며 1998년부터 설치가 시작 되어 영국 전역에 걸쳐 75km의 배점 밀도로 50개 이상을 구축 하였다. 수동계측망은 20~30km 배점 밀도로 접근이 용이한 지점에 대

해 900여 점을 설치하였으며 GPS 상대측량의 기준점 역할을 담당 하며 배점 밀도를 고려 할 때 단일주파수 수신기에 의해서도 수 센티미터의 정확도 확보가 가능하다(한국건설교통기술평가원, 2008).

네덜란드에서는 1997년부터 GPS 상시관측점의 설치를 시작하여 총 5점으로 이루어진 능동형 GPS 기준망(AGRS.NL:Active GPS Reference System for the Netherlands)를 구현하고 ETRS89(European Terrestrial Reference System 1989) 좌표를 산정하였다. AGRS.NL 고밀도화를 통해 GPS 측량의 활성화를 위하여 GBN(GPSS Base Network)을 10~15km 밀도로 접근성과 안정성이 높은 지역에 415점을 설치하여 운영 중에 있다(NCG, 2005).

말레이시아의 경우 1999년 1월~2000년 12월까지의 15개 위성기준점 관측데이터를 사용하여 세계측지계인 성과인 GDM2000(Geocentric Datum of Malaysia)을 구현하였다. 측지계의 고밀도화를 위하여 GPS 관측이 이루어진 300여점의 삼각점에 대해 상시관측점과 연결하는 측지망 조정을 통해 그 성과를 산정하였다(JUPEM, 2003).

## 2.3 IGS 관측망

IGS는 IAG(International Association of Geodesy)와 IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics)가 주도하고 세계 각국의 200 여개의 측지 및 지구물리 담당 국가 기관이 참여하고 있는 비영리 국제기구로 GPS를 활용한 초고정밀 측지측량 및 지구물리 연구를 위한 다양한 서비스와 지원을 담당하고 있다.

IGS는 독자적인 GPS 상시관측점을 운영하는 것이 아니라 세계 각국의 국가 및 산하 기관과 단체에서 운영 중인 상시관측점 중 엄격한 선정기준을 만족하는 현재 약 380 여점을 등록하여 관측데이터를 데이터센터에서 관리하고 있다. 또한 등록된 관측점의 데이터처리를 통해 해석센터(IGS Analysis Center)에서는 위성 궤도력, 위성 시계오차, 관측점의 좌표 및 지구회전 요소를 지속적으로 계산하고 있으며 그 결과를 사용자들에게 제공하고 있다. 또한 2000년부터는 독자적인 ITRF 측지계인 IGS ××을 구현하여 IGS 가공 데이터의 내부 정밀도 향상을 위해 노력하고 있다. 우리나라의 경우 국토지리정보원의 SUWN과 한국천문연구원 DAEJ가 IGS 관측점으로 등록되어 있으며, DAEJ는 전 세계 모든 IGS 관측망의 성과산정 및 구현의 기반이 되는 기준관측점(frame

site)로 등록되어 있다.

## 2.4 시사점

우리나라는 45점으로 이루어진 GPS 위성기준점, 2.5km 배점 간격으로 약 16,000여 점의 GPS 2·3등 관측 삼각점 그리고 10km 간격의 1,200 점의 통합기준점이 전국적으로 분포하고 있다. 이로 인하여 측지망 조정에서 소프트웨어 성능 제약과 방대한 관측데이터의 품질점검이 필요하여 순차적인 블록망 조정으로 인하여 복잡한 조정절차로 인하여 주기적인 조정을 통해 성과를 관리하는데 한계가 있다. GPS 위성기준점은 후처리를 위한 관측데이터와 고정밀 실시간 네트워크 RTK(Real-Time Kinematic) 가상기준점(VRS: Virtual Reference Station) 데이터의 제공과 같이 서비스 위주로 활용 되고 있으나, 측량(측위) 서비스는 물론 그 자체가 중요한 국가 측지 인프라로 이를 통한 측지계의 구축과 유지·관리에 적극 활용 할 필요가 있다.

최근 GPS에 의해 국가기준점을 정비한 국가들의 경우는 위성기준점 관측데이터의 주기적인 처리를 통해 측지계의 구축 및 유지·관리에 적극적으로 활용 하고 있다. 특히, 대부분의 기준점측량에 활용되고 있는 GPS 기술의 특성을 반영하여 기준점이 수를 최소화 하고 계층 구조를 단순화하여 물리적 측량표지 자체뿐만 아니라 성과 관리에 효율성을 극대화 하고 있다. 이러한 추세를 반영하여 최근 우리나라에서는 1,200여점의 통합기준점의 설치가 이루어 졌지만, 방대한 국가 예산 투입에 의해 이루어진 삼각점에 대한 GPS 관측에 의해 산정된 성과를 무시하기 어려운 실정이다. 이러한 사실을 고려 할 때 GPS 관측기준점 수를 최소화 하여 물리적 표지와 성과를 지속적으로 관리 및 갱신하는 방안을 고려 할 수 있다.

## 3. 국가기준점 상시적 성과 산정 체계

### 3.1 국가기준점망의 구성

#### 3.1.1 GPS 위성기준점망

최근 GPS 관측 및 데이터처리 기술의 발전으로 인하여 상대정확도 1PPB(Part Per Billion)의 확보가 가능, 상대적으로 데이터처리가 용의, 그리고 기 구축된 국가 인프라와 우리나라 인접 국가들에 분포하고 있는 IGS 관측점의 밀도를 고려한다면 GPS 위성기준점에 의해서 수 밀리미터 정확도의 측지계의 유지·관리가 가능하다.

초고정밀 GPS 관측데이터 처리는 상대측위와 고정밀

절대측위에 의해서 이루어질 수 있다. 고정밀절대측위(PPP)의 경우 개념적으로는 인접한 관측점과 연결하지 않기 때문에 간단해 보이나 실제로는 측지계 정의를 위한 변환계수 산정을 위해서 전 세계적으로 가급적 많은 관측점을 사용하여 동시 처리가 이루어져야 한다. 또한 전통적인 측지측량에서 사용한 관측점 연결을 통한 측지망의 계층 구조가 모호 할 수 있어 기존 사용자들에게 혼란을 야기할 우려가 있다. 따라서 고정밀 절대측위는 일반적으로 동남아 지역의 국가 등과 같이 주변에 IGS 관측점이 부족하여 상대적으로 멀리 떨어진 관측점을 사용해 그 정확도 확보에 우려가 있는 경우에 보다 적합하다. 우리나라의 경우에는 한반도 인근에 충분한 밀도의 IGS관측점이 분포하고 있기 때문에 세계 IGS 관측점에 연결하여 계층구조를 명확하게 할 수 있는 상대측위에 근거한 초고정밀 GPS 데이터 처리에 적용하는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다.

