

Ionospheric TEC Disturbances Triggered by the 2022 Nuri Rocket Launch

Byung-Kyu Choi[†], Dong-Hyo Sohn

Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

ABSTRACT

The Nuri rocket developed by South Korea was launched at approximately 07:00 UT on June 21, 2022. We use GPS observations obtained from the Korean GNSS network to analyze ionospheric total electron content (TEC) disturbances induced by the 2022 Nuri rocket launch. TEC disturbances are observed south over South Korea 4-5 min after the rocket launch. In addition, the maximum depletion in the vertical TEC shows approximately 8 TEC units (TECU). We also compute a horizontal velocity from initial ionospheric disturbances triggered by the 2022 Nuri rocket launch. Its velocity is about 1.4 km/s. It may be related to the rocket's flight trajectory at the observation time of the ionospheric TEC disturbance.

Keywords: Nuri rocket, GNSS, ionosphere, TEC

1. INTRODUCTION

전리층은 태양활동, 지자기 폭풍, 지구의 지진활동 등에 의해 쉽게 영향을 받는다 (Fedrizzi et al. 2005, Mannucci et al. 2005, Chen et al. 2011). 그리고 몇몇 연구들은 전리층 교란이 뇌우 (thunderstorms)와 태풍 (typhoons) 등의 대류권 활동에 의해서 관측된다고 설명했다 (Polyakova & Perevalova 2011, Shao et al. 2013).

게다가 미사일 또는 로켓발사에 의해서 전리층 교란이 발생할 수 있다. 최근에는 전리층 교란을 검출하기 위해 Global Navigation Satellite System (GNSS)를 이용하는 여러 연구가 수행되었다. Ozeki & Heki (2010)는 일본내 GNSS 기준국망을 이용해서 북한 탄도미사일에 형성된 전리층 교란을 관측했다. 또한 Kakinami et al. (2013)은 GNSS 기준국의 관측자료를 이용해서 2012년 12월 12일에 북한에서 발사된 미사일에 의해 전리층 교란이 검출되었다고 보고했다. Lin et al. (2017)은 2016년 1월 17일 Space Falcon 9 로켓발사에 의해 동심원으로 이동하는 전리층 교란을 GNSS를 통해 관측하였다. Chou et al. (2018)은 GNSS를

SpaceX 발사에 따라 약 1,450 km 거리까지 전파되는 전리층 교란을 검출하였다. 2016년 2월 7일 광명성 4호 로켓이 북한의 서해 우주센터에서 발사되었다. Choi & Kil (2017)은 광명성 4호 로켓에 의해 유도된 전리층 TEC 교란을 국내의 GNSS 기준국망을 이용해서 관측하였다. 또한 그들은 TEC 교란의 초기시점을 이용해서 광명성 4호의 수평속도가 약 1.6 km/s라는 것을 추정한다.

한국형 발사체 누리호 (Nuri)가 2022년 6월 21일 16시 KST (07 UT)에 고흥에 위치한 나로우주센터에서 발사되었고, 목표로 했던 700 km 고도에 안착하였다. 누리호는 총 3단 액체엔진으로 구성되며, 1단과 2단은 각각 75톤급 엔진 4기와 1기, 그리고 3단은 7톤급 엔진으로 이루어져 있다. 일반적으로 1단 추진체는 전리층 고도에 도달하지 못하기 때문에, 2단 추진체에서 배출되는 배기가스에 의해서 전리층 TEC 교란이 발생한다. 그리고 로켓발사에 의한 전리층 TEC 교란의 특징은 2단 추진체로부터 배출되는 배기가스의 화학적인 구성, 배기가스 양 등과 직접적인 관련이 있다.

본 연구에서는 2022년 누리호 발사에 의한 전리층 TEC 교란을 분석한다. 이를 위해 우리는 한반도에 위치한 GNSS 기준국망의 관측자료를 이용하여 TEC 값을 계산하고, 시간변화에 따른 TEC의 변화특성을 분석한다. 추가적으로 TEC 교란에 대한 초기시점 정보를 이용해서 누리호의 수평속도를 추정한다.

