

GPS 기준국망을 이용한 전리층 총전자수 변화 검출 연구

최병규^{1,2†}, 박종욱¹, 이상정²
¹한국천문연구원 위성항법기술그룹
²충남대학교 전자공학과

A DETECTION STUDY OF THE IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENTS VARIATIONS USING GPS NETWORK

Byung-Kyu Choi^{1,2†}, Jong-Uk Park¹, and Sang-Jeong Lee²

¹GNSS Technology Group, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

(Received June 11, 2007; Accepted September 17, 2007)

요 약

강한 지자기 폭풍이 발생하였을 때 한반도 상공의 전리층내 총전자수(TEC, Total Electron Contents) 변화를 분석하기 위해 GPS 기준국망을 데이터를 이용한 지역적인 전리층 감시모형을 개발하였다. 전리층 총전자수 감시모형 개발을 위해 한국천문연구원에서 운용중인 대전 IGS(International GNSS Service) 기준국을 포함한 전국에 고르게 분포하고 있는 9개의 GPS 기준국 데이터를 이용하였다. 또한 순간적인 전리층 변화 특성을 분석하기 위해 CSS(Cubic Spline Smoothing)기법을 적용하였고, 그 결과 2003년 11월 20일 강한 지자기 폭풍이 발생했을 때 한반도 상공에서 총전자수의 순간적인 변화를 검출할 수 있었다. 이때에는 평일과 비교했을 때 특정시각의 약 1.5배 이상 총전자수가 증가함을 보였다. 마지막으로 지구 자기장 활동 정도를 나타내는 Kp 지수, Dst 지수 그리고 천문연 GPS 기준국망 데이터를 이용해 산출된 총전자수 변화와의 연관성을 제시했다.

ABSTRACT

We established a regional ionospheric model for investigating ionospheric TEC (Total Electron Contents) variations over the Korean Peninsula during major geomagnetic storms. In order to monitor the ionospheric TEC variations, we used nine permanent GPS reference stations uniformly distributed in South Korea operated by the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI). The cubic spline smoothing (CSS) interpolation method was used to analyze the characteristics of the ionospheric TEC variations. It has been found that variations of TEC over the Korean Peninsula increase when a major geomagnetic storm occurred on November 20, 2003. The TEC has increased about one and a half of those averaged quite days at the specific time during a geomagnetic storm. It has been indicated that the KASI GPS-derived TEC has a correlation with the geomagnetic storm indices (eq. Kp and Dst indices).

Keywords: ionosphere, GPS network, total electron content, magnetic storm

[†]corresponding author

1. 서 론

지구자기장의 연속적인 관측자료는 지구자체에 대한 연구뿐만 아니라 21세기 정보화 시대에 인간의 활동에 지대한 영향을 미치게 될 우주환경의 연구에도 필요하다. 지자기의 단기주기적 변화는 주로 태양으로부터 끊임없이 방출되는 하전입자의 흐름인 태양풍과 지구자기장의 상호작용으로 전리층부터 자기권까지의 지구자기장 변화를 말하며, 이러한 변화는 각종 위성간의 통신과 지상에서의 유·무선 통신교란을 야기한다(김동일 외 2004). 최근에는 전지구 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)과 저궤도 위성의 관측자료를 활용한 전리층 총전자수 감시와 이를 분석하는 연구가 수행되고 있다. 이전의 전리층 연구들은 주로 하나의 GPS 기준국으로부터 얻어진 관측값 또는 지역적인 관측기기들에 기반을 두고 있었지만, 요즘에는 국내·외 GPS 관측망을 서로 통합한 공동연구를 수행하는데 초점이 맞추어져 있다.

전지구적 또는 지역적인 GPS 기준국망은 다양한 경로의 GPS 관측데이터를 수신할 수 있기 때문에 전리층내의 총전자수 변화를 검출하는데 중요한 역할을 한다(Skone 1998, Liao 2000, Fedrizzi et al. 2001.) 특히 인터넷과 전용선 등 통신기술의 발달은 실시간 GPS 관측자료 획득이 가능하여 응용 기술 뿐만 아니라 전리층 총전자수 변화 연구에도 많이 활용되고 있는 추세이다(Mannucci et al. 1998, Gao & Liu 2002).

