

GNSS 신호를 이용한 지진에 의한 전리층 교란의 주파수 분석

Analysis of Frequency of Seismogenic Ionospheric Disturbance by using GNSS Signal

김부겸¹ · 강선호¹ · 한덕화¹ · 송준솔² · 기창돈^{1*}

¹서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계연구소

²프랑스 국립 항공대학교

Bu-gyeom Kim¹ · Seon-ho Kang¹ · Deok-hwa Han¹ · June-sol Song² · Chang-don Kee^{1*}

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering and Institute of Advanced Aerospace Technology, Seoul National University

²Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC), France

[요 약]

규모가 큰 지진에 의해 발생한 에너지는 전리층까지 도달하여 교란을 발생시킨다. GNSS (global navigation satellite system) 위성의 신호의 전리층 지연을 분석하면 해당 교란을 검출할 수 있다. 지진에 의한 교란 검출에는 주로 band-pass filter가 사용되는데, 교란의 주파수에 맞는 주파수 대역 설정이 중요하다. 따라서 본 논문에선 GNSS 신호를 통해 지진에 의한 전리층 교란의 주파수를 분석하였다. 전리층 교란의 주파수 분석은 반송파의 geometry free combination으로 산출한 전리층 지연을 1 MHz high-pass filter로 처리한 후, fast Fourier transform을 통해 수행했다. 교란의 주파수 분석결과 초기 교란의 주파수는 4.5 mHz~11 mHz의 범위를 가지며, 5.7 mHz가 대표 주파수이다. 후속 교란의 경우 6 mHz~10 mHz의 주파수 대역을 가지며, 7.3 mHz가 대표 주파수로 관찰되었다.

[Abstract]

Energy which is released by a huge earthquake can reach the ionosphere and induce disturbances. Those disturbances can be detected by analyzing the global navigation satellite system (GNSS) satellite's signal. For detecting those disturbances, band-pass filter is generally used. Therefore, it is important to select proper pass band that can contain disturbance's frequency. In this paper, we analyzed a frequency of the ionospheric disturbances which are induced by earthquake by using GNSS signal. For analyzing seismogenic ionospheric disturbances, we calculated a geometry free combination of carrier phase to obtain an ionospheric delay. After that, the fast Fourier transform was applied to the 1 MHz high-passed ionospheric delay. As a result of analyzing disturbances, the frequency band of earlier disturbances was 4.5 mHz~11mHz and the representative frequency was 5.7 mHz. The frequency band of subsequent disturbances was 6 mHz~10 mHz and the representative frequency was 7.3 mHz.

Key words : Ionospheric disturbances, Frequency, High-pass filter, Fast Fourier transform.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.6.616>



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 17 October 2018; Revised 27 November 2018

Accepted (Publication) 17 December 2018 (30 December 2018)

*Corresponding Author ; Chang-don Kee

Tel: +82-2-880-1912

E-mail: kee@snu.ac.kr

1. 서론

GNSS (global navigation satellite system) 위성의 신호 내에는 위성의 궤도 오차, 시계 오차와 대류층 지연, 전리층 지연 등 여러 오차 요소들이 포함되어 있다. 신호의 전리층 지연은 전리층 전자 밀도에 영향을 받기 때문에 이를 통해 지구의 전리층 환경을 연구할 수 있다.

규모가 큰 지진이 발생하면 발생한 에너지가 파동의 형태로 대류층에 전파되고 이것이 전리층까지 도달하여 TID (traveling ionospheric disturbance)를 유발한다. 해당 TID는 GNSS의 신호를 통해 검출 가능하며 S. Jin (2015), T. Tsugawa (2011)를 비롯한 선행연구에서 그 특성을 분석하였다 [1],[2].

