

정상상황 전리층 경향 분석 및 지진에 의한 전리층 교란검출

Analysis on Normal Ionospheric Trend and Detection of Ionospheric Disturbance by Earthquake

강선호 · 송준솔 · 김오중 · 기창돈*
서울대학교 기계항공공학부 및 정밀기계설계공동연구소

Seonho Kang · Junesol Song · O-jong Kim · Changdon Kee*

Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Institute of Advanced Machines and Design, Seoul, 08826, Korea

[요 약]

지진, 쓰나미 등에 의해 지상에서 생성된 에너지는 대기를 통해 전파되어 전리층 전자밀도를 교란시키므로, 위성신호의 전리층 지연을 이용하면 충격파에 의한 교란을 관측할 수 있다. 전리층의 전자밀도는 지상의 교란원인 이외에도 태양활동, 위도, 계절, 지방시 등 다양한 요인들에 의해 영향을 받는데, 지진 및 쓰나미와 같은 이상상황을 구분하기 위해서는 정상상황에서의 전리층 경향 분석이 필요하다. 또한 전리층 교란은 지상의 교란원인으로부터 거리가 멀어질수록 크기가 감소하므로, 원거리 전리층 교란을 효과적으로 검출하기 위한 적절한 기법이 필요하다. 본 논문에서는, 정상상황에서의 전리층 경향분석을 위해 ionosphere exchange (IONEX) 데이터를 이용하여 태양 극대기 및 극소기, 위도, 계절 등에 의한 전리층 경향을 분석해보았다. 분석한 정상상황 전리층을 바탕으로 경향성이 제거된 감시값을 설정하고, 전리층 교란의 지속성을 이용한 원거리 교란검출 기법을 설계해 이에 대한 오경보율을 분석하였다. 결과적으로 전리층 지연의 2차 미분 값이 감시값으로 선정되었으며, 오경보율은 $1.4e-6$ 수준으로 나타났다. 설계한 기법을 2011 도호쿠 대지진 발생 시 수집된 데이터에 적용하여 교란 검출을 확인하였다.

[Abstract]

As the energy generated by earthquake, tsunami, etc. propagates through the air and disturbs the electron density in the ionosphere, the perturbation can be detected by analyzing the ionospheric delay in satellite signal. The electron density in the ionosphere is affected by various factors such as solar activity, latitude, season, and local time. To distinguish from the anomaly, therefore, it is required to inspect the normal trend of the ionosphere. Also, as the perturbation magnitude diminishes by distance it is necessary to develop an appropriate algorithm to detect long-distance disturbances. In this paper, normal condition ionosphere trend is analyzed via IONEX data. We selected monitoring value that has no tendency and developed an algorithm to effectively detect the long-distance ionospheric disturbances by using the lasting characteristics of the disturbances. In the end, we concluded the 2nd derivative of ionospheric delay would be proper monitoring value, and the false alarm with the developed algorithm turned out to be $1.4e-6$ level. It was applied to 2011 Tohoku earthquake case and the ionospheric disturbance was successfully detected.

Key word : Earthquake, Tsunami, Ionospheric disturbance, Total electron content, GNSS.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.2.49>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 22 February 2018; Revised 8 March 2018

Accepted (Publication) 22 March 2018 (30 April 2018)

*Corresponding Author, Chang-don Kee

Tel: +82-2-880-1912

E-mail: kee@snu.ac.kr

I. 서 론

GNSS (Global Navigation Satellite System) 위성 신호가 위성에서 지상의 기지국까지 이동하는 경로 사이에는 위성 궤도 오차, 위성 시계오차, 수신기 시계오차, 전리층 오차, 대류층 오차, 다중 경로 오차 등 다양한 오차가 포함되어 있다. 이 중에서 전리층 오차는 위성신호가 전리층을 지나는 동안 경로상의 총 전자량(TEC; total electron content)에 비례하므로, 전리층 지연 값을 이용하면 전리층 전자밀도에 대한 추정이 가능하다.

전리층의 전자밀도는 태양활동, 위도, 계절, 지방 시 등 다양한 원인에 의해 영향을 받는데, 이러한 요인들은 특별한 상황이 일어나지 않아도 자연적으로 발생하는 전리층의 특성이다. 따라서 지진과 같은 정상상황과의 구별을 위해서는 이러한 정상 상황에 대한 전리층 경향성을 분석하여 지진과 같은 이상 상황에 의한 전자밀도 변화와 구분할 필요가 있다.

지진, 쓰나미와 같은 이상상황이 발생했을 때 지표면 및 수면과 대기의 coupling에 의해 발생하는 AGW (atmospheric gravity wave)는 전리층까지 도달하여 전자밀도에 변화를 가져온다[1],[2]. 전리층의 전자밀도가 달라지면 위성신호가 전리층을 지나는 동안의 TEC 또한 달라지므로, TEC에 비례하는 전리층 지연 값을 이용하면 전리층 교란을 관측할 수 있다. 일반적으로 지진의 경우 규모 6.5 이상의 지진에 대해서는 교란 검출이 가능하다고 알려져 있다[3].

