

칼만필터에 기반한 GNSS 상시관측소 좌표 시계열의 지진에 따른 편의검출 기법에 관한 연구

이흥규

창원대학교 토목환경화학융합공학부

A Study on Online Detection Schemes of Earthquake Induced Shifts in Coordinate Time Series of GNSS Continuous Operation Reference Station by Kalman Filtering

Hungkyu Lee

School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University

요약 GNSS 상시관측소 고시좌표는 측지기준점으로써의 중요성과 다양한 위성측위 응용 분야의 활용성을 고려할 때 최고의 정확도와 최신성을 갖도록 관리해야 한다. 특히, 지진 등에 따른 지각 변위는 그 크기에 해당하는 만큼 기존 성과에 편의를 유발하므로, 그 영향이 목표 정확도를 초과할 때에는 신속히 새로운 기준 좌표를 산정·제공하는 등 적절한 조치가 필요하다. 본 논문에서는 GNSS 상시관측소 데이터 자동처리 시스템과 연계 구현할 수 있는 칼만 필터에 기반 좌표 시계열의 편의검출 절차와 방법을 연구하였다. 이를 통해 필터 이노베이션과 재추정 시계열에 적용할 수 있는 통계검정 기법을 구현한 후 과학기술용 GNSS 소프트웨어에 의해 추정된 국내 14개소 상시관측소 2010년~2011년 시계열에 적용해 그 성능과 특징을 파악하였다. 그 결과 통계검정의 오류와 신뢰성을 고려할 때 필터링 시계열에 대한 CUSUM(Cumulative Sum) 검사는 지진 등에 따른 잔류편의의 그리고 이노베이션에 대한 광역검정은 특정 에포크에서 발생하는 돌출오차 검출에 효과적인 것으로 분석되었다.

Abstract It is crucial to manage and maintain the geodetic reference coordinates of GNSS continuously operating reference stations (CORSS) in consideration of their fundamental roles in geodetic control and positioning navigation infrastructure. Earthquake-induced crustal displacement directly impacts the reference coordinates, so such events should be promptly detected, and appropriate action should be made to maintain the target accuracy, including update of the geodetic coordinates. To this end, this paper deals with online schemes for the detection of persistent shifts in the coordinate time-series produced by an automatic GNSS processing system. Algorithms were implemented to test filtered results, such as hypothesis tests of the innovation sequence of a Kalman filter and a cumulative sum (CUSUM) test. The results were assessed by the time-series of coordinates of 14 CORS for two years, including the 2011 Tohoku earthquake. The results show that the global hypothesis test is practical for detecting abrupt jumps, whereas CUSUM is effective for identifying persistent shifts.

Keywords : Coordinate Time-Series, GNSS, Persistent Shift, Detection, Kalman Filter

이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

*Corresponding Author : Hungkyu Lee(Chanwon National Univ.)

email: hkyulee@changwon.ac.kr

Received July 20, 2020

Revised August 6, 2020

Accepted September 4, 2020

Published September 30, 2020

1. 서론

GNSS 상시관측소(CORS: Continuously Operating Reference Station)는 GPS, GLONASS GALILEO, BEIDOU 등의 인공위성 전자파 신호를 연속적으로 취득해 실시간 혹은 사후에 이를 사용자와 측위 응용 서비스 공급자들에게 제공하는 측위항법 분야의 핵심 인프라이다. 우리나라에서는 한국천문연구원이 우주측지 연구를 위해 1992년 최초로 설치한 이후 2020년 현재까지 중앙·지방정부 및 산하 단체, 정부 출연 연구원 등에서 각 기관의 고유 업무 지원과 대국민 서비스를 위해 약 200개의 상시관측소를 설치·운영하고 있다. 특히, 2016년부터는 'GNSS 통합데이터 센터'를 설치해 각기 다른 기관이 운영하는 관측소의 실시간 및 후처리 데이터를 제공하고 있다.

「공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률 시행령」 제 8조는 “지리학적 경위도, 직각좌표 및 지구중심 직교좌표의 측정 기준으로 사용하기 위하여 대한민국 경위도원점을 기초로 정한 기준점”을 ‘위성기준점’으로 구분하고 있으며, 국토지리정보원이 국가 측지기준체계의 구현과 유사·관리를 주요 목적으로 설치한 약 60점의 관측소가 여기에 해당한다. 또한, 이 기관은 위성기준점 성과와 관측 데이터에 기초해 센티미터 수준의 고정밀 실시간 측량을 지원하는 네트워크-RTK 보정신호 서비스를 제공하고 있다. 이와 같은 위성기준점의 위상과 역할을 반영할 때 그 고시좌표는 최고의 정확도와 최신성을 유지해야 할 것이다.

2011년 3월 11일 발생한 동일본 대지진은 진앙 주변의 지각을 약 2.4m 정도 동쪽으로 이동시킨 것으로 알려져 있다[1]. 이 지진은 한반도에도 지각변동에 영향을 미쳐 5년 이상 장기 GNSS 관측데이터 처리결과 동쪽으로 약 3cm 수준의 지진동시변위(co-seismic deformation) 발생한 것과 크기와 특징이 진앙과의 상대 위치에 따라 다른 것으로 보고된 바 있다[2,3]. 이와 같은 결과는 동일본 대지진으로 우리나라 측지기준망에 상대·절대적 변위가 발생했다는 것을 의미한다. 이로 인해 국토지리정보원은 동일본 대지진 이후 2014년 1월 국립해양측위정보원 운영 관측소 일부를 포함해 위성기준점 72점 성과를 변경하였다(국토지리정보원 고시 제2014-164호). 그러나, 동일본 대지진 발생 약 3년 후에 기준점 성과가 재고시 되어 그 이전에 수행한 위성기준점 기반 측량 결과에 편이가 발생했을 우려가 있다. 따라서, 위성기준점과 같이 최고 수준의 정확도를 확보해야 하는 GNSS 상시관측소

는 자동 데이터 처리 시스템과 연계한 성과 모니터링 체계 구축으로 목표 정확도 이상의 잔류편의(persistent shifts) 발생 시 신속한 감지·조치가 가능하도록 관리할 필요가 있다.