2. TEC ESTIMATION

본 연구에서는 전리층의 TEC 변화를 감시하기 위해 한반도에

Received Jul 25, 2022 Revised Aug 12, 2022 Accepted Aug 15, 2022

[†]Corresponding Author

E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

Tel: +82-42-865-3237 Fax: +82-42-861-5610

Byung-Kyu Choi <https://orcid.org/0000-0003-2560-6714>

Dong-Hyo Sohn <https://orcid.org/0000-0001-9719-702X>

위치한 40개의 GNSS 기준국을 이용한다. 각각의 기준국에는 이중주파수 관측자료를 수신할 수 있는 측지용 GNSS 수신기와 안테나가 장착되어 있다. 국토지리정보원은 국내 GNSS 기준국에서 관측된 자료를 통합하여 관리하고 있으며, 실시간 또는 후처리로 GNSS 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 국토지리정보원에서 제공하는 RINEX 형식의 일일 관측자료를 사용한다.

이중주파수 GNSS 신호를 이용해서 전리층의 TEC를 추정하는 방법은 오래전 여러 문헌에서 소개되었다 (Mannucci et al. 1998, Jakowski et al. 1999, Otsuka et al. 2002). 이중주파수 관측자료는 전리층의 지연오차를 제거하거나, 반대로 전리층의 TEC를 계산하는데 사용될 수 있다.

전리층의 TEC는 식 (1)과 같이 이중주파수 관측자료의 ‘Geometry-free’ 선형조합에 의해 계산된다 (Cai et al. 2013).

$$L_2 - L_1 = I \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 \cdot f_2^2} \right) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + d_r + d^s \quad (1)$$

여기에서 L_1 과 L_2 는 각각 GPS 신호의 반송파 위상, f_1 과 f_2 는 각각 1575.42 MHz와 1227.60 MHz를 갖는 주파수이다. λ_1 과 λ_2 는 각각 GPS 신호의 파장이다. 그리고 N_1 과 N_2 는 모호수를 의미한다.

각각의 주파수(신호)에는 위성과 수신기 등 하드웨어와 관련이 있는 바이어스가 존재한다. TEC를 계산하는 과정에서 식 (1)처럼 ‘Geometry-free’ 선형조합을 사용하게 되고, 이 조합에 의해 각각의 신호에 내재되어 있는 바이어스는 차분된 형태로 바뀌게 되는데 이것이 바로 ‘Differential Code Biases (DCB)’이다. DCB는 TEC를 추정하는데 반드시 고려가 되어야 하며, TEC 정확도에 큰 영향을 줄 수 있다 (Meza 1999). 본 연구에서는 스위스 CODE에서 제공하는 한달평균의 위성 DCB값 (d)을 사용하고, 위성 DCB는 CODE 분석센터 (<http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>)에서 다운로드 할 수 있다. 또한 수신기 DCB값 (d_r)은 가중최소자승법 (Weighted least squares estimation)을 적용하여 Fig. 1과 같이 일일 평균값으로 추정한다. Fig. 1에서 각각의 GNSS 기준국에서 추정된 수신기 DCB는 서로 다른 값을 갖고 있으며, 특히 이 값들은 -20 ns에서 8 ns까지 큰 차이를 보이고 있다.

3. TEC ANALYSIS

전리층의 TEC는 우주환경 변화에 의해 영향을 많이 받는다. 특히 지역적인 전리층 교란은 지자기 폭풍과 관련이 있을 수 있기 때문에 본 연구에서는 2개의 지자기 지수를 고려했다. Fig. 2는 2022년 6월 1일부터 30일까지 Dst와 Kp 지수의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 붉은색 네모박스는 누리호가 발사된 6월 21일 지자기 지수의 변화이다. 30일간의 지자기 지수를 비교해 보면, 6월 21일의 지자기 조건 (Geomagnetic conditions)은 매우 안정적인 것을 알 수 있다. 또한 누리호의 발사시간 (07 UT, 16 KST)에서 Dst 지수는 -4 nano-Tesla (nT)였고, 3시간 평균값으로 제공되는 Kp 지수는 -2 였다. 이러한 지자기 지수로부터 우리는 누리호가 발사된 날짜 (6월 21일)와 발사시간 모두에서 지자기 변화가 안정적이었다는 것을 확인할 수 있었다. 지자기 변화는 누리호 발사