본 논문에서는 정상상황에 대한 전리층 경향분석을 위해 다양한 환경에 대한 IONEX 데이터를 분석하고, 이를 정리하였다. 또한 이를 바탕으로 지진 등 이상상황에 대한 전리층 교란을 검출하기 위해 감시값 및 threshold를 설정하고, 이에 대한 오정보율을 분석하였다. 마지막으로 이를 2011 도호쿠 대지진에 적용하여 성능 검증을 수행하였다.

II. 정상상황 전리층 지연 분석

2-1 전리층 지연과 TEC

본 논문에서는 전리층 지연의 일반적인 경향성을 확인하기 위해 IONEX 데이터를 사용했다. IGS (International GNSS Service)에 서는 전 지구를 일정한 격자점으로 나누고, 각 격자점에 대한 2시간 간격 Vertical TEC (VTEC) 정보를 제공하고 있다. 이때 데이터의 단위는 0.1 TECU(TEC unit, 1 TECU는 $10^{16}e/m^2$)이다. IONEX가 전리층 지연 값을 직접적으로 제공하지 않기 때문에 관계식을 통해 TEC를 거리로 환산해주어야 한다[4].

$$\delta\tau_p = -\frac{40.3}{f^2} TEC \quad (1)$$

(1)식에서 $\delta\tau_p$ 는 반송파의 전리층 지연(m)을, f 는 위성신호의 주파수(L_1 : 1575.42 MHz, L_2 : 1227.60 MHz)를, TEC는 위성신호의 경로 상 총 전자량(e/m^2)을 나타낸다. IONEX 데이터의 경우 0.1 TECU 단위로 정보를 제공하기 때문에 이때의 해상도는 1.6 cm 수준이다. 또한 IONEX는 후처리 방식으로 잡음 등에 의한 오차가 거의 없다고 가정할 수 있다.

2-2 IONEX 데이터 이용 정상상황 전리층 지연 분석

이상상황에 대한 교란을 검출할 때 사용할 경향성이 없는 감시값을 선정하기 위해서, 정상상황에서의 전리층 경향을 분석할 필요가 있다. 따라서 다양한 경우에 대한 전리층 분석을 수행하여 정상상황에서의 전리층 경향성을 분석하기로 한다. 구체적인 분석 내용은 표 1과 같다.

2001년은 태양활동의 극대기, 2008년은 극소기이므로, 태양활동에 의한 영향을 판단하기 위해 두 연도에 대한 분석을 수행하였다. 위도에 따른 영향을 관찰하기 위해서 다양한 위도에 대해 4개 기준국을 선정하였고, 계절에 의한 변화를 관찰하기 위해 4절기에 대한 데이터를 분석하였다. 전리층 지연의 변화율의 경우 앞뒤로 하루씩을 붙여 총 3일의 데이터를 연결하고 변화율을 구한 뒤, 가운데 24시간에 대한 데이터를 추출하여 사용하였다. 또한 IONEX 데이터는 시간에 대한 해상도를 높이기 위해 1시간 간격으로 보간하여 사용하였다.

그림 1의 (a)는 태양 극대기인 2001년을, (b)는 태양 극소기인 2008년의 전리층 지연 값을 나타낸다[5],[6]. Subplot은 위에서 서부터 차례로 춘분, 하지, 동지에 대한 그래프를, 각각의 그래프의 4가지 선은 다양한 위도에 따라 분포된 기준국의 전리층 지연을 나타낸다. 최대 전리층 지연은 모든 경우에서 지방 시 12시~16시 사이에 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 1(a)에서 극대기의 최대 전리층 지연은 춘분에서 나타났으며 20 m 수준이다. 이때 지방 시에 의한 일변화는 6시~16시 사이에서 15 m 수준이었다. 그림 1(b)의 극소기를 보면 최대 전리층 지연은 극대기와 동일한 시간대와 절기에 발생했으며 5 m 수준으로 나타났다. 전체적으로 극대기의 전리층 지연은 극소기에 대해 4배 수준을 가지는 것을 확인할 수 있다. 위도 상으로는 고위도로 갈수록 지방 시에 의한 영향이 감소하였다. 이것은 위도에 따른 태양광의 입사각 변화 때문으로 판단된다.

표 1. IONEX 데이터 분석환경

Table 1. Environment for IONEX data analysis.

Year	Station (latitude)	date (season)
2001 (solar max)	THU2 (76.5 °N)	3/20 (spring)
	CHUR (58.7 °N)	6/21 (summer)
	WUHN (30.5 °N)	9/23 (fall)
	MBAR (-0.6 °N)	12/21 (winter)

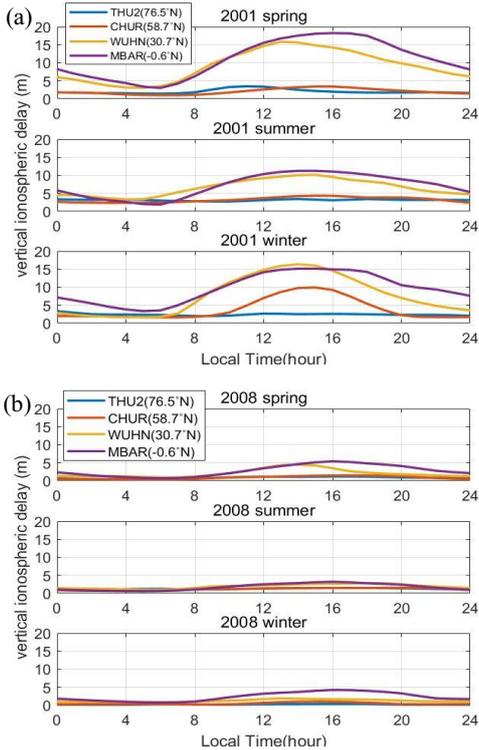


그림 1. 전리층 지연 그래프 (a)2001년 태양극대기 (b)2008년 태양 극소기
 Fig. 1. Ionospheric delay (a)2001 maximum solar activity (b)2008 minimum solar activity.

