

지역적인 GPS 관측 데이터를 이용한 이온층 모델링 및 추정

황유라* · 박관동** · 박필호** · 임형철** · 조정호**

콜로라도대학교 항공우주공학과*, 한국천문연구원 GPS 연구그룹**

Ionosphere Modeling and Estimation Using Regional GPS Data

Yoo-La Hwang*, Kwan-Dong Park**, Pil-Ho Park**, Hyung-Chul Lim**, and Jeong-Ho Joh**

Dept. of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, USA*

GPS Research Group, Korea Astronomy Observatory**

Abstract : We present a GPS-derived regional ionosphere model, which estimates Total Electron Content (TEC) in a rectangular grid on the spherical shell over Korea. After dividing longitude and latitude over Korea with $1^\circ \times 1^\circ$ spatial resolution, the TEC at the vertex of the grid was estimated by the Kalman filter. The GPS data received from nine nationwide GPS stations, operated by Korea Astronomy Observatory (KAO), were used for this study. To reduce inherent noises, the pseudorange data were phase-leveled by a linear combination of pseudoranges and carrier phases. The solar-geomagnetic reference frame, which is less variable to the ionosphere movement due to the Sun and the geomagnetic field than an Earth-fixed frame, was used. During a quiet time of solar activity, the KAO's regional ionosphere map indicated 30-45 Total Electron Content Unit at the peak of the diurnal variation. In comparison with the Global Ionosphere Map of the Center for Orbit Determination in Europe, RMS differences were at the level of 4-5 TECU for five days.

Key Words : GPS, Ionosphere, Phase-leveled Pseudorange, Rectangular grid, Kalman Filter, TEC.

요약 : 이온층 구면을 사각형 격자로 분할하여 각 격자에서 총전자수를 추정하는 지역적 GPS 이온층 모델을 제시한다. 한반도 상공을 위도와 경도 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 공간해상도를 가진 격자로 구분하고 칼만 필터(Kalman filter)를 이용하여 격자 상의 총전자수를 추정하였다. 이 연구를 위해 한국천문연구원에서 운영하고 있는 전국 규모의 9개 GPS 상시 관측소의 데이터를 이용하였다. 수신된 의사거리 데이터의 측정 잡음을 줄이기 위해 의사거리와 반송파 위상 데이터를 선형 조합한 위상보정 의사거리(phase-leveled pseudorange) 데이터를 새롭게 만들어 사용하였다. 또한 지역적 이온층의 변화에 적합한 태양-지자기 좌표계(solar-geomagnetic reference frame)를 이용하였다. 태양 활동이 비교적 활발하지 않은 때의 경우, 이 연구의 모델은 이온층 활동이 활발한 낮 시간대의 총전자수가 대략 30-45 TECU 정도로 나타났다. 이 모델의 신뢰성을 평가하기 위해 한국천문연구원(Korea Astronomy Observatory, KAO)의 지역적 모델과 Center for Orbit Determination in Europe의 전 지구적 모델에 의한 총전자수를 동일 지역에 대해 비교했을 때 5일 동안 약 4-5 TECU 정도의 RMS 차이를 보였다.

1. 서론

2000년 5월 1일 Selective Availability(SA)가 해제된 이후, GPS를 이용한 정밀 좌표 결정의 가장 큰 오차 요인은 이온층에 의한 신호 지연이다. GPS는 L 밴드 상의 두 주파수(L1=1575.42 MHz, L2=1227.6 MHz)를 사용하는데, 이 주파수 영역에서의 전파는 이온층을 통과하면서 자유 전자들에 의한 전파 경로의 굴절 때문에 신호 지연 현상이 생긴다. 태양 활동이 비교적 활발하지 않을 때, GPS 측정값 중 이온층에 의한 오차는 수 cm에서 수십 m에 이른다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1992). 그러나 2002년과 같이 태양 활동이 활발했던 때에는 그 오차가 150 m에 달했다(Komjathy *et al.*, 2002).

