

주성분분석을 통한 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소 수직좌표 시계열 분석

Principal Component Analysis of GPS Height Time Series from 14 Permanent GPS Stations Operated by National Geographic Information Institute

김경희¹⁾ · 박관동²⁾

Kim, Kyeong-Hui · Park, Kwan-Dong

Abstract

We produced continuous vertical time series of 14 permanent GPS stations operated by National Geographic Information Institute by processing about five years of data. Then we computed the height velocities by using a linear regression fitting of those time series, and did principal component analysis to understand the overall characteristics of the series. The prominent signal obtained as the first mode of PCA results showed an average of 4.2 mm/yr vertical velocity. The values of the first mode eigenvectors were consistent at all sites. Thus, we concluded that all the 14 stations are uplifting nearly at the same velocity for the test period. Then changes of precision before and after removing the first mode signal from the 14 height time series were analyzed. As a result, the precision improved 34.8% on average.

Keywords : Principal Component Analysis, PCA, GPS, Precision, Time Series

초 록

이 연구에서는 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소에서 수집된 약 5년간의 GPS 자료를 고정밀 처리하여 연속적인 수직좌표 시계열을 생성하였다. 그리고 1차 선형회귀식을 사용하여 GPS 상시관측소 속도를 계산하였으며, GPS 수직좌표 변동 경향을 분석하기 위해 주성분분석을 실시하였다. 가장 우세한 성분의 신호를 나타내는 모드 1을 대상으로 분석한 결과 약 4.2mm/yr의 수직 속도가 산출되었다. 그리고 모드 1의 고유벡터 값에서 일관성을 보였다. 따라서 분석대상 기간 동안에는 모든 관측소가 일제히 상승하는 신호를 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 14개 GPS 상시관측소 시계열에서 주성분분석을 통해 산출된 모드 1 신호를 제거하고 모드 1의 신호 제거 전·후에 따른 관측소 수직좌표 시계열의 정밀도 변화를 분석하였다. 그 결과, 수직좌표 시계열의 정밀도는 평균 34.8% 향상되었다.

핵심어 : 주성분분석, PCA, GPS, 정밀도, 시계열

1. 서 론

우주측지기술이 발달함에 따라 GPS(Global Positioning System) 상시관측소를 이용하여 관측소 좌표를 mm 수준

의 정밀도에서 장기적이고 연속적으로 관측할 수 있다. 또한 GPS 상시관측소 자료를 고정밀 GPS 자료 처리 프로그램으로 처리하여 좌표시계열을 산출할 수 있으며 GPS 상시관측소의 절대속도, 정밀좌표 등을 계산하기

1) 교신저자 · 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 박사과정(E-mail: kyeong-hui@inha.edu)

2) 정회원 · 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 부교수(E-mail: kdpark@inha.ac.kr)

위해 활용된다. 국토지리정보원(2007)은 국내 상시관측소의 GPS 상시관측소 자료를 처리하여 좌표시계열을 작성한 후 정밀좌표성과 산출을 위한 연구를 하였고, 박관동(2007)은 53개 GPS 상시관측소의 수직방향 속도를 계산하고 지역별 지각변위 경향을 비교·분석하였다. 또한 김경희 등(2009)은 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소의 자료를 처리하여 산출한 좌표시계열에서 대기압 하중에 의한 영향을 보정한 후 속도를 계산하였다. 이와 같이 국내에서는 GPS 자료 처리를 통해 산출한 좌표시계열을 이용하여 GPS 상시관측소의 절대속도, 정밀좌표 등을 계산하기 위한 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 GPS 좌표시계열을 심층 분석하여 시계열이 갖고 있는 신호 특성을 규명하기 위한 연구는 많지 않다.