동일본 대지진 이후 한반도 지역 지각변동 특성 파악을 위해 [1-4]는 GNSS 관측데이터를 Bernese, GAMIT, GIPSY와 같은 과학기술연구용 소프트웨어에 의해 처리 분석한 연구들이 수행하였다. 그러나, 이들 연구는 지진 이후 상당한 시간이 흐른 후 대체로 3년 이상의 장기간 데이터를 사용해 지진 동시·사후(post-seismic) 변위와 그 경향과 특징을 분석하는 내용을 주로 다루었다. 반면, 앞서 언급한 바와 같이 위성기준점으로써 GNSS 상시관측소의 성과 관리 측면을 고려한다면, 이와 같은 특정 이벤트 발생 후 집중적인 관측데이터 처리 보다는 자동화 방식에 따른 주기적 처리로 좌표 시계열을 형성해 모니터링 하는 것이 바람직할 것이다[5,6]. 특히, 동일본 대지진과 같이 한반도 지각에 유의미한 변위를 유발해 GNSS 상시관측소 성과갱신 혹은 지각변동에 따른 패치 모형(path model) 개발·제공 등을 포함한 정확도 유지를 위한 조치가 필요할 때는 통계적 방식을 적용해 이를 판단할 수 있도록 해야 할 것이다.

본 논문에서는 [5]에서 제시한 것과 같은 GNSS 상시관측소 데이터 자동처리 시스템이 주기적으로 추정한 좌표로 형성하는 시계열을 감시해 지진 등에 의해 발생하는 편의를 신속·신뢰적으로 검출할 수 있는 기법을 연구하였다. 이를 통해 상시관측소의 수평 좌표 시계열을 입력으로 하고, PVA(Position, Velocity, Acceleration) 동적모형을 적용하는 칼만필터(Kalman filter) 기반 편이검출 절차를 도출하였다. 이와 함께, 필터의 예측치와 측정치 차이에 해당하는 이노베이션(innovation)에 대한 가설검정과 필터링 결과에 CUSUM 검사 절차를 구현한 후 Bernese 소프트웨어가 추정한 14개 상시관측소의 2010~2011년 시계열에 적용해 동일본 대지진에 의한 편이검출 특징을 비교·분석하였다.

2. 칼만필터 기반 온라인 편이검출

2.1 개요

본 연구는 GNSS 상시관측소 좌표 시계열에 대한 통계검정으로 지진에 의한 잔류편의 검출에 관한 것으로, 지진이 발생한 이후 필요에 따라 관측데이터를 처리해 지각 변위를 분석한 [1-4]의 연구와는 차이가 있다. Fig.

1은 본 연구에서 제안하고자 하는 칼만필터 기반의 좌표 시계열 편이검출 절차를 도시한 것으로, 자동 관측자료 처리 시스템에 의해 주기적 제공하는 일간해(daily solution)에서 속도벡터에 의해 지각변동 성분을 제거한 시계열이 지속 갱신되는 상황을 가정한 것이다. Fig. 1에서와같이 편이검출 절차는 좌표 시계열 잡음 축소를 위한 칼만 필터링과 이와 연계한 통계검정으로 이루어져 있다. 통계검정은 칼만필터의 이노베이션에 대한 지역(local) 및 광역(global) 검사와 필터링 좌표 시계열에 대한 귀무대립가설의 우도 비율(likelihood ratio)을 누적하는 CUSUM (Cumulative Sum) 검사이다. 그림에서와 같은 일련의 잔류편의 검출절차를 Matlab에 의해 구현하였으며, 수치실험을 통해 각 기법의 특징과 성능을 비교하고자 하였다.

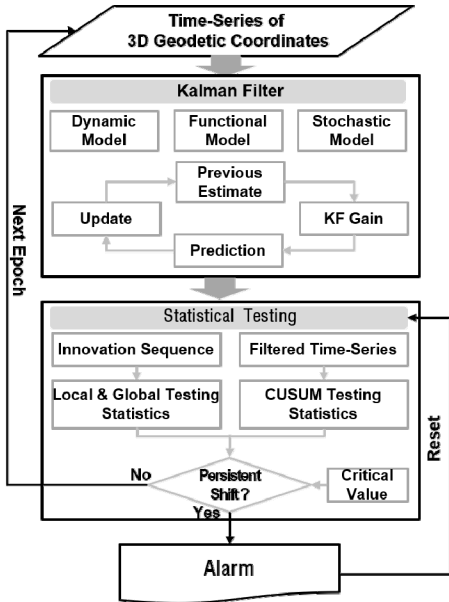


Fig. 1. A procedure of online persistent shift detections from geodetic coordinate time-series

Fig. 1의 절차는 [5]와 같은 GNSS 상시관측 자료 자동화 처리와 함께 구현될 때 지진 발생에 따른 좌표시계열 편이를 신속하게 검출할 수 있을 것이다. 즉, 상시관측소 관측자료와 IGS(International GNSS Services) 초신속(ultra-rapid) 혹은 신속(rapid) 해석결과물에 의한 주기적 처리로부터 얻어지는 좌표에 의해 시계열을 갱신한 후 칼만 필터링에 기반한 편이검출 절차를 적용하는 것이다. 다만, GNSS 자료처리 불량에 따라 시계열 상에

돌출오차 등이 나타날 수 있으므로 상시관측소 성과 편이는 지진 발생 여부를 같이 고려해 판단해야 할 것이다.