GPS 신호의 이온층에서의 지연 정도를 결정하는 가장 중요한 요소는 총전자수(TEC)이며, 이는 태양 활동이나 계절, 일변화, 수신자의 위치, 시선 방향 등에 따라 변한다. 정밀한 총전자수 값의 추정에는 우주환경 연구나 지구 원격탐사 등의 여러 응용분야에 이용되며, 특히 국내외적으로 활발히 연구되고 있는 Wide Area Augmentation System(WAAS)의 정밀도를 향상시키기 위해 필수적이다(Hansen, 2002). 또 한반도 상공의 이온층 변화에 대한 감시는 이온층에 의한 통신 장애나 전파 지연 예보를 위해 반드시 요구된다(Mannucci *et al.*, 1998).

총전자수의 단위는 TECU(Total Electron Content Unit)를 사용한다. 1 TECU는 1 평방 미터에 10^{16} 개의 전자가 들어있는 것을 의미하고 이 값을 거리로 환산하면 0.1624 m에 해당 한다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1992).

현재 알려진 이온층 모델로는, Klobuchar 모델(Klobuchar, 1987), Jet Propulsion Laboratory(JPL)의 Global Ionosphere Map(GIM), Center for Orbit Determination in Europe(CODE)의 GIM(Schaer *et al.*, 1996) 그리고 IRI(International Reference Ionosphere) 모델 등이 있다. Klobuchar 모델은 GPS 위성에서 송신하는 정보를 삼각함수

(sinusoidal function)에 적합화(fitting) 시킨 모델로 50-60% 정도의 이온층 오차 보정만이 가능하다(Klobuchar, 1987). 반면에 JPL과 CODE의 GIM은 Klobuchar 모델보다는 높은 정밀도를 가진다. 이 두 모델은 전 세계 100여 개 이상의 GPS 상시 관측소의 데이터를 이용하여 만들어진다. JPL의 모델은 삼각형 격자를 이용한 보간법을 사용하며(Wilson and Mannucci, 1993), CODE는 구면조화함수(spherical harmonics)를 사용한다. 이들은 주로 전 지구적 규모의 이온층 모델에 사용되고 있다.

일본은 이온층 감시를 위해, 앞서 언급한 모델 대신에 일본 내 1000여 개 GPS 상시 관측소로부터 얻어진 데이터를 이용하여 일본 상공을 $0.15^\circ \times 0.15^\circ$ 격자로 나눈 다음, 격자 안에 들어오는 총 전자수를 평균하는 방법을 사용한다(Otsuka *et al.*, 2002). 그러나 이 방법은 GPS 상시 관측소가 70여 개에 불과한 국내 실정에는 적합하지 않다.

이 연구는 적은 수의 상시 관측소를 이용하여 비교적 빠른 시간 내에 정밀 계산이 가능한 지역적 이온층 모델을 제시한다. GPS 데이터를 이용한 시선 방향 총전자수 계산 방법과 GPS 데이터의 잡음을 줄이는 보정법에 대해 소개하고, 사각형 격자 모델을 근간으로 한 시공간상의 수직 방향 총전자수(Vertical TEC, VTEC) 추정 방법을 논한다.

2. 총전자수 계산 방법

GPS 수신기에는 L1과 L2 두 주파수를 모두 수신할 수 있는 이중 주파수용 수신기와 L1 주파수만 수신하는 단일 주파수용 수신기가 있다. 이중 주파수용 수신기는 고가인 반면에 두 개의 주파수 차이를 이용하여 이온층에 의한 신호 지연 오차를 대부분 제거 할 수 있다. 한편, 단일 주파수용 수신기는 저가이지만 이온층에 의한 신호 지연 오차를 완전히 제거 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 그러므로 단일 주파수용 수신기는 이중 주파수 수

신기로 이루어진 지상의 GPS 상시 관측소 데이터를 이용하여 추정된 이온층 모델을 사용함으로써 그 오차를 상당 부분 보정할 수 있다(Komjathy et al., 2002).