GPS 자료 처리를 통해 산출된 좌표시계열의 특성을 분석하기 위해 주성분분석(Principal Component Analysis)을 이용할 수 있다. 주성분분석은 여러 변수 사이의 상관관계를 기초로 하여 하나 또는 몇 개의 종합적 지표로 전체 자료의 변동을 설명하는 통계분석 방법이다. 주성분분석은 EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석이라고도 불리며, 해양학과 기상학 분야에 많이 활용되고 있다. 주성분분석을 GPS 측지 분야에 사용한 몇 가지 예는 다음과 같다. Elósegui 등(1997)은 주성분분석을 이용하여 다른 위치에서 기록된 동일한 물리적 현상의 상관관계 정도를 평가하였다. Aoki 등(2003)은 일본의 502개 GPS 상시관측소 자료를 이용하여 주성분분석을 하였고, 이를 통해 수직 지각변동 특성을 분석하였다. 이와 같이 GPS 상시관측소의 좌표시계열에 주성분분석을 적용하여 관측소간의 상관관계 정도를 파악함으로써 시공간적 변화 양상을 분석할 수 있다(김경희, 2010).

이 논문에서는 국토해양부 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소의 수직좌표 시계열을 고정밀 GPS 자료 처리를 통해 산출하였다. 그리고 1차 선형회귀식을 사용하여 GPS 관측소 속도를 계산하였다. 또한 14개 GPS 상시관측소 수직좌표 시계열 특성을 분석하기 위해 주성분분석을 실시하였으며, 주성분분석을 통해 산출된 14개 관측소에서 공통으로 나타나는 모드 1 신호를 제거함에 따른 GPS 관측소 수직좌표 시계열의 정밀도 향상 정도를 파악하였다.

2. GPS 상시관측소 수직좌표 시계열 산출

2.1 GPS 자료 처리 기법

이 연구에서는 GPS 상시관측소의 수직좌표 시계열 산출을 위하여 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration) 제트추진연구소(JPL, Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 고정밀 자료 처리 프로그램인 GIPSY-OASIS II를 사용하였다(Webb 등, 1993). 자료 처리 방법으로는 일반적인 정밀단독측위(Precise Point Positioning) 기법(Zumberge 등, 1997)을 채택하였으며, 매 30초 간격의 하루 24시간 단위로 기록되어 있는 GPS 관측 자료를 처리하여 1일 평균 좌표를 추정하였다. 동시에 매 5분 단위로 대류권 지연량을 추정하였으며, 대류권 지연량 추정 과정에서 Niell 사상함수(Niell, 1996)를 이용하였다. 이중주파수 선형조합으로 이온층 오차를 제거하였고, 정밀궤도력은 JPL에서 제공하는 궤도력을 이용하였다. 그리고 GPS 안테나의 위상중심변동(phase center variation)은 절대보정모델을 사용하여 보정하였다(김경희, 2010).

GIPSY-OASIS II를 사용하여 1일 단위로 추정된 좌표시계열은 JPL에서 제공하는 좌표변환계수(7-parameter)를 이용하여 지구 중심 3차원 직교좌표계인 ITRF2005로 변환하였다. ITRF2005를 기준으로 산출된 3차원 직교좌표로부터 수직방향의 좌표시계열을 산출하기 위해서 국지좌표계(local or topocentric coordinate system)인 남-북, 동-서 그리고 수직방향 좌표로 다시 변환하였다. 이 연구에서는 수직좌표 추정치만을 이용하여 GPS 관측소의 수직속도를 계산하였다.

2.2 GPS 수직좌표 시계열 산출

GPS 관측소의 정밀 수직좌표 시계열 분석을 위하여 국토해양부 국토지리정보원의 14개소 GPS 상시관측소를 대상으로 수직좌표 값을 산출하였다. 분석기간은 2000년 1월 1일부터 2009년 6월 30일까지이며, 산출된 좌표시계열로부터 1차 선형회귀식을 사용하여 GPS 관측소 속도를 계산하였다. 14개 GPS 상시관측소 중에서 수원 GPS 상시관측소의 좌표시계열과 속도를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 가로축과 세로축은 각각 년도와 수직 방향의 일별 좌표변동을 나타낸 것이며, 수직방향으로 3.1mm/yr의 관측소 속도가 계산되었다. 14개 관측소의 수직좌표 시계열에서 계산한 속도는 표 1에 나타내었다. 관측소 수직방향 좌표변동 속도의 경우 음수는 지각하강, 양수는 지각상승을 의미하는데 태백 관측소의 경우는 관측환경이 좋지 않아 하강하는 것으로 나타나고 있다(국토지리정보원, 2007). 태백 GPS 관측소를 제

외한 대부분의 GPS 상시관측소들이 평균 2.6mm/yr의 속도를 보이고 있음을 알 수 있다.