2.2 칼만 필터링

칼만필터는 현재 상태벡터에 동적모형을 적용해 시간에 따른 상태벡터를 예측한 후 측정치와 함수모형에 의한 ‘갱신(update)’으로 최적의 파라미터를 추정하는 기법이다[7,8]. 본 연구에서는 ‘위치-속도-가속도(PVA) 동적모형’을 적용해 Eq. (1)과 같이 수평 좌표에 대해 6개 성분으로 상태벡터를 모형화하였다. 이때, PCV 모형의 전이행렬(transitional matrix)와 분산-공분산행렬은 [7]를 참조해 구성하였다.

$$\mathbf{x} = [\mathbf{P}_n \ \mathbf{V}_n \ \mathbf{A}_n \ \mathbf{P}_e \ \mathbf{V}_e \ \mathbf{A}_e]^T \quad (1)$$

Where, \mathbf{n} and \mathbf{e} denote north and east, and $\mathbf{P}, \mathbf{V}, \mathbf{A}$ are position, velocity, and acceleration of the coordinate time-series, respectively.

칼만필터는 시계열 잡음 축소와 Eq. (2)와 같이 동적모형에 의한 예측치와 측정치 차이인 이노베이션을 생성하기 위해 사용하였다. 따라서, 필터링으로 얻은 재추정 좌표 시계열과 이노베이션 시계열은 각각 편이검출 신호가 된다. 특히, 통계적으로 평균이 ‘0’인 백색가우시안(white Gaussian) 분포를 따르는 이노베이션은 수평 좌표 성분의 편이 확인을 위한 검정통계량(test statistics) 계산에 사용되었다.

$$\tilde{\mathbf{y}}_k = \mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k(-) \quad (2)$$

Where, $\tilde{\mathbf{y}}_k$ is the innovation vector, \mathbf{Z}_k is the measurement vector, \mathbf{H}_k is the design matrix, and $\hat{\mathbf{x}}_k(-)$ is the predicted state vector.

2.3 편이검출

2.3.1 이노베이션에 대한 통계검정

좌표 시계열 편이 발생 여부에 대한 이노베이션 검사는 개별 에포크(epoch)에 대한 지역검정과 이동창(moving window)의 범위에 대한 광역검정으로 구분할 수 있다[9]. 지역검정은 특정 에포크 k 에서 편이 발생 여부를 점검하기 위한 것으로 귀무가설(H_0)과 대립가설(H_a)을 Eq. (3)과 같고 검정통계량(T^h)은 Eq. (4)에 의해 계산한다. 이때 Eq. (5)와 같이 검정통계량이 유의수준(α)과 자유도(n)에 대한 χ^2 분포 임계값을 초과할 때 귀무가설이 기각된다[9].

$$\begin{cases} H_0 : \tilde{y}_k \sim N(0, P_{\tilde{y},k}) \\ H_a : \tilde{y}_k \sim N(\mu_{\tilde{y},k}, P_{\tilde{y},k}) \end{cases} \quad (3)$$

Where N denotes the standard normal distribution, and $P_{\tilde{y},k}$ is the variance-covariance matrix of the innovation.

$$T^k = \tilde{y}_k^T P_{\tilde{y},k}^{-1} \tilde{y}_k \quad (4)$$

$$T^k > \chi_a^2(n, 0) \quad (5)$$

지역검정은 좌표 시계열의 편이 발생 시점의 증가하는 이노베이션에 종속한다. 즉, 편이 발생 순간을 찾지 못할 때는 이후 다시 발견할 가능성이 희박하다는 것이다. 이와 같은 문제 해결을 위해 이동창에 의해 검정 범위($l \sim k$)를 설정해 Eq. (6)과 같이 검정통계량을 계산한 후 Eq. (7)에 의해 임계값을 초과 여부를 판단하는 광역검정 기법을 적용할 수 있다. 이 방법은 이노베이션 누적으로 검정통계량을 계산함으로써 편이 발생의 순간 검출하지 못하는 경우도 이후 검출 기회를 가질 수 있다. 단, 시간 경과에 따라 편이에 의한 이노베이션 증분이 감소해 검출 가능성은 그만큼 낮아질 수 있음에 유의해야 한다.

$$T_i^k = \sum_{i=1}^k \tilde{y}_i^T P_{\tilde{y},i}^{-1} \tilde{y}_i \quad (6)$$

$$T_i^k > \chi^2 \left(\sum_{i=1}^k n_i, 0 \right) \quad (7)$$

Where n_i is the degree of freedom at i epoch.

2.3.2 필터링 시계열에 대한 통계검정

본 연구에서 칼만필터 입력 데이터(측정값)는 지각변동 성분을 제거한 수평 좌표 시계열이다. 여기서, 필터 통과 좌표 시계열을 Eq. (8)과 같이 가우시안 정규분포를 따르는 x_k 라 한다면, 누적 우도 비율 검정기법인 CUSUM을 적용할 수 있다.

$$x_k = \begin{cases} \mu_0 + \epsilon & \text{if } T \leq u - 1 \\ \mu_1 + \epsilon & \text{if } T > u \end{cases} \quad (8)$$

Where μ_0 and μ_1 are the mean value before and after shifting, ϵ is the noise, T is the sample size, and u is an epoch that the signal is shifted.