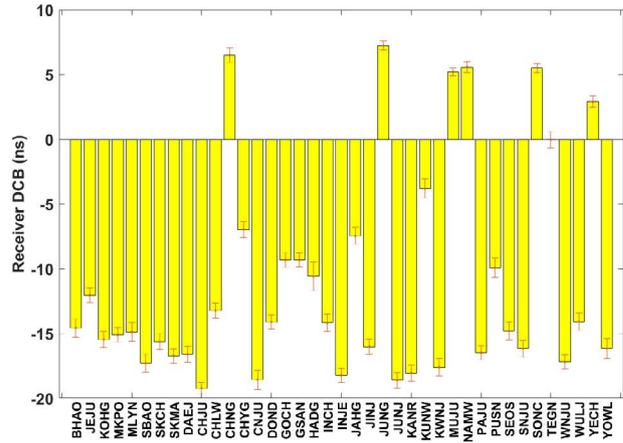


Fig. 1. GPS receiver C1-P2 DCB values (ns).

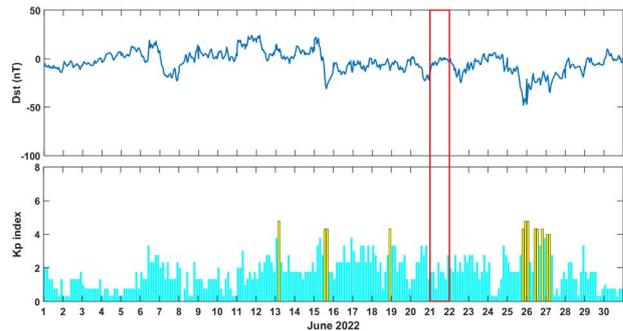


Fig. 2. The variation of the Dst and Kp indices from June 1 to June 30, 2022. The red square represents the launch day of the 2022 Nuri rocket.

에 의해 유도된 TEC 교란에 직접적으로 영향을 줄 수 있기 때문에 사전에 지자기 특성을 분석하는 것이 중요하다.

나로 우주센터에서 발사된 누리호의 비행궤적은 발사 지점을 기준으로 남쪽방향으로 지향했다. Fig. 3은 2022년 6월 21일 GPS 19번 위성의 전리층 투과지점 (Ionospheric Pierce Point, IPP)을 2차원 맵으로 나타낸 것이다. 운이 좋게도 누리호가 진행하는 경로상에 Fig. 3과 같이 GPS 19번 위성이 위치하고 있다. GPS 19번 위성의 IPP는 한반도 내륙을 통과하고 지구 적도방향을 향하고 있다. IPP 지상궤적에 표시된 숫자는 UT시를 의미한다.

Fig. 4는 2022년 6월 21일 누리호 발사 이전과 이후의 수직방향 TEC의 변화를 보여주고 있다. 누리호 발사 (07 UT) 이후 4분에서 5분 사이에 일부의 기준국에서 급격한 TEC 감소가 관측되었다. 특히 CHJU 기준국의 경우에는 비이상적인 수직방향 TEC의 큰 고갈 (depletion)이 관측되었고, 그 크기는 약 8 TECU (TECU, 1 TECU ~ 10^{16} electrons/m²) 정도이다. 이외에도 JEJU, KOHG, CHYG, JAHG, JINJ, JUNG, KWNJ, NAMW, 그리고 SEOS 기준국 등에서 TEC의 큰 변화가 관측되었다. 감소된 TEC는 서서히 회복 (Recovery)되는 특징을 보이지만, 한시간이 지난 08:00 UT까지도 완전히 회복되지는 않았다.

로켓 발사에 의해 유도되는 급격한 TEC 감소는 화학적 반응으로 설명할 수 있다. 로켓에서 분출되는 배기가스는 주로 H₂O와 H₂ 분자로 구성된다. 물 분자 (H₂O)는 대기중의 산소이온 (O⁺)과 결합하여 식 (2)와 같이 물 이온 (H₂O⁺)을 형성한다.

