

Differential Code Bias를 고려한 한반도 전리층 총전자수 지도 생성

Generation of Korean Ionospheric Total Electron Content Map Considering Differential Code Bias

이창문¹⁾ · 김지혜²⁾ · 박관동³⁾

Lee, Chang-Moon · Kim, Ji-Hye · Park, Kwan-Dong

Abstract

The ionospheric delay is the largest error source in GPS positioning after the SA effect has been turned off in May, 2000. In this study, we used 44 permanent GPS stations being operated by National Geographic Information Institute (NGII) to estimate Total Electron Content (TEC) based on pseudorange measurements phase-leveled by a linear combination with carrier phases. The Differential Code Bias (DCB) of GPS satellites and receivers was estimated and applied for an accurate estimation of the TEC. To validate our estimates of DCB, changes of TEC values after DCB application were investigated. As a result, the RMS error went down by about an order of magnitude; from 35~45 to 3~4 TECU. After the DCB correction, ionospheric TEC maps were produced at a spatial resolution of $1^\circ \times 1^\circ$. To analyze the effect of the number of sites used for map generation on the accuracy of TEC values, we tried 10, 20, 30, and 44 stations and the RMS error was computed with the Global Ionosphere Map as the truth. While the RMS error was 5.3 TECU when 10 sites are used, the error reduced to 3.9 TECU for the case of 44 stations.

Keywords : Ionosphere, Differential Code Bias, Total Electron Content, GPS

초 록

전리층에 의한 신호지연 오차는 2000년 5월 SA해제 후 GPS 측위의 가장 큰 오차 요인이다. 이 연구에서는 전리층 오차를 산출하기 위한 방법으로 국토지리정보원 44개소의 상시관측소로부터 제공된 위상평활 코드 의사거리 관측값을 이용하여 전리층 총전자수를 추정하였다. 총전자수를 정확하게 추정하기 위해 위성과 수신기의 하드웨어 바이어스인 DCB(Differential Code Bias)를 산출하여 적용하였으며, 적용 효과를 확인하기 위해 GIM을 기준으로 DCB 적용 전·후의 전리층 총전자수를 비교하였다. 그 결과, DCB를 적용했을 때 약 3~4 TECU, 적용하지 않았을 때 약 35~45 TECU의 RMS 오차를 나타냈다. DCB를 적용하여 $1^\circ \times 1^\circ$ 공간해상도의 격자형 전리층 총전자수 지도를 생성하였으며, 이때 총전자수 추정에 이용되는 상시관측소의 개소 수 증가에 따른 효과를 분석하기 위해 상시관측소의 개소 수를 10개소, 20개소, 30개소, 44개소 순으로 증가시키며 총전자수를 추정하였다. 각 총전자수 지도를 GIM과 비교하여 RMS 오차를 산출한 결과, 10개소의 상시관측소를 이용한 경우 5.3 TECU에서 44개소의 상시관측소를 이용한 경우 3.9 TECU로 감소하는 것을 확인하였다.

핵심어 : 전리층, 하드웨어 바이어스, 전리층 총전자수, 전지구 위성항법시스템

1. 서 론

정보통신기술의 발전과 위치기반서비스에 대한 사용

자들의 관심이 증가함에 따라 위치정보제공시스템에 대한 중요성이 더욱 부각되고 있다. 전지구 위성항법시스템, 특히 GPS(Global Positioning System)의 경우 측량이나

1) 교신저자 · 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 석사과정(E-mail : cm_lee@inha.edu)

2) 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 학사과정(E-mail : k6www6@naver.com)

3) 종신회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 부교수(E-mail : kdpark@inha.ac.kr)

교통, 건설, 기상 등 다양한 분야에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있으며 향후 시스템, 하드웨어 등의 계속되는 진화로 더 많은 분야에 응용이 가능할 것으로 예측된다. 이러한 GPS의 다양한 활용과 응용 서비스의 확장을 위하여 GPS 측위 정확도와 신뢰성 확보가 필수적이다. GPS 측위시 정확도를 저해하는 요인으로 위성과 수신기시계 오차, 궤도 오차, 다중경로 오차, 전리층 오차, 대류권 오차 등 다양한 오차 인자가 존재하는데, SA(Selective Availability)가 해제된 이후 전리층 오차는 정확도 저하에 가장 큰 요인으로 작용하고 있다. 따라서 보다 정밀하고 정확한 전리층 오차를 산출하는 것이 중요하다.