지진에 의한 TID의 교란 원으로는 Rayleigh wave, AGW (acoustic gravity wave), tsunami가 있다. J.Y Liu (2011)와 P. Lognonné (1988)에 따르면, 가장 먼저 검출되는, 초기교란의 교란원은 Rayleigh wave이다. Rayleigh wave에 의한 초기 교란은 지진 발생 이후 7~10분 후 전리층에서 관찰되기 시작하여 6분간 지속된다 [3],[4]. AGW와 tsunami는 초기 교란 이후 검출되는 후속 교란의 원인으로 지목된다. J.Y Liu (2010)에 의하면, AGW는 지진에 의해 발생한 acoustic wave와 gravity wave가 혼합된 것으로 Rayleigh wave와 마찬가지로 지진 발생 10분 후 전리층에 도달해 교란을 발생시킨다 [5]. G. Occhipinti (2008)에 따르면 tsunami에 의한 교란은 해상의 tsunami wave의 진행 방향과 특성을 따른다 [6].

J.Y Liu (2011)의 연구를 비롯한 많은 선행 연구에서 band-pass filter를 사용하여 교란을 검출한다. 해당 연구들에선 주파수 대역을 넓게 선정하여 교란을 검출한 후 교란의 도달 시간, 속도 등을 추가로 분석하여 교란을 교란원에 따라 분류한다. 그러나 각기 다른 교란원에 의한 교란이 동시에 도달할 경우, 상기 방법으론 각 교란의 특성을 분석하는데 어려움이 있다. 이때 각 교란의 주파수 대역을 알고 있어 주파수 대역을 특정할 수 있다면, 각 교란의 특성을 분석하는데 도움이 될 것이다.

초기 교란의 주파수를 분석한 선행 연구로는 앞선 P. Lognonné (1988)의 연구가 있다. 해당 연구 결과 초기 교란의 주파수는 4.4 mHz로 분석이 되었는데, 이는 지진이 발생했을 때 진앙지 근방 대류층에서 전파된 에너지를 분석한 것이기 때문에 전리층에 나타나는 초기 교란의 주파수가 이와 동일하지 확인할 필요가 있다 [3]. 지진의 주된 주파수로 판단되는 3-7 mHz에 대한 연구는 M. Matsumura (2011)의 연구가 있는데, 해당 연구는 위의 주파수 대역을 이용하여 시뮬레이션을 생성하여 Tohoku지진의 결과와 비교한 것이다 [7]. 따라서 실측 데이터를 분석하여 실측의 주파수를 분석할 필요가 있다. G. Occhipinti (2013)의 연구는 wavelet transform을 통해 전리층 지연에서의 tsunami에 의한 교란의 주파수를 분석한 결과가 있고, tsunami의 주파수는 3 mHz이하로 분석된다 [8].

본 연구에서는 지진에 의한 전리층 교란의 주파수 분석을 위하여, 실측 GPS 신호의 전리층 지연을 분석하였다. 교란의 주파수를 특정하기 위해 전리층 지연의 일변화에 의한 경향성을 제거하고자 high-pass filter를 사용했고, 처리한 전리층 지연에 fast Fourier transform 기법을 적용하여 교란의 주파수를 분석하였다.

II. 지진에 의한 전리층 교란의 주파수 분석

2-1 GPS 데이터 전리층 지연

지진 발생 이후 GPS신호의 전리층 지연에선 정상 상황의 통계에서 벗어난 이상 값 (anomaly)이 관찰된다. GPS신호의 전리층 지연을 산출하기 위해 본 연구에서는 L1/L2 반송파의 GFC (geometry free combination) 을 이용했다.

$$GFC = \frac{\phi_{L1} - \phi_{L2}}{\gamma - 1} = I + \frac{1}{\gamma - 1} (\Delta N \lambda + \Delta \epsilon) \quad (1)$$

식 (1)에서 ϕ 는 각 주파수의 반송파를 의미하며, γ 는 L1/L2 주파수의 비의 제곱을 의미한다. I는 반송파에서의 전리층 지연을, N은 각 주파수의 미지 정수를 의미하며, ϵ 는 나머지 오차 요소를 의미한다.

2-2 High-pass Filter

그림 1을 통해 확인할 수 있듯이 식 (1)을 통해 산출한 전리층 지연은 일변화에 따른 경향성을 보인다. 이 경향성은 교란에 비해 우세하기 때문에 경향성을 제거하지 않고는 교란의 주파수를 분석하는데 어려움이 있다.

