

지역적 GPS 관측망을 이용한 준실시간 전리층 모델링

최병규[†], 박종욱, 정종균, 박필호
한국천문연구원 우주측지연구그룹

NEAR REAL-TIME IONOSPHERIC MODELING USING A REGIONAL GPS NETWORK

Byung-Kyu Choi[†], Jong-Uk Park, Jeong-Kyun Chung, and Phi-Ho Park
Space Geodesy Research Group, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348 Korea
E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

(Received July 21, 2005; Accepted August 3, 2005)

요 약

우주환경과 밀접한 연관성을 갖고 있는 전리층은 매질의 전자기적 특성상 전파 신호에 간섭을 유도하게 되는데, 전리층 통과시 GPS 신호에 인가되는 이러한 오차를 분석함으로써 전리층의 상태를 추정할 수 있으며, 이는 상층 대기의 순환과 전지구적인 변화 및 우주환경의 물리적 특성을 이해하는 중요한 열쇠가 될 수 있다. 전리층 총 전자수를 정밀하게 측정하기 위해 한국천문연구원에서 운영하는 9개의 GPS 관측망 데이터를 사용하였으며, 코드 데이터 잡음을 줄이기 위해 의사거리 데이터를 반송파 위상 데이터와 선형 조합을 하였다. 또한 한반도 상공의 위·경도를 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 의 공간 해상도로 분할하여 각 격자점의 총 전자수를 추정하는 격자 방식의 지역적 전리층 모델을 개발하였으며, 전리층의 정밀도 향상을 위해 Inverse Distance Weight(IDW) 기법과 칼만 필터를 적용하였다. 본 연구에서 개발된 지역적 전리층 모델과 전세계 전리층 분석센터에서 제시하는 글로벌 모델(GIMs)을 8일 동안 자료 처리 비교한 결과 평균적으로 3 ~ 4 Total Electron Contents Unit(TECU)의 RMS값 차이를 보였다.

ABSTRACT

Ionosphere is deeply coupled to the space environment and introduces the perturbations to radio signal because of its electromagnetic characteristics. Therefore, the status of ionosphere can be estimated by analyzing the GPS signal errors which are penetrating the ionosphere and it can be the key to understand the global circulation and change in the upper atmosphere, and the characteristics of space weather. We used 9 GPS Continuously Operating Reference Stations (CORS), which have been operated by Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI), to determine the high precision of Total Electron Content (TEC) and the pseudorange data which is phase-leveled by a linear combination with carrier phase to reduce the inherent noise. We developed the method to model a regional ionosphere with grid form and its results over South Korea with 0.25° by 0.25° spatial resolution. To improve the precision of ionosphere's TEC value, we applied IDW (Inverse Distance Weight) and

[†]corresponding author

Kalman Filtering method. The regional ionospheric model developed by this research was compared with GIMs (Global Ionosphere Maps) produced by Ionosphere Working Group for 8 days and the results show 3 ~ 4 TECU difference in RMS values.

Keywords: ionosphere, GPS, total electron content, space weather

1. 서 론

현재 국제적인 전리층 분석 센터 및 여러 국가들은 고유의 전리층 모델을 개발하여 우주 환경의 급격한 변화로 인한 피해의 최소화 및 이를 예측하고 예보할 수 있는 기반을 조성하고 있다. 특히, 지구 대기에 가장 큰 영향을 미치는 태양 활동과 자기 폭풍을 실시간으로 감시하고 있으며, 위성 항법 시스템(GNSS) 및 전파를 사용하는 모든 시스템에서 중요시되는 전리층의 총전자수 함유량(Total Electron Contents) 변화 또한 다양한 관측 장비를 이용하여 준 실시간 또는 실시간으로 예측·예보하고 있다(Mannucci et al. 1998, Gao & Liu 2002).

국내의 경우, 이러한 전리층에 대한 중요성을 인식하고 있으나 학계나 연구기관에서는 아직까지 기초 연구에만 머물고 있다. 한국천문연구원(Korea Astronomy and Space Science Institute, KASI)에서는 2004년부터 GPS를 이용한 전리층 변화 감시 및 모델 개발에 착수하여 자동화된 준실시간 전리층 모델을 개발 하였고, 실시간 전리층 변화 감시를 위한 기반 조성을 마련하였다.