GPS 위성에서 송신되는 신호들 중, 반송파 위상은 잡음이 없고 정밀한 총전자수 계산이 가능하지만, 신호끊김(cycle slip) 현상을 고려해야 하고 모호정수(integer ambiguity)를 찾아야 한다. 반면에, 의사거리 데이터는 신호끊김 현상이 없고 모호정수를 찾을 필요가 없지만, 다중경로 오차(multipath error)와 시스템의 잡음이 많이 내재되어 있다. 따라서 이 연구에서는 의사거리와 반송파 위상 데이터의 장단점을 상호 보완한 위상보정 의사거리(phase-leveled pseudorange) 데이터를 이용하여 총전자수를 계산한다.

L1, L2 두 주파수의 경우 의사거리 데이터의 관측 값(P1, P2)은 수식적으로 다음과 같이 표현된다.

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

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

여기에서

ρ	GPS 위성과 수신기 사이의 거리
c	빛의 속도
δt^s	GPS 위성의 시계 오차
δt_r	수신기 시계 오차
$f_i(i=1,2)$	L1, L2 주파수
ε_{trop}	대류층에 인한 오차
ε_{multi}	다중경로 오차
$\varepsilon_{L_i}(i=1,2)$	L1, L2 상의 수신기 잡음

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

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

다시 식(1)로부터 식(3)을 빼면 L1 의사거리에 내재된 이온층에 의한 오차 값이 계산 된다.

반송파 위상의 이온층 오차 또한 의사거리 데

이터에서 계산된 것과 같은 방법의 선형 조합에 의해 구할 수 있다. 이온층 오차에 의한 신호 지연 거리는 이온층 내의 총전자수로 변환될 수 있다(1 TECU=0.162 m). 그러므로 위상보정 의사거리 데이터를 이용한 총전자수는 식(4)처럼 의사거리와 반송파 위상의 총전자수에 대한 선형 조합으로 이루어진다.

$$\overline{(P1-P2)}_k = (P1-P2)_k + \{ \overline{(P1-P2)}_{k-1} + \delta(\Phi_1 - \Phi_2)_{k, k-1} \} \quad (4)$$

여기서 $(P1-P2)_k$ 는 시각 k에 의사거리 데이터로부터 유도된 총전자수를 의미하고 $\delta(\Phi_1 - \Phi_2)_{k, k-1}$ 는 반송파 위상 데이터를 이용하여 구한 시각 k와 시각 k-1사이의 총전자 수 차이를 나타낸 것이다. $\overline{(P1-P2)}_{k-1}$ 와 $\overline{(P1-P2)}_k$ 는 k-1과 k 각각의 시각에서 위상보정 의사거리 데이터를 이용하여 계산한 총전자수를 나타낸다.

3. 이온층 모델링과 추정 전략

2차원적인 이온층 모델은 가상의 얇은 단일층 안에 총전자가 밀집되어 분포한다는 가정 아래 만들어진다. 일반적으로 태양 활동이 활발하지 않은 날의 낮 시간 동안 전자밀도 분포는 대부분의 전자가 450 km 높이에 밀집되어 있다(Mannucci et al., 1998). 이 논문에서도 가상의 단일층 높이를 450 km로 가정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 GPS 위성으로부터 수신기까지 시선 방향의 연결선이 450 km 상공에 있는 가상의 단일 층과 만나는 점을 Ionospheric Pierce Point(IPP)로 정의한다(Hofmann-Wellenhof et al., 1992).

IPP에서의 총전자수 변화는 태양 활동과 지구 자기장에 민감한 영향을 받는다. 그러므로 지구 중심 좌표계를 사용하기 보다는 총전자수를 기술하는데 적합한 좌표계인 태양-지자기 좌표계(solar-geomagnetic frame)를 사용한다. 식(5)에서 보는 바와 같이 IPP의 경도 s 를 지방시(Local Time)로 표현하여 이온층에 의한 오차 변화가 지방시와 일치하게 하였다.

