J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(8), 549-557(2019)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.8.549
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

위성항법 신호를 이용한 지진에 의한 전리층 교란 실시간 검출 기법 연구

송준솔[1], 강선호[2], 한덕화[3], 김부겸[4] 기창돈[5]

Real-Time Detection of Seismic Ionospheric Disturbance Using Global Navigation Satellite System Signal

Junesol Song[1], Seon-Ho Kang[2], Deok-Hwa Han[3], Bu-Gyeom Kim[4] and Changdon Kee[5]
Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), France[1]
School of Mechanical and Aerospace Engineering and SNU-IAMD, Seoul National University[2,3,4,5]

ABSTRACT

In this paper, we focus on the real-time detection method of a seismic ionospheric disturbance using Global Navigation Satellite System (GNSS) signal. First, the monitor for the detection of the seismic ionospheric disturbance is studied based on the estimated ionospheric delay using the GNSS signals. And then, the threshold for the automatic detection is computed. Moreover, to discriminate the seismic ionospheric disturbance against the other ionospheric anomalies due to other error sources such as cycle slips, the signatures of the ionospheric perturbation caused by the seismic wave is investigated. Based on the observation, the detection strategy is proposed. Using GPS observations collected from the 47 permanent stations in South Korea and Japan, the proposed real-time detection method is evaluated.

초 록

본 연구에서는 위성항법 신호를 활용하여 전리층 교란 관측을 통한 실시간 지진 발생 검출에 대한 연구를 수행한다. 위성항법 신호를 활용하여 추정한 전리층 지연을 이용하여 전리층 교란 모니터를 선정하고, 실시간 검출을 위한 교란 판단 기준값(threshold)을 계산하는 방법을 소개한다. 또한, cycle slip 등 다른 오차 요인에 의하여 발생하는 전리층 변화와 지진에 의해 발생하는 전리층 변화를 구분하기 위하여, 지진에 의한 파동 특성을 이용하여 지진에 의한 전리층 교란 검출 판단 기준을 제시한다. 한국 및 일본에 설치되어 있는 47개의 기준국으로부터 수집한 측정치를 활용하여 제안된 알고리즘의 성능 검증을 수행한다.

Key Words : Global Navigation Satellite System(위성항법시스템), Ionospheric Disturbance(전리층 교란), Seismic Wave(지진파), Ionosheric Delay(전리층 지연)

† Received : February 12, 2019 Revised : July 19, 2019 Accepted : July 27, 2019
[1] Postdoctoral Researcher, [2] Graduate Student, [3] Postdoctoral Researcher, [4] Graduate Student, [5] Professor
[5] Corresponding author, E-mail : kee@snu.ac.kr
ⓒ 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Ⅰ. 서 론

위성항법 시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)은 지구를 중심으로 공전하는 위성으로부터 항법 신호를 수신하여 전 지구상에서 고정확도의 위치 계산이 가능하도록 하는 시스템이다. 미국의 시스템인 Global Positioning System (GPS)의 경우 Code Division Multiple Access (CDMA) 방식으로 변조된 항법 신호를 L1, L2 주파수 대역으로 송신한다. 고도 약 20,000km에 위치한 위성으로부터 방송된 신호는 지상으로 도달하는 과정에서 전리층, 대류층 등을 지나면서 신호에 지연이 발생하며, 이는 지상 사용자의 위치 정확도를 저하시키는 원인이 된다. 대류층 지연의 경우에는 높은 정확도를 갖는 비교적 간단한 대류층 모델을 활용하여 해당 오차의 보정이 가능하다. 하지만 전리층의 경우에는 단순한 모델로는 높은 정확도로 해당 오차의 제거가 불가능하기 때문에, 전리층 지연 추정 및 제거를 위한 연구가 활발히 이루어져왔다. 그 결과, 미국 본토, 유럽 지역과 같은 넓은 영역에 대해 수 m 수준의 위치 정확도를 제공하는 위성항법보강 시스템이 개발된 바 있다. 이와 같은, 높은 정확도를 갖는 전리층 지연 추정 기법을 바탕으로 위성항법신호를 활용하여 전리층 상태를 모니터링하는 연구가 수행되었다. 최근 들어서는, 지구에서 발생하는 지진·화산·쓰나미 등의 자연재해 및 지상에서 발생하는 인위적인 폭발 등을 위성항법신호 기반으로 추정된 전리층 지연을 통하여 감시 및 검출하는 응용연구도 활발히 이루어지고 있다[1-6]. 지상에서 자연적 또는 인위적인 원인으로 큰 충격이 발생하게 되면, 해당 충격원에 의해 지구 대기층에 교란이 발생한다. 해당 교란은 대류층을 지나 전리층에까지 도달 가능하며[7], 전리층에 분포되어 있는 자유전자 밀도에 변화를 발생시켜[8] 해당 영향이 전리층 지연 교란으로 관측이 가능한 것이다. 이와 같은 감시 방법은, 지상에 이미 구축되어 있는 다수의 위성항법신호 기준국을 활용하기 때문에 새로운 장비의 설치가 필요하지 않으며, 기준국-위성 간 시선벡터가 통과하는 영역에 대한 감시가 가능하기 때문에, 경우에 따라서는 쓰나미 예보도 가능하다[2]. 보통 전리층 수직 지연 및 경사지연 추정치를 활용하여 그 절대값 또는 시간 변화율, 가속도 등의 정보가 전리층 교란 감시에 활용되고 있다. Jin은 6차 butter-worth filter를 활용하여 전리층 수직 지연 절대값의 nominal 경향성을 제거하여 전리층 교란 감시에 활용하였다[4]. Komjathy는 동일한 filter를 전리층 경사 지연에 적용하여 전리층 교란을 감시하였으며[2], Park은 전리층 경사 지연의 3차 미분값을 활용하여 전리층 교란을 관찰하고 그 전파 속도를 추정하였다[5]. 한편, 기존의 연구는 다양한 감시값을 활용하여 전리층 교란 관찰 및 분석에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 그러나 실시간 전리층 지연 교란 감시를 위해서는 감시값에 대한 전리층 교란 판단 기준값이 설정되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위하여 반송파 위상 기반의 전리층 지연 교란 감시값을 선정하였다. 지상의 충격파에 대한 전리층 교란과 cycle slip 등과 같은 다른 종류의 이상 측정치와 구분하기 위해, 지진에 의한 전리층 파동 특성을 활용하여 지진에 의한 전리층 교란 판단 기법을 제안하였다. 또한, 제안된 전리층 교란 검출 감시값의 통계 분석을 통하여 검출 판단 기준값을 계산하였다. 선정된 전리층 교란 감시값과 그에 대한 교란 판단 기준값의 성능 평가를 위하여, 2011년 3월 동일본 대지진 발생 당시 일본 및 한국 기준국에서 습득된 위성항법 신호를 활용하였다. 검출 결과로부터 제안된 전리층 교란 검출 알고리즘의 성능을 분석하였다.