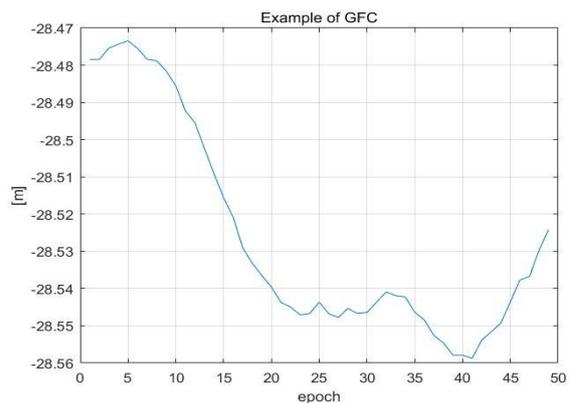


그림 1. GFC 예시
Fig. 1. Example of a GFC.

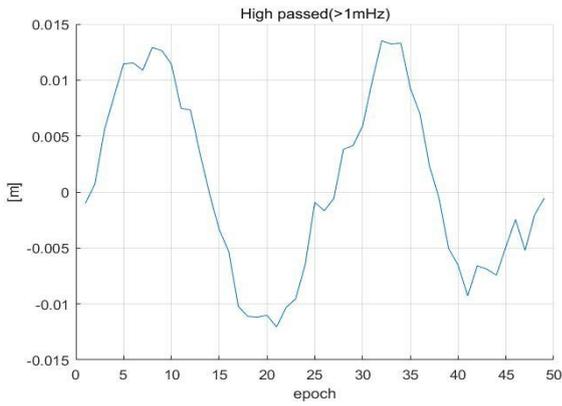


그림 2. High-pass filter를 적용한 GFC 결과 예시
Fig. 2. Example of a high-passed GFC.

따라서 본 연구에선 전리층 지연에 HPF (high-pass filter)를 적용하여 분석 데이터로 사용했다.

일변화에 따른 전리층 지연의 경향성 주기는 약 6 시간으로, 주기의 역수로 구할 수 있는 주파수는 0.05 mHz 정도이다. 따라서 1 mHz HPF를 전리층 지연에 적용하면 경향성을 제거할 수 있고 그 결과가 그림 2이다.

2-3 주파수 분석 기법

FFT (fast Fourier transform)는 신호의 주파수를 분석하는데 사용되는 기법으로 Park(2013)의 연구에선 이를 사용하여 교란을 분석하였다 [9]. 본 연구에서도 FFT를 사용하여 high-passed된 교란의 주파수 분석하였다.

III. Tohoku 지진 데이터 분석

3-1 분석 데이터 선정

2011년 3월 15일 5:46(UTC) 발생한 Tohoku 지진의 경우 전리층 교란을 발생시키기에 충분한 규모(M 9.0)임과 동시에, 진앙지 주변 GNSS 데이터를 획득할 수 있는 기준국의 수가 충분히 존재한다. 따라서 본 연구에서는 국토 지리정보원에서 제공하는 30 초 간격의 한국 기준국 데이터 45 개를 사용하여 Tohoku 지진에 의한 교란을 분석했다. 기준국의 위치는 그림 3에서 확인할 수 있다.

3-2 정상 상황의 주파수 분석

분석 결과 지진에 의한 교란은 PRN 26번과 PRN 5번에서 명확하게 나타난다. 그림 4는 PRN 26번 데이터의 예시이며, 그래프에서 점선은 지진 발생 시간이다.

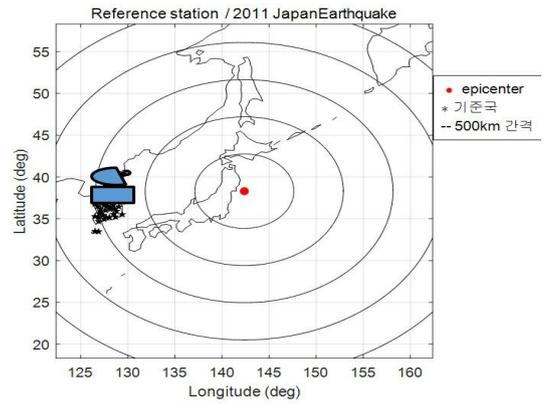


그림 3. Tohoku 지진 진앙지 및 사용 기준국
Fig. 3. Epicenter of the Tohoku earthquake and reference stations.