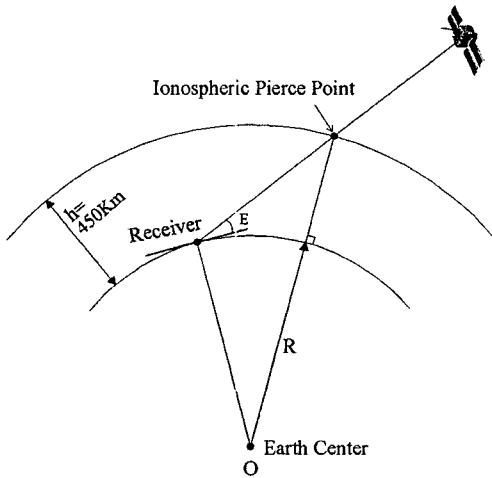


Fig. 1. Geometry of the slant TEC in the ionosphere shell.

$$s = LT - 12h = UT + \lambda_0 - 12h \quad (5)$$

여기서 UT 는 세계시(Universal Time), LT 는 지방시를 의미하고, λ_0 는 지구 중심 좌표계(geocentric coordinate)로 표현된 IPP의 경도를 나타낸다. 반면에 IPP의 위도는 지자기 좌표계(geomagnetic frame)를 사용한다. 이는 이온층의 총전자수 변화를 지구 자기장 활동과 연관지음으로 데이터 처리의 정확성을 더욱 높일 수 있기 때

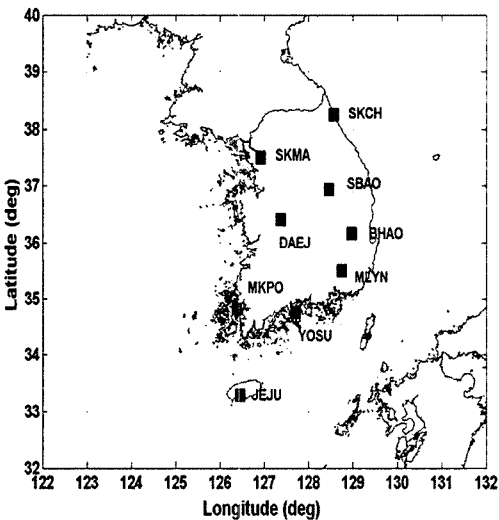


Fig. 2. Nine KAO GPS stations in $1^\circ \times 1^\circ$ spatial resolution.

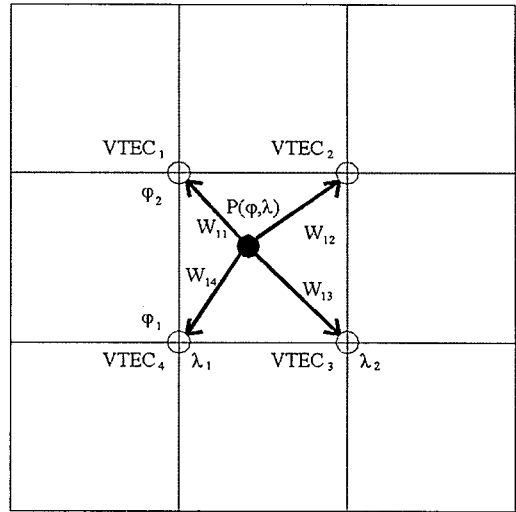


Fig. 3. Relationship between slant TEC and vertical TEC.

문이다.

한반도 상공의 단일 이온층을 Fig. 2와 같이 공간 해상도 $1^\circ \times 1^\circ$ 격자로 나눈 다음, IPP의 위도와 경도가 각각 $32^\circ - 40^\circ$ 와 $122^\circ - 132^\circ$ 사이에 해당하는 시선 방향 총전자수만을 선택한다. Fig. 2는 한반도 상공을 공간 해상도에 따라 나눈 격자들과 이 연구에서 사용된 한국천문연구원(Korea Astronomy Observatory, KAO)에서 운영하는 9개의 GPS 상시 관측소의 위치를 보여주고 있다. 이 연구에 사용된 관측소들의 위치는 경도 126도에서 130도, 위도 33도에서 39도 사이에 존재한다.

Fig. 3은 시선 방향으로의 총전자수가 격자점 상의 수직 방향 총전자수로 어떻게 전환되는가를 도식화 한 것이다.