편이검출을 위한 귀무대립 가설은 Eq. (9)와 같이 설정할 수 있으며, 여기서 μ_0 와 μ_1 은 u 시점 전후 시계열 평균이다. 각 가설에 대한 우도를 확률밀도함수에 의해 $f_0(x_k)$ 와 $f_a(x_k)$ 로 계산한 후 그 비율에 로그함수를 취한 것을 z_n 할 때 이 값을 누적한 것을 CUSUM(C_k)이라

한다[9,10]. CUSUM 증분에 해당하는 z_n 값 특징은 귀무가설이 참이면 음수, 반면 대립가설이 참일 때는 양수를 갖는다는 것이다. 따라서, 편이 발생으로 시계열 평균이 달라질 때 z_n 부호가 바뀌어 누적되어 시간에 따라 한 방향으로 증가해 임계값을 초과할 때 귀무가설이 기각된다.

$$\begin{cases} H_0 : \mu = \mu_0, \text{ if } T \geq u \\ H_a : \mu = \mu_1, \text{ if } T \geq u \end{cases} \quad (9)$$

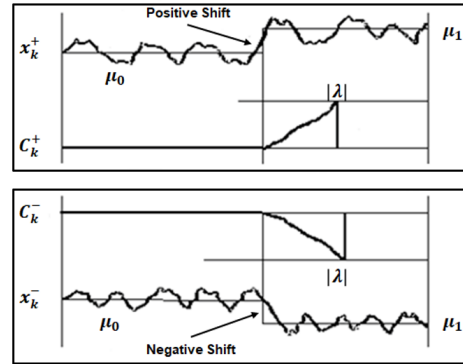


Fig. 2. A typical behavior of CUSUM testing statistics[10,11]

시계열 평균의 편이(잔류편의)는 양수와 음수 방향 모두 발생할 수 있으므로 양방향에 대한 CUSUM 검사가 필요하다. 이때, 시계열 편이가 발생하지 않은 구간에서 CUSUM 값의 무한 증가를 방지하기 위해 Eq. (10)을 사용할 수 있다[11]. Fig. 2는 시계열 편이 발생 전후 CUSUM 값을 도시한 것이다. 귀무가설 만족 시는 '0'을 유지하다가, 기각되는 순간부터 증가하며, 임계값($|\lambda|$)를 초과해 잔류편의가 검출된다[11]. 따라서, 임계값 설정이 중요하며, 이 값이 너무 작을 때는 가설검정의 제2종 오류 발생이 빈번해지며, 클 때는 제1종 오류가 발생할 수 있으나 편이검출 신뢰도가 높아진다. 이노베이션에 대한 통계검정과 비교할 때, CUSUM은 편이 발생 순간에 검출되지 않더라도 시간 흐름에 따라 검출 확률이 높아지는 것이 특징이며, 시계열 평균 변화를 최소 지연으로 검출할 수 있는 것으로 알려져 있다[9,10].

$$\begin{cases} C_n^+ = \max(0, C_{n-1}^+ + z_n) \\ C_n^- = \min(0, C_{n-1}^- + z_n) \end{cases}, C_0^+ = C_0^- = 0 \quad (10)$$

Where C_i^+ and C_i^- are positive and negative CUSUM, respectively.

3. 수치실험 및 결과분석

3.1 개요

칼만필터에 기반 GNSS 상시관측소 좌표 시계열 편의 검출 기법 3가지를 과학기술용 계산 소프트웨어 매트랩으로 구현하였다. 실제 적용을 위해서는 GNSS 자동처리 시스템과 연계 구축이 필요하지만, 여기서는 편의검출 기법 성능 비교를 목적으로 후처리 시계열 파일로부터 일간 단위로 좌표를 차례로 입력하도록 하였다. 본 연구의 수치실험에 사용한 시계열은 Fig. 3에 도시한 것과 같이 국토지리정보원 상시관측소 14점의 2010~2011년 관측데이터를 Bernese 소프트웨어에 의해 처리한 결과이었다. 이는 IGS 관측소 10점을 기준으로 BPE(Bernese Processing Engine)의 'RN2SNX.PCF' 절차로 처리해 얻은 총 731일 동안의 일간해이다[12].

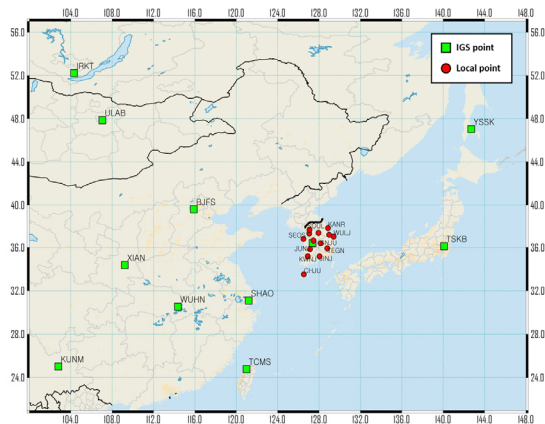


Fig. 3. Distribution of CORSs included in data processing for generation of coordinate time-series

2000년부터 2016년까지 장기 GNSS 관측데이터 처리로부터 산정한 관측점의 속도벡터를 적용해 좌표시계열의 선형지각변동 성분을 Fig. 4와 같이 제거하였다 [13]. 이는 필터링 시계열이 실용적 측면에서 Eq. (8)의 가정을 만족하도록 해 CUSUM 검정을 적용하기 위해서였다. 시계열은 2011년 동일본 대지진 발생 시점을 포함하고 있으며, Fig. 4는 진앙과 상대 위치에 따라 잔류편의 크기가 다른 것을 보여준다. 이들 좌표 시계열은 동일본 대지진을 포함 2년을 나타내 그 편의를 쉽게 확인할 수 있다. 반면, 편의 판단 시점을 지진 발생 직후라 가정할 때는 충분치 않은 시계열 길이로 인해 검출이 쉽지 않

을 것이다. 따라서, 실험에서는 지진이 유발한 지각변동이 상시관측소 성과의 갱신이 필요한 만큼인지를 통계적으로 판단할 수 있는 기법을 비교하고자 하였다.