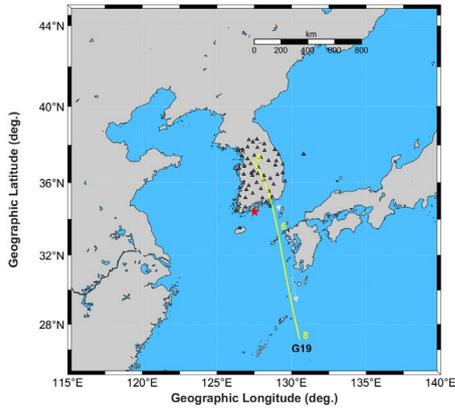


Fig. 3. The IPP trajectories of GPS PRN 19 for 3 hours (5~8 UT) on 21 June 2022. The IPPs are calculated assuming an ionospheric shell height of 300 km. The small triangles indicate the location of the GNSS reference stations. The red star represents the launch site of the 2022 Nuri rocket.

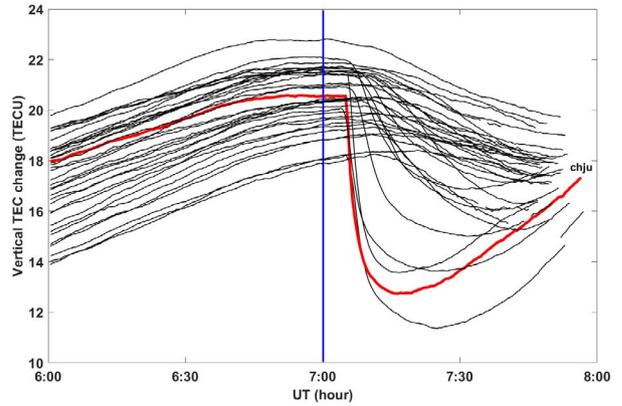


Fig. 4. Vertical TEC time series derived from the GNSS reference stations on June 21, 2022. TEC changes are obtained with the GPS PRN 19 satellite. The vertical blue-line indicates the onset time of the Nuri rocket. The red-line represents the TEC change at CHJU site.