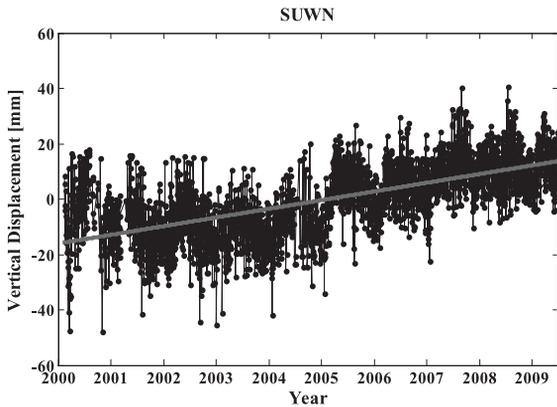


그림 1. 수원 GPS 상시관측소 수직좌표 시계열

표 1. 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소 수직좌표 시계열 속도

GPS 관측소	속도(mm/yr)	GPS 관측소	속도(mm/yr)
제주(CHJU)	1.7	상주(SNJU)	2.4
청주(CNJU)	1.0	서울(SOUL)	2.7
진주(JINJ)	2.5	수원(SUWN)	3.1
전주(JUNJ)	2.5	태백(TABK)	-0.4
강릉(KANR)	2.1	대구(TEGN)	2.7
광주(KWNJ)	3.4	원주(WNJU)	2.4
서산(SEOS)	3.6	울진(WULJ)	4.0

3. GPS 수직좌표 시계열의 주성분분석

3.1 주성분분석(Principal Component Analysis)

주성분분석은 여러 변수 사이의 상관관계를 기초로 하여 자료의 손실을 최소화 하면서 하나 또는 몇 개의 종합적 지표로 전체 자료의 변동을 설명하고자 하는 통계분석법으로 이 결과는 다른 분석을 위한 전단계로서의 의미를 갖고 있다(Park, 2000). 주성분분석은 선형결합을 통해 주어진 자료들의 정보를 가장 많이 가진 순서대로 성분(mode)을 산출하여 주어진 자료들의 변동을 시·공간적으로 설명한다. 주성분분석을 통해 산출된 여러 개의 성분 중에서 고유값(eigenvalue)의 크기를 이용하여 몇 개를 주성분으로 선택할 것인가를 결정하며, 산출된

성분들 중 고유값의 크기가 가장 큰 경우를 주성분으로 채택한다. GPS 수직좌표 시계열을 주성분분석 할 경우 분석대상 지역에서 광범위하게 발생하는 좌표변동 신호를 검출할 수 있을 뿐만 아니라 개별 GPS 관측소의 시계열 특성을 타 관측소와 비교하여 관측소 개별 신호를 찾을 수 있다(김경희, 2010).

주성분분석에 이용하는 각 관측소의 장기간 자료에서 결측일이 존재하는 경우 분석에서 오류가 발생된다. 따라서 이러한 경우 각 관측소마다 날짜와 날짜 사이에 하루의 결측일이 존재할 경우 스플라인(spline) 보간법을 사용하여 보간하고, 각 관측소마다 날짜와 날짜 사이의 이틀 이상의 결측일이 존재할 경우 결측일이 발생하지 않은 관측소에서 유추한 common mode signal(Wdowinski 등, 1997; Park, 2000)을 이용하여 결측일에 대해서 보간한 후 분석을 실시한다(김경희, 2010). Common mode signal을 이용한 보간법은 참고문헌으로 대체한다(Aoki 등, 2003; Mazzotti 등, 2008).

3.2 GPS 수직좌표 시계열의 주성분분석

주성분분석으로 GPS 수직좌표 시계열 분석에 앞서 14개 GPS 관측소 자료의 품질 및 결측율에 대한 검증을 하였다. 14개 관측소 자료의 결측율은 2.7(강릉)~18.1%(태백)의 범위이다(표 2). 이와 같이 결측일이 존재할 경우