여름보다 봄과 겨울의 전리층 지연 값이 더 크다는 것을 알 수 있는데, 이것은 원자상태 산소와 분자상태 질소의 비율인 $[O^+N^2]$ 가 반년을 주기로 변하는 현상에 의한 것이다[7].

전리층 지연의 경우 지방 시, 태양활동, 위도, 계절 등에 의한 경향성이 매우 크게 남아 있으므로, 이상상황 검출을 위한 감시값으로 적절하지 않다. 이상상황 검출을 위해서는 일정한 threshold를 설정하여 교란을 검출하는데, 교란을 제외한 다른 요소들의 경향성은 모두 배제되어야 하기 때문이다. 일반적으로 경향성을 가지는 데이터의 경위 차분을 거치면 그 경향성이 줄어들게 되므로, 이를 이용하여 전리층 지연에 대한 1,2,3차 미분을 수행하여 보았다. 이때 전리층 경향성의 최댓값이 중요하므로, 2001년 극대기에 대한 분석을 수행하기로 한다.

그림 2의 (a),(b),(c)는 각각 2001년 극대기 전리층 지연의 1,2,3차 미분 값을 나타낸다[5],[6]. 그림 2(a) 1차 미분 값을 보면 계절 및 위도에 대한 경향성은 상당히 줄어들었으나 지방 시에 의한 경향성이 잔류한 것을 확인할 수 있다. 이때 전리층 지연의 1차 미분 값은 지방 시로 8시 부근에서 최댓값을, 18시 부근에서 최솟값을 가졌다. 전반적인 scale은 $1e-3$ m/s 수준으로 나타났다. 그림 2(b),(c)는 2차,3차 미분 값으로, 그래프 상으로도 경향성이 거의 사라진 것을 확인할 수 있다. 이때 scale은 각각 $1e-7$ m/s², $1e-11$ m/s³ 수준이다. 차수에 따른 전리층 지연 미분의 최댓값을 표 2에 정리하였다.

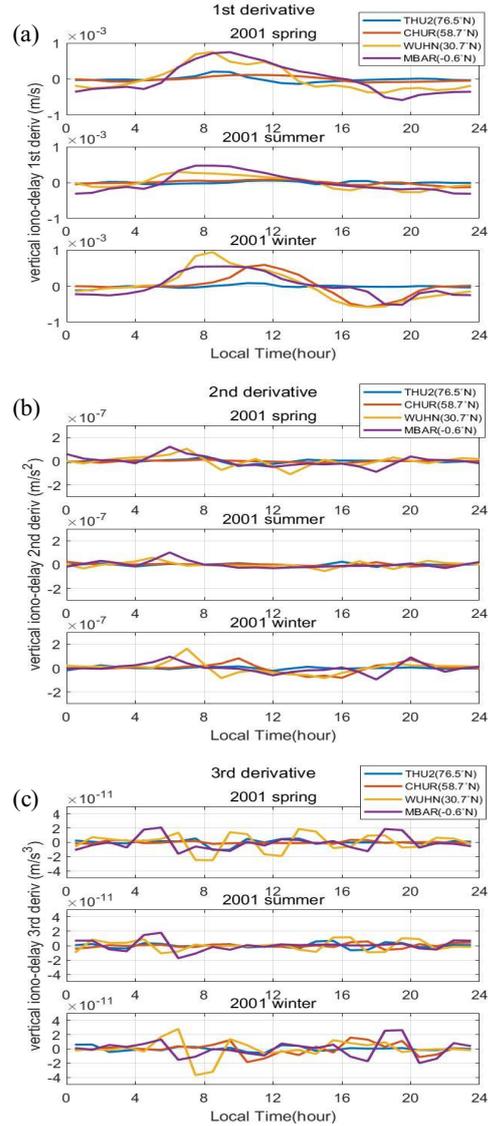


그림 2. 2001년 전리층 지연 미분 (a)1차 미분 (b)2차 미분 (c)3차 미분
 Fig. 2. 2001 ionospheric delay derivatives (a)1st derivative (b)2nd derivative (c)3rd derivative.

표 2. IONEX 데이터 최댓값

Table 2. IONEX data maximum value.