Ⅱ. 위성항법신호 기반 전리층 교란 검출 알고리즘 설계 및 성능 검증

2.1 위성항법신호 전리층 교란 감시값 선정

2.1.1 측정치 전리층 조합 및 변화율

GPS 위성은 L1, L2 주파수 대역으로 항법 신호를 방송하며, 이를 통하여 사용자는 L1 및 L2 주파수의 의사거리와 반송파 위상 측정치를 얻을 수 있다. 의사거리 측정치는 보통 수 m의 정밀도를 가지고, 반송파 위상은 수 mm 수준의 정밀도를 갖는 측정치를 제공한다. 그러나 반송파 위상 측정치에는 임의의 정수에 파장이 곱해진 형태의 bias 오차가 포함되어 있기 때문에 이를 정확히 추정해 주어야만 고정확도 위치 결과를 얻을 수 있다. 지진에 의한 충격파는 전리층 지연에 작은 크기로 나타나기 때문에 의사거리 측정치의 경우에는 해당 교란에 대한 민감도가 부족하다. 따라서 전리층 교란 검출을 위해서는 반송파 위상 측정치가 주로 사용된다. L1 및 L2 주파수 반송파 위상 측정치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\phi_{L1} &= d + B - b - I_{L1} + T + N_{L1}\lambda_{L1} + \epsilon_{L1} \\ \phi_{L2} &= d + B - b - \gamma I_{L1} + T + N_{L2}\lambda_{L2} + \epsilon_{L2}\end{aligned} \tag{1}$$

위 식에서 아래첨자 L1, L2는 신호 방송 주파수이며, 변수 d, B, b, I, T, N, λ, 그리고 ε은 각각 위성-지상 사용자간 거리, 수신기 시계오차, 위성 시계오차, 전리층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 미지정수, 파장 그리고 잡음을 나타낸다. 또한, 상수 γ는 L1 및 L2 주파수 비율의 제곱이다. 식 (1)의 두 측정치의 선형조합을 다음과 같이 취하면 전리층, bias 및 잡음으로 구성된 측정치 조합을 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\phi_I \equiv \frac{\phi_{L1}-\phi_{L2}}{\gamma-1} = I_{L1} + \frac{N_{L1}\lambda_{L1}-N_{L2}\lambda_{L2}}{\gamma-1} + \frac{\epsilon_{L1}-\epsilon_{L2}}{\gamma-1} = I_{L1} + bias + \epsilon_I \quad (2)$$

식 (2)에서 미지정수의 조합으로 이루어진 bias항은 시간에 대해 일정한 값이며, L1 및 L2 반송파 위상 잡음의 선형조합은 ϵ_I로 나타내었다. 한편, 지진에 의한 전리층 교란만을 감지하기 위해서는 지진 등의 자연재해에 의한 전리층 교란이 존재하지 않는 상황에서의 전리층 지연 경향성을 제거해 주어야 한다. 태양 폭발, 전리층 폭풍 등의 현상이 없을 때 전리층 지연은 시간에 따라 천천히 변하는 특성을 가진다[9]. 그러나 전리층 경사 지연의 경우, 위성 앙각이 낮은 경우 전리층 지연 변화율이 무시 가능한 수준이 아니므로, 본 논문에는 전리층 지연의 2차 미분값을 활용하여 자연재해에 의한 전리층 지연 교란을 감시하기로 한다. 전리층 지연 2차 (가속도) 미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\phi}_I \equiv \ddot{I}_{L1} + \ddot{\epsilon}_I \quad (3)$$

전리층 조합 측정치에 시간 차분을 수행하게 되면 시간에 따라 일정한 항인 bias 항은 제거된다.

