

GPS 네트워크 기반의 전리층 모델을 이용한 단일 주파수 수신기의 측위 정밀도 향상

The Improvement of the Positioning Precision for Single Frequency Receiver Using Ionospheric Model Based on GPS Network

최병규¹⁾ · 박종욱²⁾ · 이상정³⁾

Choi, Byung-Kyu · Park, Jong-Uk · Lee, Sang-Jeong

Abstract

Ionosphere is the largest error source on propagation of GPS signals. Dual frequency (L1,L2) GPS receiver can be effectively able to eliminate the ionosphere error by using linear combination of two frequencies, but the single frequency receiver (L1) have to compute the ionosphere error. In this research, we developed the new ionospheric model with 1° by 1° spatial resolution based on the grid form using 9 GPS reference stations which have been operated by KASI (Korea Astronomy and Space Science Institute) and computed TEC (Total Electron Contents) over South Korea by epoch. This paper gives the positioning results of Klobuchar model with that of a newly developed KASI regional ionospheric model and shows the positioning precision of the KASI regional ionospheric model along with TEC variation of ionosphere.

Keywords : GPS, Ionosphere, Klobuchar model, TEC

초 록

전리층은 안테나에서 수신되는 GPS 신호에 가장 큰 오차를 유발시킨다. 이중 주파수(L1,L2)를 모두 사용하는 수신기는 두 주파수의 선형조합을 통해 전리층의 오차를 효율적으로 제거할 수 있지만, 단일 주파수 수신기(L1)는 전리층 모델을 이용하여 오차를 계산해야 한다. 본 연구에서는 한국천문연구원에서 운영하는 9개의 GPS 기준국 망 데이터를 이용하여 위·경도 각각 1°×1°의 공간 해상도를 갖는 격자 기반의 새로운 전리층 모델을 개발하였고, 매 관측 시간대별로 한반도 상공의 총전자수(Total Electron Contents, TEC)를 계산하였다. 기존의 Klobuchar 모델과 새롭게 개발된 KASI 전리층 모델에 의한 측위 결과를 서로 비교하였고, 전리층의 총전자수 변화에 따른 모델의 정밀도를 제시하였다.

핵심어 : GPS, 전리층, Klobuchar 모델, 총전자수

1. 서 론

전리층은 지구의 표면 위 50~1000km 높이에 분포하고 있으며 전자파가 통과 할 때 전리층의 분산적 성질에 의해 감쇄 또는 굴절해서 통과 하게 된다.

2000년 5월 1일 의도적 정밀도 저하 조치>Selective Availability, SA)가 해제된 이후, GPS를 이용한 정밀 좌표

결정의 가장 큰 오차 요인은 전리층에 의한 신호 지연이다.

GPS는 L밴드 상에 두개의 주파수(L1=1575.42MHz, L2=1227.6MHz)를 사용하는데, 이 주파수 영역에서의 전파는 전리층을 통과하면서 자유 전자들에 의한 전파 경로의 굴절 때문에 신호 지연 현상이 생긴다. 태양 활동이 비교적 활발하지 않을 때, GPS 측정값 중 전리층에 의한 오차는 수 cm에서 수십 m에까지 이른다(Hofmann-Wellenhof

1) 정회원 · 한국천문연구원 우주측지연구그룹 기술원(E-mail:bkchoi@kasi.re.kr)

2) 연결저자 · 한국천문연구원 우주측지연구그룹 책임연구원(E-mail:jupark@kasi.re.kr)

3) 충남대학교 공과대학 전자공학과 교수(E-mail:eesjl@gnu.ac.kr)

등, 1992). 그러나 2003년과 같이 태양 활동이 활발했던 때에는 그 오차가 100m에 도달할 정도이다. GPS 신호가 전리층을 통과할 때, 전리층에서 지연 정도를 결정하는 가장 중요한 요소는 총전자수(TEC)이며, 이는 태양 활동이나 계절, 일변화, 연변화, 수신자의 위치 그리고 시선 방향 등에 따라 변한다(Komjathy 등, 1997). 정밀한 총전자수 값의 추정에는 우주환경 연구나 지구 원격탐사 등의 여러 응용분야에 이용되며, 특히 국내외적으로 활발히 연구되고 있는 GPS 광역보정시스템(WAAS, Wide Area Augmentation System)의 정밀도를 향상시키기 위해 필수적이다(Hansen, 2002).