Fig. 3의 점 $P(\phi, \lambda)$ 는 특정 GPS 위성의 시선 방향 상에 존재하는 총전자수를 의미하고, $VTEC_j$ ($j=1, 2, 3, 4$)는 격자점에서 추정될 수직 방향의 총전자수를 나타낸다. 즉 점 $P(\phi, \lambda)$ 에서의 총전자수에 사상함수(mapping function)를 적용하면 수직 방향 총전자수로 변환되고, 변환된 수직 방향 총전자수는 W_{ij} 라는 기저 함수에 의해 $VTEC_j$ ($j=1, 2, 3, 4$)들과의 상관 관계로 표현 될 수 있다. 이러한 상관 관계는 식(6)으로 표현된다.

$$TEC_i = f(E)_i \sum_{j=1}^4 (VTEC)_j \cdot W_{ij} + b_{sr} \quad (6)$$

TEC_i	IPP에서 시선 방향으로 관측된 총 전자수
$VTEC_j$	4개 격자점 상의 수직한 방향으로 추정되는 총전자수
W_{ij}	TEC_i 와 $VTEC_j$ 상관 관계를 나타내는 기저함수
b_{sr}	GPS 위성과 수신기 오차
$f(E)$	사상함수 (식(7) 참고)

식(6)에서 $f(E)$ 는 시선 방향 총전자수를 격자점 상의 수직 방향 총전자수로 변환하는 사상함수이며 식(7)에서 자세히 나타내었다. 여기서 E 는 Fig. 1에서 도시하고 있는 것처럼 GPS 위성의 고도 각이며, h 는 450 km로 가정한 가상의 단일층 높이를, R 은 지구 반지름을 의미한다(Mannucci et al., 1998, Gao et al., 2002).

$$f(E) = \left[1 - \left(\frac{\cos E}{1 + \frac{h}{R}} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

이 연구에서는 KAO 관측소에서 30초 간격으로 120분 동안 수신한 위성보정 의사거리 데이터를 가지고 식(6)에 칼만 필터를 적용하여 수직 방향 총전자수를 추정하였다. 또 GPS 위성과 수신기의 오차는 수직 방향 총전자수 추정 과정에서 동시에 계산된다(Wilson and Mannucci, 1993). GPS 위성의 주파수간 편향(interfrequency bias)은 무시할 정도의 작은 값으로(Wilson and Mannucci, 1993) 이 모델에서는 GPS 위성과 관측소의 주파수간 편향을 동시에 추정하여 수직 방향 총전자수를 계산하였다.

4. 결과

Fig. 4는 사각형 격자 모델을 토대로 추정된 2003년 1월 26일 한반도 상공의 이온층 시공간 변

화도이다. 이 이온층 변화도는 위도 32°부터 40°, 경도 122°부터 132°까지 한반도 상공 위의 총전자수 추정치를 매 2시간마다 보여준다. Fig. 4를 보면 낮 시간으로 갈수록 총전자수가 많아지고 밤으로 갈수록 총전자수의 값이 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉 오후 1시부터 3시까지가 총전자수의 분포에 있어 가장 높은 값을 보인다. 공간상으로 북동쪽은 낮은 TECU 값을 남서쪽은 높은 수치를 나타냈다. 데이터 처리에 사용된 2003년 1월 26일은 태양 활동이 비교적 활발 하지 않은 날로, 공간상으로 남서쪽에서 최고치가 대략 30 TECU 이상의 값을 보이고 있다.

한반도 상공의 총전자수 추정 값은 아직 비교할 만한 데이터나 모델이 존재하지 않기 때문에 CODE의 GIM과 상대적인 비교를 하였다. Fig. 5는 KAO의 모델로 추정된 5일 동안의 한반도 상공 총전자수 값들을 위도 35°와 37°에 대해 각각 CODE의 GIM과 비교하였다. 2003년 1월 25일은 다른 날짜에 비해 총전자수가 비교적 높았고, 지역적 GPS 데이터에 의해 추정된 KAO의 모델은 CODE의 GIM에 비해 높은 수치를 기록하였다.