일반적으로 전리층 오차는 전리층 내부에 존재하는 총전자수(TEC, Total Electron Content)를 추정하여 나타낸다. 총전자수의 단위는 TECU로 1 TECU는 0.164m의 거리오차로 환산할 수 있다(Hofmann-Wellenhof 등, 2001). 전리층 총전자수는 GPS 관측값을 이용하여 추정할 수 있으며 근래에는 코드 의사거리와 반송파 위상의 장단점을 상호 보완한 관측값인 위상평할 의사거리(phase-leveled pseudorange)가 이용되고 있다. 위상평할 의사거리를 이용하면 전리층 총전자수를 비교적 간편하고 정밀하게 추정할 수 있다(황유라 등, 2003).

GPS 관측값을 이용하여 전리층 총전자수를 추정할 경우 특정 주어진 시각에서 두 개 이상의 관측정보 사이에 존재하는 하드웨어 바이어스(DCB, Differential Code Bias)를 고려해야 한다. 이 DCB는 전리층 총전자수를 추정하는데 있어서 정확도에 영향을 주기 때문에 반드시 결정해야 한다. DCB는 주어진 GPS 관측값을 수학적으로 조합하여 추정할 수 있다(최병규 등, 2009; Wilson 등, 1993).

황유라 등(2003)은 한국천문연구원에서 운영하는 9개소의 상시관측소를 대상으로 위상평할 의사거리를 이용하여 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 공간해상도의 전리층 총전자수 지도를 생성하였다. 김경희 등(2009)은 국토지리정보원에서 운영하는 45개소의 상시관측소 데이터를 이용하여 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 공간해상도의 총전자수 지도를 생성하였다. 여기서 황유라 등(2003)은 9개소의 상시관측소만을 이용하여 총전자수 지도를 생성했기 때문에 총전자수 추정에서 사용되는 상시관측소의 배치밀도가 낮다는 점, 김경희 등(2009)은 총전자수 산출시 사용되는 상시관측소의 개소수가 45개소로 비교적 많고 공간해상도는 높지만 DCB를 고려하지 않았다는 개선의 여지가 있다.

본 연구에서는 보다 정확한 전리층 총전자수 지도를 생성하기 위해 그림 1에 나타난 것처럼 국토지리정보원에

서 운영하는 44개소의 상시관측소 관측값을 이용하였으며, 각 상시관측소의 DCB를 산출하여 총전자수 추정에서 반영하였다. 그리고 CODE(Center for Orbit Determination in Europe)에서 제공하는 전지구 전리층 모델(GIM, Global Ionosphere Map)을 기준으로 DCB 적용 전·후 총전자수 추정 결과의 RMS 오차를 산출하여 정확도를 검증하였다. CODE의 GIM은 전 세계적으로 약 240개소 이상의 상시관측소 데이터를 사용하고 있으며, 구면조화 함수를 이용하여 총전자수를 추정한다(Jee 등, 2010). GIM은 현재까지 연구된 전리층 모델 중 가장 높은 정확도를 나타내기 때문에 비교 대상으로 선정하였다(최병규, 2009). 마지막으로 전리층 총전자수 산출에 이용되는 상시관측소의 개소수가 총전자수 지도의 정확도에 미치는 영향을 분석하였다.