2. GPS 관측 방정식

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 전리층에 의한 신호 지연 오차를 보정하거나 대부분 제거 할 수 있다. 한편, 단일 주파수용 수신기는 저가이지만 전리층에 의한 신호 지연 오차를 완전히 제거 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 그러므로 단일 주파수용 수신기는 이중 주파수 수신기로 이루어진 지상의 GPS 상시관측소 데이터를 이용하여 추정된 전리층 모델을 사용함으로써 그 오차를 상당 부분 보정할 수 있다(Komjathy 등, 1997).

GPS 위성에서 송신되는 신호들 중에서 반송파 위상 데이터는 잡음이 적고 정밀한 총전자수 계산이 가능한 반면, 신호 끊김(Cycle Slip) 현상을 고려해야 하고 모호정수(Integer Ambiguity)를 반드시 결정해야만 한다(Erickson, 1992; Fotopoulos 등, 2001). 또한 정확한 모호 정수를 결정하기 위해선 정확한 측정값을 필요로 한다. 반면에, 의사거리 데이터는 신호 끊김 현상이 적고 모호정수를 결정할 필요가 없지만, 다중경로 오차(Multipath Error)와 시스템의 잡음이 많이 내재 되어있다. 따라서 본 연구에서는 의사거리와 반송파 위상 데이터의 장단점을 상호 보완한 위상보정 의사거리(Phase-leveled Pseudorange) 데이터를 이용하여 총전자수를 계산하였다. GPS의 L1, L2 두 주파수의 경우 의사거리 데이터의 관측 값(P1 또는 P2)은 수식적으로 다음과 같다(Klobuchar, 1987).

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

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

여기에서,

- ρ 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_m 다중경로 오차
- $\epsilon_{L_i} (i=1,2)$ L1, L2 상의 수신기 잡음
- k 관측시간 지수

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

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

다시 식 (3)에서 식 (1)을 빼면, 즉 전리층 오차를 포함하지 않는 새로운 관측 데이터 값에서 원래의 L1상에 있는 관측 데이터 값을 빼면, 식 (4)와 같이 L1 의사거리에 내재된 전리층 오차 값이 계산 된다. 이 때 전리층 오차에 의한 신호 지연 거리는 전리층 내의 총전자수로 변환될 수 있다(1 TECU (TEC Unit) $\cong 0.162m \cong 1.0 \times 10^{16} el/m^2$).

$$TECU_{P1-P2} = 9.52 \times (P1 - P2) \quad (4)$$

여기에서 9.52는 $f_2^2/(f_1^2 - f_2^2)$ 를 0.162로 나눈 값이다. 반송파 위상의 전리층 오차값 또한 의사거리 데이터에서 계산된 것과 같은 방법의 선형 조합에 의해 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$I_{\phi_{ionofree}}(k) = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi1(k) - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi2(k) \quad (5)$$

3. GPS 네트워크

네트워크 기반의 정밀한 지역적 전리층 모델을 개발하기 위해 사용된 GPS 기준국은 한국천문연구원의 DAEJ 국제 기준점(IGS)을 포함하여 9개 관측소, 즉 BHAO(보현산), JEJU(제주), MKPO(목포), MLYN(밀양), SBAO(소백산), SKCH(속초), SKMA(서울) 그리고 YOSU(여수)이다. 각각의 GPS 상시 관측소는 한반도 상공을 모두 포함할 정도로 잘 분포되어 있고, 그림 1에서 볼 수 있듯이 한반도 상공뿐만 아니라 그 주변 지역의 위도·경도에 대한 공간해상도를 각각 1°×1°의 격자로 나누었다.