2.1.2 전리층 교란 감시값 통계 분석

자연재해에 의한 전리층 지연 교란을 실시간으로 판단하기 위해서는 검출 판단 기준값이 필요하다. 일반적으로 고장 검출에서는 감시값의 표준편차를 계산하고, 요구되는 오경보율(False Alarm)을 만족하도록 하는 문턱값(Threshold)을 설정한다. 본 논문에서는 다수의 기준국에서 24시간 동안 30초 간격으로 습득된 전리층 조합 변화율 측정치를 활용하여 전리층 교란 감시값의 표준편차를 위성 앙각에 따라 모델링 하였다. 또한, 보수적인 표준편차 계산을 위하여 전리층 지연 오차 및 그 변화율이 극심한 태양 극대기인 2001년 춘분(Day-of-Year 079)에 습득된 측정치를 활용하였다. Fig. 1은 일본 기준국 및 중국/러시아에 위치한 IGS 기준국인 USUD, AIRA, SHAO, YSSK에서 습득된 측정치를 활용하여 모델링한 감시값의 표준편차 결과이다. 식 (4)는 위성 앙각(el)에 대해 모델링 식을 나타낸 결과이다.

$$\sigma_{model}(el) = 8.3906\times10^{-6} + 1.1052\times10^{-5}e^{-el/33.44} \quad (4)$$

한편, 반송파 위상의 경우, 의사거리 측정치에 비하여 다중경로 오차가 작다고 알려져 있으나, 저 앙각에서는 그 영향을 무시할 수 없는 수준이다. 또한, 저앙각일 때에 습득된 측정치에는 다중경로 오차 외

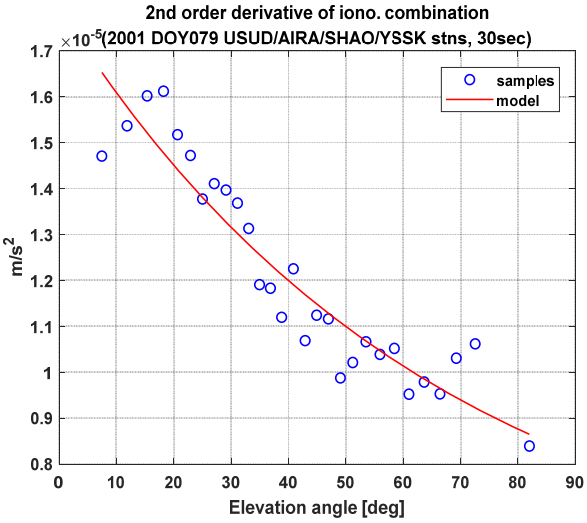


Fig. 1. Computed standard deviation of a monitoring value according to elevation angles

의 오차가 포함될 수 있기 때문에 본 논문에서는 기준국 측정치 잔여오차 분석을 통하여 위성 앙각이 15° 이상인 측정치만을 활용하여 전리층 교란을 검출하기로 한다.

2.2 전리층 교란 검출 판단 기법

2.2.1 지진에 의한 전리층 교란 특성 분석

2.1.1에서 제시된 전리층 조합의 미분값은 이미 cycle slip 등과 같은 다른 종류의 반송파 위상 고장 검출에 널리 활용되고 있다. 해당 감시값을 활용하여 자연재해에 의한 전리층 교란을 구분하여 검출하기 위해서는 해당 전리층 교란의 발생 특성을 활용해야 한다. Cycle slip과 같은 측정치 오차는 반송파 위상 내의 미지정수에 발생하는 step 오차이다. 즉, 고장이 순간적으로 발생하는 특성을 가지고 있다. 반면에 지진과 같은 자연재해에 의한 전리층 교란은, 자연재해가 한 번 발생하면 일정 기간 동안 그 영향이 지속되는 특성이 있다. 지진의 경우에는 그 지속시간이 약 15분으로 알려져 있다[5]. Fig. 2는 2011년 동일본 대지진 발생 후, 일본 및 한국 기준국에서 관측된 전리층 지연 가속도의 정규화(Normalized)된 값을 나타내며, Fig. 1에서 계산한 전리층 조합 2차 미분값의 표준편차를 활용하여 정규화 하였다.

관측 지점이 진앙지로부터 가까운 일본 기준국에서는 지진 발생 후 약 15분(30 epochs) 동안 전리층 교란 크기가 크게 관측됨을 확인할 수 있으며, 이는 기존 연구의 분석결과와 일치한다. 진앙지로부터 멀리 떨어져 있는 한국 기준국에서 관측된 전리층 교란 크기는 상대적으로 작지만, 교란이 역시 지진 발생 이후 수 분 동안 지속됨을 확인할 수 있다. 이와 같은 자연재해에 의한 교란 지속성은 cycle slip과 같

이 순간적인 step 오차로 발생하는 오차와는 명확히 구분되는 특성이므로, 이를 이용하여 자연재해에 의한 교란 검출 판단 기법을 새롭게 제안한다. 즉, 단일 epoch에 대한 검출 결과만을 활용하여 자연재해 검출 판단을 수행하는 것이 아니라, 자연재해에 의한 교란 지속시간인 15분 window 동안 감시값이 문턱값을 초과한 횟수를 확인하여 최종적으로 자연재해에 의한 교란 검출 판단을 수행하도록 하였다. 이때, 문턱값과 15분 window 동안 문턱값을 초과한 검출 기준 횟수는 오경보율을 기준으로 설계하였으며, 제안된 검출 판단 기법에 대한 새로운 오경보율 계산 방법은 아래 절에서 자세히 설명한다. 한편, 하나의 epoch에 대한 결과가 아닌 15분 window 길이의 데이터를 활용하여 검출 판단을 수행하기 때문에, 제안된 알고리즘은 단일 epoch 검출에 비하여 최대 15분의 시간지연이 발생할 수 있다. 본 연구에서는