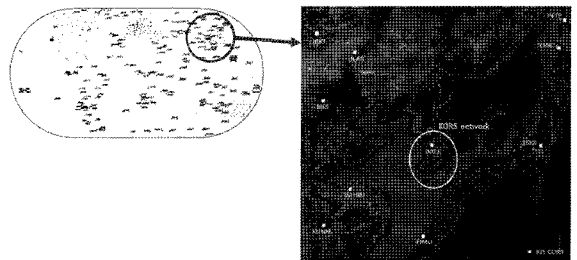


그림 2. GPS 위성기준점망의 구성

GPS 상대측위 방식에 의해 IGS 관측망에 연결하기 위해서는 ITRF 좌표 산정을 위해서는 최소 3개 이상의 관측점과 연결이 필요하며, 정확하고 신뢰적인 결과의 확보와 데이터 처리의 시간과 효율성을 상호 고려하여 IGS 관측점의 적절한 개수와 안정적인 관측소의 선정이 중요하다(Altamini, 2002). 따라서 본 연구에서는 그림 2와 같이 전체 IGS관측점 중 동북아시아에 분포하는 10점의 IGS 기준관측점과 국토지리정보원에서 운영 중인 45점의 위성기준점과 연결하는 방안을 측지계 구축과 운영·관리를 위한 측지기본망으로 제안하고자 한다. 위성기준점망의 관측데이터는 24시간 단위로 지속적으로 처리하여 기준점 성과의 갱신과 최신 ITRF와 KGD2002 사이의 변환계수 추정을 통한 정확도 및 호환성 확보 그리고 지각변동 벡터 추정을 통해 향후 시간에 따른 지각변동을 고려하는 동적(dynamic) 혹은 준동적(semi-dynamic) 측지계

의 도입 방안 수립에 활용 할 수 있으며 이를 통해 국가 기준점 성과의 상시적 산정체계를 구축 할 수 있다.

### 3.1.2 단일 GPS 관측망 구성

동시 측지망 조정을 통해 작업의 효율성을 극대화 하여 성과의 상시적 산정체계를 확보하기 위하여 본 연구에서는 약 17,000 여점의 GPS 삼각점 중 아래의 기준에 의해 선별된 GPS 2·3등 관측점과 통합기준점으로 구성된 6,900 여점으로 구성된 단일 GPS 관측망 구성을 제안하고자 한다. 이러한 단일망 구성을 위한 관측점의 선별은 아래 조건을 고려하여 이루어졌다.

첫째, 8시간 이상 관측이 이루어졌고 상대적으로 고지대에 설치되어 훼손의 우려가 적으며 위성기준점과 함께 현재 우리나라 측지망의 기본이 되는 모든 GPS 2등 관측점은 포함한다. 둘째, 단일 GPS 관측망을 구성하기 위해 사업지구 사이의 연결을 위한 단위망 사이의 중복점은 반드시 포함 한다. 셋째, GPS 상대측량에서 기선장에 따른 오차를 최소화 하고 위성기준점망과 연결을 위해 인접한 관측점은 가급적 포함한다.

넷째, 향후 고정밀 지오이드의 사용에 의한 GPS 수준망 조정을 통해 GPS 관측점의 정표고 산정을 고려하여 측표수준점은 포함한다. 다섯째, 이설 및 재설 등으로 변동사항이 발생한 관측점은 관측 당시만 존재 했던 것으로 유지 및 관리에 혼란을 방지하기 위해 제외한다.

## 3.2 국가기준점 성과의 상시 산정 절차와 체계

### 3.2.1 개요

본 연구에서는 “GPS 다중해석을 통한 연속조정”과 “단일해석을 통한 다중세션조정 기법”의 적용에 의한 국가기준점 성과의 상시적 산정 체계를 그림 3과 제안하고자 한다. IGS 기준관측점을 포함하는 위성기준점망의 데이터 획득을 통해 취득이 이루어진 24시간 단위 일간 GPS 관측데이터에 대해 다중해석을 실시하고 4차원 동적측지계인 최신 IGS-ITRF에 대한 좌표를 산정한 후 정규방정식을 생성·저장 한다(일간해: daily solution). 일간해 정규방정식에 대해 다중세션조정기법을 적용하여 주간 및 연간 단위의 좌표를 산정(주간해: weekly solution, 연간해: annual solution) 하고 이에 따른 누적 정규방정식을 생성한다. 이용 가능한 모든 연간 정규방정식에 대해 다중세션조정을 실시하여 통합 좌표와 지각변동 벡터(통합해: integrated solution)를 추정하여 지속적인 업데이트를 실시한다.

이상과 같은 단계에서 산정된 좌표는 최신의 IGS-ITRF에 대한 결과로 우리나라 측지계인 KGD2002에 대한 성과는 기준시점 2002.0에 대해 Helmert 변환을 통해 KGD2002 좌표를 산정할 수 있다. 따라서 측지기준망의 성과는 세계측지계와의 호환성 확보를 위해 KGD2002와 최신 IGS-ITRF 좌표 성과 모두를 산정하고 관리하도록 해야 한다.

산정된 측지좌표, 지각변동벡터 및 정규방정식은 데이터베이스 구축하여 지각변동 모니터링과 측지망의 상시적 조정 에에 활용하도록 한다. 연간 및 통합 조정을 통해 산정된 측지좌표의 모니터링을 통해 지진과 같은 급격한 지각변동의 발생 혹은 지속적인 좌표의 업데이트를 통해 고시 좌표에 비해 새롭게 산정된 좌표의 정확도가 월등이 높다고 판단되는 경우 측지기준망의 위성기준점 좌표를 고정하는 단일 GPS망에 대한 다중세션 조정을 실시하여 새로운 좌표를 산정하여 고시한다.