4. 전리층 투과지점(IPP) 추정

전리층 통과 지점(IPP, Ionosphere Pierce Point)은 전자 밀도가 최대인 지점(대략 350~500km)을 수신기와 GPS 위성 사이의 신호가 투과하는 한점을 의미한다. 정밀한 전리층 모델 개발에 있어서 전파 신호의 전리층 통과 지점의 정확한 추정은 매우 중요하다. 잘못된 IPP 추정은 총전자수에 영향을 미치고 결국 이것은 측위 오차에 반영되게 된다. 본 연구에서는 전자밀도가 고도 350km에 밀집되어 있다는 가정 하에 모델을 구성하였다.

그림 2에서 (ϕ_u, λ_u) 는 사용자의 위·경도 좌표, E는 위

성의 고도, R_e 는 지구 반경(대략 6378.136km), ψ_{pp} 는 지구중심으로부터 측정된 사용자와 IPP사이의 각, 그리고 $(\phi_{pp}, \lambda_{pp})$ 는 IPP의 좌표를 나타낸다. IPP좌표를 계산하는 일반적인 수식은 다음과 같이 식 (6), 식 (7) 그리고 식 (8)에 잘 나타나 있다(Biel, 1990).

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

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

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

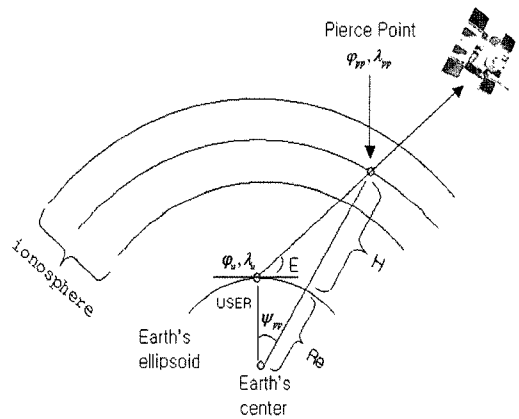


그림 2. 전리층 통과 지점에 대한 기하학적 배치도

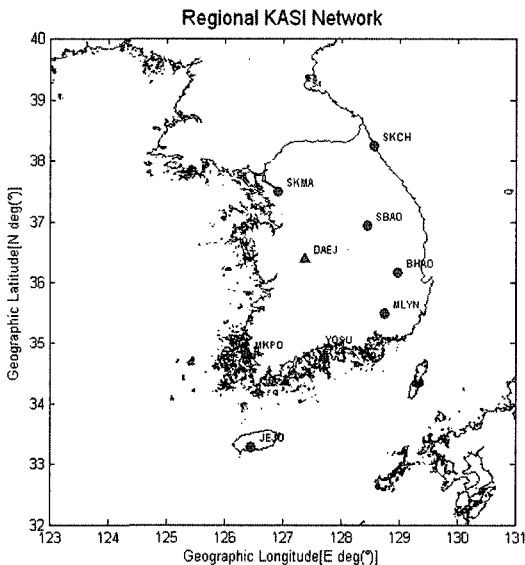


그림 1. 전리층 모델 개발에 사용된 한국천문연구원의 GPS 기준국망

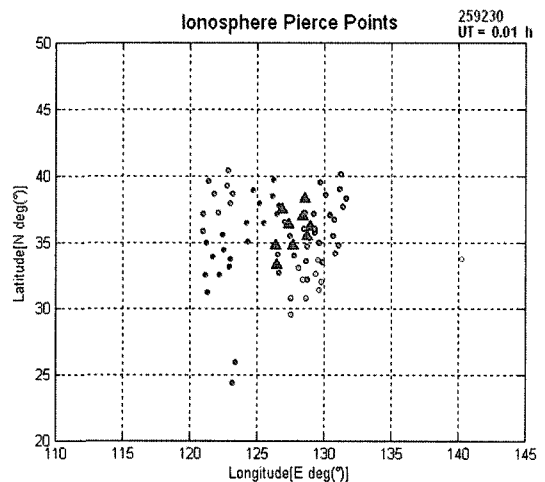