한편, 지난 2003년 10월 말에 발생하였던 대규모의 태양 플레어 폭발과 자기 폭풍으로 인한 영향에 국내외 여러 학계와 관련 기관들이 많은 관심의 초점을 모으고 있다. 태양의 강력한 플레어 폭발은 코로나 물질 방출(Coronal Mass Ejection, CME)과 지구 자기권뿐만 아니라 고층대기의 급격한 변화를 초래하였고, 그 결과 무선 통신 및 일부 위성체 등에 손실이 발생하였음이 보고 되었다. 또한 미국 우주환경센터(NOAA/SEC)의 보고에 따르면 이 지자기 폭풍기간 동안에 지자기장의 중위도 지역인 미국 남부의 휴스턴 까지 오로라가 관측되었다고 한다(조경석 외 2004).

한국천문연구원에서는 한반도 전역에 고르게 분포된 9개의 GPS 상시관측망 데이터 이용하여 태양 플레어 폭발로 인한 자기 폭풍 전후의 8일간 데이터를 처리하여 독자적인 지역적 전리층 모델의 정밀도와 신뢰도를 검증하는 작업을 수행하였으며, 이를 위해서 국제 전리층 분석센터에서 IONEX(IONosphere EXchange) 포맷으로 제공하는 글로벌 전리층 모델(Global Ionosphere Maps, GIMs)의 총전자수 값과 비교하였다. 글로벌 전리층 모델들은 전세계 상공의 위도($-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$)와 경도($-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$)를 $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 의 공간 해상도를 갖는 격자로 분할하여 추정된 총전자수 값과 Differential Code Biases(DCB)를 함께 제공한다(Wilson et al. 1995, Saito et al. 1998, Leonovich et al. 2000).

2. 지역적 전리층 모델(RIM)

2.1 전리층 총전자수 결정

GPS 위성에서 송신되는 신호들 중에서 반송파 위상 데이터는 신호 잡음이 작고 정밀한 총전자수 계산이 가능한 반면, 신호 끊김(Cycle Slip) 현상을 고려해야 하고 모호정수(Integer Ambiguity)를 반드시 결정해야만 한다(Erickson 1992, Fotopoulos & Cannon 2001). 또한 정확한 모호 정수를 결

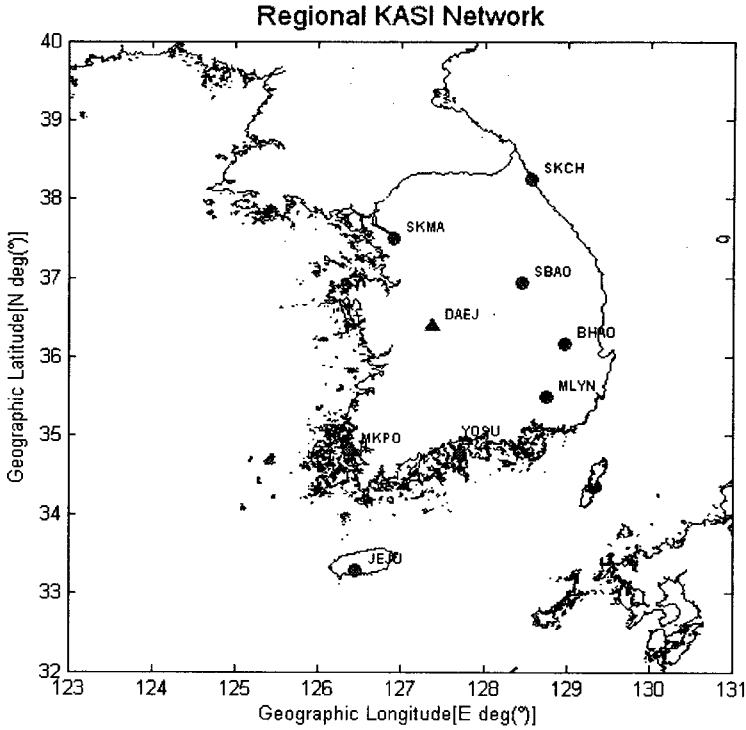


그림 1. 전리층 모델링에 사용된 한국천문연구원의 GPS 상시관측망.

정하기 위해서는 정확한 측정값을 필요로 한다. 반면에, 의사거리 데이터는 신호 끊김 현상이 작고 모호 정수를 결정할 필요가 없지만, 다중경로 오차(Multipath Error)와 시스템의 잡음이 많이 내재되어 있다. 따라서 본 연구에서는 의사거리와 반송파 위상 데이터의 장단점을 상호 보완한 위상보정의 의사거리(Phase-Leveled Pseudorange) 데이터를 이용하여 총 전자수를 계산하였다.