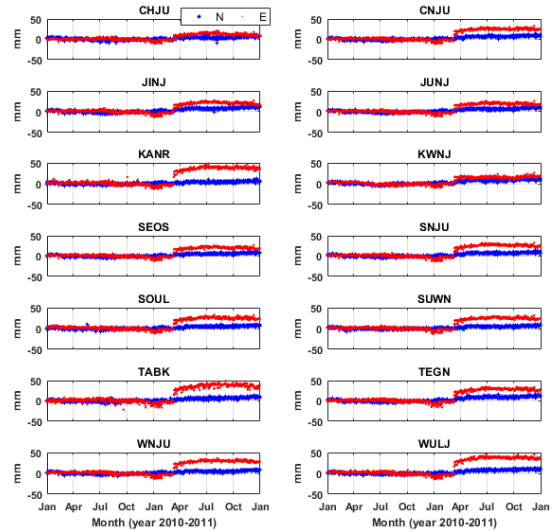


Fig. 4. Time-series of horizontal coordinates in this study

3.2 칼만필터 이노베이션에 대한 통계검정

Fig. 4의 14개 관측소 수평 방향 좌표 시계열에 대한 칼만 필터링 결과 중에서 전형적인 예로 KANR(강릉)의 것을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 1행 그래프는 필터링 전후 시계열 그리고 2행은 상태벡터 요소의 표준편차를 나타낸 것으로, 이를 통해 시계열 잡음의 축소와 필터의 수렴성을 확인할 수 있다. 특히, 동서 시계열의 2011년 3월 부근 편의는 동일본 대지진에 따른 지각변동 영향이다. 반면, Fig. 5의 3·4행 그래프는 이노베이션 시계열과 그 히스토그램으로 남북과 동서 방향에서 각각 다른 경향을 보인다. 즉, 남북방향은 전형적인 백색 잡음의 특징을 보이지만, 동서 방향의 그것은 그래프에서 타원으로 표시한 구간에 이노베이션이 많이 증가해 히스토그램의 정규분포 표본 범위를 초과하는 크기를 보인다. 동서 방향 좌표 시계열을 고려할 때 첫 번째 타원은 GNSS 관측데이터 불량 등으로 인한 처리결과의 돌출오차 그리고 두 번째는 지진에 의한 동시지각 변위에 따른 것으로 볼 수 있을 것이다.

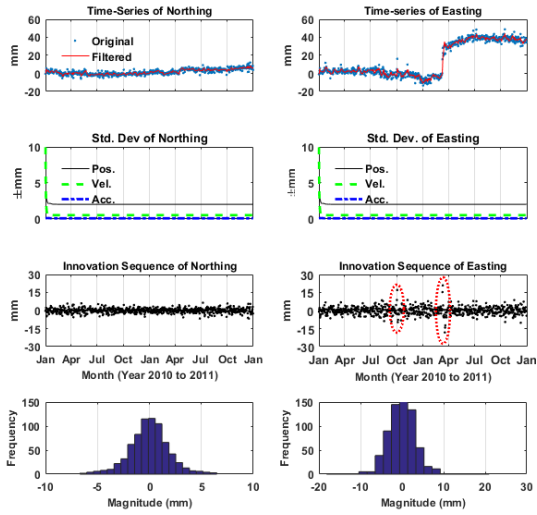


Fig. 5. A typical example of Kalman filtering at KANR

칼만필터 이노베이션에 대한 통계검정은 Eq (4)의 가중노름(weighted norm)에 의하며, 이 기법은 Fig. 5에서 타원으로 표시한 것과 같이 백색 잡음과 다른 통계 특성을 갖는 이노베이션을 찾는 것이다. Fig. 6은 지역검정을 통한 편의검출을 위해 검정통계량에 해당하는 이노베이션의 가중노름과 유의수준 5%에 대한 χ^2 -분포의 임계값을 횡방향 실선으로 나타낸 것으로, 검정통계량이 실선을 초과할 때 Eq. (3)의 귀무가설이 기각되어 편의를 검출할 수 있다. Fig. 6은 KWNJ(광주), CHJU(제주), JUNJ(전주), JINJ(진주)를 제외한 11개소 관측소에서 동일본 대지진에 따른 시계열 편의가 검출되었음을 보여준다. 이들 관측소는 진앙으로부터 상대적으로 멀어 지각변동 영향이 적으나, Fig. 4에서 편의를 관찰하여 여기서 미검출은 가설검증의 '제1종 오류'이다. 반면, KANR, CHJU와 TABK(태백)는 지진 이전에도 검정통계량이 임계범위를 초과하는 것을 볼 수 있다. 이들은 GNSS 관측 불량 등으로 데이터처리 결과의 정밀도 저하에 따른 일시적 편의로, 지진에 따른 잔류편의 검출 측면에서는 '제1종 오류'에 해당한다.

Fig. 7은 이노베이션에 대한 광역검정 결과로, 이동창 범위 3일 설정으로 Eq. (6)에 의해 가중노름 합과 유의수준 5%에 대한 임계값을 나타낸다. 지역검정과 상이하게 JINJ와 JUNJ에서 지진에 의한 편의가 추가로 검출됐지만, 같은 관측소에서 제2종 오류가 발생하였다. Fig. 6과 7을 비교할 때, 후자가 전자보다 큰 검정통계량을 갖는 값의 빈도가 높아 그 신뢰성을 확인할 수 있다.

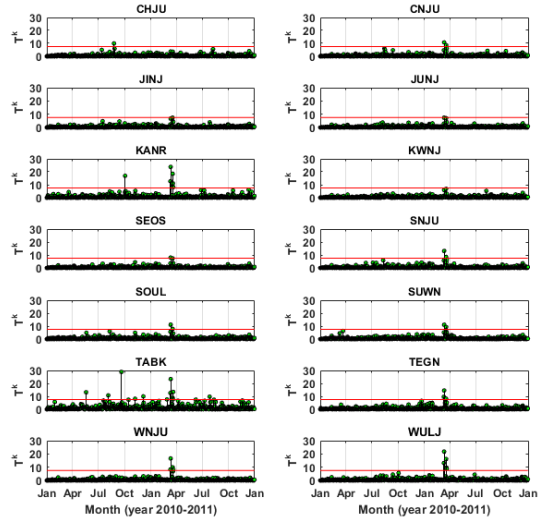


Fig. 6. Weighted norm of the filter innovations with critical value for the local tests