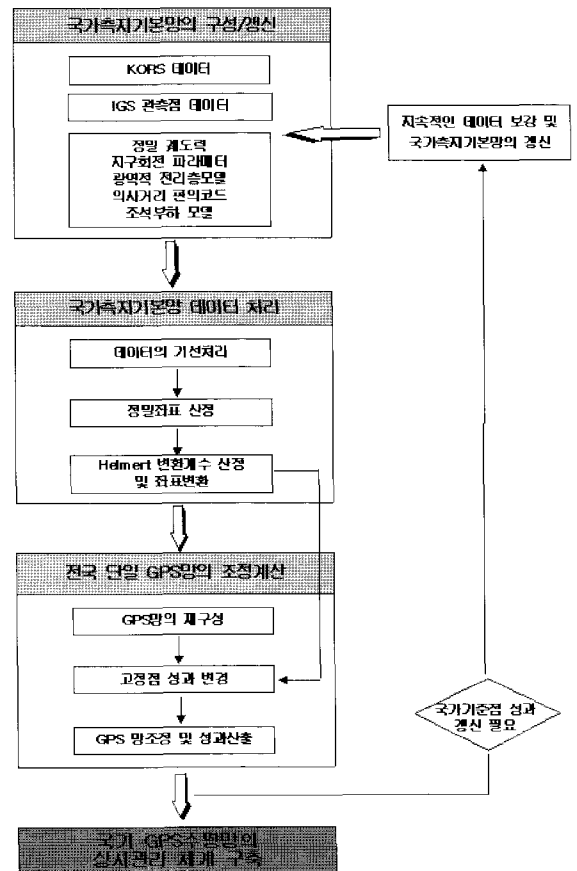


그림 3. GPS망 조정에 의한 상시적 성과산정 절차 (Jung et al., 2010)

### 3.2.2 위성기준점망

성과산정을 위해서는 1,000~2,000km의 초장기선 GPS 관측데이터를 다중기선해석을 통해 처리한 후 연속 조정기법을 적용해야 하기 때문에 과학기술용 초고정밀 GPS 데이터처리 소프트웨어의 사용이 필수적이다. 그림 4는 위성기준점망의 상시적 성과산정을 위한 절차를 보다 자세하게 도시한 것이다. 각 단계에서 추정된 IGS-ITRF 좌표와 SINEX(Solution Independent EXchange) 형식의 정규방정식을 데이터베이스에 저장하고 이어지는 해의 추정에 입력 데이터로 사용한다. 다중기선해석 연속 조정을 통한 측지계 정의를 위해서는 IGS 관측점의 고시좌표와 추정좌표 사이 Helmert 변환 계수를 구속하는 최소제약(minimum constraint)조정을 실시한다(전성배, 2010). 최소제약조정은 GPS 관측데이터 처리 혹은 불규칙한 지각변동에 의해 유발되는 관측점의 좌표 오차로 인한 측지망 왜곡을 최소화 할 수 있기 때문에 GPS에 의한 세계측지망과 연결 관측을 통한 측지계 정의 하는데 사용할 수 있는 최적의 기법으로 알려져 있다(Altamini, 2002).

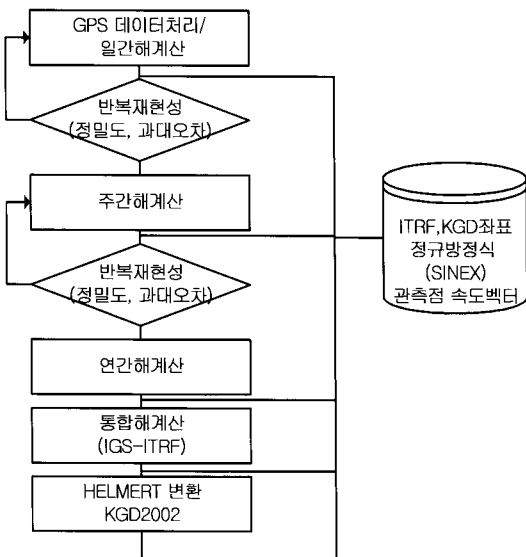


그림 4. 위성기준점 성과 산정 절차

IGS 관측점과 연결하는 GPS 관측데이터는 기본적으로 1일(24시간)간 단위로 지속적인 처리가 이루어져야 한다. 2,000km 이하 기선에 대해서는 반송파 관측데이터의 포함된 가급적 많은 미지정수가 추정될 수 있도록 처리가 이루어져야 한다. 또한 밀리미터 수준 이상의 정

확도 확보를 위해서는 안테나 위상센터 변동 및 조석부하(ocean tides), solid Earth tide, pole tides와 같은 지구과학적 현상에 따른 관측점의 변위들을 IERS의 규약(convention)과 국제적인 지구과학 연구기관에서 제공하는 모델을 사용해야 한다(MaCarthy & Petit, 2004). 최종적으로 일간해의 측지좌표는 GPS 데이터의 다중기선 해석 방식을 적용한 후 최소제약 조정을 통해 측지계를 정의한다.

주간해, 연간해 및 통합해는 선행 단계에서 저장된 정규방정식을 누적하는 다중기선에 대한 연속조정에 의해 추정한다. 단계별 해의 계산에 앞서 이전 단계에서 추정된 좌표에 대한 반복재현성 계산을 통해 그 정밀도를 평가하고 3차원 좌표성분의 잔차를 계산하여 과대오차 존재 여부를 파악해야 한다. 만약 과대오차가 판단되는 관측점이 있는 경우 해당 관측점을 제거한 후 재계산을 실시해야 한다. 특히 연간해와 통합해의 경우 관측점 지각변동 영향을 제거한 후 반복재현성을 검토해야 하기 때문에 지각변동벡터를 사용하여 공통의 기준시점으로 좌표를 변환해야 한다. 주간해와 연간해 좌표는 지각변동 모니터링과 지진과 같은 불규칙한 지각변동이 측지망에 미치는 영향을 분석하는데 활용 할 수 있다. 통합해에 의해 IGS-ITRF 좌표를 산정한 후 상시관측점의 고시좌표를 이용하여 Helmert 변환을 통해 현행 우리나라 측지계인 KGD2002에 대한 좌표를 지속적으로 업그레이드해야 한다. 이를 통해 IGS-ITRF와 KGD2002 사이의 호환성을 확보하고 고시 좌표에 비해 새롭게 산정된 좌표의 정확도가 월등히 높다고 판단되는 경우 측지기준점의 기준점 좌표를 고정하는 단일 GPS망에 대한 다중세션 조정을 실시하여 새로운 좌표를 산정하여 고시한다. 궁극적으로 위성기준점 성과는 세계측지계와의 호환성 확보를 위해 IGS-ITRF와 KGD2002 모두를 산정하여 관리해야 해야 한다. 또한 지각변동을 고려하는 4차원 측지계 도입을 위해 통합해에 의해 각 위성기준점 좌표의 지각변동 벡터를 계산하여 제공할 필요가 있다.

### 3.2.3 단일 GPS 관측망

단일 GPS망은 위성기준점 성과를 고정하는 다점고정에 의한 단일기선해석에 의한 다중세션조정을 통해 그 성과를 산정 한다. 본 연구에서는 상시적인 관측데이터를 처리와 조정을 통해 그 성과를 관리하는 위성기준점망과 다르게 GPS 관측망의 경우는 지진에 의한 급격한 지각 이동, 측지계의 기준시점의 변경 등 기준에 산출 및 고시된 성과가 크게 변경될 우려가 있다고 판단될

때 한시적으로 실시하는 방안을 제시하고자 한다. 단일 GPS망의 성과를 계산하기 위해서는 그림 5와 같이 전국에 분포한 GPS 관측점 중 동시조정이 가능하도록 5km 간격의 단일 GPS망을 구성하고, 최소제약조정을 통해 구성된 GPS망의 내부 상대정밀도 평가와 과대오차 점검을 실시한다. 이후 위성기준점 갱신성과를 고정하는 측지망 조정을 실시하고 그 성과를 산정한다. 특히, 상시적인 측지망 동시조정이 가능한 형태로 3차원 기선벡터를 데이터 베이스화 하여 관리해야 한다.