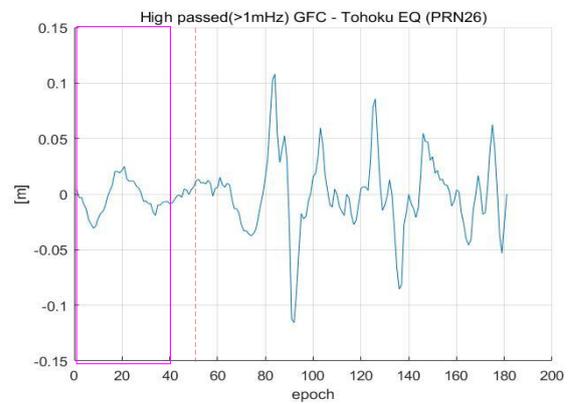


그림 4. 정상 상황 분석 영역
Fig. 4. Analysis area of the undisturbed GFCs.

1 mHz HPF를 적용하여 경향성을 제거하기 때문에 경향성에 해당하는 주파수는 존재하지 않는다. 그러나 교란이 존재하지 않는 정상상황에서 경향성에 의한 주파수 이외의 주파수 대역이 존재할 수 있고, 교란의 주파수를 특정하기 위해선 해당 주파수 대역을 파악할 필요가 있다. 따라서 지진 발생 이전 데이터를 정상상황이라 가정하여 그림 4와 같이 지진 발생 20 분 전을 분석영역 (0-40 epoch)으로 설정해 주파수 분석을 진행하였다.

그림 5는 한국 기준국 45 개의 PRN 26번 데이터의 분석 결과를 분석의 편의를 위해 각각의 최댓값으로 정규화해 겹쳐 도시한 그래프이다. 그림 6은 그림5의 결과의 평균값을 나타낸 그래프로, 그림 6에서 주파수의 크기가 최대 주파수의 50% 이상을 분석 영역의 주파수 대역으로 판단한다면 정상 상황의 주파수 대역은 1~3 mHz이다. 이는 PRN 5번에서도 동일하다.

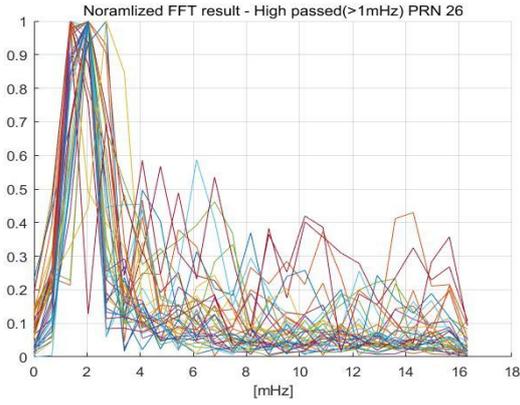


그림 5. 정상 상황의 주파수 분석 결과
Fig. 5. Analysis result of the frequency of undisturbed GCFs.

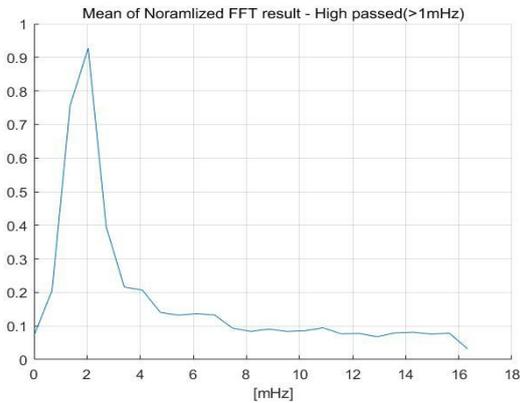


그림 6. 정상 상황의 주파수 분석 결과 (평균값)
Fig. 6. Analysis result of the frequency of undisturbed GCFs (mean).

3-3 초기 교란의 분석

그림 7은 PRN 26번 PRN 5번의 IPP (ionospheric pierce point) track으로 그래프의 O 표시가 지진 발생 시점의 IPP 위치이며, X 표시는 위성이 지는 시점의 IPP 위치를 나타낸다. 그림 7에서 PRN 26번의 IPP track을 보면 모든 IPP가 진앙지로부터 반경 1,000 km 이내에 존재한다. 반면에 PRN 5번의 IPP는 진앙지에서 1,000 km 밖에도 존재한다.