	IONEX max
ionospheric delay	20.7m
1 st derivative	9.4e-4 m/s
2 nd derivative	1.6e-7 m/s ²
3 rd derivative	4.3e-11 m/s ³

III. 지진에 의한 전리층 교란 검출기법 설계

3-1 반송파 이용 전리층 조합

L1, L2 주파수에 대한 GNSS 반송파는 아래의 식 (2)와 같이 나타난다. 이때 위성궤도 오차, 다중경로 오차, 주파수 간 bias 등은 없다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \phi_1 &= d + B - b - I_1 + T + \lambda_1 N_1 + \epsilon_1 \\ \phi_2 &= d + B - b - \gamma I_1 + T + \lambda_2 N_2 + \epsilon_2 \end{aligned} \quad (2)$$

아래첨자 1,2는 각각 L1, L2를 의미하고, d는 위성에서 수신기까지의 거리, B는 수신기 시계오차, b는 위성 시계오차, I는 전리층 오차, T는 대류층 오차, N은 미지정수를 나타낸다. $\gamma = (f_1/f_2)^2 \cong 1.647$, λ_1, λ_2 와 ϵ_1, ϵ_2 는 각각 반송파 L1, L2 신호의 파장과 잡음을 나타낸다.

식 (2)의 두 식을 선형조합하면 전리층 조합(ϕ_{iono})를 만들 수 있고, 이때 전리층 조합은 전리층 지연과 bias, 잡음 세 가지 성분을 가지고 있으므로, 전리층 조합을 미분하면 식 (3)의 결과처럼 bias 성분이 사라지게 된다. 미분을 거듭했을 때, 전리층 조합의 n차 미분 값에 대한 표현은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{iono} &= \frac{\phi_1 - \phi_2}{\gamma - 1} = I_1 + \frac{\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2}{\gamma - 1} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\gamma - 1} \\ &= I_1 + bias + \epsilon_{iono} \\ \dot{\phi}_{iono} &= \dot{I}_1 + \dot{\epsilon}_{iono} \\ \ddot{\phi}_{iono} &= \ddot{I}_1 + \ddot{\epsilon}_{iono} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\phi_{iono}^{(n)} = I_1^{(n)} + \epsilon_{iono}^{(n)} \quad (4)$$

3-2 Sampling time에 따른 보정상수 계산

IONEX 데이터의 경우 2시간 간격으로 제공되기 때문에 1시간 간격으로 보간을 하더라도 주기가 짧은 고주파수 영역에 대한 정보가 생략되어 있다. 실측데이터의 경우 주로 1초, 30초의 데이터가 사용되므로 이때의 1,2,3차 미분은 IONEX의 미분 값보다 클 것을 예상할 수 있다. 따라서 이에 대한 고려가 필요하다.

보수적인 설계를 위해서는 전리층 경향성이 가장 컸던 2001년 태양 극대기의 MBAR 기준국에 대한 분석을 수행하는 것이 이상적이나, 데이터의 부재로 2002년 춘분의 일본 USUD 기준국의 데이터를 사용하였다. IONEX의 경우 USUD 위치에서의 가시 위성에 대한 경사 전리층 값을 계산하였다. RINEX 데이터는 1초 데이터를 30초, 3600초로 re-sampling하고 1,2,3차 미분을 수행하였다. 전리층 지연 미분값의 표준편차를 구하는 과정에서 잡음의 영향을 고려하기 위해 식 (4)를 활용하였다.

표 3. Sampling time에 따른 전리층 미분 최댓값(3 sigma)

Table 3. Maximum values for various sampling times.

sampling time (sec)	1 st derivative (m/s)	2 nd derivative (m/s ²)	3 rd derivative (m/s ³)
1	4.63e-3	2.32e-3	3.89e-3
30	4.30e-3	2.42e-5	1.36e-6
3600	3.48e-3	4.76e-7	1.38e-10
(IONEX) 3600	5.91e-3	8.82e-7	2.74e-10

$$\begin{aligned} \phi_{iono}^{(n)} &= I_1^{(n)} + \epsilon_{iono}^{(n)} \\ \Rightarrow (\sigma_{I_1}^{(n)})^2 &= (\sigma_{\phi_{iono}^{(n)}})^2 - (\sigma_{\epsilon_{iono}^{(n)}})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$\sigma_{I_1}^{(n)}$ 와 $\sigma_{\epsilon_{iono}^{(n)}}$ 는 각각 경사 전리층 지연 및 경사 전리층 조합의 n차 미분값에 대한 표준편차를 의미한다. $\sigma_{\epsilon_{iono}^{(n)}}$ 는 경사 전리층 지연의 n차 미분에 대한 잡음의 표준편차이다. 잡음의 특성 상 어느 신호와도 상관관계가 없으므로 $Cov(I_1^{(n)}, \epsilon_{iono}^{(n)})$ 는 항상 0이 되고, (4) 식이 성립한다. $\sigma_{\epsilon_{iono}^{(n)}}$ 는 수신기 잡음 모델링을 통해 구하며, 선행연구의 결과를 활용하였다[6]. 이때의 잡음 수준은 보수적인 설계를 위해 고양각을 기준으로 하였다. 표 3은 USUD 1초 데이터를 30초, 3600초, 7200초로 re-sampling하여 1,2,3차 미분값에 따른 최댓값을 구한 것이다. 이때의 최댓값은 통계적 의미의 최댓값으로서, 3 sigma를 의미한다.

USUD RINEX 데이터에 대한 3600초 re-sampling 데이터의 1,2,3차 최대 미분값은 IONEX 3600초 데이터와 같은 수준인 것을 확인할 수 있다. 이때 IONEX의 값이 2배 가량 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 IONEX 데이터 처리의 특성에 기반한 것으로 추정된다. 즉 5도 간격의 격자점에 대한 수직 전리층 지연을 제공하는 IONEX 데이터를 처리하는 과정에서, 위성 신호의 전리층 통과점에 대한 보간 과정과, 수직 전리층을 경사전리층으로 변환하는 과정에서 오차가 이중으로 발생하기 때문이다.