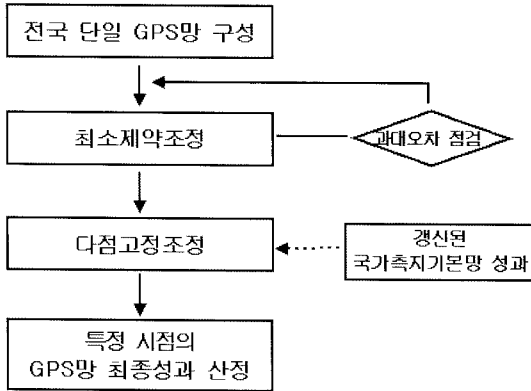


그림 5. 단일 GPS망의 성과계산 절차

GPS 3차원 기선벡터로 이루어진 전국 단일 GPS망을 단일기선해석에 의한 다중세션 조정을 통해 기준점 성과의 산정을 위해서는 다음과 같은 기능을 가지는 측지망 조정 소프트웨어의 사용이 필수적이다. 첫째 GPS 단일기선해석 소프트웨어가 제공하는 기선벡터와 분산-공분산 행렬의 입력이 가능해야 한다. 둘째 상위 기준점 좌표의 구속(fixed) 및 가중제약(weighted constrained)에 의한 망조정이 가능해야 한다. 셋째 과대오차 점검과 정확도 표현을 위해 사후 분산인자와 추정 잔차에 대한 통계검정이 가능하고 절대 및 상대 오차타원의 크기와 방향을 계산할 수 있어야 한다. 넷째 망조정의 결과는 사용자의 필요에 따라 다양한 파일형식으로 출력이 가능하여야 하고, 표준화잔차의 히스토그램 및 조정 망도를 오차타원과 함께 화면에 출력할 수 있어야 한다.

#### 4. 상시적 성과산정체계에 따른 시험산정

본 연구에서 제안한 GPS 망조정에 의한 국가기준점의 상시적 성과 산정 체계의 방법과 절차의 효율성을 분석

하기 위해 위성기준점망과 단일 GPS 관측망을 시범적으로 구성하고 다양한 방법으로 조정계산을 실시하여 그 결과를 분석 하였다. 위성기준점망은 그림 6과 같이 10개의 IGS 기준관측점과 국내 14점을 포함하여 총 24점으로 구성하고 2007년~2009년 까지 3년간 약 1,100일에 걸친 GPS 관측데이터를 다중기선에 대해 처리하고 정규 방정식을 누적하는 연속조정을 실시하였다. IGS 관측점의 데이터는 한국천문연구원(<ftp://nfs.kasi.re.kr/gps/data>)과 미국 NASA(<ftp://cddis.gsfs.nasa.gov>)의 데이터베이스 센터로부터 FTP서버를 사용하여 다운로드 하였고, 국내 위성기준점 데이터는 국토지리정보원 GPS 기준점 데이터베이스로부터 획득하였다(<http://gps.ngii.go.kr>).

또한 단일 GPS 관측망은 1996년에서 2008년까지 관측된 약 16,000 여 점 중 5km 간격으로 본 연구에서 제안한 기준에 따라 선별된 약 6,900 여 점의 단일기선에 대해 처리된 3차원 기선벡터를 사용하였다. 위성기준점의 데이터 처리와 조정에는 스위스 베른대학에서 개발한 과학기술용 GPS 데이터처리 소프트웨어인 Bernese V5.0을 사용했으며, 단일 GPS 관측망의 다중세션 망조정은 캐나다 Microsearch사의 Geolab 2001에 의해 실시하였다.

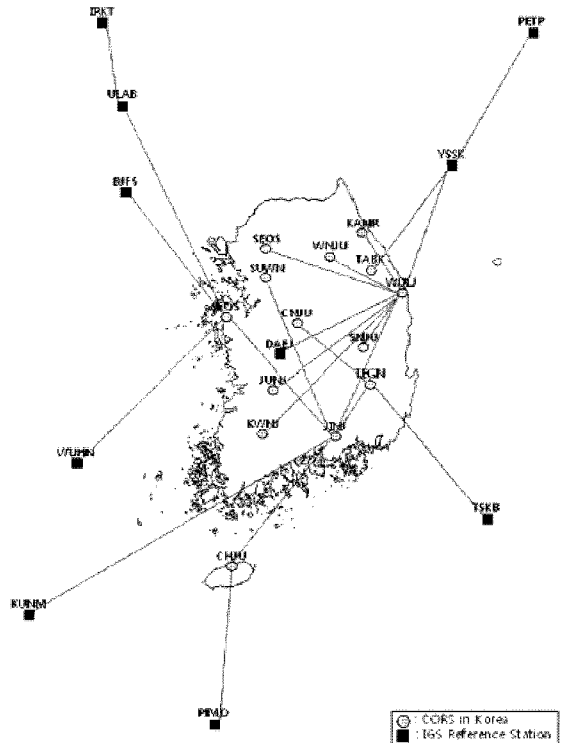


그림 6. 시험망조정을 위한 위성기준점망 구성

### 4.1 위성기준점망 성과산정

#### 4.1.1 GPS 관측데이터의 처리와 일간해

위성기준점망의 GPS 관측데이터는 스위스 베른 대학에서 개발된 Bernese V.5.0 소프트웨어에 의해 이중차분 관측데이터 형성에 의한 다중기선해석 방식으로 처리하였다(Dach et al., 2007). IGS 관측점의 좌표와 지각변동벡터는 GPS 데이터처리와 조정계산을 통해 구현한 IGS-ITRF2005(또는 IGS05) 측지계에 대해 고시된 값을 사용하였다. 따라서 본 연구에서 GPS 원시데이터처리와 일간해의 누적해의 기준 측지계는 IGS-ITRF2005이며, IGS 관측점 초기좌표는 다음 식에 의해 계산한 것을 사용하였다.

$$X_{t_{obs}} = X_{t_0} + V(t_{obs} - t_0) \quad (1)$$

여기서,  $t_{obs}$  는 GPS 관측일,  $t_0$  는 IGS-ITRF2005의 기준시점(2000년 1월 1일),  $V$  는 관측점 지각변동 3차원벡터이다. 따라서  $X_{t_{obs}}$  와  $X_{t_0}$  는 지각변동을 고려한 데이터처리 해당일과 IGS-ITRF2005 기준시점에 대한 3차원 직교좌표로 4차원 동적측지계에 대해 데이터처리가 이루어진다.