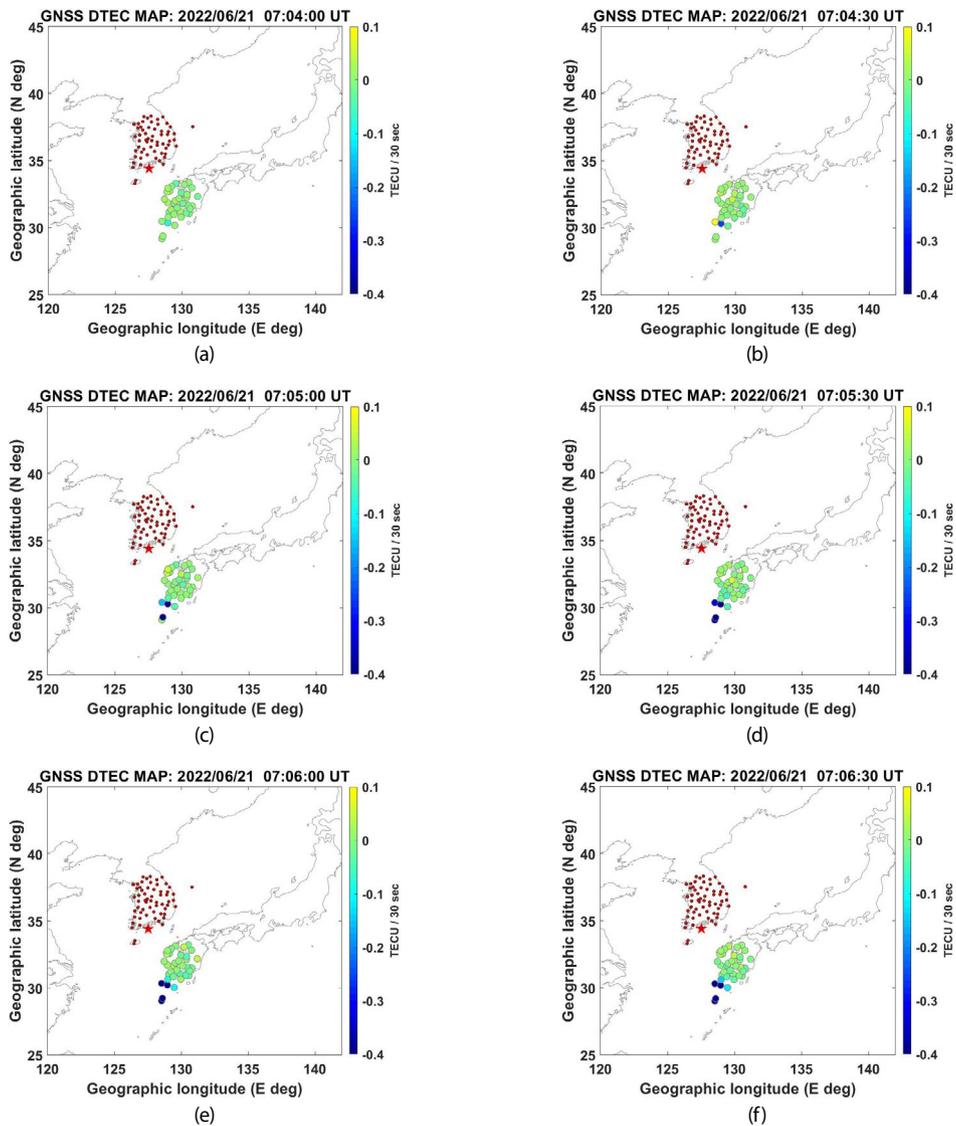


Fig. 5. Detrended TEC maps at 6 epochs from June 21 07:04:00 UT (a) to 07:06:30 UT (f) produced from the ground-based GPS observations in South Korea. Ionospheric TEC disturbances are observed ~4.5 minutes after the launch (07:00 UT) of Nuri rocket. The launch site is marked by the red star.

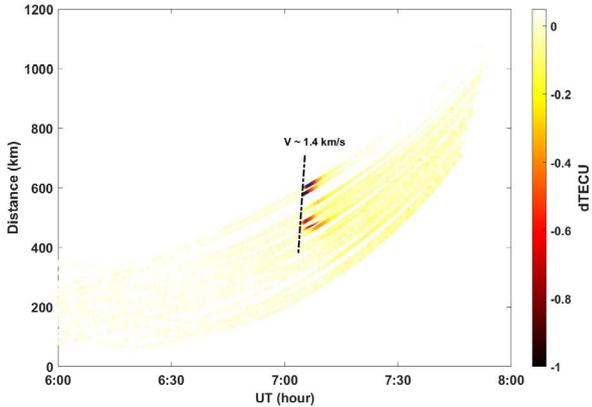
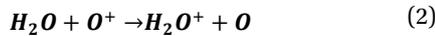


Fig. 6. The distance-time diagram of DTEC changes for ionospheric disturbances. The dashed-line denotes the velocity of the Nuri rocket in the horizontal direction.



이렇게 형성된 물 이온 (H_2O^+)은 전리층 내의 자유전자 (e^-)와 빠른 속도로 결합해서 tec의 감소를 유발하게 된다. 따라서 로켓의 추진체로부터 분사되는 물 분자의 양과 전리층내에 존재하는 자유전자의 수가 tec 변화의 핵심적인 인자라 할 수 있다. 이외에 지자기 활동 및 고층대기의 중성대기 바람장도 TEC 변화에 영향을 줄 수 있는 요인이다.