항법위성으로부터 지상의 수신기까지 신호전달 과정에 있어서 전리층의 지연은 가장 큰 오차 요인으로 작용한다. 일반적으로 단일주파수 GPS 수신기(L11,575MHz)를 사용하는 경우에는 전리층 지연오차를 추정하기 위해 Klobuchar 모델을 사용한다. 그러나 이 모델은 평균적으로 약 50% 정도 까지 전리층 지연오차를 보정할 수 있다(Klobuchar 1987, Komjathy 1997). 전리층 지연오차는 전리층내의 총전자수와 밀접한 관련이 있으며, 바로 총전자수의 정밀한 추정은 GPS 사용자의 위치 정확도를 향상시킬 수 있고, 전리층의 변화 특성을 이해하는데 중요한 역할을 한다.

전리층의 총전자수 결정과 변화특성을 분석하기 위해 GPS 기준국망을 활용하는 연구가 활발히 수행되고 있으며 새로운 전리층 분석 모델들이 개발되었거나 개발 중에 있다(Zhizhao & Yang 2004).

이 연구에서는 강한 지자기 활동기간 동안 한반도 상공의 총전자수 변화를 검출하기 위해 한국천문연구원 의 대전 IGS(International GNSS Service) 기준국을 포함한 9개 GPS 기준국으로부터 얻어진 데이터를 이용하여 2003년 11월 19일부터 11월 21일까지 총 3일간의 자료처리를 수행하였다. 그리고 전 지구 자기장의 변동 정도를 표시하는 Kp 지수와 총전자수 변화 특성을 분석하였고, 자기폭풍의 정도를 평가하는 Dst 지수를 또한 총전자수 변화와의 연관성을 분석하였다.

2. 자료처리 전략

현재 전세계적으로 약 380여개 GPS기준국이 IGS 국제 기준국망에 가입되어 활동하고 있으며 이러한 GPS 기준국들은 고정밀 기준좌표계 구현, 지구과학 및 지구동역학 등의 연구에 활용되고 있다. 미국 제트추진연구소(JPL, Jet Propulsion Laboratory), 유럽우주국(ESA, European Space Agency) 등 선진기관에서는 독자적인 전지구적 전리층 감시시스템을 구축·운영하고 있고, 실시간 또는 준실시간으로 2차원 전리층 총전자수 맵을 제공해 주고 있다.

또한 그 외 다수의 국가에서 지역 GPS 기준국망을 활용하여 각국의 지역적 특성에 맞는 전리층 감시모델을 개발하여 활용하고 있다. 한국천문연구원은 이러한 추세에 따라 GPS 기준국망을 활용한

준실시간 전리층 감시모델을 개발하였고, 다양한 우주환경변화 속에서 전리층 총전자수의 정밀도를 높이기 위해 계속 모델의 보완작업을 수행하고 있다. 이 연구에서는 강한 지자기 활동 때 전리층내의 총전자수 변화를 감시하기 위해 한국천문연구원에서 운용중에 있는 9개의 GPS 기준국 관측정보와 항법정보를 이용하여 자료처리를 수행하였다. 전리층 총전자수 감시 프로그램이 구동되면 GPS 데이터 센터에 접속하여 해당날짜의 GPS 관측정보를 자동으로 다운로드한다. 자료처리에 사용된 관측정보는 GPS 사용자들을 위한 공통된 고유의 형식인 RINEX(Receiver INdependent EXchange)이며, 관측 자료의 저장은 30초 간격이다. 그리고 수집된 관측정보와 항법정보를 이용하여 GPS 위성의 위치와 시선방향의 총전자수(STEC, Slant Total Electron Contents)를 계산한다. 또한 GPS 신호가 전리층을 투과하는 지점(IPP, Ionosphere Pierce Points)의 추정은 전리층 모델을 개발하는데 핵심이 되는 부분이다. GPS 위성과 지상의 GPS 기준국 위치에 따라 실시간으로 IPPs가 변하기 때문에 정확한 추정이 요구된다. 3차원 단층모델이 아닌 2차원 전리층 모델들은 보편적으로 지상으로부터 약 350km 또는 400km에 자유전자가 가장 많이 밀집되어 있다고 가정을 한다. 이 연구에서는 그 높이를 350km로 설정하였고, 추정된 시선방향 총전자수와 전리층 투과지점을 활용하여 격자기반의 총전자수를 다시 추정하였다.