표 2. 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소별 자료 결측율

GPS 관측소	결측 자료 수 (2000.01.01-2009.06.30, 3356일)		결측율 (%)
	관측된 날짜	결측된 날짜	
제주(CHJU)	2982	374	11.1
청주(CNJU)	2923	433	12.9
진주(JINJ)	3195	161	4.8
전주(JUNJ)	3218	138	4.1
강릉(KANR)	3263	93	2.7
광주(KWNJ)	3070	286	8.5
서산(SEOS)	3100	256	7.6
상주(SNJU)	2785	571	17.0
서울(SOUL)	2753	603	18.0
수원(SUWN)	2920	436	13.0
태백(TABK)	2749	607	18.1
대구(TEGN)	3144	212	6.3
원주(WNJU)	3196	160	4.8
울진(WULJ)	3211	145	4.3

앞서 설명한 스플라인 보간법이나 common mode signal 방법에 의해 보간하여 분석할 수 있지만 동일한 날짜에 14개 관측소가 모두 결측되면 주성분분석을 할 수가 없다. 그러므로 14개 관측소에서 동시에 결측된 날짜를 포함하지 않은 기간 중 장기 분석을 실시할 수 있는 2004년 8월 8일부터 2008년 5월 22일까지를 선별하여 주성분분석을 실시하였다.

국토해양부 국토지리정보원의 14개 GPS 상시관측소의 수직좌표 변동 경향을 분석하기 위해서 총 5년 기간 동안의 수직좌표 시계열을 대상으로 주성분분석을 실시하였다. 이때 고유값은 직교함수를 통해 산출하고 모드는 특이값분해(SVD, Singular Value Decomposition)를 이