그림 3. 실시간으로 각 상시관측소에서 계산된 GPS 위성 신호의 전리층 투과지점 감시

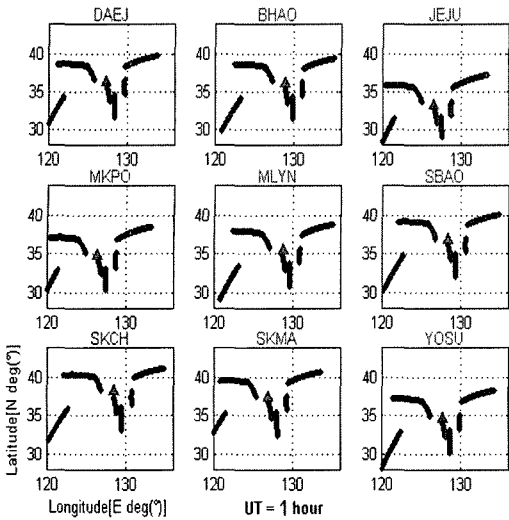


그림 4. 한시간 단위로 각 지역적 GPS 상시관측소에서 측정된 전리층 투과지점 모니터링

그림 3은 임의의 관측 시간 동안 GPS 위성신호의 전리층 투과 지점을 감시한 것을 나타낸다. 삼각형 형태로 표현된 것은 한국천문연구원에서 운영하고 있는 GPS 상시관측소들이다.

효율적인 준실시간 한반도 상공의 전리층 감시를 위해 9개 GPS 상시관측소 데이터가 이용되었다. 작은 원으로 표현된 것은 각 상시관측소에서 관측된 모든 위성에 대한 전리층 투과지점을 나타낸다.

전리층 투과지점은 매 관측 시간별로 계산되어 그림 4 처럼 모니터링 되며, 그림 4에서 보다 큰 범위의 위도와 경도를 설정한 것은 GPS 수신기의 임계각(Mask Angle)에 따른 전리층 투과지점을 관찰하고, GPS 위성신호의 전리층 투과지점이 한반도 상공의 한쪽에 치우쳐 있는 경우, 충전자수 결정에 어느 정도 영향을 주는지 알아보기 위함이다.

5. 격자기반 충전자수 추정

정밀한 충전자수 추정을 위해 본 연구에서 IDW(Inverse Distance Weight)기법을 적용하였다. IDW 기법에 대한 수식은 다음과 같다.

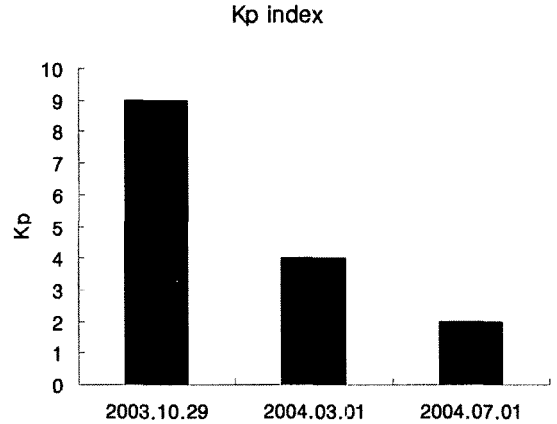


그림 5. 자료 처리 날짜에 따른 Kp 지수

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^s z_i \cdot 1/d_i^k}{\sum_{i=1}^s 1/d_i^k} \quad (9)$$

식 (9)에서 z_i 는 전리층 투과지점의 수직방향 충전자수 값을 의미하고, d_i 는 전리층 투과 지점과 각 격자점과의 2차원 거리를 의미한다.