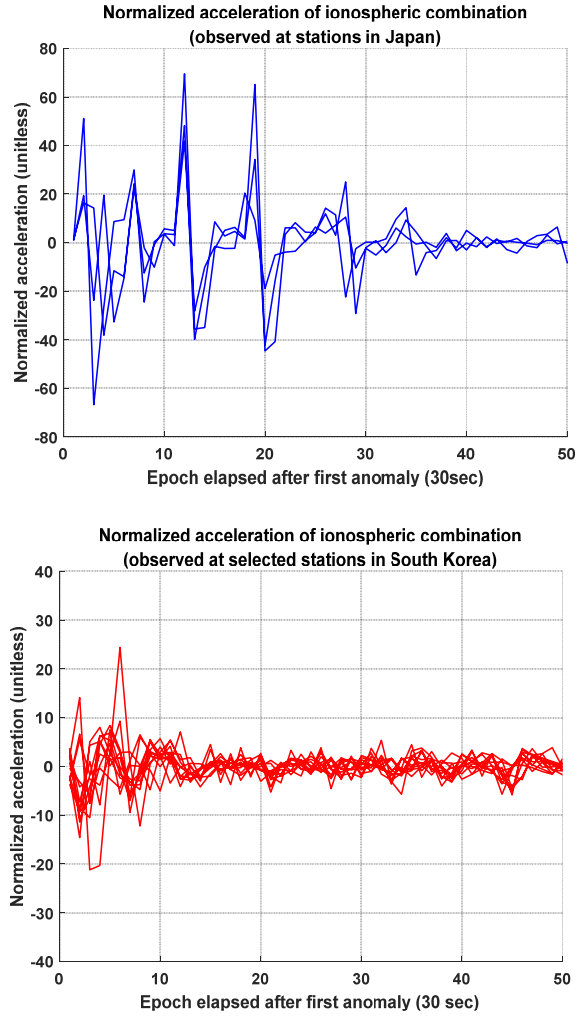


Fig. 2. Monitoring value after first anomaly detected for observations collected at reference stations in Japan (up) and South Korea (down)

수집 가능한 데이터의 한계에 의해 30초 간격의 측정치를 활용하였기 때문에 상대적으로 긴 window를 사용하였으나, 추후 1초 간격의 측정치를 활용한다면 더 짧은 window에 대한 검출판단 기법 설계가 가능하여 검출 지연 시간의 감소가 가능할 것으로 판단된다.

2.2.2 전리층 교란 검출 판단 기법 설계

앞서 관찰한 자연재해에 의한 전리층 교란 지속성을 활용하기 위하여, 15분 길이의 검출 window를 도입하기로 하였다. 즉, 15분 길이의 검출 window를 설정하여 해당 window 내에서 전리층 교란 감시값이 N번 이상 정상 통계수준을 벗어나는 경우, 자연재해에 의한 전리층 교란으로 판단하기로 하였다. 해당 전리층 교란 판단 기법을 활용한 경우의 오경보율 계산은 다음과 같이 새롭게 제안한다.

$$P_{FA} = \sum_{j=N}^{m} {}_{m}C_{j}(1-p)^{j}p^{m-j} \tag{5}$$

위 식에서 p는 전리층 교란이 존재하지 않는 경우, 전리층 교란 감시값이 특정 문턱값(Threshold) 내에 존재할 확률로, 1-p가 해당 문턱값에 대한 오경보율을 의미한다. 또한, 변수 m은 15분 window 내에 존재하는 데이터 개수이며, 30초 간격 데이터 활용 시 30의 값을 갖는다. 변수 N은 지진에 의한 전리층 교란 판단을 내리기 위해 요구되는 감시값의 문턱값 초과 횟수를 나타낸다. 문턱값의 경우, 감시값 표준편차에 상수 k를 곱하여 설정한다. 따라서 설계된 전리층 검출 판단 기법은 문턱값 설정에 사용되는 k, 그리고 감시값 초과 회수인 N에 따라 Table 1과 같은 오경보율을 가진다.

계산 결과, 본 논문에서는 지진에 의한 전리층 교란 지속성을 반영하도록, k=3, N=4인 경우에 대한 값인 10^{-6} 수준의 오경보율이 적절하다고 판단하였으며, 해당 값을 바탕으로 자연재해에 의한 전리층 교란을 구분 및 검출하였다.

Table 1. Probability of false alarm according to design parameters of detection determination method

	N			
False alarm for kσ	1	2	3	4
k=3	7.8×10^{-2}	3.0×10^{-3}	7.6×10^{-5}	1.4×10^{-6}
k=4	1.9×10^{-3}	1.7×10^{-6}	1.0×10^{-9}	4.4×10^{-13}

2.3 실험 결과

2.3.1 전리층 교란 검출 실험 환경

제안된 자연재해에 의한 전리층 교란 감시 기법의 성능 검증을 위하여 2011년 3월 11일 05:46:24 (Coordinated Universal Time, UTC)에 발생한 동일본 대지진 시점에 기 구축되어 있는 위성항법신호 기준국에서 수집된 GPS L1, L2 측정치를 활용하였다. 선정된 기준국은 총 47개로, 진앙지에서 약 500km 이내에 가까이 위치하는 일본 IGS 기준국(TSK2, MTKA, USUD) 3곳과 진앙지로부터 1100km 이상 떨어져있는 한반도 국토지리원 기준국 44곳이다. 측정치 시간 간격은 30초이며, 지진 발생 당시 진앙지 부근을 통과한 PRN 26번 위성에 집중하여 전리층 교란 검출을 수행하였다. 진앙지, 각 기준국 위치 및 PRN 26번 위성의 전리층 통과점은 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

제안된 알고리즘을 활용한 지진에 의한 전리층 교란 실시간 검출 여부 확인을 위해서는 원칙적으로는 완전한 실시간 환경에서 성능 확인을 수행해야 한다. 그러나 실제로 지진이 발생 할 때까지 대기하는 것은 비현실적이며, 위 기준국에서 습득한 과거 데이터로 실시간 환경을 모사하여 알고리즘 성능 검증을 수행하는 것만으로도 충분히 실시간 성능을 확인할 수 있으므로 과거에 발생한 일본 대지진 발생 시점의 측정치를 활용하였다. 실시간 환경 모사는, 실험 수행 시작 시간을 지진 발생 약 6시간 전인 2011년 3월 11일 0시 0분 0초로 설정하고, 30초 간격으로 가시 위성 측정치를 입력하여 현재 및 과거 측정치만을 활용하여 지진에 의한 전리층 교란 검출 여부를 확인하였다. 본 연구에서 수행한 실험 과정을 순서도로 도시한 결과는 Fig. 4와 같다.