표 3의 IONEX 1시간 간격 데이터의 전리층 n차 미분값 $I_{1hr}^{(n)}$ 를 이용하여 30초 간격에서의 전리층 지연 n차 미분값 $I_{30sec}^{(n)}$ 을 구할 때, 보정상수 $f_{30sec-1hr}$ 는 식 (5)를 통해 계산할 수 있다.

$$I_{30sec}^{(n)} = f_{30sec-1hr} \times I_{1hr}^{(n)} \quad (5)$$

따라서 USUD IONEX 3600초 데이터를 1초, 30초로 변환한 결과는 표 4와 같이 정리할 수 있다. 분석 결과 자연재해가 발생하지 않은 정상상태에서 전리층 1,2,3차 미분 값이 최대 1cm 이하 수준임을 확인하였다. 1초 데이터의 경우에는 차분을 거듭할수록 잡음에 대한 3 sigma는 증가하므로 2차보다 3차 미분의 값이 더 큰 것을 확인하였다. 이때 1차 미분이 2차 미분보다 큰 것은 아직 지방 시에 대한 경향성이 남아 있어 3 sigma가 크게 계산되기 때문으로 보여진다.

표 4. Sampling time에 따른 3sigma 보정

Table 4. Converted 3 sigma value by sampling time.

Sampling time (sec)	1 st derivative (m/s)	2 nd derivative (m/s ²)	3 rd derivative (m/s ³)
(IONEX) 3600	5.91e-3	8.82e-7	2.74e-10
factored	30	7.33e-3	4.49e-5
	1	7.86e-3	4.43e-3

표 5. 30초 보정 전리층 지연 1,2,3차 미분의 3 sigma

Table 5. 3 sigma of 30sec-converted Ionospheric delay 1st, 2nd, 3rd derivatives.

Derivative level	$3\sigma_{I_1}$	$3\sigma_{\epsilon_{iono}^{(n)}}$	$3\sigma_{\phi_{iono}^{(n)}} / (3\sqrt{\sigma_{I_1}^{2(n)} + \sigma_{\epsilon_{iono}^{2(n)}}})$
(n=1) 1 st (m/s)	7.33e-3	1.33e-4	7.33e-3
(n=2) 2 nd (m/s ²)	4.49e-5	7.65e-6	4.55e-5
(n=3) 3 rd (m/s ³)	2.70e-6	4.54e-7	2.74e-6

3-3 감시값 선정

감시값을 선정하는 데에는 다음과 같이 두 가지 방법을 사용할 수 있다. 첫 번째는 자연재해 등 이상상황에 의한 전리층 교란과 정상상황에서의 전리층 교란이 갖는 특성을 파악하여, 자연재해에 의한 교란만을 추출하는 것이다. 그러나 이상상황과 정상상황에 의한 교란을 완벽하게 분리하기란 불가능하다. 따라서 두 번째 방법으로, 경향성을 갖지 않은 값은 감시값을 찾아 사용할 수 있다. 본 논문에서는 두 번째 방법을 사용하여 정상 전리층 지연의 다양한 미분 값이 가지는 경향성을 비교해 감시값을 선정하고자 한다.

표 5의 $3\sigma_{I_1}$ 는 USUD 기준국의 IONEX 3600초 데이터 1,2,3차 미분값의 3 sigma를 구하고, 이를 실측 데이터와 같은 30초로 보정한 값이다. $3\sigma_{\epsilon_{iono}^{(n)}}$ 는 앞서 구한 이론상 전리층 조합 n차 미분 잡음의 3 sigma를, $3\sigma_{\phi_{iono}^{(n)}}$ 는 전리층 조합 n차 미분의 3 sigma를 나타낸다. 표 5를 보면, 전리층 조합의 미분값 중 전리층 지연의 미분값이 차지하는 비율이 99%로, 반송과 잡음에 의한 영향은 무시할만한 수준이라는 것을 확인할 수 있다. 따라서 전리층 지연값 자체가 경향성을 가지지 않는 미분 차수 n을 구한다면, 이를 감시값으로서 활용할 수 있다.

앞서 IONEX 데이터를 분석할 때, 전리층 지연의 2,3차 미분의 경우 경향성이 거의 사라진 것을 확인할 수 있었다. 경향성 측면에서는 차분을 거듭할수록 전리층 지연의 경향성 줄어들어 고차 미분값을 사용하는 것이 좋아 보이나, 차분을 거듭할수록 교란 검출 시점에 대한 시간 분해능이 떨어지는 단점이 발생한다. 따라서 적절한 미분 차수 n을 설정하는 것이 중요하다. Cycle-slip 검출에는 전리층 조합의 2차 미분 값이 널리 사용된다. 지진에 의한 전리층 교란 또한 fault의 일종이므로, 2차 미분

을 통해 전리층 교란이 검출 가능하다고 판단할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 전리층 지연의 2차 미분을 감시값으로 활용하기로 한다.

3-4 지진에 의한 전리층 교란 검출기법 설계 및 오경보를 분석

지진에 의한 전리층 초기교란은 약 15분 동안 지속된다고 알려져 있다[8]. 본 논문에서는 이 점에 착안하여 원거리 교란 검출을 개선하는 기법을 설계하였다.