G. Occhipinti(2013)의 연구에 따르면 후속 교란의 전파 범위는 500~1,000 km인 반면, 초기 교란은 1,000 km 이상에서도 검출된다. [8]. 따라서 IPP 분포 상 PRN 26번에는 후속 교란이 관찰될 가능성이 높으며, 후속 교란이 언제 IPP에 도달하지 모르는 상황에서 PRN 26번을 사용하면 초기 교란의 주파수를 특정 하는데 어려움이 있을 것이라 판단했다. 그런 이유로 초기 교란의 주파수 분석에는 PRN 5번의 데이터 중 진앙지로부터 IPP까지 거리가 1,000 km 이상의 것을 사용했다.

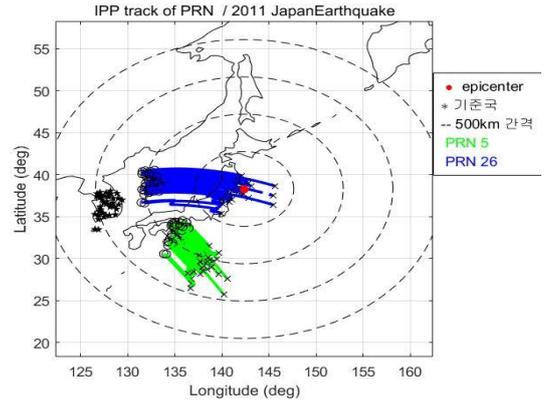


그림 7. PRN 26, PRN 5번의 IPP track
Fig. 7. IPP track of PRN 26, PRN 5.

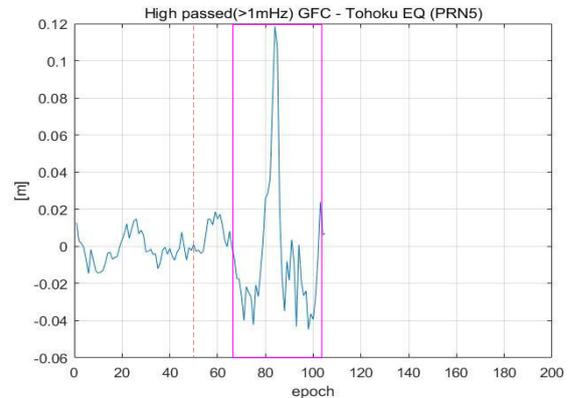


그림 8. 초기 교란 분석 영역 (PRN 5)
Fig. 8. Analysis area of the earlier disturbances (PRN 5).

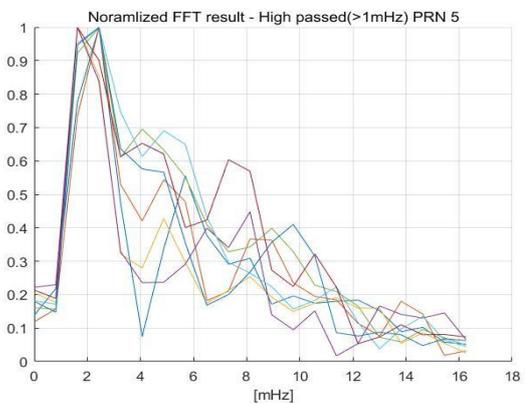


그림 9. 초기 교란의 주파수 분석 결과
Fig. 9. Analysis result of the frequency of earlier disturbances.

S. Jin (2015)의 연구에 의하면, 초기 교란의 전파 속도는 3.5 km/s, 교란이 전리층에 도달하기 까지 걸리는 시간은 약 10 분, 교란의 지속 시간은 6 분이다 [1]. 이를 참고하여 그림 8과 같이 분석 영역(65~100 epoch)을 선정했다.