2.3.2 전리층 교란 검출 결과

지진에 의한 전리층 교란 검출은 먼저 진앙지에서 가까운 일본 기준국에서 관측한 결과와 진앙지에서 멀리 떨어진 한국 기준국에서 관측한 결과를 비교하여 분석하였다. 진앙지 부근에서 관측한 표준편차로 normalize된 전리층 지연 2차 미분값은 Fig. 5에 나

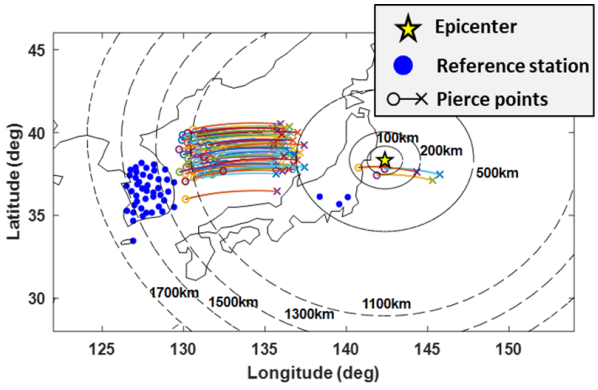


Fig. 3. Location of receivers and epicenter, and PRN 26 pierce points

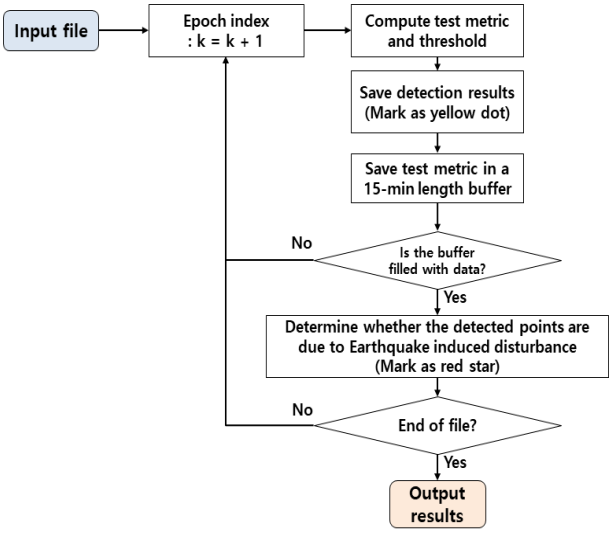


Fig. 4. Flow chart of performance evaluation

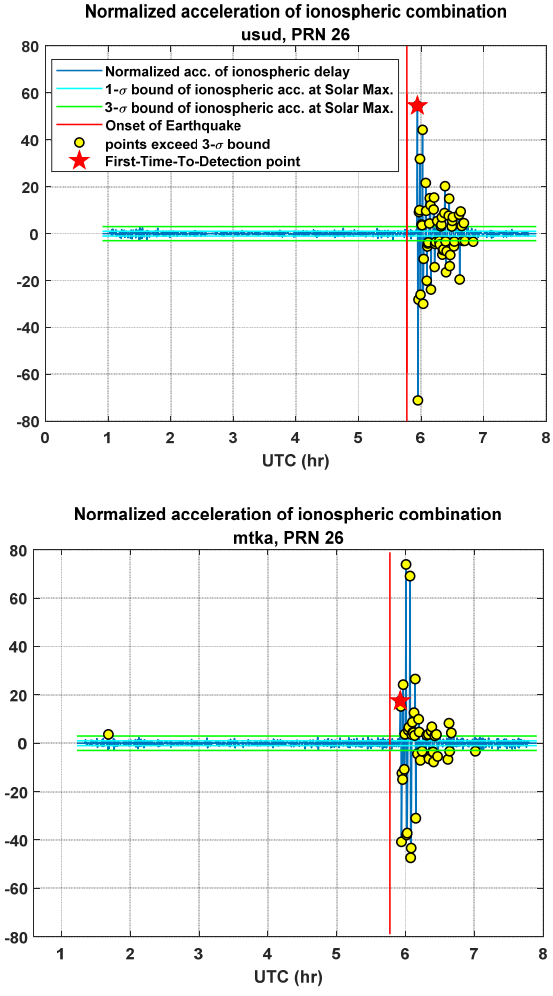


Fig. 5. Detection results for observations collected at selected Japanese stations