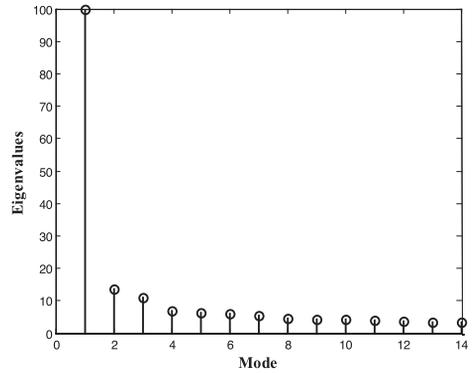


그림 2. 모드 신호의 상대적인 크기 비교

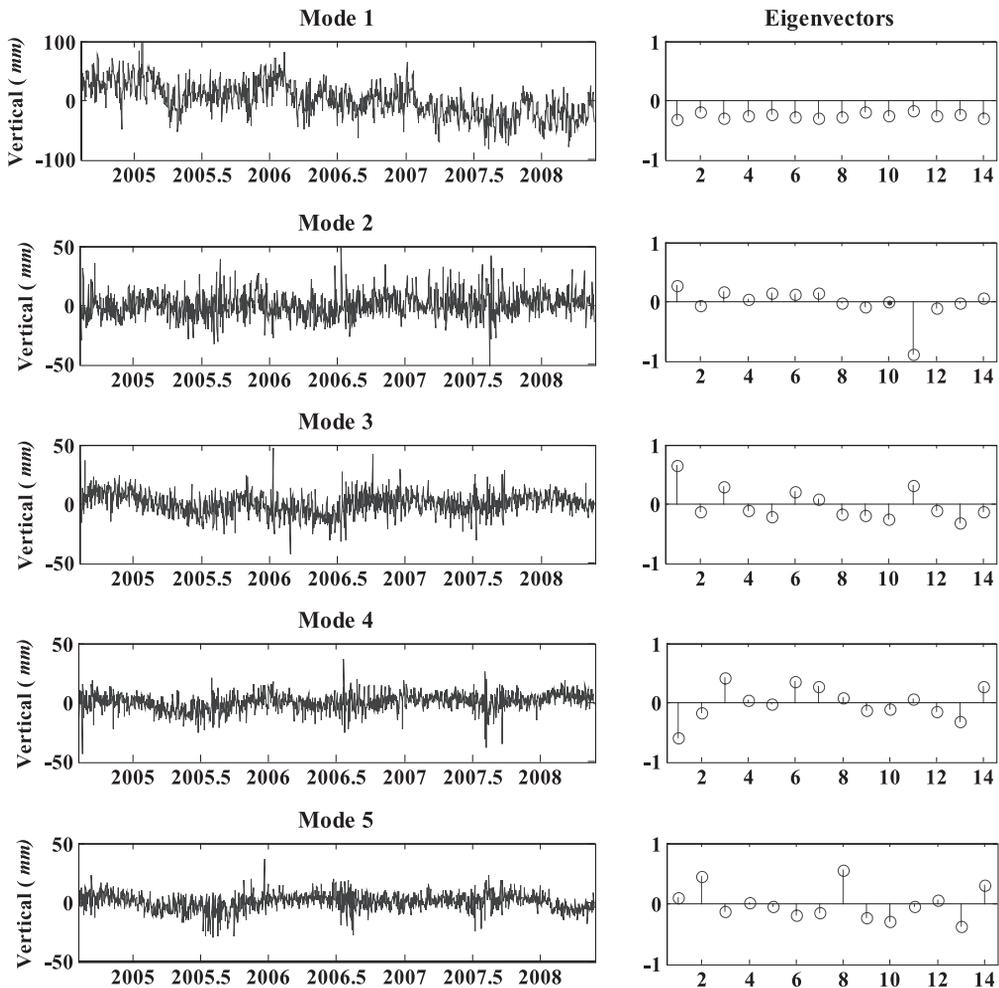


그림 3. 14개 GPS 상시관측소 수직좌표 주성분분석 결과

용하여 산출하게 된다. 이를 통한 분석과정은 참고문헌으로 대체 한다(Kelly, 1988; Park, 2000). 주성분분석 결과는 분석에 사용된 관측소의 개수만큼 모드가 검출되며, 이는 시계열에서 나타내는 신호 세기의 순서대로 모드 1, 2, 3...등으로 표현된다. 그림 2는 14개 관측소의 수직좌표 주성분분석으로 산출된 각 모드의 상대적인 크기를 비교한 것으로 모드 1의 크기를 100%로 나타내고 나머지 모드의 상대적인 세기를 나타내었다. 산출된 14개 모드의 크기를 백분율로 나타낸 결과 모드 1의 크기가 100%일 때 모드 2는 13%, 모드 3은 11%, 모드 4부터는 10% 이하로 모드 1에 비해 나머지 모드의 크기가 상대적으로 매우 작음을 확인할 수 있다. 그러므로 이 연구에서는 모드 1만을 대상으로 분석하였다.

14개 관측소의 주성분분석 결과를 나타내는 그림 3의 좌측 그래프는 우세한 5개 성분의 신호를 모드 1에서 5까지 나타낸 것이며, 우측 그래프는 각 모드의 관측소별 고유벡터(eigenvector)를 나타낸 것이다. 모드 1의 고유벡터를 보면 모든 관측소에서 부호와 크기가 동일하게 일관성을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 주성분분석 결과 중 가장 우세한 신호인 모드 1은 분석대상인 14개 관측소에서 공통적으로 나타나는 신호이며, 동시에 이 지역에서 동일하게 발생하는 물리적 현상이다. 이와 같은 현상은 지각변동 혹은 대기압하중에 의한 계절적 신호 등을 의미한다. 반면에 모드 2 이후의 고유벡터에서는 일관성이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 모드 2와 3의 경우 각각 11 번째 관측소와 첫 번째 관측소에서만 고유벡터가 크게 나타나고 나머지 관측소에서는 고유벡터의 부호 및 크기의 일관성이 없다. 따라서 모드 1을 제외한 신호는 특정 관측소 고유의 오차요인 혹은 관측환경의 특징을 나타낸 것이라고 판단된다.

그림 3에서 GPS 상시관측소 모드 1의 고유벡터는 대략 -0.2~-0.3의 범위로 모든 관측소에서 유사한 경향이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 모드 1의 시계열의 속도는 -16.4mm/yr로 이 시계열 속도에 관측소 고유벡터의 평균값인 -0.26을 곱하면 약 4.2mm/yr로 모드 1에 대한 수직속도를 산출할 수 있다. 이와 같은 결과는 14개 GPS 상시관측소에서 수직방향으로 속도가 상승하고 있으며 한반도의 지각이 전반적으로 상승한다는 의미로 해석할 수 있다. 이 결과는 앞서 GPS 자료 처리에 의해 산출된 평균 2.6mm/yr의 속도보다 약 1.6mm/yr 정도 차이를 보이는데 이러한 결과는 주성분분석의 분석기간이 짧기 때문으로 판단된다. 또한 각 관측소가 나타내는 고유신

호의 정밀도 분석을 위해 14개 관측소에서 공통으로 나타나는 신호인 모드 1을 각 관측소별 수직좌표 시계열에서 차감함으로써 제거하였고, 제거 전후에 따른 14개 관측소 시계열 정밀도를 표 3에 나타내었다.