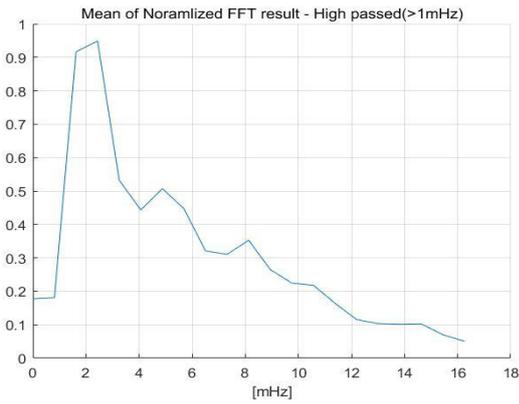


그림 10. 초기 교란의 주파수 분석 결과 (평균값)
Fig. 10. Analysis result of the frequency of earlier disturbances (mean).

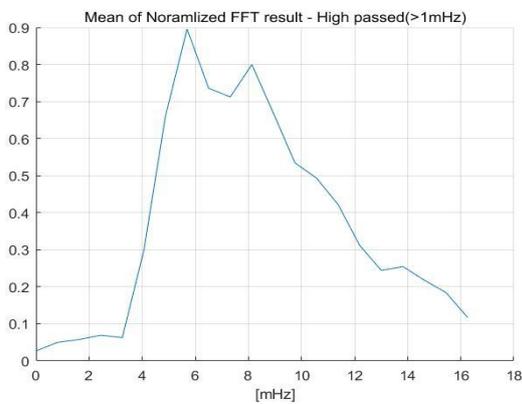


그림 11. 초기 교란의 주파수 분석 결과 (>3 mHz)
Fig. 11. Analysis result of the frequency of earlier disturbances (>3 mHz).

PRN 5번의 경우 IPP의 위치상 교란은 지진 발생 이후 약 15 분 후에 관찰된다. 분석 영역을 설정한 후 정상 상황의 분석 영역과 동일하게 주파수 분석을 진행하였다. 분석 결과 그림 6과 그림 10을 비교했을 때 정상 상황의 주파수 영역 이외의 주파수가 포함되어 있을 것이라 추측할 수 있지만, 정상 상황의 주파수가 우세하여 실제 교란의 주파수를 분석하는데 어려움이 있다.

초기 교란의 주파수를 면밀히 분석하고자 선행 연구를 참고하였다. S. Jin(2015)에 따르면 Rayleigh wave의 주파수는 3~7 mHz이다 [1]. 해당 분석에 근거하여 HPF의 Cut-off Frequency를 1 mHz에서 3 mHz로 높여 추가로 분석하였다. 분석 결과 그림 11을 통해 확인할 수 있듯이 4.5~11 mHz, 특히 5.7 mHz가 가장 주된 주파수 인 것을 확인할 수 있었다

3-4 후속 교란의 분석

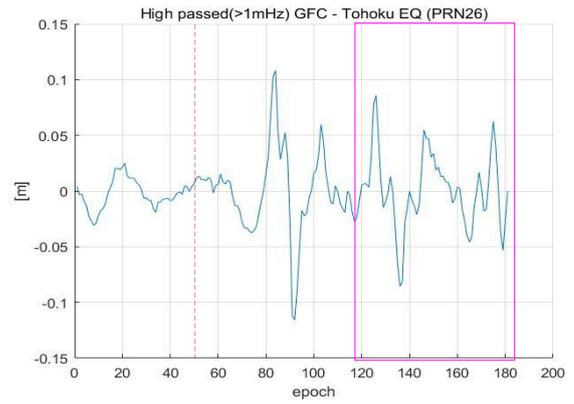


그림 12. 후속 교란 분석 영역
Fig. 12. Analysis area of the subsequent disturbances.

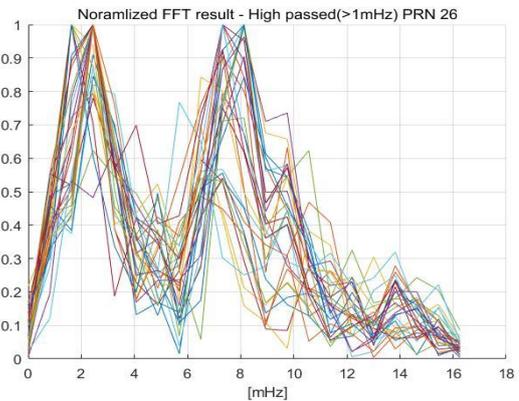


그림 13. 후속 교란의 주파수 분석 결과
Fig. 13. Analysis result of the frequency of subsequent disturbances.