Fig. 5는 시간에 따른 전리층 TEC 변화 (Detrended TEC, DTEC)를 이차원 맵으로 표현한 것이다. Figs. 5a-f는 UT로 07시 04분부터 매 30초 간격으로 산출된 DTEC 맵을 나타내고 있다. DTEC 맵으로부터 우리는 UT로 07시 04분 30초에 처음으로 TEC의 변화가 감지된 것을 알 수 있다. 즉, 누리호 발사 이후 약 4분 30초에 한반도 남쪽에서 TEC의 변화가 검출되었다. 앞서 우리는 누리호 발사시점에 지자기에 의한 영향이 미비하다는 것을 보였다. 따라서, 이것은 누리호의 2단 추진체에서 배출된 배기가스에 의해서 전리층 TEC 교란이 발생한 것으로 추측된다. Figs. 5c-f에서 우리는 TEC 변화를 보다 구체적으로 확인할 수 있다. 일부 GNSS 기준국에서 수신한 GPS 19번 위성의 신호에서 TEC의 교란이 발생했는데, 이것은 누리호의 지상궤적과 GPS 19번 위성의 IPP 경로와 직접 관련이 있다. 그러므로 DTEC 맵으로부터 누리호의 발사궤적을 유추해 볼 수 있다.

Fig. 6은 시간과 거리에 따른 DTEC 변화를 나타내고 있다. 여기에서 거리는 누리호의 발사지점과 IPP와의 수평거리를 의미한다. 마찬가지로 누리호가 발사된 07:00 UT 이후에 전리층 TEC 교란이 발생했다. 초기 TEC 교란이 관측된 곳은 발사지점으로부터 수평거리로 약 420 km 인 지점이다. TEC 교란은 약 600 km 지점까지 관측되었고, 그 이상의 거리에서는 GPS 위성신호가 관측되지 않았다.

누리호 발사에 의해 유도된 전리층 교란의 수평속도는 교란의 초기발현 시점을 통해 대략적으로 계산될 수 있다. Fig. 6에서 검은 점선은 교란의 초기발현 시점을 연결한 것이다. 점선의 기울기를 통해 누리호의 수평속도가 약 1.4 km/s 임을 알 수 있다. 물론 수평속도는 전리층 모델에서 가정한 TEC의 밀집 고도에 따라 조금 달라질 수 있다. Kakinami et al. (2013)은 2012년 북한에서

발사된 미사일의 수평속도가 약 1.8 ~ 2.6 km/s라고 보고했다. 또한 Choi & Hong (2019)은 2017년 북한에서 발사된 화성 15호 미사일의 수평속도가 약 2.3 km/s라고 추정된 바 있다.

미사일 또는 로켓의 궤도특성에 따라 수평성분의 속도가 강할 수도 있고, 이와는 반대로 수직성분의 속도가 강하게 나타날 수 있다. 일반적으로 저궤도 위성들은 안정적인 궤도를 유지하기 위해서 7~8 km/s의 속도가 필요하다. 따라서 누리호의 경우에는 초기 전리층 교란이 발생한 시점에서는 수평속도보다는 수직성분의 속도가 컸을 것으로 추측된다.

4. CONCLUSIONS

2022년 6월 21일 한반도에 있는 나로우주센터에서 누리호가 발사되었다. 본 연구에서는 누리호 발사에 따른 전리층 TEC 교란을 분석하였다. 누리호 발사 4분 후에 수직방향 TEC의 급격한 감소가 관측이 되었고, 그 크기는 약 8 TECU 수준이었다. 2차원 DTEC 맵을 통해서 누리호 발사 후 04분 30초에 한반도 남쪽에서 처음으로 TEC의 변화가 검출되었다.

시간에 따른 초기 전리층 TEC 교란을 활용하여 우리는 누리호의 수평속도가 대략적으로 1.4 km/s 임을 계산하였다. 일반적으로 저궤도 위성들이 안정적인 궤도를 유지하기 위해서 7~8 km/s의 속도가 필요한 것을 고려하면, 초기 전리층 TEC 변화가 감지된 시점에서 누리호는 수직성분의 속도가 수평성분의 속도보다 컸을 것으로 추측된다.