GPS 데이터처리에서 안테나 위상센터 변동모델은 절대모델을 사용하고, 지구과학적 현상에 따른 관측점의 변동에 대한 모델링은 IGS 규약을 따랐으며, 특히 조석 부하에 의한 영향은 스웨덴 온사라 우주관측소(Onsala Space Observatory)에서 제공하는 GOT00.2모델을 적용하였다. 또한 GPS 위성궤도력과 지구회전요소는 IGS 최종해(final products), 반송파 관측데이터의 미지정수 결정은 QIF(Quasi Ionosphere-Free) 기법을 사용하였다. 다중기선해석의 최종해 추정에는 대기권 신호전파에 따른 영향을 최소화 하기위하여 L3(iono-free) 선형결합 관측데이터에 의해 대류권지연량을 동시에 추정 하였다. 일간해는 GPS 원시데이터 처리의 최종해 계산에 사용한 정규방정식을 사용하여 IGS 관측점의 추정좌표와 고시좌표 사이 Helmert 변환 계수를 구속하는 최측제약 조정을 통해 추정하였다. 원시관측데이터 처리와 일간해 추정의 과정은 BPE(Bernese Processing Engine)을 이용하여 자동화 하고, 이를 통해 1,096개의 일간해를 추정 하였다. 그림 7은 SUWN 관측점을 예로 일간해를 수평과 수직방향으로 분리하여 도시한 것으로 수평방향의 경우 동쪽과 남쪽으로 이동하는 지각변동 경향을 확인할 수 있었으며, 수직방향의 경우 매우 미소하게

지각이 융기하는 것으로 나타났다.

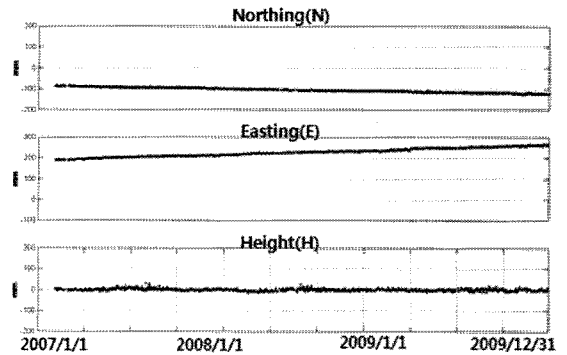


그림 7. SUWN의 2007-2009년 일간해 시계열

#### 4.1.2 연속조정을 통한 누적해

주간해는 7개의 일간해 정규방정식을 누적하는 연속 조정을 통해 매 주 수요일 12:00을 기준으로 산정 하였다. 일간해 추정에 포함된 과대오차를 점검하기 위해서 3차원 좌표성분의 비교를 통해 GPS관측데이터의 품질 및 처리 정확도, 데이터 처리 S/W의 정확도 등을 고려하여 잔차의 크기가 수평성분의 각 방향에서 1.5cm 그리고 수직방향에서 3cm 이상이 되는 경우 해당 관측일의 관측점을 과대오차로 판정하여 제외한 후 일간해를 다시 추정하였다. 이러한 과정을 통해 총 156개의 주간해를 추정하였으며, 그림 8은 SUWN 관측점의 주간해를 도시한 것이며, 일간해의 결과와 유사한 지각변동 경향을 확인할 수 있었다.

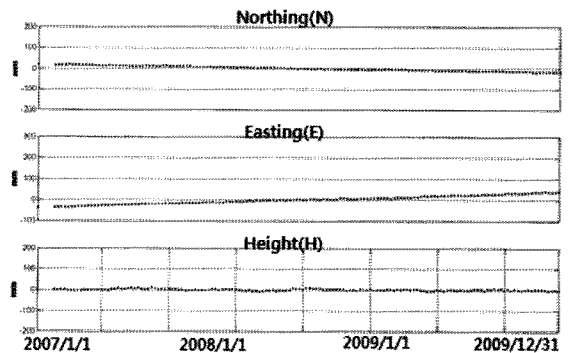


그림 8. SUWN의 2007-2009년 주간해 시계열

추정된 일간해와 주간해의 정밀도 평가를 위하여 반복재현성 분석을 실시하였다. 모든 해는 3차원 동적측지



계상의 좌표로 기준시점은 일간해의 경우 매일 12:00이며 주간해는 매주 수요일 12:00 분이다. 반복재현성을 평가하기 위해서는 시간에 따른 지각변동을 최소화하기 위하여 속도벡터를 이용하여 공통의 기준시점으로서의 변환이 필요하다. 산정 좌표의 기준시점 변환을 위해 사용한 관측점의 속도벡터는 이 후에 언급될 3년간의 주간해 누적에 의해 연속조정된 통합해의 결과를 이용하였으며, 이를 통해 모든 해의 기준시점을 2008년 7월 1일

00:00시로 변환 하였다. 표 1은 공통 기준시점에 대해 계산된 RMS를 요약한 것이다. 일간해와 주간해에서 평균적으로 수평방향은 각각  $\pm 3.3\text{mm}$ 와  $\pm 2.9\text{mm}$  그리고 수직방향의 경우는 각각  $\pm 6.3\text{mm}$ 와  $\pm 4.9\text{mm}$  정도였다. 주목한 것은 일간해의 연소조정을 통해 추정된 주간해의 수직성분의 정밀도가 일간해에 비해 상대적으로 크게 향상되었다는 사실이다.

표 1. 일간해 좌표 및 주간해 좌표의 반복재현성(RMS, 단위: m)