표 3. 14개소 GPS 상시관측소의 공통오차 보정 전후의 수직좌표 시계열 정밀도 변화

GPS 관측소	정밀도(mm)		
	보정 전	보정 후	향상도(%)
제주(CHJU)	12.3	8.1	33.7
청주(CNJU)	8.8	6.4	26.9
진주(JINJ)	11.2	6.6	40.8
전주(JUNJ)	9.0	5.3	41.5
강릉(KANR)	9.5	6.5	31.9
광주(KWNJ)	10.3	6.7	34.8
서산(SEOS)	10.3	5.8	44.2
상주(SNJU)	10.2	6.3	38.1
서울(SOUL)	8.1	5.7	28.7
수원(SUWN)	9.8	6.0	38.9
태백(TABK)	11.4	10.0	11.7
대구(TEGN)	9.4	5.7	38.7
원주(WNJU)	9.4	6.4	32.7
울진(WULJ)	10.3	5.8	44.1

표 3을 보면 14개 관측소 모두에서 수직좌표 시계열의 정밀도가 향상되었음을 알 수 있다. 모드 1을 제거함으로써 수직좌표 시계열의 평균적인 정밀도는 34.8%이며, 특히 서산과 울진 관측소에서는 44% 이상 정밀도가 향상되었다. 이와 같은 결과는 수직좌표 시계열에서 지각상승에 따른 모드 1의 영향이 매우 높음을 의미하며, 모드 1을 제거함으로써 관측소별 수직좌표 변동의 경향을 확인할 수 있다. 예를 들어 태백 관측소의 경우는 향상도가 11.7%로 다른 관측소보다 낮은 향상률을 보인다. 이는 태백 관측소의 수직좌표 시계열 변동이 지각상승보다는 다른 원인에 의한 것이 더 크게 작용하기 때문으로 판단되며, 국토지리정보원(2007)에 의하면 관측환경이 좋지 않아 수직좌표 시계열에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 그림 4는 가장 높은 향상도를 보인 서산 관측소의 수직좌표 시계열에서 모드 1을 제거하기 전과 후를 나타낸 것이다. 그림 4를 보면 모드 1을 제거하기 전에는 시계열이 위쪽과 아래쪽으로 넓게 분포되어 있지

만, 제거 후에는 산포도가 줄어들어 육안으로도 정밀도가 크게 향상되었음을 확인할 수 있다.