이상상황이 일어날 확률이 매우 작은 경우 검출에 대한 성능은 missed detection과 오경보를 두 가지로 평가할 수 있다. Missed detection은 실제 이상상황이 발생했는데도 경보가 울리지 않는 것을, 오경보는 이상상황이 발생하지 않았는데도 alarm이 울리는 것을 말한다. 그러나 지진 및 쓰나미 등에 의한 전리층 교란의 경우 교란 데이터 자체가 많지 않고, 그 크기도 일정하지 않아 missed detection을 평가하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 주로 오경보율을 이용한 분석을 수행하도록 한다.

지진에 의한 전리층 교란은 진앙으로부터 멀어질수록 그 크기가 감소한다. 단일 threshold를 설정하여 지진을 검출하는 경우 오경보 때문에 높은 수준의 sigma를 threshold로 설정하게 되는데, 이때 원거리에서의 교란은 크기가 작아 검출이 어렵다. 따라서 오경보율을 낮게 유지하면서 원거리 교란검출을 개선하는 방안이 필요하다.

본 논문에서 제안하는 교란검출 방식은 일정 크기의 window 안에 N번 이상의 anomaly (threshold 이상의 측정치)가 발생하면 교란으로 판단하는 것이다. 지진에 의한 초기 교란이 15분이므로, window size는 15분으로 설정한다. 이는 30초 간격 데이터 기준 30 epoch에 해당한다. Threshold는 가능한 낮게 잡아야 원거리 검출 성능을 높일 수 있다. 따라서 threshold를 전리층 조합 미분 값의 3sigma로 설정하였다. 이때 N에 따른 오경보율은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{FA} = \sum_{j=N}^{30} {}_{30}C_j (1-p_{3\sigma})^j (p_{3\sigma})^{30-j} \tag{6}$$

이때 P_{FA} 는 오경보율을, $p_{3\sigma}$ 는 측정치의 3 sigma 확률로 0.9973이다. N에 따른 오경보율은 표 6과 같다.

N이 커질수록 오경보율이 작아지는 것을 확인할 수 있다. N이 커진다는 것은 15분 윈도우 안에서 3 sigma threshold를 넘는 측정치 값들이 더 많아져야한다는 것을 의미하므로 이는 자연스러운 결과이다. 그런데 N이 커지면 어느 정도 교란의 영향이 있더라도 검출이 되지 않는 missed detection 또한 증가한다. 따라서 적절한 N을 설정해주어야 한다. N=4 일 때 오경보율은 1.4e-6 수준으로 나타났고, 이때 오경보율은 30초 데이터 기준 255일에 1번 발생하는 수준으로 적절하다고 판단된다. 따라서 N은 4로 설정하였다.

표 6. N에 따른 오경보율

Table 6. False alarm rate in accordance with N.

N	1	2	3	4
$2\sigma P_{FA}$	$7.5e-1$	$4.0e-1$	$1.5e-1$	$4.6e-2$
$3\sigma P_{FA}$	$7.8e-2$	$3.0e-3$	$7.6e-5$	$1.4e-6$
$4\sigma P_{FA}$	$1.9e-3$	$1.7e-6$	$1.0e-9$	$4.4e-13$

IV. 2011 도호쿠 대지진

4-1 데이터 분석환경

도호쿠 대지진은 2011년 3월 11일 UTC 05:46 경에 일본 센다이 도호쿠 해안지역에서 발생한 9.0 규모의 지진이다. 지진이 발생할 당시 GPS 위성 중 PRN26이 진앙 근처를 통과했다. 거리에 따른 비교를 위해 한국 기준국 및 일본 기준국 3개씩을 선정하였다. 한국은 KANR, SUWN, WOLS를 일본은 mtka, tsk2, usud를 선정하였으며, 각각의 기준국의 위치와 PRN26에 대한 IPP (Ionospheric Pierce Point) track이 그림 3에 나타나있다. 그림 3의 IPP track에서 o는 지진 발생 1시간 전의 IPP 위치를, x는 지진 발생 1시간 이후의 IPP 위치를 나타낸다. 일본 기준국의 IPP가 한국 기준국에 비해 가까운 것을 확인 할 수 있다.

4-2 실측 데이터 이용 전리층 경향성 검증

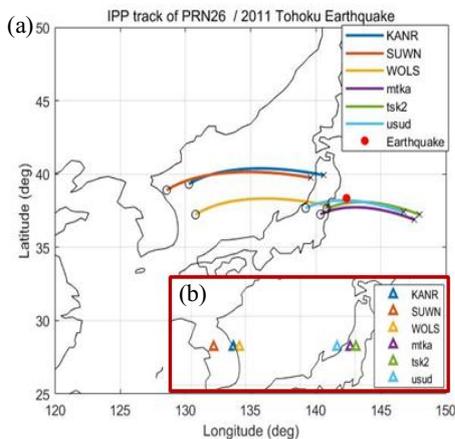


그림 3. 2011년 도호쿠 대지진 (a)전후 2시간 PRN26 위성의 IPP track (b)한국 및 일본 기준국
 Fig. 3. 2011 earthquake (a)IPP track of PRN26 for 2 hours around outbreak (b)Korean and Japanese ground stations.