일간해 좌표				주간해 좌표			
관측점	N	E	h	관측점	N	E	h
CHJU	$\pm 0.0027$	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0072$	CHJU	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0022$	$\pm 0.0047$
CNJU	$\pm 0.0016$	$\pm 0.0032$	$\pm 0.0079$	CNJU	$\pm 0.0011$	$\pm 0.0032$	$\pm 0.0065$
JINJ	$\pm 0.0019$	$\pm 0.0025$	$\pm 0.0059$	JINJ	$\pm 0.0015$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.0039$
JUNJ	$\pm 0.0016$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.0058$	JUNJ	$\pm 0.0012$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.0043$
KANR	$\pm 0.0018$	$\pm 0.0028$	$\pm 0.0065$	KANR	$\pm 0.0012$	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0036$
KWNJ	$\pm 0.0018$	$\pm 0.0025$	$\pm 0.0070$	KWNJ	$\pm 0.0013$	$\pm 0.0025$	$\pm 0.0052$
SEOS	$\pm 0.0019$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.0056$	SEOS	$\pm 0.0016$	$\pm 0.0022$	$\pm 0.0040$
SNJU	$\pm 0.0016$	$\pm 0.0026$	$\pm 0.0060$	SNJU	$\pm 0.0010$	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0041$
SOUL	$\pm 0.0019$	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0057$	SOUL	$\pm 0.0015$	$\pm 0.0022$	$\pm 0.0037$
SUWN	$\pm 0.0015$	$\pm 0.0025$	$\pm 0.0055$	SUWN	$\pm 0.0010$	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0037$
TABK	$\pm 0.0027$	$\pm 0.0052$	$\pm 0.0080$	TABK	$\pm 0.0022$	$\pm 0.0047$	$\pm 0.0048$
TEGN	$\pm 0.0017$	$\pm 0.0027$	$\pm 0.0063$	TEGN	$\pm 0.0011$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.0042$
WNJU	$\pm 0.0017$	$\pm 0.0024$	$\pm 0.0054$	WNJU	$\pm 0.0012$	$\pm 0.0022$	$\pm 0.0038$
WULJ	$\pm 0.0017$	$\pm 0.0026$	$\pm 0.0060$	WULJ	$\pm 0.0012$	$\pm 0.0023$	$\pm 0.0038$
평균	$\pm 0.0016$	$\pm 0.0027$	$\pm 0.0063$	평균	$\pm 0.0014$	$\pm 0.0025$	$\pm 0.0043$
	$\pm 0.0033$				$\pm 0.0029$		

주간해 정규방정식의 누적에 의해 각 해당연도 7월 1일 00:00시에 대한 연간해와 연간해 정규방정식 누적에 의한 연속조정을 통해 2008년 7월 1일 00:00시(2008.183)에 대한 통합해를 IGS-ITRF2005에 대해 산정 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 각 해의 산정에서 선행 단계에서 산정된 좌표의 잔차 분석을 통해 과대오차로 판명된 관측점을 누적해의 추정에서 배제 하였다. 표 2는 각 년도의 중간시점에서 계산된 연간해의 좌표차를 비교한 것으로 지각변동에 의해 수평방향에서 연간 약 27mm 남동 방향으로 균질하게 이동한 것을 볼 수 있으며, 수직 방향의 경우 미소한 것으로 보이며 보다 정확한 변동을 파악하기 위해서는 장기간에 걸친 분석이 필요한 것으로 판단된다.

표 2. 해당 연도 기준 시점간의 연간해 좌표차 비교(단위:m)

연도		N방향	E 방향	h 방향
2007-2008	평균	0.013	0.022	0.002
	RMS	$\pm 0.002$	$\pm 0.001$	$\pm 0.002$
2008-2009	평균	0.012	0.025	0.001
	RMS	$\pm 0.001$	$\pm 0.001$	$\pm 0.001$
2007-2009	평균	0.025	0.047	0.002
	RMS	$\pm 0.003$	$\pm 0.001$	$\pm 0.003$

각 연간해 및 연간해와 통합해의 균질성을 분석하기 위하여 관측점의 지각변동 벡터를 이용하여 동일한 기준시점 2008.183(2008년 7월 1일)에 대해 각 해의 좌표를 변환 하였다. 지각변동벡터는 선형적인 지각 이동을 나

표 3. 기준시점 2008년 7월 1일에서 Helmert 변환에 의한 좌표비교(단위:m)

관측점	성분	연간해 차이			각 연간해와 통합해 차이		
		2007-2008	2008-2009	2007-2009	2007	2008	2009
CHJU	N	0.000	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000
	E	0.003	0.001	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
CNJU	N	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.004	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001
JINJ	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001
JUNJ	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000
KANR	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.001	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
KWNJ	N	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	E	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000
	h	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SEOS	N	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.002	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000S
SNJU	N	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.002	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001
SOUL	N	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001
SUWN	N	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
TABK	N	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.003	0.003	0.000	0.000
	h	0.002	0.003	0.001	0.000	0.002	0.001
TEGN	N	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
WNJU	N	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
	h	0.001	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
WULJ	N	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	E	0.003	0.001	0.003	0.003	0.000	0.000
	h	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000

표 4. 한국측지계2002에 대해 산정된 위성기준점의 성과 (단위:m)

KORS	구분	고시좌표	연간해			통합해
			2007	2008	2009	
CHJU	X	-3168622.322	.317	.317	.316	.317
	Y	4277489.600	.592	.593	.592	.592
	Z	3501650.056	.055	.055	.056	.056
CNJU	X	-3117076.205	.222	.221	.221	.222
	Y	4067949.797	.809	.807	.808	.808
	Z	3784300.502	.509	.507	.509	.508
JINJ	X	-3217002.759	.758	.758	.758	.758
	Y	4110225.654	.653	.654	.654	.654
	Z	3653650.430	.425	.426	.426	.426
JUNJ	X	-3124886.932	.927	.928	.927	.928
	Y	4126580.536	.531	.531	.531	.531
	Z	3714170.158	.152	.153	.153	.153
KANR	X	-3167833.726	.720	.721	.720	.720
	Y	3930397.144	.139	.140	.139	.140
	Z	3885411.916	.912	.913	.913	.913
KWNJ	X	-3134404.492	.501	.502	.501	.502
	Y	4173081.828	.837	.837	.837	.837
	Z	3654100.968	.974	.974	.974	.974
SEOS	X	-3042060.369	.363	.364	.363	.363
	Y	4111978.757	.752	.752	.752	.752
	Z	3797578.729	.725	.725	.725	.725
SNJU	X	-3175473.079	.086	.085	.086	.086
	Y	4043362.930	.939	.937	.939	.939
	Z	3762213.594	.599	.599	.600	.599
SOUL	X	-3049402.747	.743	.743	.743	.743
	Y	4035000.351	.349	.348	.349	.349
	Z	3873010.167	.171	.171	.171	.171
SUWN	X	-3062022.791	.791	.790	.790	.790
	Y	4055448.048	.047	.047	.046	.047
	Z	3841818.259	.260	.260	.260	.260
TABK	X	-3201453.665	.687	.686	.687	.687
	Y	3956909.945	.940	.940	.941	.941
	Z	3832097.202	.220	.220	.220	.220
TEGN	X	-3241051.556	.556	.556	.556	.556
	Y	4030771.756	.756	.755	.756	.756
	Z	3719838.486	.481	.482	.482	.481
WNJU	X	-3122341.161	.160	.160	.159	.160
	Y	4004030.665	.662	.662	.661	.662
	Z	3847323.755	.751	.752	.752	.752
WULJ	X	-3238396.150	.147	.147	.147	.147
	Y	3940665.402	.402	.402	.402	.402
	Z	3816730.567	.569	.568	.568	.568

\* 연간해, 통합해의 위성기준점성과는 고시좌표의 정수부분과 동일함.