GPS의 L1(1575.42MHz), L2(1227.60MHz) 두 주파수를 모두 수신하는 경우, 의사거리 데이터의 관측 값(P1, P2)은 수식적으로 다음과 같이 표현된다(Hofmann-Wellenhof et al. 1992).

$$P1(k) = \rho + c(\delta t^s - \delta t_r) + \frac{40.3}{f_1^2} TEC(k) + \epsilon_{trop} + \epsilon_m + \epsilon_{L1} \quad (1)$$

$$P2(k) = \rho + c(\delta t^s - \delta t_r) + \frac{40.3}{f_2^2} TEC(k) + \epsilon_{trop} + \epsilon_m + \epsilon_{L2} \quad (2)$$

여기에서, ρ 는 GPS 위성과 수신기 사이의 거리, c 는 빛의 속도, δt^s 는 GPS 위성의 시계 오차, δt_r 는 수신기 시계 오차, $f_i (i = 1, 2)$ 는 L1, L2의 주파수, ϵ_{trop} 는 대류층에 의한 오차, ϵ_m 는 다중경로 오차, 그리고 $\epsilon_{L_i} (i = 1, 2)$ 는 L1, L2의 수신기 잡음이다.

식 (1)과 (2)의 선형 조합으로 전리층 오차가 제거된 의사거리 데이터에 의한 새로운 GPS 측정값을 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{P_{ionfree}}(k) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P1(k) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P2(k) \quad (3)$$

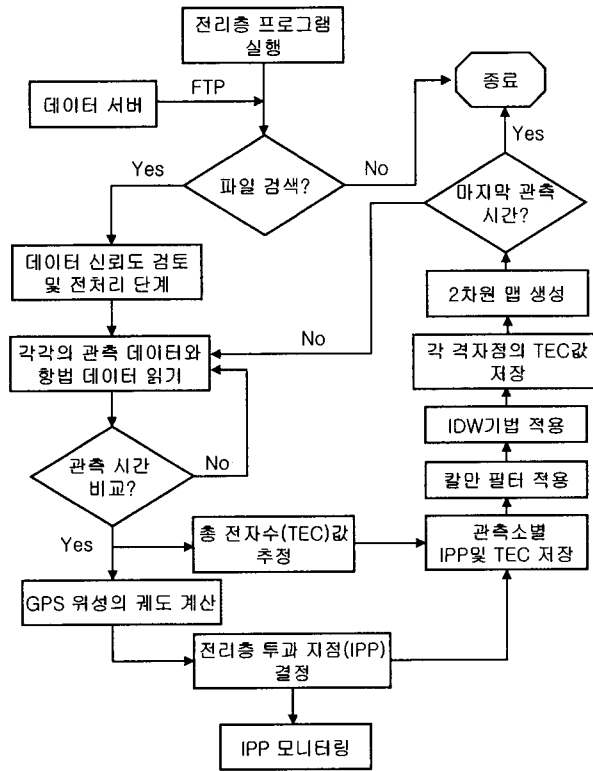


그림 2. 전리층 모델 자동화 프로그램에 의해 수행되는 자료 처리 흐름도.

식 (3)에서 식 (1)을 빼면, 즉 전리층 오차를 포함하지 않는 새로운 관측 데이터 값에서 원래의 L1 상에 있는 관측 데이터 값을 빼면 식 (4)와 같이 L1 의사 거리에 내재된 전리층 오차 값이 계산된다. 이 때 전리층 오차에 의한 신호 지연 거리는 전리층 내의 총전자수 값으로 변환된다(1 TECU ≃ 0.162m).

$$TECU_{P1-P2} \cong 9.52 \times (P1 - P2) \tag{4}$$

여기에서 9.52는 $f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2)$ 를 0.162로 나눈 값이다.

2.2 KASI의 지역적 전리층 모델

KASI의 지역적 모델은 소규모의 GPS 관측망을 이용하여 한반도 상공의 전리층 총전자수 값을 산출하는 것으로 한국천문연구원에서 운용하는 국제 GPS 기준국점인 DAEJ를 포함하여 9개의 GPS 관측망 데이터를 이용하는 국지적이고 자동화된 준실시간 관측 모델이다. 그림 1은 전리층 모델링에 사용된 GPS 상시관측소를 나타낸다.