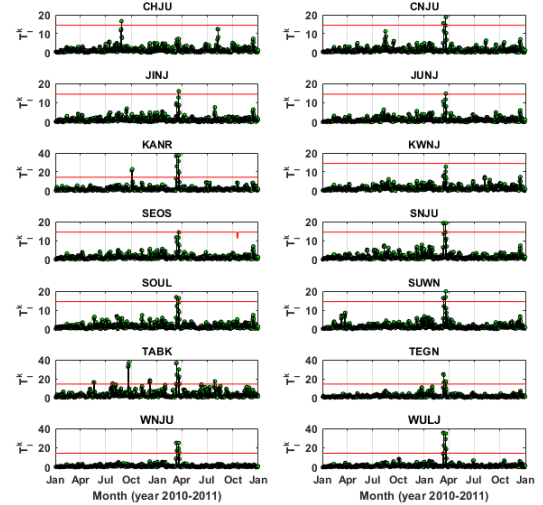


Fig. 7. Sum of weighted norm of the filter innovations with critical value for the global tests

Table 1은 지역-광역검정을 적용한 시계열 편의검출 결과를 요약한 것으로, 광역검정의 제2종 오류 발생 빈도가 낮아 지역검정보다 2개소 많은 곳에서 편의를 검출하였다. 표에 따르면 광역검정의 편의검출 시점 부근에서 임계값 초과 검정통계량 발생 빈도가 지역검정보다 1~3회 높아 그 신뢰성을 확인할 수 있다. 지진 편의검출은 대부분 관측소에서 발생 1일 이내 이루어졌으나, 광역검정이 추가 검출한 JINJ와 JUNJ는 3일의 지연이 있었다.

그러나, 이러한 자연에도 광역검정이 지역검정의 제2종 오류를 줄여 그 한계를 보완할 수 있음을 알 수 있다. Table 1의 '부정확 검출(incorrect)'은 지진에 따른 편의를 검출을 목적으로 했을 때의 것으로, GNSS 데이터처리의 '돌출오차' 검출 측면으로는 적절한 작동한 것이다. Table 1에서 주목해야 할 것은 광역검정에 의해서는 Fig. 4에서 확인 가능한 CHJU와 KWNJ(광주)의 지진에 따른 미소한 편의를 검출할 수 없었다는 점이다.

Table 1. Results of the global and the local hypothesis tests about the innovation sequence (unit: the number of epochs)

STN ID	Local Tests			Global Tests		
	Incorrect	Correct	Delayed	Incorrect	Correct	Delayed
CHJU	1	0	N/A	1	0	N/A
CNJU	0	2	1	0	3	1
JINJ	0	0	N/A	0	1	3
JUNJ	0	0	N/A	0	1	3
KANR	1	5	0	3	7	1
KWNJ	0	0	N/A	0	0	N/A
SEOS	0	1	1	0	1	1
SNJU	0	2	1	0	3	1
SOUL	0	2	1	0	4	1
SUNW	0	2	1	0	4	1
TABK	6	5	0	10	8	1
TEGN	0	3	0	0	5	1
WNJU	0	4	0	0	6	1
WULJ	0	5	0	0	7	1

3.3 필터링 시계열에 대한 CUSUM 검정

CUSUM 계산에는 대립가설 평균(μ_1)에 해당하는 최소편의를 설정해야 한다[9,10]. 여기서는 국토지리정보원 위성기준점 수평방향 정확도 5mm+ 0.5PPM과 기선장 약 40km를 반영해 18mm를 적용하였다. Fig. 8은 CUSUM 검정의 메커니즘을 도시한 것으로, 2,3행 그래프는 각 좌표 성분의 양수음수 방향 CUSUM 값을 나타낸 것이다. 그림에서 동서 좌표 시계열에 대한 CUSUM 값의 변화를 나타낸 2행 2열 그래프는 2011년 3월 11일 동일본 대지진 발생 시기부터 그 값이 증가를 지속한다. CUSUM이 임계값을 초과할 때 편의를 검출할 수 있으므로, 이를 적절하게 설정하는 것이 중요하다. 만약, 임계값을 크게 설정할 때는 통계검정 제2종 오류로 검출이 지연되나, 그 신뢰성을 높일 수 있다. 이에 반해, 너무 낮게 설정할 경우는 제1종 오류 발생 확률이 높아져 부정확한 알람이 빈번해질 수 있다. 본 실험에서는 지진에 따른 편의검출의 신뢰성을 중요하게 고려하고, 14개소 상시관측소 시계열과 CUSUM 값 분석과 조정으로 '3'을 임계값으

로 설정하였다. 지진에 따른 잔류편의와 별도로, Fig. 8의 동서 좌표의 음수 방향 CUSUM에서 2011년 1월 부근에 편의가 검출된다. 이는 1행 2열 그래프의 타원으로 표시된 부분에 관찰되는 일정 기간 발생한 편의에 의한 것이다. 이와 같은 현상은 GNSS 상대측위 기법을 적용한 관측데이터 처리의 측지계 정의에 사용하는 IGS 등록 관측소와 같은 기지점 구성이 달라질 때 발생할 수 있다.