3. CSS(Cubic Spline Smoothing) 기법

내삽(Interpolation)을 할 때, 어떤 관측 값을 통해 다양한 내삽법을 적용하여 미지의 값을 산출하거나, 관측 값이 실제 값에 가까워지도록 유도를 한다. 일반적으로 관측방정식을 고려해보면 식 (1)처럼 표현된다.

$$y_i = f(x_i) \tag{1}$$

CSS 기법은 식 (2)와 같이 Spline 함수 $S(x)$ 가 최소가 되도록 함수 $f(x)$ 를 재 구성하는 것이다.

$$L = \lambda \sum_{i=0}^n \left(\frac{y_i - S_i}{\sigma_i} \right)^2 + (1 - \lambda) \int_{x_0}^{x_n} \{S''(x)\}^2 dx \tag{2}$$

여기에서 $S(i) = S(x_i)$ 이고, y_i 는 임의의 총전자수 값이다. 그리고 적절한 총전자수 값을 갖기 위해 신뢰구간 $[y_i - \sigma_i, y_i + \sigma_i]$ 을 갖는다. σ_i 는 y_i 의 표준편차를 의미하고, 가중변수 λ 는 0부터 1까지의 범위를 갖는다. 극단적인 경우에 만약 $\lambda = 0$ 이면 Spline 함수 $S(x)$ 는 직선이 되고, $\lambda = 1$ 이면 산출되는 값은 Smoothing이 적용되지 않는다. 이 연구에서는 CSS의 가중변수를 0.9로 설정하여 자료처리 하였다.

4. 자료처리 결과

2003년 11월 강한 지자기 폭풍이 발생했을 때, 한반도 상공에서 전리층 내 총전자수 값의 변화를 정밀하게 추정하기 위해 한국천문연구원에서 운용하고 있는 9개 GPS 기준국 관측자료를 모두 활용 하였다. 관측자료의 처리는 최병규 외(2005)가 개발한 전리층 감시 프로그램을 이용하였고, 총전자수 값 산출부분에 CSS 알고리즘을 추가적으로 적용하였다. 2003년 11월 20일을 기준으로 강한 지자기 폭풍 발생하기 전(11월 19일)과 후(11월 21일)의 GPS 기준국망 데이터를 처리하여 시간에 따른 총전자수 값의 변화를 산출해 보았다. 그림 1a부터 그림 1c는 각각 위에서 언급한 해당날짜의 자료