KASI 지역적 모델은 격자 기반(Grid Based)의 모델이며, 위도 32° ~ 40°와 경도 123° ~ 131°에 해당하는 한반도 상공을 0.25° × 0.25°의 좁은 간격 격자로 나누어 각 격자점의 총전자수 값을 추정한다. 이렇게 추정된 총전자수는 다양한 기법(Multiple Regression, Multiquadratic 그리고 IDW 등)

을 적용하여 그 값을 보완할 수 있는데, 현재 개발된 모델은 IDW(Inverse Distance Weight) 기법이 사용되었고, 수식으로 표현하면 식 (5)와 같다(Lancaster & Salkauskas 1986).

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^s z_i \cdot 1/d_i^k}{\sum_{i=1}^s 1/d_i^k} \quad (5)$$

여기에서 z_i 는 전리층 투과지점의 수직방향 총전자수 값, k 는 관측 데이터 수 그리고 d_i 는 전리층 투과 지점과 각 격자점과의 2차원적 거리를 의미한다.

GPS를 이용한 준실시간 한반도 상공의 전리층의 변화를 감시하기 위한 알고리즘은 그림 2와 같다. 9개의 GPS 관측소로부터 수신되는 데이터는 자동으로 데이터 서버에 변환되어 저장되고 이렇게 저장된 데이터는 웹 서비스 및 다양한 목적으로 사용이 되고 있으며, 그러한 사용 목적 중에 하나로 전리층 모델링에 이용된다. 특정 시간이 되면 전리층 자료 처리 서버에서 프로그램이 자동적으로 구동되고, FTP를 이용하여 GPS 관측 데이터를 검색하여 데이터를 다운로드 한다. 저장된 데이터의 검색과 확인 작업은 전리층 자료 처리 서버(Ionosphere Processing Server)에서 제어한다. 데이터 검색 작업이 끝나면 각 상시관측소 데이터의 신뢰도 검증과 항법 데이터를 읽어 자료 처리를 위한 전처리 단계를 수행한다.

관측 시간별(Epoch-by-Epoch) 자료 처리 시간을 비교하기 위해 대전(DAEJ) 국제 기준점의 데이터를 기준으로 한다. 대전은 세습 원자시계를 이용하여 GPS 시간과 동기 시켜 데이터의 품질과 신뢰도가 다른 GPS 관측소 보다 우수하며 자료 처리 센터내에 위치하여 최단시간 안에 자료 확보가 가능하기 때문이다.

항법데이터와 관측치를 이용하여 GPS 위성의 궤도를 계산하고, 상시관측소별로 GPS 위성으로부터 오는 전파의 전리층 투과 지점(Ionosphere Pierce Point, IPP)을 계산하여 저장한다. IPP는 전자 밀도가 최대인 지점(대략 350 ~ 500km)을 수신기와 GPS 위성 사이의 신호가 투과하는 한점을 의미하며, IPP의 계산 수식은 다음과 같다(Biel 1990).

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + h_I} \cos E \right) \quad (6)$$

$$\phi_{pp} = \sin^{-1} (\sin \phi_u \cos \psi_{pp} + \cos \phi_u \sin \psi_{pp} \cos A) \quad (7)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \psi_{pp} + \sin A}{\cos \phi_{pp}} \right) \quad (8)$$

여기에서 (ϕ_u, λ_u) 는 사용자의 위·경도 좌표, E 는 위성의 고도, R_e 는 지구 반경(대략 6378.136km), ψ_{pp} 는 지구중심으로부터 측정된 사용자와 IPP 사이의 각, 그리고 $(\phi_{pp}, \lambda_{pp})$ 는 IPP의 좌표를 나타낸다.

전리층의 총전자수 값은 코드(C/A 또는 P)와 반송파 위상데이터(Carrier Phase)의 선형 조합에 의해 결정이 되고, 자료 처리에 따른 가중치를 적용하여 코드 자체에 내포되어 있는 잡음이 최소화될 수 있도록 하였다. 매 관측 시간별(30초 간격)로 계산된 각 격자점의 총전자수는 칼만 필터를 적용하여 1차적으로 보완을 하고, 거리에 따른 각 격자의 총전자수 값에 가중치를 적용하는 내삽 기법인 IDW를 이용하여 최종적인 결과를 얻게 된다. 이러한 기법 적용에 의해 결정된 각 격자점의 총전자수 값은 매 관측 시간별로 저장과 동시에 2차원 맵을 생성하여 한반도 상공 전체에 해당하는 전리층의 총전자수 변화 감시를 가능케 한다. 또한 한반도 상공은 지형학적인 특성상 매우 좁은 지역에 해당하므로 격자를 세분화하여 전리층의 변화를 감시할 수 있다.