타낸 것으로 이로 인한 불확실성을 반영하기 위하여 Helmert 변환을 통해 표 3과 같이 비교 하였고, 각 해의 차이는 모든 방향에서 평균적으로 0.003m 이내로 계산 되는 것을 알 수 있었다.

4.1.3 한국측지계2002(KGD2002) 성과산정

GPS 데이터 처리와 정규방정식의 누적에 의한 연속 조정을 통해 산정된 좌표는 IGS-ITRF2005에 대해 표현 되는 위성궤도력과 IGS 관측점 고시좌표를 사용했기 때문에 이 측지계에 대해 표현된다. 본 연구에서 제안한 바와 같이 위성기준점의 성과는 GPS에 의해 직접 산정한 최신의 IGS-ITRF 좌표와 함께 우리나라 측지계인 KGD2002에 대한 성과도 지속적으로 산정하여 관리 할 필요가 있다. KGD2002에 대한 성과 산정을 위해서는 지각변동벡터를 이용하여 기준시점 2002.0에 대해 나타낸 후 Helmert 변환을 수행하여 산정된 연간해와 통합해의 좌표를 비교하였다.

또한 계산된 표의 결과는 향후 어떠한 방식으로 위성 기준점의 성과를 산정해서 관리해야 하는지를 요약 하여 보여주고 있다. 통합해의 경우 새로운 연간해가 추정 될 때 마다 지속적으로 산정하여 관리할 필요가 있으며, 특히 현행 고시좌표와 의미 있는 차이가 발생하는 경우 고시좌표의 갱신을 검토해야 한다. 표 4는 KGD2002에 대한 고시좌표(국토지리정보원, 고시제2010-189호)와 연간해 및 통합해의 비교로 수평과 수직 방향에서 수 밀리미터 이내로 일치하고 있어 고시좌표 성과가 산정된 이후로 의미 있는 불규칙한 지각변동이 발생하지 않았음을 확인 할 수 있다. 표 5는 표 4의 계산결과를 수평과 수직(2D+1D) 성분으로 환산한 수치의 통계계산 결과를 요약하고 있으며, N, E, h 방향에서 각각 평균적으로 0.003m, 0.003m, 0.008m의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다.

표 5. 한국측지계2002에 대한 고시좌표와 연간해 및 통합해 차이 (단위:m)

통계값	성분	2007	2008	2009	통합해
평균	N	0.003	0.003	0.003	0.003
	E	0.003	0.003	0.003	0.003
	h	0.008	0.007	0.008	0.008
RMS	N	±0.002	±0.002	±0.002	±0.002
	E	±0.005	±0.005	±0.005	±0.005
	h	±0.007	±0.006	±0.006	±0.006

4.2 단일 GPS 관측망

위성기준점 성과 산정 절차에 따라 지속적인 관리가 이루어 져야 하며 불규칙한 지각변동 혹은 최신 ITRF 측지계와 차이가 의미 있는 수준인 경우, 단일 GPS 관측망 조정을 실시하고 새로운 성과를 산정해야 한다. 2007년~2009년의 위성기준점 성과에 특이점은 발생되지 않으나 본 연구에서 제안한 절차에 의해 시범적인 성과를 산정하였다.

2007년~2009년 위성기준점망의 연간해 산출결과를 기지점으로 사용하여 단일기선 해석에 의한 다중세션 조정방식으로 망조정 전용 소프트웨어인 캐나다의 Microsearch사의 GeoLab™ 소프트웨어로 전국 단일 GPS 망의 성과를 산출하였다(Microsearch, 2001). 각 연간해의 기준시점에 대해 측지망조정이 이루어졌기 때문에 3회에 걸친 조정을 통해 산출된 성과의 기준시점은 각각 2007년 7월 1일 00:00(2007.182), 2008년 7월 1일 00:00시(2008.183), 2009년 7월 1일 00시(2009.182) 기준 시점으로 GPS망의 최종결과가 산정되었다. 전체 관측점의 수는 6,900 여점으로 3차원 좌표성분 20,700개를 기선해석을 통해 얻어진 76,902개의 3차원 기선벡터를 사용하여 추정하였다. 이러한 단일 GPS 측지망 동시조정 에 약 12 시간이 소요되었다. 그림 9는 망도와 조정결과에 대한 표준화잔차 히스토그램을 나타내고 있다.

표 6은 기준 국가측지기본망의 연간해를 고정점으로 사용하여 계산된 6,900 여점의 GPS망의 좌표를 각각 비교한 통계계산의 결과를 나타내고 있다. 1년 간격인 2007년과 2008년, 2008년과 2009년의 좌표차는 평균적

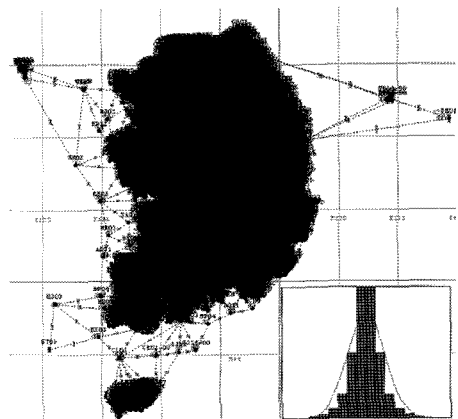


그림 9. 단일 GPS 조정망도 및 표준화잔차 히스토그램

으로 위도, 경도, 수직방향에서 각각 0.012m, 0.023m, 0.001m로 거의 유사한 좌표차를 보이고 있다. 이것은 위성기준점의 연간 지각변동 벡터의 경향을 나타내는 것이다. 따라서 산출된 성과의 기준시점이 2년 간격인 2007년과 2009년의 좌표차는 위도, 경도, 수직방향에서 각각 0.025m, 0.047m, 0.001m로 좌표차로 연간 변동량의 2배이며, 수직방향인 타원체고의 좌표변화량은 거의 없어 보인다. 실제 한반도 내부의 상대적인 지각변동을 고려하기 위해서는 GPS 관측점에 대해 주기적인 관측이 필요한 것으로 판단된다.

표 6. 해당 연도 기준 시점의 전국 단일 GPS망의 좌표차 통계(단위:m)

연도	통계량	위도	경도	타원체고
2007-2008	평균	0.013	0.022	0.001
	RMS	±0.001	±0.000	±0.001
2008-2009	평균	0.012	0.025	0.001
	RMS	±0.001	±0.000	±0.001
2007-2009	평균	0.025	0.047	0.001
	RMS	±0.001	±0.001	±0.001

위성기준점망의 통합해를 기준으로 단일 GPS 측지망을 동시 조정 하였다. GPS망조정은 국가측지기본망의 IGS-ITRF2005 측지계(기준시점: 2008.183)에 따른 성과와 우리나라 국가삼각점의 산출 좌표계인 KGD2002 측지계(기준시점: 2002.0)의 성과를 각각 산정하여 차이를 표 7에 비교하였다. 이러한 차이는 위치 표현에 사용되는 측지계와 기준시점에 의해 발생하며, 결과에서는 그 차이의 크기 보다는 앞서 언급된 원인에 주목해야 하며 이러한 이유로 국가기준점 성과의 상시 관리의 중요성을 강조하고자 하였다.