6. 자료 처리 결과

전리층 변화로 인한 GPS 측위 정밀도의 비교 검증을 위해 특정 날짜의 데이터를 이용하여 자료처리를 수행하였다. 1)태양의 플레어 폭발로 인해 전지구적으로 전리층의 충전자수 변화가 심했을 때(2003년 10월 29일), 2)지자기 폭풍으로 일시적인 전리층의 충전자수 변화가 있었을 때(2004년 3월 1일), 3)전리층의 변화가 거의 없었을 때(2004년 7월 1일)를 선택하여 자료 처리를 수행하였다. 그림 5는 위의 세가지 경우에 해당하는 날짜의 Kp 지수 값을 나타내고 있으며, 그림 6은 KASI 전리층 모델을 이용하여 처리된 수직방향 충전자수(VTEC, Vertical TEC)의 일일 변화량을 나타낸 것이다. 전리층의 변화가 매우 유동적일 때에는 밤과 낮의 충전자수 변화가 거의 50 TECU에 이르며, 평상시에는 낮에 최고 25~30 TECU를 보이는 것이 일반적이다.

각각의 전리층 충전자수 값에 따라 현재 전지구적인 실시간 모델로 사용되고 있는 Klobuchar 모델(8개 변수만을 제공)과 한국천문연구원의 GPS 기준국망을 이용한 격