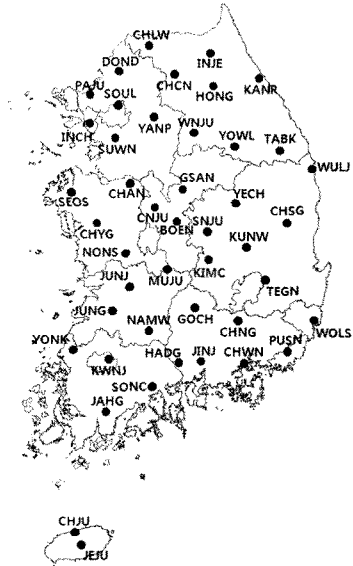


그림 1. 국토지리정보원 운영 GPS 상시관측소

2. 전리층 총전자수 추정

2.1 위상평할 의사거리 관측값

이중주파수 GPS 수신기에서 수신되는 L1(1575.42MHz)과 L2(1227.60MHz)신호에는 코드 의사거리와 반송파 위상이 포함되어 있으며 이러한 관측값을 이용하면 전리층 총전자수를 추정할 수 있다. 반송파 위상은 잡음이 없고 정밀한 총전자수 계산이 가능하지만, 사이클 슬립을 고려해야 하고 모호정수(integer ambiguity)를 결정해야 하는 어려움이 있다. 반면, 코드 의사거리는 사이클 슬립 현상이 없고 모호정수를 결정하지 않아도 되지만, 다중경로 오차와 시

스텝 잡음이 다수 존재한다. 그에 따라 두 관측값의 장점만을 가지고 있는 위상평활 의사거리 관측값을 생성하여 전리층 총전자수를 추정하는 연구가 다수 진행되었다.

위상평활 의사거리를 이용한 총전자수는 수식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다(황유라 등, 2003). 수식 (1)에서 $(P_1 - P_2)_k$ 와 $(P_1 - P_2)_{k-1}$ 는 각각 $k, k-1$ 시각에서 위상평활 의사거리 데이터를 이용하여 계산한 총전자수이고, $(P_1 - P_2)_k$ 는 k 시각에 의사거리를 이용한 총전자수, $\delta(\phi_1 - \phi_2)_{k,k-1}$ 는 k 시각과, $k-1$ 시각에 반송파 위상에서 유도된 총전자수의 차이를 나타낸다.

$$\overline{(P_1 - P_2)}_k = (P_1 - P_2)_k + \left[\overline{(P_1 - P_2)}_{k-1} + \delta(\phi_1 - \phi_2)_{k,k-1} \right] \quad (1)$$

그림 2는 위상평활 의사거리 관측값의 효과를 확인하기 위해 코드 의사거리를 이용했을 때와 위상평활 의사거리를 이용했을 때 산출된 전리층 총전자수를 비교한 것이다. 2011년 3월 1일의 PRN 1 위성과 PRN 3 위성을 대상으로 산출한 총전자수를 30초 간격으로 산출하여 나타냈다. 그 결과 위상평활 의사거리를 이용했을 때 총전자수가 코드 의사거리를 이용하여 산출된 총전자수보다 잡음이 작게 발생한 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 위상평활 의사거리를 이용하여 전리층 총전자수를 추정하였다.