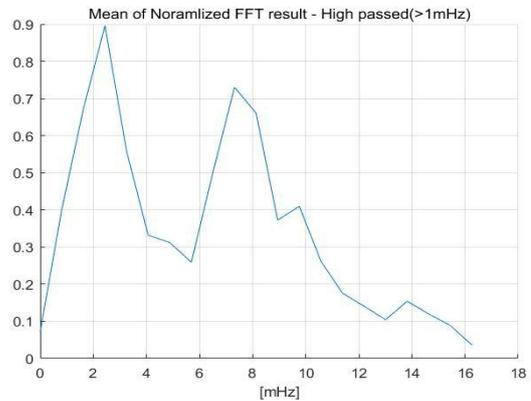


그림 14. 후속 교란의 주파수 분석 결과 (평균값)
Fig. 14. Analysis result of the frequency of subsequent disturbances (mean).

후속 교란 검출에는 PRN 26번을 사용했다. 이는 앞서 언급했듯이 PRN 26번의 경우 지진 발생 이후 위성이 질 때까지 IPP의 위치가 진앙에서 1,000 km 이내에 존재하여 후속 교란의 도달 가능성이 높기 때문이다.

앞선 초기 교란의 경우 분석 영역을 교란의 전파 속도와 지속 시간을 참고하여 설정했다. 그러나 후속 교란의 경우 교란의 전파 속도와 지속 시간이 명확하지 않아 교란의 도달 시간을 특정할 수 없기 때문에 본 연구에선 초기 교란이 지나간 이후의 관찰된 교란을 후속 교란으로 보았다. PRN 26 번의 경우 IPP의 위치상 초기 교란이 약 14 분 후에 관찰되어 6 분간 지속된다. 따라서 지진 발생 20 분(40 epoch) 후 일정 시간 간격을 두고 위성이 질 때까지를 후속 교란의 분석 영역(120~end epoch)으로 선정했다.

그림 12가 분석 영역을 표시한 그래프이고, 그림 13은 앞선 그래프와 마찬가지로 주파수의 최댓값으로 정규화 한 FFT 결과를 겹쳐 도시한 것이다. 그림 14를 통해 확인했을 때 후속 교란의 경우 초기 교란과 달리 1 mHz로 HPF 결과에서도 정상상황과 다른 주파수 영역이 명확히 존재함을 알 수 있다. 정상 상황 주파수를 제외한 후속 교란의 주파수는 6~10 mHz, 특히 7.3 mHz이다.

서론에서 언급했듯이 후속 교란의 교란원으로 AGW와 tsunami가 있다. 따라서 분석한 주파수가 어떤 교란원에 의한 주파수인지 판단해야 할 필요가 있다. 2011 Tohoku 지진은 tsunami를 동반한 큰 지진이였다. 그런데, tsunami의 경우 일본의 동쪽으로 진행하여 일본 서쪽에 미친 영향은 미미했다. G. Occhipinti (2008)에 의하면 tsunami에 의한 교란의 진행 방향은 tsunami wave의 진행 방향과 일치한다 [6]. 즉 tsunami wave에 의한 전리층 교란 또한 주로 일본 동쪽의 전리층에 영향을 주었을 것이라 판단된다. 그림 7에서 확인 할 수 있듯이 PRN 26번은 지진 발생 이후 위성이 질 때까지 IPP가 일본의 서쪽에 위치한다. 그렇기 때문에 분석한 후속 교란의 교란원이 tsunami일 가능성은 낮다고 판단했다.

IV. 결 론

본 연구는 지진에 의한 전리층 교란의 주파수 분석을 수행했다. 분석한 지진은 2011년에 발생한 일본 Tohoku 지진이며, 국토지리정보원에서 제공하는 45 개 기준국의 30 초 간격 데이터를 사용했다.