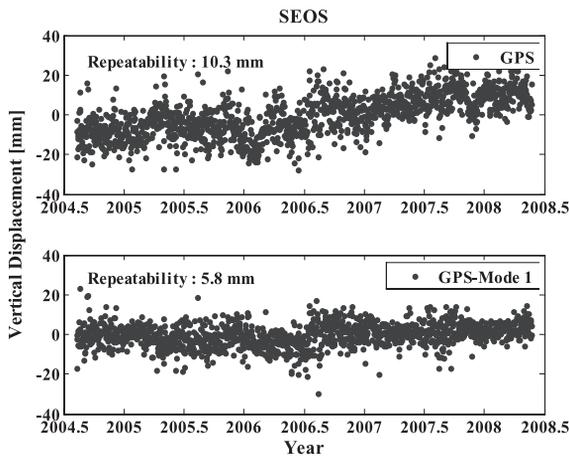


그림 4. 서산 GPS 상시관측소의 모드 1 제거 전후에 따른 수직좌표 시계열

4. 결 론

이 연구에서는 국토해양부 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소에서 약 10년간 수집된 자료를 고정밀 자료 처리 프로그램인 GIPSY-OASIS II로 처리하여 수직좌표 시계열을 생성하였다. 그리고 1차 선형회귀식을 사용하여 GPS 관측소 속도를 계산하였으며, 태백 관측소를 제외한 13개 GPS 상시관측소에서 평균 2.6mm/yr의 속도를 보임을 확인하였다. 또한 GPS 수직좌표 변동 경향을 분석하기 위한 주성분분석에 앞서 자료 품질 및 결측율에 대한 검증은 실시하였으며 결측일이 없는 약 5년의 기간을 분석기간으로 선정하였다. 이에 따라 약 5년의 기간에 대해 주성분분석을 실시하였으며, 가장 우세한 성분의 신호를 나타내는 모드 1을 대상으로 분석하였다. 모드 1의 시계열 속도 -16.4mm/yr에 관측소 고유벡터들의 평균 -0.26을 곱하여 약 4.2mm/yr의 크기로 수직방향 속도가 상승함을 확인하였다. 추가적으로 14개 GPS 상시관측소 시계열에서 주성분분석을 통해 산출된 모드 1을 제거하였다. 그 결과 14개 관측소에서 수직좌표 시계열 정밀도가 향상되었으며 제거 전과 비교하여 평균 34.8%의 향상도를 보였다. 태백 관측소의 경우에는 모드 1을 제거한 후 정밀도 향상률이 11.7%인데 이는 수직좌표 시계열에 태백 관측소의 관측환경에 의한 영향이 반영된

에 따른 것이다. 이와 같이 수직좌표 시계열 변동에 큰 영향을 주는 모드 1을 제거함으로써 관측소별 수직좌표 시계열의 변동 경향을 파악할 수 있는 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다. 그리고 향후 연구를 통해 각 관측소별 변동에 따른 원인을 파악하고, 국가 수준점 성과를 유지 관리할 수 있는 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

김경희는 GPS 수직좌표 시계열 주성분분석에 관한 해석 및 전체적인 논문 결과 도출에 관해서 공간정보 전문 인력 양성사업의 지원을 받아 수행하였습니다. 박관동은 GPS 상시관측소 자료 처리 및 수직좌표 시계열 산출에 관해서 “2009년도 교육과학기술부 기초기술연구회 협동연구사업비(과제명: GPS 기반 집중호우·전파장애·지각변동 상시감시기술 개발)” 지원을 받아 이 연구를 수행하였습니다.

참고문헌

국토지리정보원 (2007), 한반도 지각변동 연구.
 김경희, 박관동 (2009), 대기압하중에 의한 지각변위 보정을 통한 GPS 수직좌표 시계열 정밀도 향상, 한국측량학회지, 제 27권, 제 5호.
 김경희 (2010), 수직 지각변동 보정을 통한 한반도 절대 해수면 상승속도 산출, 석사학위 논문, 인하대학교
 박관동 (2007), 7년간의 GPS 상시관측소 데이터에서 유추한 한반도 수직방향 지각변위, 제 15차 GNSS Workshop 발표논문집.
 Aoki, Y. and Scholz, C. H. (2003), Vertical deformation of the Japanese islands, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108(B5), No. 2257, doi:10.1029/2002JB002129.
 Elósegui, P., Rius, A., Davis, J. L., Ruffini, G. and Deihm, S. (1997), A regional GPS experiment for estimating the spatial and temporal variations of water vapor. *In Proceedings of the ION GPS-97 10th International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation*, Kansas City, Missouri, pp. 241-248.
 Kelly, K. A (1988), Comment on "Empirical orthogonal function analysis of advanced very high resolution radiometer surface temperature patterns in santa barbara channel" by

- G. S. E. Lagerloef and R. L. Bernstein, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93(C12), No. 15, pp. 15753-15754.
- Mazzotti, S., Jones C. and Thomson, R. E. (2008), Relative and absolute sea level rise in western Canada and north-western United States from a combined tide gauge-GPS analysis, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 113, C11019, doi:10.1029/2008JC004835.
- Niell, A. E. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, No. B2, pp. 3227-3246.
- Park, K.-D. (2000), *Determination of Glacial Isostatic Adjustment Parameters Based on Precise Point Positioning using GPS*, Ph.D. Thesis, University of Texas, Austin, USA.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P. and Genrich, J. (1997), Southern california permanent GPS deodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 landers earthquake, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102(B8), pp. 18,057-18,070.
- Webb, F. H. and Zumberge, J. F. (1993), *An introduction to the GIPSY/OASIS-II*, JPL Publ., D-11088, Pasadena, Calif.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and Webb, F. H. (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5017.

(접수일 2010. 05. 18, 심사일 2010. 06. 16, 심사완료일 2010. 06. 23)