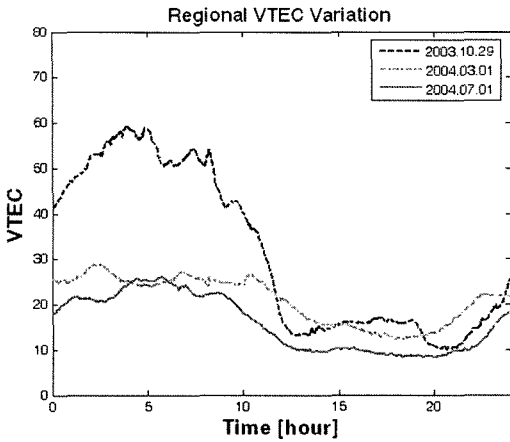


그림 6. KASI의 전리층 모델에 의한 수직 방향 총전자수 (VTEC) 일일 변화량 추정

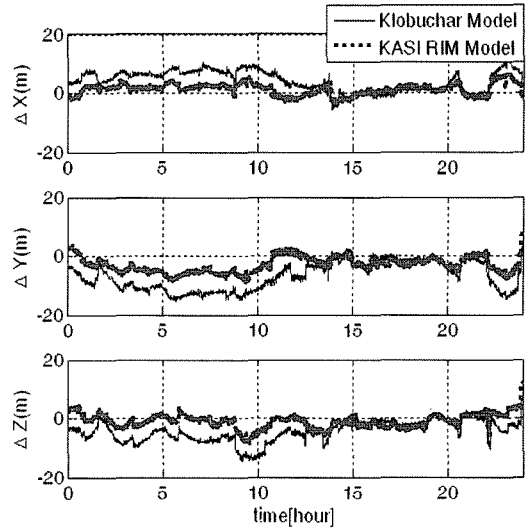


그림 8. 전리층의 변화가 심했을 때, 각 성분별 측위오차 비교

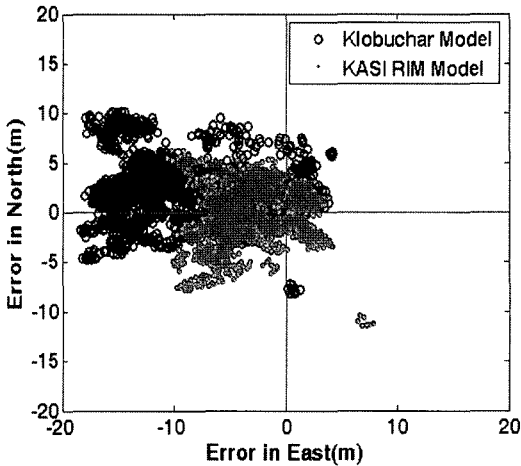


그림 7. 전리층의 변화가 심했을 때(2003년 10월 29일), Klobuchar 모델과 KASI 모델의 2차원 오차 비교

자 기반의 국지적 전리층 모델을 사용하였을 경우, L1 코드데이터만을 이용하여 각각의 측위 정밀도를 비교하였다. Klobuchar 모델은 전리층 활동에 따라 오차 보정률이 다르지만, 전리층 오차를 약 50~60%까지 보완하는 것으로 알려져 있다.

6.1 전리층 변화가 극심할 경우

그림 7과 8은 지난 2003년 10월 29일 태양 플레어 폭발로 인해 전지구적으로 전리층의 총전자수 변화가 심했을 때, Klobuchar 모델과 KASI 전리층 모델을 사용하여 측위 정밀도를 서로 비교한 것이다.

여기에서 참값은 베른대학에서 개발한 고정밀 측위 소프트웨어인 Bernese 5.0을 이용하여 결정된 것이라 가정하였다. Klobuchar 모델을 사용했을 경우에는, 측위 오차가 3차원 RMS(Root Mean Squares)로 11.49m가 발생했고, KASI 전리층 모델을 사용하였을 경우에는 5.29m의 측위오차가 발생했다. 즉, 전리층의 총전자수 변화가 심했을 때, KASI 전리층 모델을 사용하였을 경우 약 54% 측위 정밀도가 향상됨을 알 수가 있었다.

6.2 일시적인 전리층 변화의 경우

그림 9와 10은 지자기 활동이 활발한 시기에 전리층의 총전자수 변화로 인해 영향 받는 GPS 측위 정밀도를 두 모델을 사용하여 비교한 것이다.

낮 시간(UT 3h~10h, KST 12h~19h)동안에는 전리층의 총전자수 변화가 매우 유동적이기 때문에 측위 정밀도는 밤 시간 때 보다 나쁘게 나왔다.

Klobuchar 모델을 사용했을 경우에는, 측위 오차가 3차원 RMS로 6.41m가 발생했고, KASI 전리층 모델을 사용하였을 경우에는 4.24m의 측위오차가 발생했다. 이 때에는 태양활동이 극심할 때 보다 전체적으로 두 모델의 측위 정밀도가 향상되었고, KASI 전리층 모델을 사용하였을 때, 약 34%의 측위 정밀도 향상을 보였다.