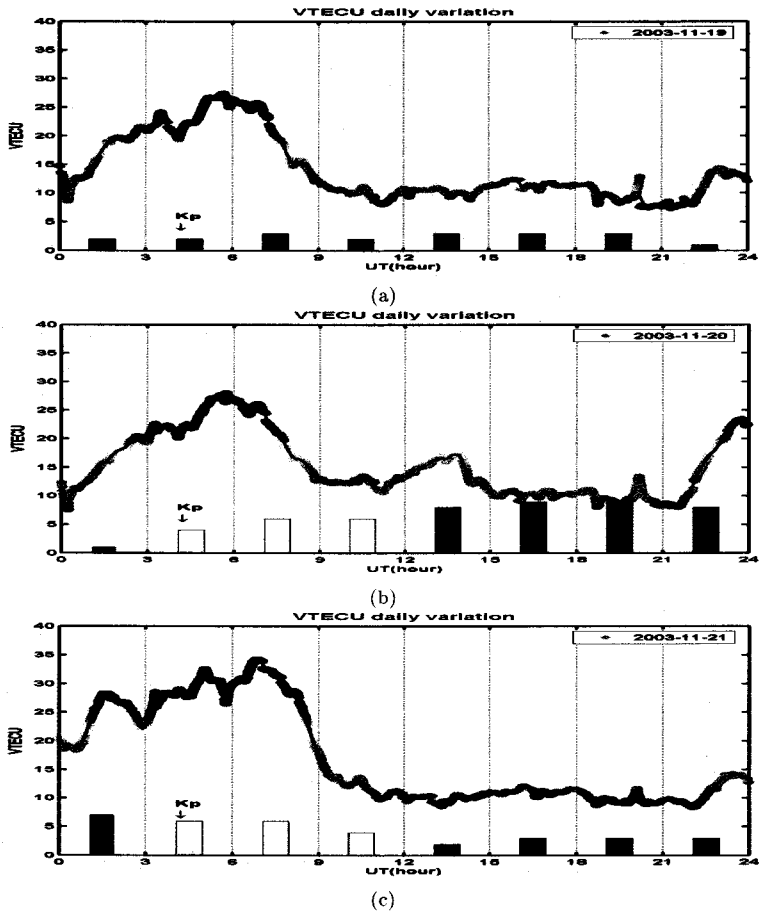


그림 1. 한반도 상공의 총전자수 일일변화와 Kp 지수. (a) 11월 19일, (b) 11월 20일, (c) 11월 21일.

처리된 결과이고, 이것은 한반도 상공의 특정 위도(37°N)와 경도(128°E)에서 시간에 따른 총전자수 값의 일일 변화를 나타낸 것이다.

그림 1a는 2003년 11월 19일 한반도 상공의 총전자수 값 일일변화이다. 총전자수 변화와 지자기 변동 정도를 나타내는 Kp 지수와의 연관성을 분석하기 위해 Kp 지수를 그림에 함께 삽입하였다. Kp 지수는 일본 Kakioka 자자기 데이터센터로부터 얻었고, 매 3시간 간격으로 하루(24시간)에 8번 제공된다. 이것은 지자기 변동 정도에 따라 최소 0에서 최대 9까지의 값을 갖는다. Kp 지수 값이 7 이상이면 강한 지자기 폭풍으로 인식된다. 그림 1b는 2003년 11월 20일에 해당하는 총전자수 변화이다. 12시(UT) 이후에 총전자수 값이 급격히 상승하는 것이 GPS 자료처리에 의해 검출되었고, 그 시점에 Kp 지수는 매우 강한 지자기 폭풍(Very major storm)을 의미하는 8을 나타내고 있었다. 그 이후에도 Kp 지수는 지속적으로 8 이상의 값을 유지하고 있음을 알 수가 있고, 15시(UT) 이후에는 19일과 비교하여 총전자수 값의 변화가 유사했지만, 21시(UT) 이후에 또다시 총전자수 값이 급격히 상승하는 것이 검출되었는데 이때는 총전자수의 증가 원인 분석을 위해 자기폭풍의 정도를 평가하는

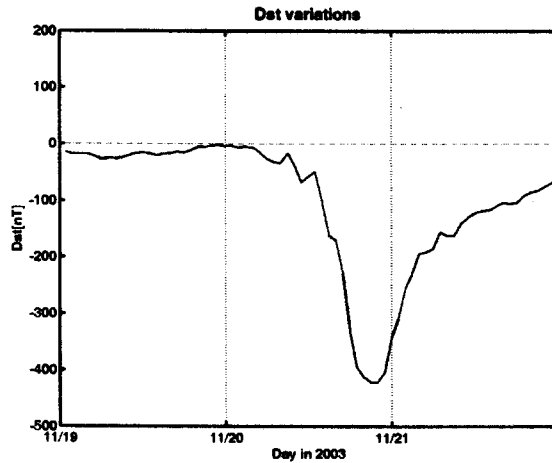


그림 2. 2003년 11월 19일부터 21일까지 3일간 Dst 지수 변화.

Dst 지수 변화와의 연관성을 고려해 보았다.

그림 2는 2003년 11월 19일부터 21일까지 Dst 지수 변화를 나타낸 것인데, 11월 20일 0시(UT)에는 약 0nT(nano-Tesla)의 값을 유지할 정도로 자기변화가 안정적이었지만, 20시(UT)이후에는 최대 약 -400nT까지 순간적으로 Dst 지수 값이 떨어져 그 변화 폭이 크게 나타났다. 즉 11월 20일 21시 이후의 총전자수 값은 11월 19일과 비교하여 약 1.5배 이상 상승하였고, 이것은 자기변화가 한반도 상공의 총전자수 변화와 깊은 연관이 있음을 시사해 주고 있다.