주파수 분석을 수행한 결과 초기 교란에 의한 주파수는 4.5~11 mHz에서 우세하며 특히 5.7 mHz가 대표 주파수로 분석 되었다. 후속 교란의 주파수는 6~10 mHz에서 우세하며 7.3 mHz가 대표 주파수이다. 본 연구에서 분석한 후속 교란은 AGW에 의한 교란을 의미하며 tsunami에 의한 교란은 분석 할 수 없었다. 분석 결과 Rayleigh wave에 의한 초기 교란과 AGW에 의한 후속 교란의 주파수 대역은 상당 부분 공유한다. 그럼에도 대표가 되는 주파수가 다르기 때문에 band-pass filter의 주파수 대역을 각 교란의 대표 주파수를 포함하도록 각기 설정한다면 추가적인 교란 분류법 설계 없이, 서로 다른 교란원에 의한 교란의 특성 분석을 효과적으로 수

행할 수 있을 거라 생각한다.

앞서 언급한 이유로 현재 사용한 데이터로는 tsunami에 의한 교란의 주파수 분석을 수행할 수가 없었다. 이는 일본 서쪽에 위치한 한국 기준국 데이터만을 사용했기 때문으로 판단된다. 따라서 지진 발생 당시 IPP가 일본 동쪽에 위치한 국외 기준국의 데이터를 사용한다면 tsunami에 의한 교란의 주파수 분석도 수행 할 수 있을 거라 전망한다.

Acknowledgments

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

References

- [1] S. Jin, G. Occhipinti, and R. Jin, "GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics," *Earth-Science Reviews*, Vol. 147, pp. 54-64, Aug, 2015.
- [2] T. Tsugawa, A. Saito, and Y. Otsuka, "Ionospheric disturbances detected by GPS total electron content observation after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," *Earth Planets Space*, Vol. 63, pp. 875-879, July, 2011.
- [3] J. Y. Liu, C. H. Chen, and C. H. Lin, "Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku Earthquake," *Journal of Geophysical Research*, Vol. 116, A06319 pp. 1-5, June, 2011.
- [4] P. Lognonné, E. Clévéde, and H. Kanamori, "Computation of seismograms and atmospheric oscillations by normal-mode summation for a spherical earth model with realistic atmosphere," *Geophysical Journal International*, Vol. 135, Issue 2, pp. 388-406, June, 1988
- [5] J. Y. Liu, H. F. Tsai, and C. H. Lin, "Coseismic ionospheric disturbances triggered by the Chi-Chi earthquake," *Journal of geophysical research*, Vol. 115, A08303, pp. 1-12, Aug, 2010
- [6] G. Occhipinti, A. Komjathy, and P. Lognonné, "Tsunami Detection by GPS," *GPS World*, pp. 50-57, Feb, 2002
- [7] M. Matsumura, A. Saito, and T. Iyemori, "Numerical simulations of atmospheric waves excited by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake," *Earth, Planets and Space*, Vol. 63, Issue 7, pp. 63-68, July, 2011
- [8] G. Occhipinti, L. Rolland, and P. Lognonné, "From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: The systematic GPS detection of the

ionospheric signature induced by tsunamigenic earthquakes,”
Journal of geophysical research, Vol. 118, Issue 6, pp.
3626-3636, June, 2013

discrimination of traveling ionospheric disturbances from
underground nuclear explosions and earthquakes,” *Navigation*,
Vol. 61, Issue 2, pp. 125-134, June, 2014

[9] J. H. Park, D. Grejner-Brzezinska, and R. R. B von Frese, “GPS



김 부 검 (Bu-Gyeom Kim)

2018년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2018년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 석사과정
※ 관심분야 : 위성항법시스템, SBAS, 전리층



강 선 호 (Seon-ho Kang)

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



한 덕 화 (Deok-hwa Han)

2011년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (공학사)
2018년 2월 : 서울대학교 대학원 기계항공공학부 (박사)
2018년 3월 ~ 현재 : 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 (박사 후 연구원)
※ 관심분야 : 위성항법시스템, SBAS, 전리층



송 준 솔 (June-sol Song)

2008년 8월 : 서울대학교 기계항공공학부 (학사)
2016년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (박사)
2016년 3월 ~ 2018년 4월 : 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 (박사 후 연구원)
2018년 6월 ~ 현재 : Ecole Nationale de l'Aviation Civile, France (박사 후 연구원)
※ 관심분야 : 위성항법시스템, 실시간 정밀 측위 (RTK, Network RTK)



기 창 돈 (Chang-don 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