로켓발사에 의해 유도된 전리층 TEC 교란에 대한 분석은 향후 로켓 추진체의 성능 및 배출가스의 성분까지도 유추해 볼 수 있는 사례연구가 될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the 2022 Primary Project of the Korea Astronomy and Space Science Institute.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, B.-K. Choi, and D.-H Sohn; software, B.K. Choi; formal analysis, B.K. Choi; investigation, D.-H. Sohn.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

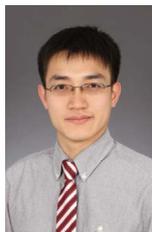
REFERENCES

Cai, C., Liu, Z., Xia, P, & Dai, W. 2013, Cycle slip detection

- and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity, *GPS Solut.*, 17, 247-260. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0275-7>
- Chen, C. H., Saito, A., Lin, C. H., Liu, J. Y., Tsai, H. F. et al. 2011, Long-distance propagation of ionospheric disturbance generated by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *EPS*, 63, 881-884. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.06.026>
- Choi, B. K. & Hong, J. S. 2019, Observation of the fast-traveling ionospheric disturbances induced by the 2017 North Korean missile, *ASR*, 63, 2598-2608. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.12.033>
- Choi, B. K. & Kil, H. 2017, Large ionospheric TEC depletion induced by the 2016 North Korea rocket, *ASR*, 59, 532-541. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.09.012>
- Chou, M. Y., Shen, M. H., Lin, C. C. H., Yue, J., Chen, C. H., et al. 2018, Gigantic circular shock acoustic waves in the ionosphere triggered by the launch of FORMOSAT-5 satellite, *Space Weather*, 16, 172-184. <https://doi.org/10.1002/2017SW001738>
- Fedrizzi, M., de Paula, E. R., Langley, R. B., Komjathy, A., Batista, I. S., et al. 2005, Study of the March 31, 2001 magnetic storm effects on the ionospheric using GPS data, *ASR*, 36, 534-545. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.07.019>
- Jakowski, N., Schluter, S., & Sardon, E. 1999, Total electron content of the ionosphere during the geomagnetic storm on 10 January 1997, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 61, 299-307. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(98\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(98)00130-8)
- Kakinami, Y., Yamamoto, M., Chen, C.-H., Watanabe, S., Lin, C., et al. 2013, Ionospheric disturbances induced by a missile launched from North Korea on 12 December 2012, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 118, 5184-5189. <https://doi.org/10.1002/jgra.50508>
- Lin, C. H., Chen, C. -H., Matsumura, M., Lin, J. -T., & Kakinami, Y. 2017, Observation and simulation of the ionosphere disturbance waves triggered by rocket exhausts, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 122, 8868-8882. <https://doi.org/10.1002/2017JA023951>
- Mannucci, A. J., Tsurutani, B. T., Iijima, B. A., Komjathy, A., Saito, A., et al. 2005, Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30, 2003 "Halloween Storms", *Geophys. Res. Lett.* 32, L12S02. <https://doi.org/10.1029/2004GL021467>
- Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., et al. 1998, A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Sci.*, 33, 565-582. <https://doi.org/10.1029/97RS02707>
- Meza, A. 1999, Three dimensional ionospheric models from earth and space based GPS observations, Ph.D. thesis, Universidad Nacional de La Plata.
- Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S., et al. 2002, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *EPS*, 54, 63-70. <https://doi.org/10.1186/BF03352422>
- Ozeki, M. & Heki, K. 2010, Ionospheric holes made by ballistic missiles from North Korea detected with a Japanese dense GPS array, *J. Geophys. Res.* 115, A09314. <https://doi.org/10.1029/2010JA015531>
- Polyakova, A. S. & Perevalova, N. P. 2011, Investigation into impact of tropical cyclones on the ionosphere using GPS sounding and NCEP/NCAR reanalysis data, *ASR*, 48, 1196-1210. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2011.06.014>
- Shao, X. -M., Lay, E. H., & Jacobson, A. R. 2013, Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm, *Nat. Geosci.*, 6, 29-33. <https://doi.org/10.1038/ngeo1668>



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC & DCB analysis.



Dong-Hyo Sohn received the Ph.D. degree in Geoinformatic Engineering in Inha University in 2015. He is currently working for Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute. His research interests include crustal deformation, GNSS precipitable water vapor, and ionospheric variations.