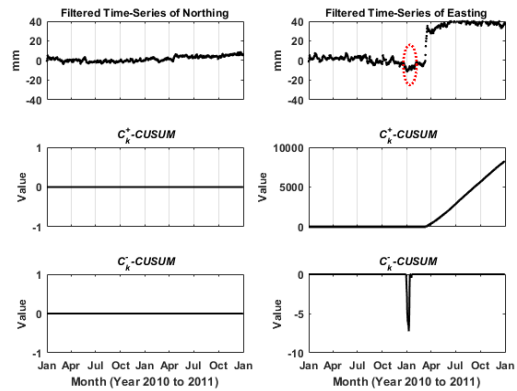


Fig. 8. Filtered coordinates time-series and CUSUM values of KANR station

동일본 대지진 발생일 전후 각각 3일 (총 1주일) 동안 동서 방향 필터링 시계열과 양수 방향 CUSUM을 Fig. 9에 나타내었으며, 이를 통해 이 방식에 의한 잔류검출의 성능을 확인할 수 있다. 예를 들어, 편의 발생 여부를 판단하는 시점을 지진 직후 3일 13일이라 가정한다면, GNSS 상시관측소 자동 데이터처리 시스템으로 형성한

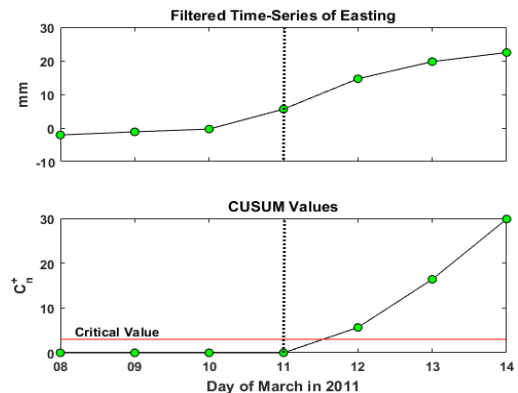


Fig. 9. Magnified the time-series and CUSUM values of KANR for seven days before and after the earthquake event (i.e., 11th March, 2011)

시계열 데이터는 12일까지일 것이다. 따라서, 이 시계열 만에 의해서 지각변동에 따른 편이 발생 여부와 이에 따른 위성기준점 성과갱신 등을 결정하기는 쉽지 않을 것이다. 반면, 그림에서 CUSUM을 같이 고려할 때는 12일부터 임계값이 초과로 목표 정확도를 벗어나는 편의를 즉시 검출할 수 있을 것이다. 이 검정 결과의 신뢰성을 높이고자 할 때는 임계값을 상향할 수 있을 것이나, 이때는 추가적 GNSS 처리를 위해 지연을 피할 수 없다.

광역검정으로 지진 유발 편의를 검출할 수 없었던 CHJU에 대한 CUSUM 검사 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 4개 그래프 중 동서 방향 양수 검정통계량이 지진 시점부터 일정한 기간이 지난 후 많이 증가한다. 이것은 상대적으로 작은 편의로 인해 Eq. (9)의 음수 증분(z_n)이 차츰 작아져 양수로 바뀌는 시간이 필요했기 때문일 것이다. CHJU 편이검출에 상당한 지연이 있었지만, 광역통계검정으로 불가능 했던 것을 검출한 것이 중요하며, 이는 CUSUM 검정이 잔류편의 발생 즉시 검출할 수 없는 경우에도 z_n 가 누적적으로 발견할 수 있음을 의미한다.

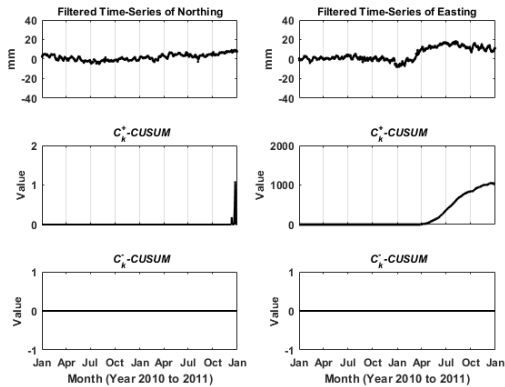


Fig. 10. Filtered coordinates time-series and CUSUM values at CHJU

Fig. 11은 실험에서 고려한 모든 상시관측소의 동일본 대지진 이후 7일(CHJU 23일) 동안 동서 좌표에 CUSUM 변화를 나타낸 것이며, Table 2는 CUSUM 검정 결과를 요약한 것이다. 이노베이션에 대한 검정결과와 비교할 때 주목할 점은 모든 관측소에서 지진으로 인한 편의를 검출할 수 있었다는 것과 11개소 관측소의 편이 검출에 2일 이상 지연이 발생했다는 것이다. 표에서 부정확한 검출로 나타낸 것은 지진과 무관한 것들로 GNSS 관측데이터 혹은 처리결과의 불량에 따른 것이다. 이들 돌출오차 검출 결과를 살펴보면 이노베이션 검사는 특정

에포크에 발생한 돌출오차를 그리고 CUSUM은 일정 기간 발생한 편이 판정에 효과적임을 알 수 있다.

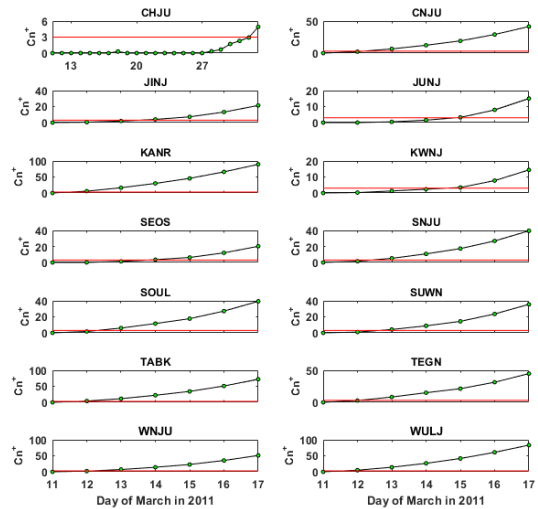


Fig. 11. Positive CUSUM values of the easting component for seven days after the earthquake attack

Table 2. Summary of CUSUM tests about easting component of the filtered time-series

STN ID	Incorrect	Correct	Delayed epochs
CHJU	No	Yes	22
CNJU	No	Yes	2
JINJ	No	Yes	3
JUNJ	No	Yes	4
KANR	Yes	Yes	1
KWNJ	No	Yes	4
SEOS	No	Yes	3
SNJU	No	Yes	2
SOUL	No	Yes	2
SUWN	No	Yes	2
TABK	Yes	Yes	1
TEGN	Yes	Yes	2
WNJU	No	Yes	2
WULJ	Yes	Yes	1