3. 자료 처리 결과 및 검증

지난 2003년 10월 29일 강력한 태양 플레어 폭발로 인해 한반도 상공에서도 전리층 총전자수 값의 심한 변화가 관측되었다. 미국 제트추진연구소(Jet Propulsion Laboratory)에 의하면 이 태양 플레어 폭발의 영향으로 인하여 전 세계적으로 전리층의 변화가 크게 일어났는데, 특히 미국 서부의 경우 총전자수 값이 정상시의 6배까지 증가하였다. 본 연구에서는 개발된 지역적 전리층 모델을 이용하여 태양 플레어 폭발 이전과 이후, 총 8일간의 GPS 관측망 데이터를 이용하여 각각 자료 처리를 수행하였다. 이 기간동안 한반도 상공의 많은 총전자수 변화가 감지되었고, 지자기 활동도 활발하여 지역적 전리층 모델을 비교하고 검토해 볼 수 있는 적절한 시기라 판단되었다. 한국천문연구원에서 개발한 지역적 전리층 모델은 9개 GPS 상시관측소 데이터를 이용하여 30초 간격으로 자료 처리를 수행할 수 있도록 하였다. 이것은 극히 짧은 시간에 한반도 상공의 순간적인 전리층 변화 특성을 분석하고, 보다 효율적인 우주 환경 변화 감시를 위해서 구성한 것이다. 대부분 전파를 사용하는 위성 항법시스템이나 지상파 통신에 우주 환경의 변화가 중요하고, 특히 전리층의 총전자수 변화는 외부적 요인에 의해 급격히 변화하는 특성이 있기 때문에 예측·예보를 통해 사전에 피해를 방지하는 것이 중요하다.

전 세계적으로 전리층의 변화를 감시하기 위해 많은 연구가 수행되고 있고, 특히 GPS 관측 데이터 또는 저궤도 관측 위성을 통해서 2차원 격자 모델뿐만 아니라 3차원 Tomography 모델을 개발하고 있다. 전세계 100여개의 국제 GPS 기준점으로부터 획득된 자료를 이용하는 GIMs 모델들은 총전자수 값을 계산한 후, 내삽하여 적절하게 분할된 격자의 수직방향의 총전자수 값 및 2차원 맵을 제공하는 정밀한 모델이다. 이 모델들은 저궤도 위성들(TOPEX, JASON-1 등)에 의해 관측되는 총전자수 값과 GIMs 모델에 의해 계산된 총전자수 값이 거의 일치할 정도로 그 정밀도가 입증되었다(Zhao et al. 2004).

본 연구에서는 JPL(Jet Propulsion Laboratory), CODE(Center for Orbit Determination in Europe), ESA(European Space Agency)와 IGS(International GPS Service) 등에서 제공하는 GIMs 모델 자료를 비교 대상으로 택하여 24시간 동안 동일한 위·경도(36° , 127°)의 전리층 총전자수 값을 추정 후 각각의 GIMs 모델과의 일변화 차이를 RMS값으로 제시하였다. 특히 자료 처리 대상 기간 중 지자기 폭풍이 있었던 특정한 날(2003년 11월 04일)의 경우에 개발된 지역적 전리층 모델이 지자기 변화로 인한 총전자수 변화 감시가 가능한지를 검토하였다.

국제 전리층 분석 센터에서 제시하는 GIMs 모델과 KASI의 지역적 전리층 모델 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 KASI의 지역적 모델이 GIMs 모델과 총전자수 변화 유형이 일치함을 보였고, 시간에 따른 그 차이 또한 그리 크지 않음을 알 수 있다. 태양 플레어 폭발의 영향이 가장 심했던 시점(2003년 10월 29일)을 기점으로 전체적인 전리층의 총전자수 변화가 크게 일어났음을 알 수가 있으며, 자기 폭풍의 영향이 있었던 시점(2003년 11월 04일)은 순간적인 총전자수 변화가 감지되었다.

특히 그림 3b에서 6시 30분(UT)과 10시(UT) 이후에는 KASI의 지역적 전리층 모델에 의해 계산된 총전자수 값은 순간적인 증가를 보인다. 그림 4는 2003년 11월 4일에 일본 Kakioka 관측소의 지자기 변화를 나타낸 것이다. 총전자수의 순간적 변화가 감지된 동일한 시간대에 지자기 교란이 있었음을 알 수 있다.