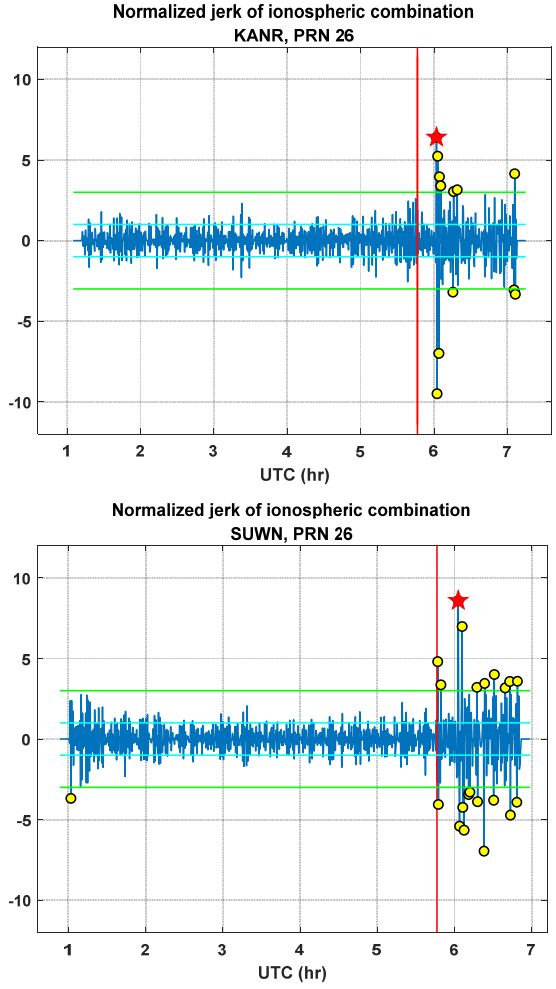


Fig. 6. Detection success results for observations collected at selected Korean stations

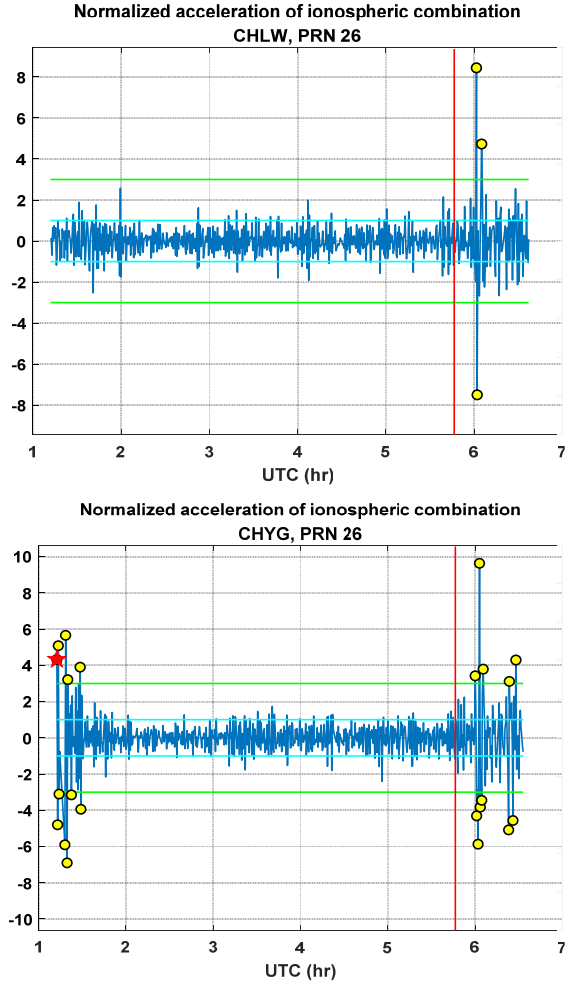


Fig. 7. Detection failure/false alarm results for observations collected at selected Korean stations

타내었다. 노란 점은 단일 검출, 즉 한 epoch의 전리층 교란 검출 감시값이 문턱값을 초과한 점을 나타낸 것이며, 붉은 색 별은 본 연구에서 제안하는 지진에 의한 전리층 교란지속 특성을 활용하여 지진에 의한 전리층 교란을 최초 검출한 시점을 의미한다. 빨간색 수직선은 지진이 발생한 시점을 나타내며, 기준국에서 관측한 결과 지진 발생 후 약 10분 이내에 지진에 의한 전리층 교란이 판단됨을 확인하였다. 한편, MTKA 기준국의 경우, UTC 1시 부근에서 감시값이 문턱값을 초과하는 경우가 있었지만, 본 논문에서 제안한 방법에 의해 해당 사례는 지진에 의해서 발생한 것이 아님을 판단할 수 있었다. 즉, 본 논문에서 제안한 지진에 의한 전리층 교란 지속 특성을 활용한 검출 방법으로 감시값에 포함된 기타오차에 의한 오경보를 효과적으로 방지할 수 있었다.

Figure 6은 한반도 기준국에서 관측한 전리층 교란 검출 결과이며, 지진 발생 약 13~15분 후 지진에 의한 전리층 교란이 검출됨을 확인할 수 있었다. 일본 기준국에서 관측한 결과에 비하여 교란의 크기는 감소하였으나, 지진 발생 시점 이후에 교란이 집중되는 것을 뚜렷하게 확인할 수 있다.

한편, 진앙지로부터 먼 거리에서 관측한 경우, 오경보 및 미검출된 경우도 존재하였으며, 해당 결과는 Fig. 7에 도시하였다. 오경보의 경우에는 PRN 26이 저앙각인 경우에 집중되어 있었으며, 이는 기준국 별로 다중경로 오차 발생이 상이하기 때문에, 감시값 표준편차 모델링이 잘 맞지 않는 기준국의 경우에 발생한 것으로 판단된다. 또한, 반송파 위상에 포함되는 다중경로 오차는 수 cm 수준으로 의사거리에 포함된 다중 경로 오차에 비하여 작은 값을 가지나, 진앙지에서 멀리 떨어진 기준국에서 관측하는 경우 지진의 교란 크기가 감소하므로 반송파 위상의 다중경로 오차도 한 가지 원인이 될 수 있다. 다중경로 오차의 경우 시간에 대해 correlated 되어 있는 특성이 있기 때문에 감시값이 연속해서 문턱값을 초과하는 현상이 발생할 수 있다.