Fig. 5에서 보는 것처럼, 2003년 1월 25일부터 1월 29일 까지 5일 동안의 총전자수 분포는 CODE의 GIM과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. KAO의 모델과 CODE의 모델은 위도 35°일 때는 4.67 TECU의 RMS 차이를 나타내었고 37°일 때에는 5.30 TECU의 RMS 차이를 보였다. 비교에 사용된 CODE의 모델은 전세계 상공의 경도와 위도를 5°×25° 격자로 분할하여 추정된 총전자수의 값을 2시간 마다 제공 한 것이다. 그래서 KAO의 모델과 비교하기 위해 CODE의 GIM 중에서 한반도 상공에 해당하는 데이터를 가지고 겹삼차 스플라인(bi-cubic-spline) 보간법(interpolation)을 적용하여 주어진 공간 해상도 1°×1°로 변환하였다. 두 모델 간의 RMS 차이는 근본적으로 다른 두 모델의 차이에서 발생하는 오차 외에도 스플라인 보간법 특성에 기인하는 끝점에서의 오차가 포함 되었다고 추정된다.

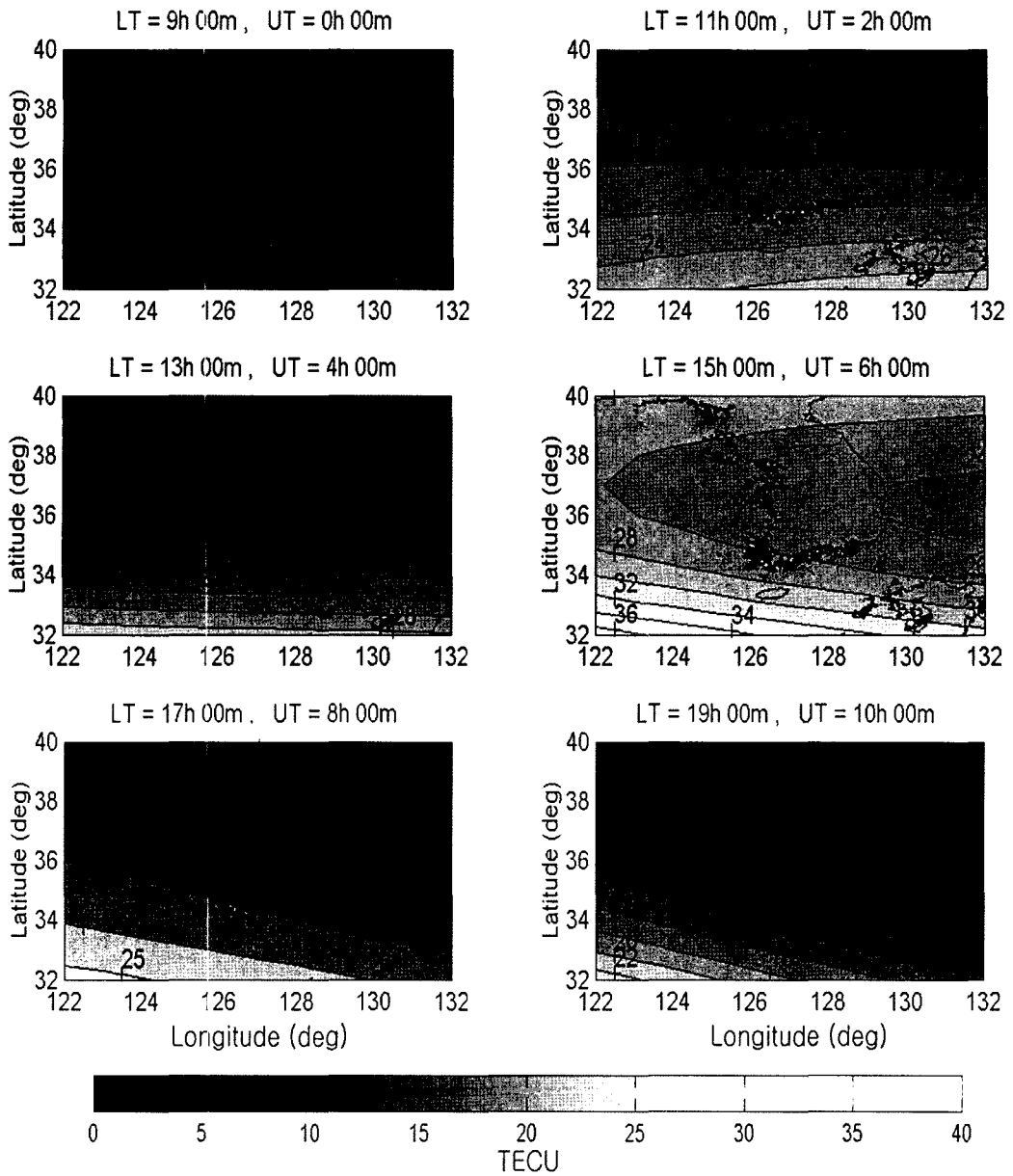
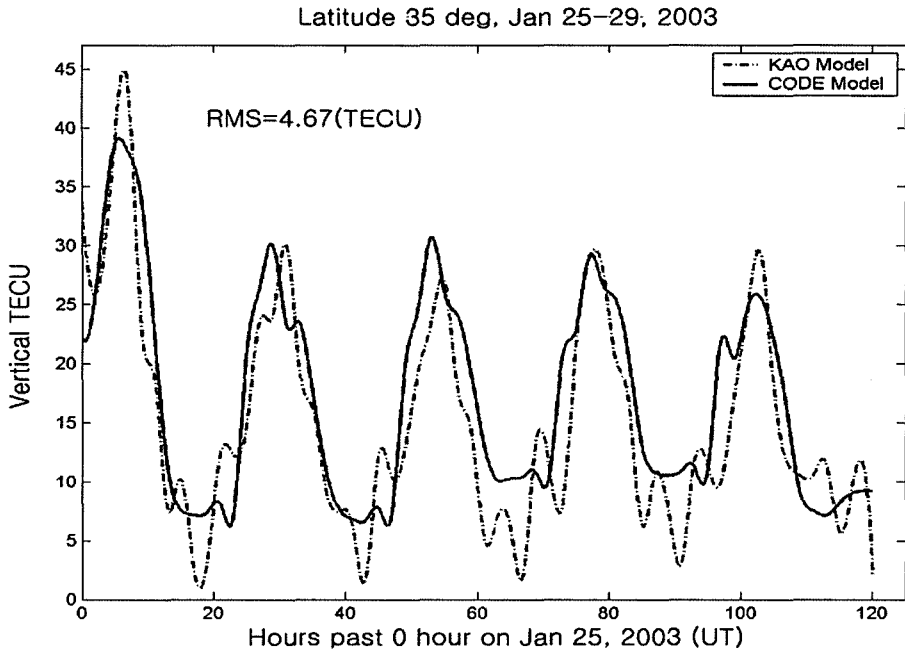