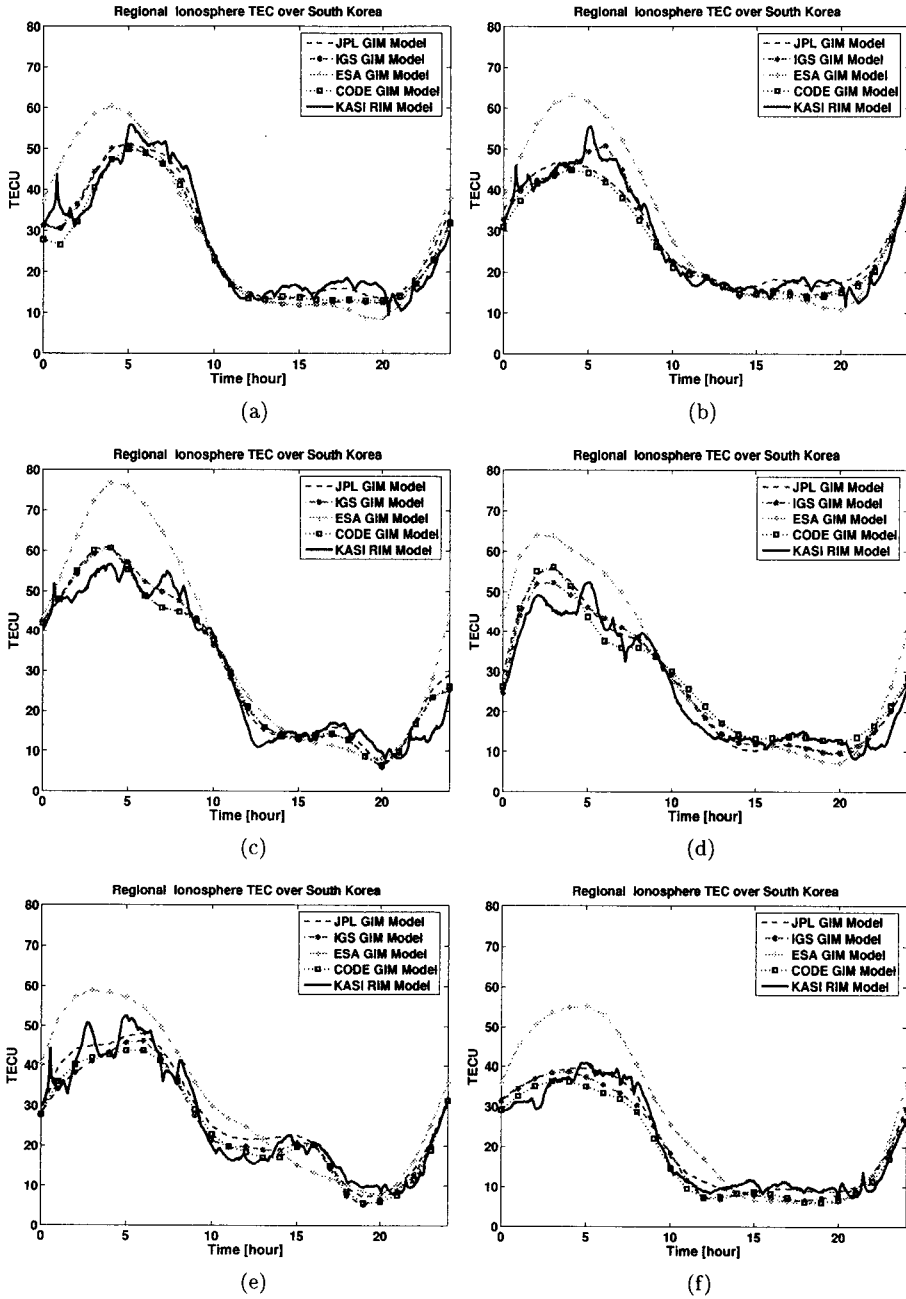


그림 3. 특정 위도·경도(36°, 127°)에서의 TEC 일변화 비교. (a) 2003년 10월 27일, (b) 2003년 10월 28일, (c) 2003년 10월 29일, (d) 2003년 10월 30일, (e) 2003년 10월 31일, (f) 2003년 11월 01일, (g) 2003년 11월 03일, (h) 2003년 11월 04일