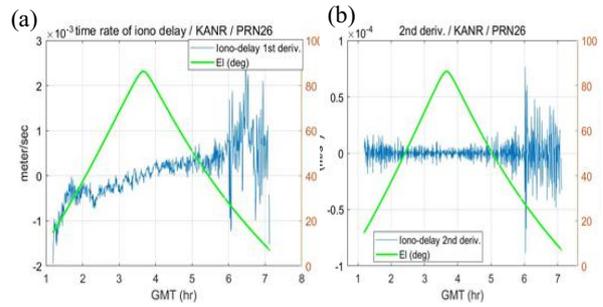


그림 4. 한국 KANR 기준국 (a)전리층 조합 1차 미분 (b)전리층 조합 2차 미분

Fig. 4. (a)The 1st derivative and (b) 2nd derivative of ionospheric combination at KANR station.

전리층 교란 검출을 수행하기에 전에, 앞서 분석한 경향성에 대한 분석을 실측 데이터를 통해 검증해보았다. 그림 4(a),(b)는 도호쿠 지진 당시 한국의 강릉(KANR) 기준국 데이터에 대한 전리층 조합 1,2차 미분 값을 나타낸 것이다. 초록 실선은 위성의 양각을 나타낸다. 그림 4(a)의 1차 미분 값을 보면 시간에 따라 전리층의 경향성이 아직 남아있는 것을 확인할 수 있다. 이는 threshold를 선정하여 교란을 검출하는 알고리즘에 적합하지 않다는 것을 알 수 있다. 반면에, 전리층 지연의 가속도를 나타내는 2차 미분의 경우 경향성이 사라지고 신호가 잡음 형태로 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 일변화에 의한 경향성이 차분을 거듭함에 따라 거의 사라졌기 때문이다. 결과적으로 전리층 조합의 2차 미분 값이 감시값으로 적절하다는 것을 실측 데이터를 통해 확인할 수 있다.

4-3 지진에 의한 전리층 교란 검출

그림 5는 전리층 조합의 2차 미분 값과 본 논문에서 제시한 검출 방법을 이용하여 전리층 교란 검출을 수행한 결과이다. 데이터는 위성신호의 양각에 따른 잡음의 1 sigma로 나누어 normalize 시켰다. 분홍색 점은 threshold (3 sigma)를 넘는 anomaly 측정치를 의미한다. 빨강, 검정 가로선은 각각 3 sigma, 1 sigma이다. 초록 실선은 위성신호의 양각을 나타낸다. 분홍색 세로 점선은 지진이 발생한 시점으로, 05:46 UTC에 해당한다. 그림 5(a),(b)의 빨간 점선 원은 설계된 기법에 따라 교란이 검출된 시점을 의미한다. 두 경우 모두 교란이 시작되고 얼마 지나지 않아 검출이 이루어진 것을 확인할 수 있다. 교란은 6개 기준국에 대해서 모두 검출되었다.

그림 5(b)의 저장각 부분을 보면, 검정색 점선 원 안에 anomaly가 발생한 것을 알 수 있다. 이것은 저장각에서 발생하는 다중경로 오차에 의한 것으로 판단된다. 이때 만약 단일 threshold를 사용했다면, 원거리 검출 성능을 높이기 위해 threshold를 낮추는 과정에서 저장각 부분의 오경보가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

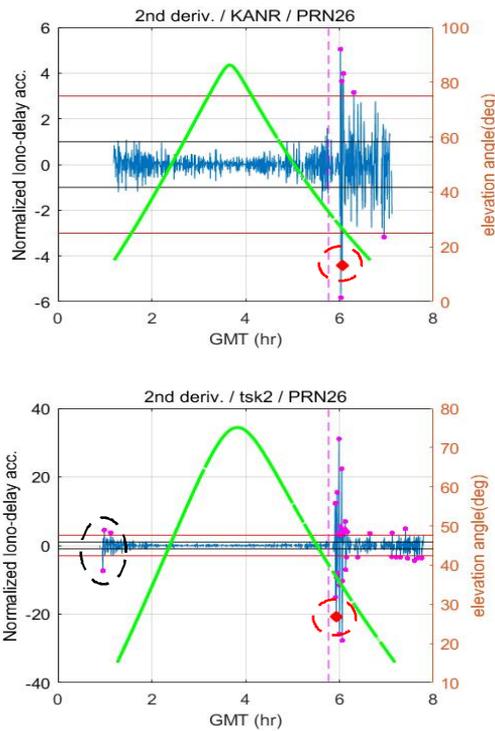


그림 5. 전리층 조합 2차 미분 값을 통한 2011년 도호쿠 대지진 교란검출 (a)KANR (b) tsk2

Fig. 5. Detection of Ionospheric disturbances via ionospheric combination 2nd derivative for 2011 Tohoku earthquake data (a)KANR and (b)tsk2 stations.

표 7. 전리층 조합 2nd deriv.의 첫 anomaly IPP와 진앙 사이 거리, normalized 최대값, 첫 anomaly로부터 교란판단 사이 시간

Table 7. Distance between IPP and station on the initial anomaly, maximum normalized ionospheric combination 2nd derivative, the time between initial anomaly and disturbance confirmation.