Fig. 4. Regional ionosphere map over Korea on Jan. 26, 2003.

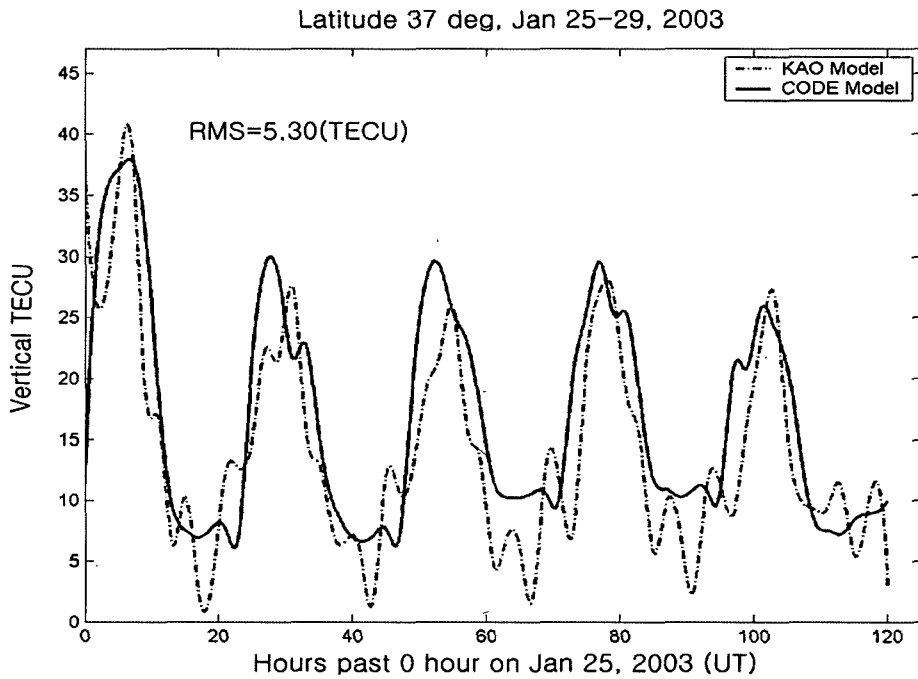
5. 결론

국내 GPS 관측망의 데이터를 이용하여 준-실시간 구현이 가능한 한반도 상공의 지역적 이온층 지도가 만들어졌다. 이온층 변화에 적합한 태양-지자기 좌표계를 사용하였고 위상보정 의사거리

데이터를 통하여 관측 값의 잡음을 줄였다. 이 연구의 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 사각형 격자 모델을 통해 한반도 상공의 준-실시간 총전자수 추정이 가능하였다. 5일 동안 추정된 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 격자상의 총전자수를 시간대 별로 CODE의 GIM과 비교했을 때 4-5 TECU의 RMS 차이로 비교적 잘 일치하였다. 이 연구에서



(a) Latitude 35°



(b) Latitude 37°

Fig. 5. Comparison of the estimated vertical TECU by KAO and CODE models (Jan. 25-29, 2003).

제시한 한반도 상공의 총전자수 추정 방법과 모델의 적절함을 보여준다.

현재 천문연구원에서는 2차원 이온층 모델을 발전시켜 3차원에서의 시선 방향을 따른 정확한 총전자수를 계산하는 연구가 진행 중이다. 이 연구와 더불어 향후 3차원적 이온층의 총전자수 결정은 통신 장애, 그리고 우주 환경 연구 등 다양한 분야에 기여할 수 있으리라 전망된다.

참고문헌

- Gao, Y., X. Liao, and Z. Liu, 2002. Ionosphere modeling using carrier smoothed ionosphere observations from a regional GPS network, *Geomatica*, 56(2): 97-106.
- Gao, Y. and Z. Liu, 2002. Precise ionosphere modeling using regional GPS network data, *Journal of Global Positioning Systems*, 1(1): 18-24.
- Hansen, A. J., 2002. *Tomographic estimation of the ionosphere using terrestrial GPS sensors*, Ph.D. Dissertation, Stanford University, 200 pp.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, 1992. *GPS theory and practice fourth revised edition*, Springer.
- Klobuchar, J., 1987. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, AES-23(3): 325-331.
- Komjathy, A., B. D. Wilson, T. F. Runge, B. M. Boulat, A. J. Mannucci, L. Sparks, and M. J. Reyes, 2002. A new ionospheric model for wide area differential GPS: The multiple shell approach, *Presented at the ION National Technical Meeting, San Diego, CA, January 28-30*.
- Mannucci, A. J., B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister, and T. F. Runge, 1998. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements, *Radio Science*, 33(3): 565-582.
- Otsuka, Y., T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, 2002. A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan, *Earth Planets Space*, 54: 63-70.
- Schaer, S. G., M. Rothacher, and T. A. Springer, 1996. Global ionosphere maps based on GPS carrier phase data routinely produced by CODE analysis center, *EOS Transactions, AGU Spring Meeting*, 77(12): 71.
- Wilson, B. D. and A. J. Mannucci, 1993. Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data, *Proceedings of the Institute of Navigation GPS-93, Salt Lake City, Utah*, pp. 1343-1351.