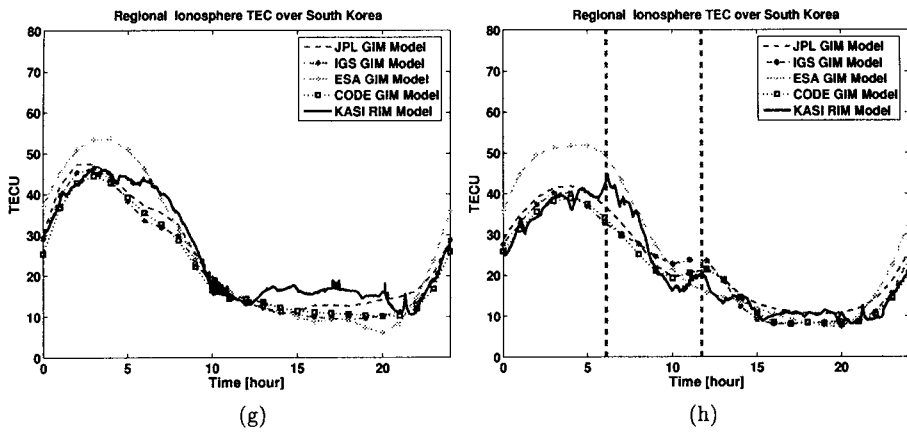


그림 3. (계 속)

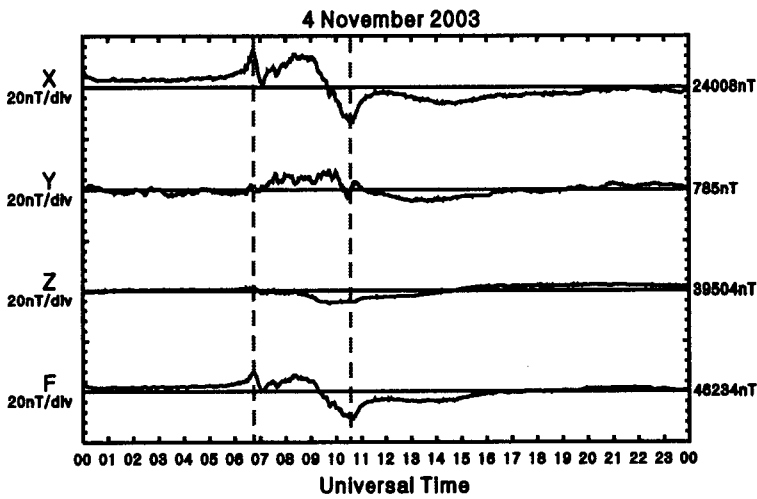


그림 4. 2003년 11월 04일 Kakioka 관측소에서 측정된 지자기 활동 지표(교토, 지자기 데이터 센터 제공).

표 1에 나타난 것처럼 전체적인 자료 처리 결과를 살펴보면, KASI의 지역적 전리층 모델이 IGS·JPL·CODE의 GIMs 모델들과는 평균 3 ~ 4TECU 정도의 차이가 발생했는데, 이것은 자료 처리 간격(Processing Interval) 및 모델에 의한 오차에 기인하는 것으로 판단된다. GIMs 모델들은 대략적으로 2 ~ 8TECU 정도의 오차 범위를 설정하고 있으며 위의 평균 RMS값이 오차 범위 안에 포함되므로 개발된 지역적 전리층 모델이 글로벌 모델의 정밀도에 상당히 근접했음을 시사한다. 그리고 유럽항공우주국(ESA)에서 제시하는 GIMs 모델과는 가장 큰 평균 RMS 값 차이를 보였는데, 이것은 ESA GIMs 모델이 IGS·JPL·CODE의 GIMs 모델들과는 다른 자료 처리 기법을 사용하고, 채프만 모델(Chapman Profile)에 많이 의존하기 때문으로 분석된다.

표 1. 8일 동안 글로벌 모델과 KASI 모델간의 RMS값 변화(TECU).

날짜	KASI-IGS	KASI-JPL	KASI-CODE	KASI-ESA
10.27	3.50	2.90	3.36	8.68
10.28	2.63	3.57	3.66	7.69
10.29	3.75	3.96	3.93	10.52
10.30	3.04	3.91	4.47	8.97
10.31	3.69	3.47	3.64	8.66
11.01	3.43	2.29	3.49	9.60
11.03	4.76	3.50	4.32	5.99
11.04	4.27	3.51	3.80	7.33
평균(RMS)	3.63	3.39	3.83	8.43