4. 결론

본 논문에서는 지진 등에 의해 GNSS 상시관측소 성과에 영향을 미칠 정도의 지각변동이 발생했을 때 자동

데이터처리 시스템과 연계해 신속하게 검출할 수 있는 기법들을 연구하였다. 이를 통해 칼만필터에 기반한 이노베이션 통계검정과 필터링 시계열에 대한 CUSUM 검정으로 이루어진 일련의 절차를 제안하였다. 편의검출 기법의 특징을 고찰하기 위해 국토지리정보원 14개 상시관측소 2010년~2011년 수평 좌표 시계열에 대해 수치시험을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 지역·광역 통계검정 결과를 비교했을 때 전자가 할 수 없었던 지진에 의해 미소 지각변동이 발생한 관측소의 시계열 편의를 후자에 의해 검출할 수 있었으며, 이때 높은 임계값 초과 검정통계량 크기와 빈도로 그 신뢰성을 확인할 수 있었다. 그러나, 광역검정을 수행한 경우도 2개 관측소(14.2%)의 지진에 따른 잔류편의는 검출할 수 없었다.

둘째, CUSUM 검정은 지진에 의한 지각변동이 제한적인 관측소 CHJU를 포함해 모든 관측소의 지진 잔류편의를 검출할 수 있었으나, 이노베이션 통계검정에 비해 긴 지연이 발생하였다. 이와 같은 지진 잔류편의 확인은 우리나라 측지기준프레임의 핵심 인프라인 위성기준점의 성과갱신과 관련해 매우 중요하기 때문에 충분한 신뢰성 확보를 위해 임계값을 다소 크게 설정했기 때문이다.

셋째, 이노베이션 통계검정과 좌표 시계열 CUSUM 검사 결과를 비교할 때, 전자는 특정 시점 발생 돌출오차에, 후자는 일정 기간 혹은 영구적으로 잔류하는 편의에 민감하였다. 따라서, 향후 GNSS 상시관측소 자동 데이터처리 시스템과 본 논문에서 제시한 절차를 이용해 좌표 시계열을 모니터링 체계를 구축하고 할 때는 관측데이터 불량 등에 따른 돌출 오차 검출에는 이노베이션에 대한 광역검정, 지진에 따른 잔류편의 검출을 위해서는 CUSUM 기법을 동시에 적용하는 것이 타당할 것으로 사료된다.

마지막으로, 본 논문에서 수치시험은 하나의 지진 사례에 대해 GNSS 위성기준점 14개소만을 적용한 것으로, 향후 실용화를 위해서는 국내외 더 다양한 지진과 관측소를 대상으로 하는 시계열 분석에 의한 CUSUM 임계값 설정과 성능평가 그리고 GNSS 자동처리와 연계한 시스템 구축 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] S.K. Kim, T.S. Bae, "Analysis of crustal deformation on the Korea Peninsula after the 2011 Tohoku earthquake", *Journal of the Korean Society of Surveying*, Vol. 30, No. 1, pp.87-96, Feb. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.1.087>
- [2] T.J. Jeong, "Analysis of crustal deformation using GNSS measurements after the Tohoku earthquake", Ph.D. dissertation, Sungkyunkwan University, Korea, 127pp, 2014.
- [3] D.S. Kim, "Geodetic studies of post-seismic crustal deformations occurring in the Southern Korean Peninsula due to the Tohoku-oki earthquake". Ph.D. dissertation, Inha University, Korea, 114pp., 2015.
- [4] M.G. Kim, J.K. Park, "Monitoring the crustal movement before and after the earthquake by precise point positioning - focused on 2011 Tohoku Earthquake", *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 5, pp.477-484, Oct. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7848/ksgpc.2012.30.5.477>
- [5] H. Lee, "Experimental implementation of continuous GPS data processing procedure for high-precision of medium-range kinematic positioning application", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 13, No. 3, pp.31-40, Mar. 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.3.31>
- [6] National Geographical Information Institute, "Development of real-time baseline analysis techniques for GNSS continuously operating reference stations", Final Report, 158pp., 2017.
- [7] R. G. Brown, P.Y.C. Hwang, "Introduction to random signals and applied Kalman filtering", 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, pp.190-449, 1997.
- [8] J.A. Farrel, M. Barth, "The global positioning system and inertial navigation", McGraw-Hill, New York, USA, pp.102-113, 1998.
- [9] P.B. Obser, "Integrity monitoring", Information Paper, Delft University of Technology, Netherlands, pp.8-11, 2001.
- [10] S.P. Mertikas, "Automatic and online detection of small but persistent shifts in GPS station coordinates by statistical process control", *GPS Solutions*, Vol. 5, No. 1, pp.39-50, Jul. 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00012875>
- [11] H. Lee, J. Wang, C. Rizos, "Effective cycle slip detection and identification for high precision GPS/INS integration systems", *Journal of Navigation*, Vol. 56, No. 3, pp.475-486, Aug. 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463303002443>
- [12] R. Dach, U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl, "Bernese GPS software version 5.0", Astronomical Institute, University of Bern, Switzerland, pp.437-446, 2007.
- [13] National Geographical Information Institute, "A study on strategy development to adopt international terrestrial reference frame in Korea", Final Report, pp.85-86, 2017.

[1] S.K. Kim, T.S. Bae, "Analysis of crustal deformation on

이 흥 규(Hungkyu Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 동아대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 10월 : 뉴사우스웨일즈 대학교(호주) 측량·공간정보 시스템 공학부 (공학박사)
- 2004년 11월 ~ 2005년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 토목환경화공융합공학부 교수

<관심분야>

GNSS 측위/항법, 측지측량, 공간정보 수치모델링