Station	KANR	SUWN	WOLS	mtka	tsk2	usud
IPP-epicenter distance (km)	791.5	898.3	738.4	375.6	382.1	350.6
Normalized max value	5.2	5.8	19.5	45.3	31.3	43.4
time-to-detect (min)	2.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0

그러나 본 논문에서 제시한 기법은 15분 window 안에 4번 이상의 anomaly가 발생해야하기 때문에 오경보가 일어나지 않는다. 결과적으로, 지진에 의한 교란의 지속성을 이용한 검출 방법을 통해 단발적으로 발생하는 다중경로 오차 등 다른 오차들에 의한 오경보를 방지하는 효과를 확인할 수 있다.

표 7는 첫 anomaly가 발생한 시점에서 IPP와 기준국 사이의

거리, 교란의 normalized 최대값, 첫 anomaly와 교란판단 시점 사이의 시간간격을 표로 나타낸 것이다. 교란의 이동거리는 한국 기준국이 일본 기준국에 비해 2배 이상 큰 것을 알 수 있고, 이에 따라 교란의 최대값도 감소한 것을 확인할 수 있다. 울산 (WOLS)의 경우 남동쪽 해안에 위치하여 일본 진앙에 가까우므로 교란의 세기가 다른 한국 기준국보다 컸다. 첫 anomaly가 발생한 시점으로부터 15분 window 안에 4번째 anomaly가 발생하기까지의 시간 time-to-detect는 모든 기준국에서 3분 이내를 만족했다. 30초 간격 데이터 특성상 2차 미분을 계산하기 위해서 1.5분이 교란 판단에 필요한 최소값이므로, 모든 기준국이 큰 지체 없이 교란을 검출한 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 지진에 의한 전리층 교란의 지속성을 이용하여 원거리 전리층 교란 검출을 향상시키는 검출 방법을 소개하였다. 지진, 쓰나미 등 이상상황에 의해 발생한 전리층 교란을 정상상황과 구분하기 위해 IONEX 데이터를 이용하여 태양활동, 위도, 계절 등에 대한 전리층 경향성을 파악하였다. 그 결과 전리층 조합의 2차 미분이 감시값으로 선정되었고, 선정된 감시값을 바탕으로, 15분 window 안에 4번의 anomaly (3 sigma 이상 측정치)가 발생하면 교란이라고 판단하는 기법을 설계하였다. 이때 오경보율은 $1.4e-6$ 수준으로 나타났다. 설계한 기법을 2011 도호쿠 대지진에 적용하여 검출성능을 검증한 결과, 근거리 및 원거리에서 교란검출이 성공적으로 이루어졌고, 저장각 오차에 의한 오경보를 방지하는 효과를 확인하였다.

Acknowledgments

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

References

[1] C. O. Hines, "Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights," *Canadian Journal of Physics*, Vol. 38, No. 11, pp. 1441-1481, 1960.
 [2] W. R. Peltier, and C. O. Hines. "On the possible detection of tsunamis by a monitoring of the ionosphere," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 81, No. 12, pp. 1995-2000, 1976.

- [3] N. P. Perevalova, V. A. Sankov, E. I. Astafyeva, and A. S. Zhupityaeva, "Threshold magnitude for ionospheric TEC response to earthquakes," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 108, No. 9, pp. 77-90, 2014.
- [4] Y.M.Yang, et al. "Tohoku Oki earthquake caused major ionospheric disturbances at 450 km altitude over Alaska," *Radio Science*, Vol. 49, No. 12, pp. 1206-1213, 2014.
- [5] S. Kang, et al., "Analysis on Ionospheric Trend by Latitude/Season/Solar activity and Ionospheric Disturbances Detection Method," in *Proceeding of the 2017 IPNT Conference*, Jeju: Korea, pp.426-429, Nov. 2017.
- [6] B. Park, A study on reducing temporal and spatial decorrelation effect in GNSS augmentation system : consideration of the correction message standardization, Ph. D. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea, 2008.
- [7] J. E. Titheridge, "Changes in atmospheric composition inferred from ionospheric production rates," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 36, No. 7, pp. 1249-1257, 1974.
- [8] J. Park, et al., "GPS discrimination of traveling Ionospheric disturbances from underground nuclear explosions and earthquakes," *Navigation*, Vol. 61, No. 2, pp. 125-134, 2013.
- [9] D. Han, et al., "Modeling of GPS measurement noise for estimating smoothed pseudorange and ionospheric delay," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 602-610, 2012.



강 선 호 (Seonho Kang)

2017년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2017년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사과정
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 전리층



송 준 솔 (Junesol Song)

2008년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2016년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학박사)
2016년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 (박사 후 연구원)
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 실시간 정밀 측위 (RTK, Network RTK)



김 오 종 (O-jong Kim)

2011년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2013년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학석사)
2013년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정
※ 관심분야 : Alternative PNT, Cycle ambiguity resolution, Cubesat



기 창 돈 (Changdon Kee)

1984년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학사)
1986년 2월 : 서울대학교 항공공학과 (공학석사)
1994년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
1996년 9월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 교수
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 보정위성항법시스템, 광역보정위성항법시스템, 초정밀위치결정시스템, 우주비행체 자세결정, 무인항공기 자동제어 시스템, 실내용 자동항법시스템, 항공교통관제시스템