4. 결론

본 연구는 한국천문연구원에서 운영중인 9개의 GPS 상시 관측망 데이터를 이용하여 한반도 상공의 준실시간 전리층 변화 감시 및 지역적 전리층 모델의 정밀도를 향상시키기 위한 목적으로 수행되었다. 하루 동안 한반도 상공 전리층의 총전자수 변화 감시가 용이하고, 자기 폭풍등과 같은 이벤트 발생시 충분히 그 변화를 추정하는 것 또한 가능하다는 것이 입증되었다. KASI의 지역적 전리층 모델은 격자 기반의 모델로써, 한반도 상공을 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 작은 공간 해상도로 분할하여 각 격자점의 총전자수를 산출하는 기법을 사용하였다. 이 격자 모델을 기초로 한반도 상공에 해당하는 위도($32^{\circ} \times 40^{\circ}$)와 경도($123^{\circ} \times 131^{\circ}$)의 모든 공간 분할 지역에 대해 Cubic spline 내삽법을 적용하고 IDW를 이용하여 보다 정밀하게 각 격자점의 총 전자수 값을 다시 추정하였다.

정밀도 비교 검증을 위해 2003년 10월 전리층의 변화가 매우 유동적인 시점을 채택하여 JPL-IGS-CODE와 ESA의 GIMs 모델과 한반도 상공의 특정 위·경도에 대해 24시간 동안 전리층 총전자수 변화를 비교하였다. GIMs 모델들은 2시간 간격으로 전지구의 위·경도 각각 $2.5^{\circ} \times 5^{\circ}$ 의 격자에 해당하는 총 전자수 값을 제공해주기 때문에 시간에 따른 총 전자수 변화가 내삽법을 적용해도 완만할 수밖에 없다. 하지만 KASI 지역적 전리층 모델은 30초 간격으로 총전자수 값을 산출하기 때문에 전리층의 급격한 변화 감시가 가능한 반면 순간적인 오차 요인을 효율적으로 제거하지 못하는 단점을 포함하고 있다.

KASI의 지역적 전리층 모델이 JPL-IGS-CODE의 GIMs 모델과는 RMS로 평균 3~4TECU 정도의 총전자수 차이를 보이는 것을 알 수 있었고, ESA의 GIMs 모델과는 다소 큰 RMS값 차이를 보였다. GIMs 모델에서 제공하는 오차 범위를 2~8TECU라 가정하면 자료 처리 기간 전리층의 총 전자수가 매우 급격하게 변화 했음에도 불구하고, 본 연구에서 개발된 전리층 모델의 정밀도가 우수함을 알 수 있었다. 또한 지역적으로 국한된 GPS 관측망 데이터를 이용했기 때문에 오히려 전 지구적인 GIMs 모델 보다는 KASI의 지역적 전리층 모델이 전리층 변화 감시에 더 효율적일 수가 있다.

이러한 정밀한 지역적 모델을 기초로 고도에 따른 총전자수 산출뿐만 아니라 실시간 또는 준실시간으로 한반도 상공의 우주 환경 감시 역할이 가능하리라 판단된다. 또한 저가의 GPS 수신기를 사용하는 사용자에게 전리층 보정 정보를 제공함으로써 정밀도를 향상 시켜 줄 수 있는 발판을 마련하는 계기가 될 것이다.

참고문헌

- 조경석, 문용재, 김연한, 최성환, 김록순, 박종욱, 김해동, 임무택, 박영득 2004, 한국우주과학회지, 21, 325
- Biel, H. A. 1990, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 52, 9
- Erickson, C. 1992, *IONGPS*, 43, 753
- Fotopoulos, G., & Cannon, M. E. 2001, *GPS Solutions*, 4, 1
- Gao, Y., & Liu, Z. 2002, *Journal of Global Positioning System*, 1, 18
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. 1992, *GPS Theory and Practice* Fifth, revised edition (Wien: Springer-Verlag), pp.104-105
- Lancaster, P., & Salkauskas, K. 1986, *Curve and Surface Fitting* (London: Orlando), p.280
- Leonovich, L. A., Palamartchouk, K. S., Perevalova, N. P., & Pirog, O. M. 2000, *EPS*, 52, 670
- Mannucci, A. J., Wilson, B. D., Yuan, D. N., Ho, C. H., Lindqwister, U. J., & Runge, T. F. 1998, *Radio Science*, 33, 566
- Saito, A., Fukao, S., & Miyazaki, S. 1998, *Geophysics*, 25, 3080
- Wilson, B. D., Mannucci, A. J., & Edwards, C. D. 1995, *Radio Science*, 30, 640
- Zhao, C., SHUM, C. K., Yi, Y., Ge, S., Bilitza, D., & Callahan, P. 2004, *Marine Geodesy*, 27, 730