해당 사실 확인을 위하여, 시간에 대해 correlated

된 오차를 1차 Gauss-Markov로 모델링하여 다양한 time constant에 대한 측정치를 생성하였다. 해당 측정치를 시간차분한 후, Gaussian-white noise로 가정하고 이론적으로 계산한 표준편차(σ)를 활용하여, 10^6 개수의 차분된 측정치가 3σ 내에 포함되는 데이터 수의 백분율을 Gaussian-white noise에 대해 테스트한 경우와 비교하였다. 그 결과, Table 2와 같이 time constant 값이 증가할수록, 즉 측정치가 시간에 대해 더 correlated 될수록 3σ 내에 포함되는 이론적인 확률 99.73%와 차이가 큼을 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 7에서 검출이 불가능한 경우는, 관측지와 진앙지 거리가 멀어, 전리층 교란 에너지가 감소하여 감시값에 나타난 교란 크기가 충분히 크지 않은 경우 발생한 것을 확인하였다. 다음 Table 3은 총 47 기준국에 대해 각각 관측 성공, 오경보 발생, 그리고 미검출 횟수를 정리한 것이며, 본 논문에서 제안된 지진에 의한 전리층 교란 판단기법을 활용하지 않았을 때의 결과와 비교하였다. 그 결과, 제안된 기법을 적용하는 경우, 오경보율이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로, 제안된 검출 판단 기법은 단일 epoch만 테스트하는 방식에 비하여 자연재해 검출에 최대 15분 지연이 있을 수 있으나, 더 낮은 오경보율을 갖기 때문에 보다 신뢰성 있는 검출 결과를 제공한다고 할 수 있다. 본 연구에서는 수집 가능한 데이터의

Table 2. Data portion outside of 3σ

	Theoretical value	Gaussian white noise	Time correlated noise		
			τ=10	τ=100	τ=1000
Data portion outside of 3σ (%)	2.70	2.78	4.44	6.61	6.86

Table 3. Detection results for overall stations

	Number of stations (total: 47)		
	Detection success	False alarm	Missed detection
Single epoch detection	14	33	-
Multiple epochs detection (proposed)	38	8	1

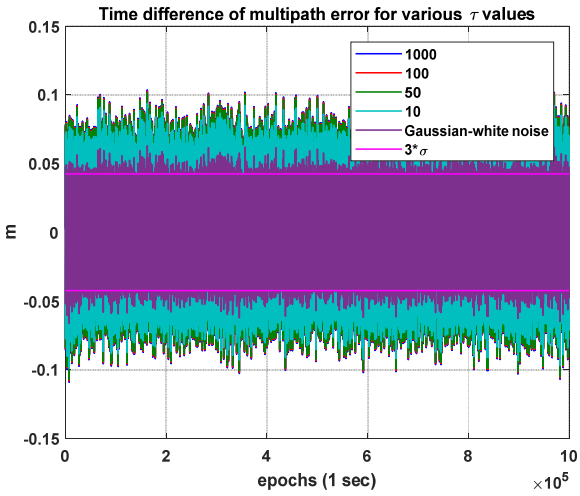


Fig. 8. Time difference of time correlated noise with various time constants and Gaussian-white noise

한계에 의해 30초 출력 rate를 갖는 데이터를 활용하였으나, 더 높은 출력 rate를 갖는 측정치를 활용한다면, 기존 15분보다 더 짧은 window를 활용하여도 유사한 성능을 갖는 검출 기법 설계가 가능할 것으로 생각된다.

2.3.3 전리층 교란 특성 분석

앞서 지진에 의한 전리층 교란으로 판단된 결과가 신뢰할 수 있는 결과인지 확인하기 위해, 교란 관측이 성공한 경우, 각 기준국과 진앙지 거리 및 지진 발생 시간으로부터 전리층 교란이 관측되는데 걸린 시간 정보를 활용하여 전리층 교란파의 속도를 대략 계산해 보았다. 각 기준국과 진앙지 사이 거리와 검출에 걸린 시간을 도시한 결과는 Fig. 9와 같다. 일반

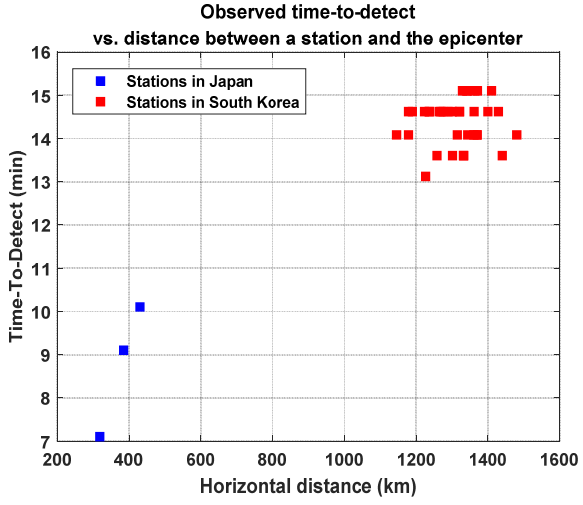
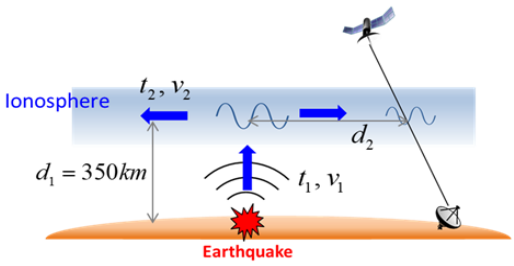