6.3 전리층의 변화가 거의 없는 경우

그림 11과 12는 전리층내의 총전자수 값이 작은 특정

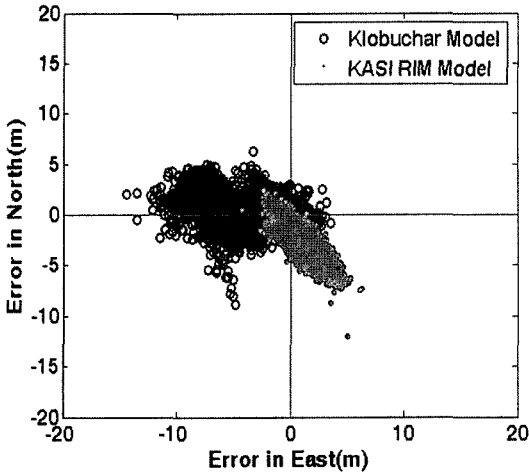


그림 9. 지자기 변화로 인해 전리층이 영향을 받았을 때(2004년 3월 1일), Klobuchar모델과 KASI모델의 2차원 오차 비교

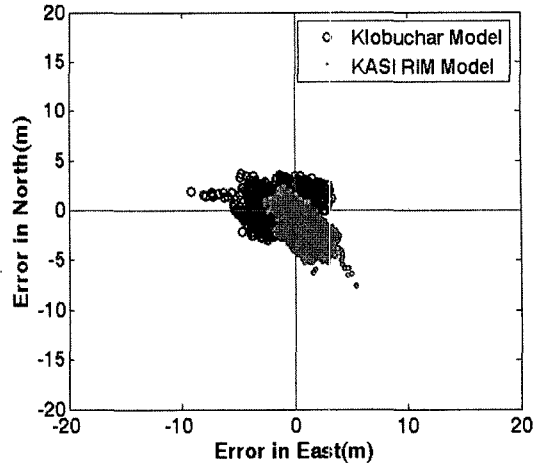


그림 11. 전리층내의 총전자수 변화가 작을 때(2004년 7월 1일), Klobuchar모델과 KASI모델의 2차원 오차 비교

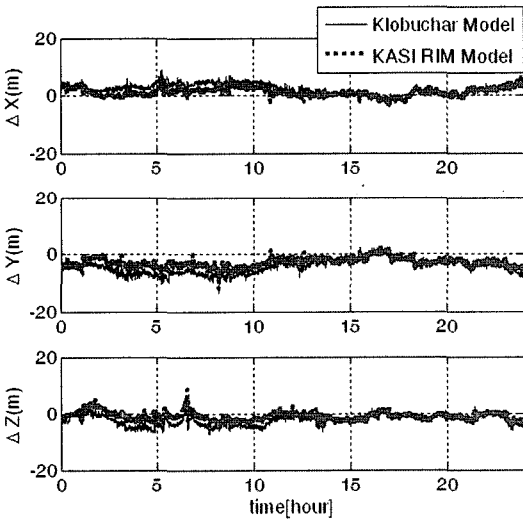


그림 10. 지자기 변화로 인해 전리층이 영향을 받았을 때, 각 성분별 측위오차 비교

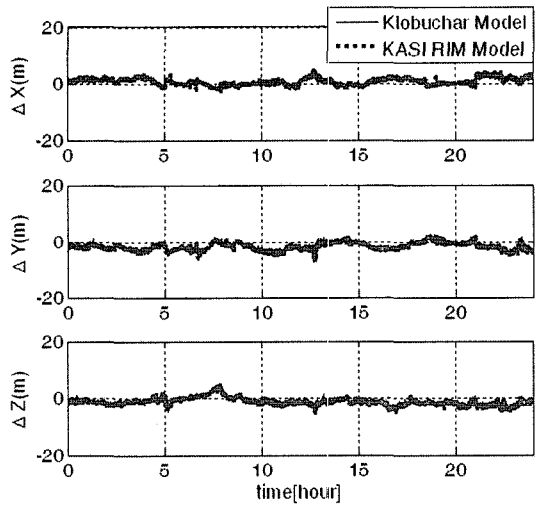


그림 12. 전리층내의 총전자수 값이 작을 때, Klobuchar모델과 KASI 모델의 2차원 오차 비교

한 날을 선택하여 두 모델간의 측위 정밀도를 비교한 것이다. 총전자수 변화가 심하지 않을 때에는 밤과 낮의 측위오차가 거의 유사함을 나타내고 있으며, Klobuchar 모델을 사용했을 경우에는, 측위 오차가 3차원 RMS로 3.79m가 발생했고, KASI 전리층 모델을 사용하였을 경우에는 3.27m의 측위오차가 발생했다. 이 때에는 약 14%의 측위 정밀도 향상을 보였다. 마찬가지로 전리층내의 총전자수 값이 작을 때에도 이전의 실험들 보다 측위 정밀도가

향상됨을 보이고 있다.

주목할만한 것은 전리층의 총전자수 값이 작을 때에는, 그림 12에서 볼 수 있듯이 밤과 낮의 측위오차차이가 없다는 것이다.