표 7. KGD2002와 IGS-ITRF2005(2007.183)과 좌표차 비교 (단위:m)

통계값	N	E	h
평균	0.082	0.161	0.002
RMS	±0.003	±0.002	±0.002

## 5. 결 론

본 논문은 지각판 운동과 지진과 같은 급격한 지각변동을 고려한 국가기준점의 상시적 성과 산정 체계 수립

에 관한 연구를 수행 한 것으로 다음과 같이 결과를 요약 할 수 있다.

첫째, 국내 GPS 관측 기준점 현황과 성과산정 절차와 최근 국가기준점 체계의 재정비가 이루어진 해외 사례의 조사를 실시하고 기준점 성과의 상시 산정 방안을 제시하기 위한 시사점을 도출 하였다.

둘째, 상시적 성과산정의 효율성을 높일 수 있도록 현재 국토지리정보원에서 운영 중인 45점의 GPS 상시관측점과 우리나라 인근에 위치하는 10점의 IGS 기준관측망을 연결하는 위성기준점망과 통합기준점 1,200점 및 2·3등 관측점 중 선별된 6,900 여점으로 이루어진 단일 GPS 관측망 (총 6,900 여점)으로 2 계층으로 단순화된 측지망의 구성을 제안하였다.

셋째, 24시간 관측데이터에 대해 초고정밀 GPS 다중기선해석(multi-baseline analysis)를 실시하고 정규방정식을 이용하여 일간해, 주간해, 연간해 및 통합해를 연속조정기법(sequential least squares adjustment)에 의해 최신의 IGS-ITRF 측지계에 대한 좌표와 Helmert 변환을 통한 현행 우리나라 측지계인 KGD2002 (기준시점 2002.0)에 대한 상시적 성과 산정 절차를 제시하였다. 또한, 위성기준점망의 조정 결과 성과의 갱신이 필요한 경우 단일 GPS 관측망 조정계산 절차를 제안 하였다.

넷째, 본 연구에서 제안한 절차에 따라 24점의 위성기준점망과 6,900 여점 GPS 관측점으로 이루어진 시험망을 구성하고 측지망 조정을 실시하였다. 위성기준점망의 경우 2007년~2009년이 GPS 관측데이터 처리를 실시하고 계산 단계별 결과 분석을 통해 지각변동에 의한 기준시점에 따른 기준점 성과의 변화 검토를 통해 KGD2002와 IGS-ITRF로 이원화된 성과의 관리 방안의 필요성 및 제안된 성과산정 방안의 타당성을 확인 하였다. 또한, 국가기준점 성과의 전면 갱신을 가정하여 단일 GPS 관측망 조정을 통해 절차의 단순화를 통한 효율성을 극대화 할 수 있음을 알 수 있었다.

다섯째, 본 연구는 우리나라 국가기준점 성과의 상시적 성과 산정을 위한 하나의 방안을 제안한 것으로 향후 실제 적용을 위해서는 측지측량 전문가의 추가적인 검토와 현장 기술자의 경험을 반영할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임[NRF-2009-351-D00086].

### 참고문헌

건설교통부 국토지리정보원 (2006), 국가기준점 망조정에 관한 연구.

건설교통부 국토지리정보원 (2007), 한반도 지각변동 연구.

국토해양부 국토지리정보원 (2008), 통합 전자기준점 구축을 위한 기초연구.

국토해양부 한국건설교통기술평가원 (2008), 통합 국가 기준점 상시관리체계 구축 기술개발 제 1, 2차년도 연구보고서.

국토해양부 국토지리정보원 (2010), 위성기준점 활용확대 및 지각변동 연구.

국토지리정보원, 고사 제2010-189호.

국토지리정보원 GPS기준점 서비스 홈페이지, <http://gps.ngii.go.kr>

이영진, 이흥규, 이준혁, 정광호, (2007-a) GPS망조정에 의한 2등측지기준점의 세계측지계 성과산정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 25권, 제 5호, pp. 451-463.

이영진, 정광호, 이흥규, 권찬오, 송준호, 조준래, 남기범, 차상현, (2007-b) GPS망조정에 의한 3등측지기준점의 세계측지계 성과산정. 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 25권, 제 5호, pp. 437-449.

이영진, 이흥규, 정광호, 송준호 (2008), 정확도 향상을 위한 GPS/EDM 통합데이터의 조정시험, 한국지적학회지, 한국지적학회, 제 24권, 제 1호, pp. 245-255.

이영진, 정광호 (2011), 통합 GPS망조정에 의한 삼각점의 세계측지계 성과결정 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 31권, 제 1D호, pp. 167-173.

전성배 (2010), 초고정밀 GPS 관측데이터 처리에 의한 상시관측점의 ITRF2005 좌표산정, 창원대학교 석사학위논문.

정광호 (2009), GPS기반의 국가기준망 통합조정에 관한 연구, 경일대학교 박사학위논문.

한국천문연구원 GPSDATA 서비스 홈페이지, <http://nfs.kasi.re.kr/gps/data>

Altamini, Z (2002), Discussion on how to express a regional GPS solutions in the ITRF, *Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF)*, Ponta Degada. 5-8 June.

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Mei, M. (2007), *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern.

Jung, K.H., Ryu, S.H., Lee, Y.J., Lee, H.K., Cha, S.H. (2010), Nationwide Geodetic Adjustment of Integrated GPS Networks in Korea, *XXIV FIG 2010 in Sydney*, Australia, 11-16 April.

JUPEM (2003), *A Technical Manual on the Geocentric Datum of Malaysia(GDM2000)*, Department of Survey and Mapping Malaysia, p. 77.

Lee, H.K., Lee, Y.J., Jung, K.H. (2007), Nationwide GPS Network Adjustment for the Densification of Korean Geodetic Datum 2002. Joint International Symposium & Exhibition on Geoinformation 2007 & International Symposium on GPS/GNSS 2007 (*ISG-GNSS2007*). Johor Bharu, Malaysia, 5-7 November.

MaCarthy, D.D., Petit, G. (2004), IERS Convention (2003), IERS Technical Note 32, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

Microsearch (2001), *Microsearch Geolab 2001 Field Manual*, Microsearch, Canada.

NSAS Homepage, <http://cddis.gsfs.nasa.gov>

NCG (2005), *Geodetic reference frame in the Netherlands*, Netherlands Geodetic Commission, p. 117.