Fig. 9. Time-to-detection according to horizontal distance between reference stations and the epicenter



$$t_1 + t_2 = t_{TTD}$$
$$\frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} = t_{TTD} \Rightarrow \begin{cases} v_1 = 0.84km/\sec \\ v_2 = 2.96km/\sec \end{cases}$$

Fig. 10. Simple modeling of wave propagation for validation of detection result

적으로 지진이 발생하면 acoustic-gravity wave가 발생하여 대기로 전파해 나가고, 해당 wave가 전리층의 자유전자를 교란시키게 된다. 교란된 자유전자는 Rayleigh wave와 동일한 속도로 전파되어 나간다고 알려져 있다[8]. 해당 원리를 Fig. 9와 같이 간략히 모델링하여 acoustic-gravity wave와 Rayleigh wave의 속도를 계산한 결과 각각 0.84km/sec, 2.96km/sec이었다. 해당 값은 일반적인 acoustic-gravity, Rayleigh wave의 속도로 알려진 1km/sec, 3km/sec과 근접한 수치로, 엄밀한 계산은 아니지만 앞서 얻은 전리층 교란이 지진에 의한 것이라는 주장을 뒷받침한다.

III. 결 론

본 논문에서는 기존에 구축되어 있는 GPS 기준국 인프라를 활용하여, 지진에 의한 전리층 교란을 감시하는 방법을 제안하였다. 지진에 의한 전리층 교란을 다른 종류의 GPS 측정치 고장과 구분하기 위하여, 지진에 의한 전리층 교란은 약 15분 동안 지속된다는 특성을 활용하여 전리층 교란을 판단하는 방안을 제시하였다. 또한, 제안된 방법으로 오경보율 계산하는 식을 제시하였으며, 해당 식을 바탕으로 선정한 설계 변수를 통하여 지진에 의한 전리층 교란 판단 기법을 설계하였다. 제안된 전리층 교란 검출 기법의 성능 검증을 위하여, 2011년 동일본 대지진 당시 일본 및 한반도에 설치된 47개의 기준국에서 수집된 GPS 측정치를 활용하였으며, 제안된 기법을 적용하는 경우, 오경보율을 크게 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 검출된 전리층 교란이 지진에 의한 것이 맞는지 확인하기 위하여, 지진에 의한 파동 전파를 간략히 모델링 한 후, 각 기준국과 진앙지 거리 및 지진 발생 시점으로부터 전리층 교란 검출에 걸린 시간 정보를 활용하여 지진에 의해 발생한 acoustic-gravity 및 Rayleigh wave의 전파 속도를 간단히 계산해 보았다. 계산 결과, 해당 파동의 전파 속도가 일반적으로 알려진 값과 유사함을 확인하였으며, 따라서 제안된 기법으로 검출한 전리층 교란이 지진에 의한 것임을 검증하였다.

본 논문에서는 제안된 기법으로 지진에 의해 발생한 대기 전파로 교란된 전리층 검출에 초점을 맞추었지만, 해당 방법은 쓰나미에 의해 발생한 전리층 교란에도 적용이 가능하다. 쓰나미의 경우에는 해류가 해안까지 도달하는데 여유 시간이 있기 때문에 그 전에 쓰나미에 의한 전리층 교란을 검출한다면, 자연재해 경보 시스템에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 항공우주신기술연구소를 통해 계약된 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-우주핵심기술개발사업 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2017M1A3A3A02016230). 또한, 서울대학교 공학연구원의 시설지원에도 감사를 드립니다.

References

1) Choi, B.-K., and Lee, S. J., "Anomalous ionospheric disturbances over South Korea prior to the 2011 Tohoku earthquake," *Advances in Space Research*, Vol. 57, 2016, pp. 302~308.

2) Komjath, A., Galvan, D. A., Stephens, P., Butala, M. D., Akopian, V., Wilson, B., Verkhoglyadova, O., Mannucci, A. J., and Hickey, M., "Detecting ionospheric TEC perturbations caused by natural hazards using a global network of GPS receivers: The Tohoku case study," *Earth Planets Space*, Vol. 64, 2012, pp. 1287~1294.

3) Heki, K., "Explosion energy of the 2004 eruption of the Asama Volcano, central Japan, inferred from ionospheric disturbances," *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L14303, 2006.

4) Jin, S., Occhipinti, G., and Jin, R., "GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics," *Earth-Science Review*, Vol. 147, 2015, pp. 54~64.

5) Park, J., Grejner-Brzezinska, A., Von Frese, R. R. B., and Morton, Y., "GPS Discrimination of Traveling Ionospheric Disturbances from Underground Nuclear Explosions and Earthquakes," *Navigation*, Vol. 61, No. 2, 2014, pp. 125~134.

6) Sun, K. Y., Yoon, M. S., and Lee, J. Y., "Statistical analysis of GNSS based traveling ionospheric disturbance associated with natural hazards case study: 2011 Tohoku earthquake,"

Proceedings of Korean Navigation Institute Conference (domestic), October 2015.

7) Yang, Y.-M., Meng, X., Komjathy, A., Verkholyadova, O., Langley, R. B., Tsurutani, B. T., and Mannucci, A. J., "Tohoku-Oki earthquake caused major ionospheric disturbances at 450km altitude over Alask," *Radio Science*, Vol. 49, 2014.

8) Hines, C. O., "Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights," *Canadian Journal of Physics*, Vol. 38, No. 11, 1960, pp. 1441~1481.

9) Doherty, P., Ra, E., Klobuchar, J., and El-Arini, M. B., "Statistics of time rate of change of ionospheric range delay," *Proceedings of ION GPS-94*, September 1994, pp. 1589~1598.