그림 13는 세가지 실험과정을 통해서 얻어진 두 모델간의 측위오차를 나타낸 것이다. 전리층의 총전자수 값이 작을수록 전체적인 측위오차가 향상됨을 보이고 있으며, 또한 네트워크 기반의 KASI 전리층 모델을 사용한 결과, 기존의 실시간 전리층 모델인 Klobuchar 모델을 사용했

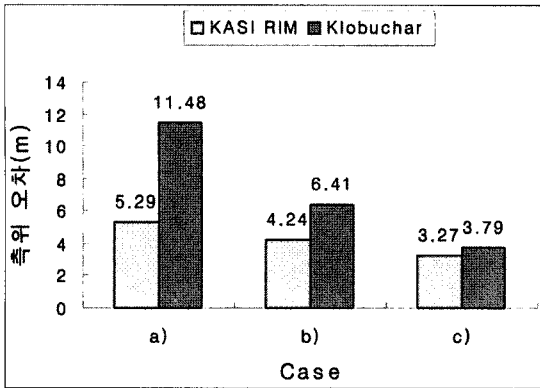


그림 13. 전리층 총전자수 값에 따른 각 실험별 측위 오차 비교

을 때 보다 전체적으로 측위 정밀도가 14~54% 향상되는 것을 알 수가 있었다.

7. 결 론

본 연구는 기존의 전리층 보정 모델을 대체할 수 있는 지역적 전리층 모델의 개발 및 이에 따른 정밀도 향상 효과를 살펴보기 위해 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전리층의 정밀한 총전자수 산출을 위해 한반도 상공의 위도와 경도를 각각 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 의 격자로 나누어 격자기반의 총전자수를 추정하는 모델을 구성하였다.
2. 한반도 전역에 고르게 분포하고 있는 한국천문연구원 9개 GPS 상시관측소 데이터를 이용하였고, 각 관측소별로 GPS 신호가 전리층을 투과하는 지점을 감시하는 알고리즘을 개발하였다.
3. GPS 신호 지연 중 가장 큰 오차를 내포하고 있는 전

리층 효과를 분석하고, GPS 네트워크 기반의 새로운 전리층 모델을 개발하여 기존의 실시간 전리층 모델인 Klobuchar 모델과 측위 정밀도를 비교한 결과, 개발된 모델을 사용하였을 경우 측위 정밀도가 최소 14%에서 최대 54%까지 향상되었다.

본 연구를 통해서 네트워크 기반의 정밀한 전리층 모델 개발로 측위 정밀도를 향상시킬 수 있었고, 개발된 모델을 이용하여 L1단일주파수 GPS 수신기를 사용하는 사용자들의 측위 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

- Biel, H.A. (1990), *The geomagnetic time and position of a terrestrial station*, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 52, No. 9, pp. 687-694.
- Erickson, C. (1992), *An Analysis of Ambiguity Resolution Techniques for Rapid Static GPS Surveys Using Single Frequency Data*, Proceedings of ION GPS-92, pp. 39-42.
- Fotopoulos, G. and Cannon, ME.(2001), *An Overview of Multi-Reference Station Methods for Cm-Level Positioning*, GPS Solutions, Vol. 4, No. 3, pp. 1-10.
- Hansen A.J. (2002), *Tomographic estimation of the ionosphere using terrestrial GPS sensors*, Ph.D. Dissertation, Stanford University, pp. 200.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J. (2001), *Global Positioning System Theory and Practice*, Springer-Verlag, Wien, New York.
- Klobuchar J. (1987), *Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users*, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, AES, Vol. 23, No. 3, pp. 325-331.
- Komjathy A. (1997), *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System*, Ph.D. dissertation, University of New Brunswick, Canada.

(접수일 2005. 12. 12, 심사일 2006. 3. 3, 심사완료일 2006. 6. 22)