그림 1c는 11월 21일의 총전자수 일일변화를 보여주고 있다. 지자기 폭풍은 3시(UT)까지 지속되다가 12시 이후에는 서서히 안정화되는 특성을 보였다. 총전자수 값의 변화는 11월 20일과 21일의 지자기 폭풍으로 인한 영향으로 총전자수 값이 최대 약 33VTECU(Vertical TECU)까지 상승을 했고, 12시(UT) 이후부터는 11월 19일과 유사하게 정상적인 총전자수 변화 흐름을 보이고 있다. 강한 지자기 폭풍이 발생했을 때에 총전자수 값의 상승정도를 분석하기 위해 그림 3과 같이 정상적인 총전자수 변화를 보인 11월 19일과 강한 지자기 폭풍이 발생했던 11월 20일의 총전자수 변화를 서로 비교하였다. 그림 3은 11월 19일과 11월 20일의 총전자수 차이를 의미한다. 강한 지자기 폭풍이 발생했던 12시 이후에 총전자수 값이 급격히 상승했고, 또한 Dst 지수가 최대로 떨어진 시점에서 또다시 총전자수 값이 약 10VTECU 이상 상승했음을 알 수 있다. 이처럼 외부환경 변화 척도를 나타내는 Kp나 Dst 지수의 변화가 한반도 상공의 총전자수 변화와 밀접하게 연계되어 있음을 알 수가 있었다.

5. 결 론

이 연구에서는 한국천문연구원의 GPS 기준국망을 이용하여 강한 지자기 폭풍 등 외부환경 변화로 인한 한반도 상공의 총전자수 변화 감시를 수행하였다. 그림 1b와 그림 3의 결과로 강한 지자기 폭풍이 발생하였을 때 GPS 기준국망 관측자료를 활용하여 한반도 상공에서 총전자수가 순간적으로 상승하는 것을 알 수 있었다. Kp 지수와 Dst 지수의 변화는 GPS에 의한 전리층 모델을 통해 산출된

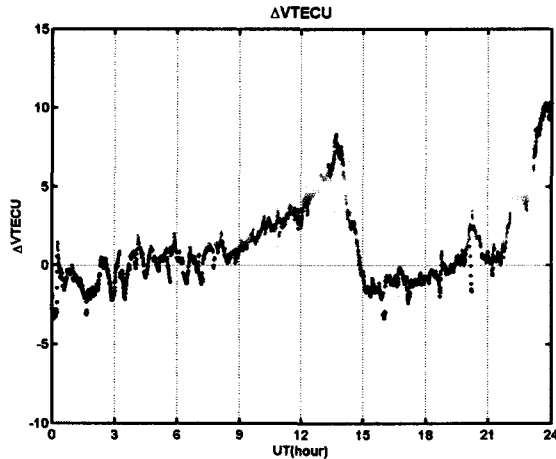


그림 3. 2003년 11월 19일과 11월 20일의 총전자수 값 차이.

총전자수 변화와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었고, 특히 강한 지자기 폭풍이 발생한 특정시점에서 한반도 상공에서 총전자수가 약 1.5배 이상 상승했다.

향후 개발된 GPS 전리층 감시 모델을 기반으로 중위도 지역의 세밀한 전리층 변화 특성 분석 뿐만 아니라 고위도 지역의 GPS 자료도 서로 공유하여 급격한 우주환경변화가 발생하였을 때 각각의 위도에 따른 전리층내의 총전자수 변화 유형을 세밀하게 분석할 예정이다. 또한 개발된 모델은 우주 환경감시에도 중요한 역할을 할 것으로 기대한다.

참고문헌

- 김동일, 진영근, 남상현, 이주한 2004, 지구물리학회지, 7, 12
 최병규, 박종욱, 정종균, 박필호 2005, 한국우주과학회지, 22, 283
 Fedrizzi, M., Langley, R. B., Komjathy, A., Santos, M. C., Paula, E. R., & Kantor, I. J. 2001, in ION GPS, ed. NAVSYS (Colorado: Colorado Springs), pp.2468-2475
 Gao, Y. & Liu, Z. 2002, Journal of Global Positioning System, 1, 18
 Klobuchar, J. A. 1987, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23, pp.325-331
 Komjathy, A. 1997, PhD Thesis, University of New Brunswick
 Liao, X. 2000, PhD Thesis, University of Calgary
 Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., & Runge, T. F. 1998, Radio Science, 33, 566
 Skone, S. 1998, PhD Thesis, University of Calgary
 Zhizhao, L. & Yang, G. 2004, GPS Solutions, 8, 13