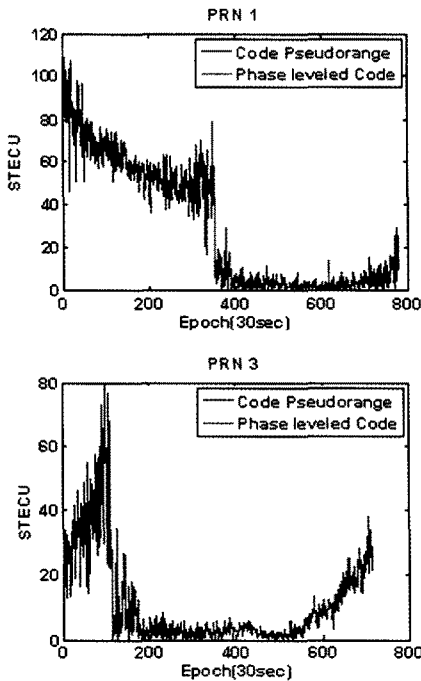


그림 2. 코드 의사거리와 위상평활 의사거리를 이용하여 산출한 전리층 총전자수

2.2 격자형 전리층 총전자수 추정

일반적으로 전리층 총전자수를 추정할 경우 자유전자가 전리층 내 두께가 0인 가상의 단일층에 밀집되어 분포하고 있다고 가정한다. 단일층의 고도는 적도지방의 경우 350-450km로 가정하는 것이 적당하고, 한반도와 같은 중위도의 경우 350km로 가정하는 것이 일반적이다(Ya'acob 등, 2008). 전리층 총전자수는 그림 3에 나타낸 것과 같이 수신기에서 위성을 향한 시선방향의 연결선이 단일층과 만나는 점(IPP, Ionosphere Pierce Point)에 대한 값을 추정하며, 위상평활 의사거리를 이용하여 추정된 전리층 총전자수는 IPP상의 시선방향 총전자수(STEC, Slant TEC)이다. IPP의 위·경도 ϕ_{pp} 와 λ_{pp} 는 수식 (2)-(4)를 통해 계산할 수 있다. 여기서 ψ_{pp} 는 지구 중심에서 수신기와 IPP 사이의 각을 나타내고, E 는 수신기로부터 위성까지의 고도각, R 은 지구 반경, H 는 가상 단일층의 고도, ϕ_u 와 λ_u 는 사용자의 위도와 경도, A 는 위성의 천정각이다. IPP 좌표는 태양활동과 지구자기장의 영향을 잘 나타낼 수 있도록 태양-지구자기 좌표를 사용한다(Klobuchar, 1987).

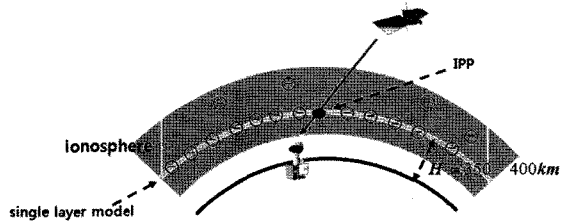


그림 3. 가상의 단일층과 IPP 개념도

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

$$\phi_{pp} = \sin^{-1} (\sin \phi_u \cos \psi_{pp} + \cos \phi_u \sin \psi_{pp} \cos A) \quad (3)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \psi_{pp} + \sin A}{\cos \phi_{pp}} \right) \quad (4)$$

이 연구에서는 위도 32~40°, 경도 122~132°를 범위로 하여 1° × 1° 공간해상도의 격자형 한반도 전리층 총전자수 지도를 생성하였으며, 이를 위해 IPP STEC 중에서 위도 32~40°, 경도 122~132° 영역에 위치한 값들을 선별하여 사용했다. 1° × 1°의 공간해상도를 선정한 이유는 다음과 같다. GIM은 비교적 높은 정확도의 총전자수를 제공하지만 격자 간격이 위도 2.5°, 경도 5°로써 우리나라 상공에 포함되는 지점이 없다. 따라서 우리나라 상공의 전리층 총전

자수 상태를 나타낼 수 있는 모델이 필요하며 GIM에서 제공하는 격자점상의 총전자수를 비교하여 GIM과 비슷한 정확도의 조밀한 격자형 전리층 모델을 만들어야 한다.

전리층 총전자수 지도에 나타내어지는 총전자수는 연직방향 총전자수(VTEC, Vertical TEC)이다. 따라서 IPP STEC을 IPP VTEC으로 변환하는 과정이 필요하며 이때 STEC과 VTEC간 관계는 그림 4와 같다. STEC을 VTEC로 변환하기 위해 수식 (5)에 나타난 사상함수(mapping function)를 이용하였으며 여기서 E 는 위성의 고도각, H 와 R 은 각각 가상 단일층의 고도와 지구 반지름을 의미한다.

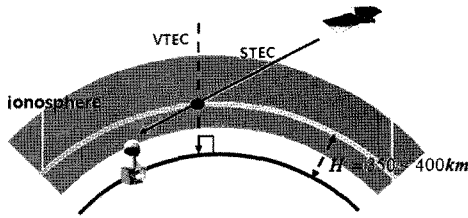


그림 4. 연직방향 총전자수와 시선방향 총전자수

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\cos E}{1 + \frac{H}{R}}\right)^2}} \quad (5)$$

격자형 전리층 지도를 생성하기 위해 IPP VTEC을 각 격자점에서의 VTEC으로 변환하였다. 이를 위해 IPP와 격자점간 거리를 산출하여 역거리 가중치를 적용하였다. 그림 5는 역거리 가중치의 개념을 나타낸 것이다. 격자 중앙의 점은 IPP상의 총전자수를 의미하며, 격자상 4개의 모서리는 격자점 VTEC을 나타낸다. 수식 (6)에 나타낸 것처럼

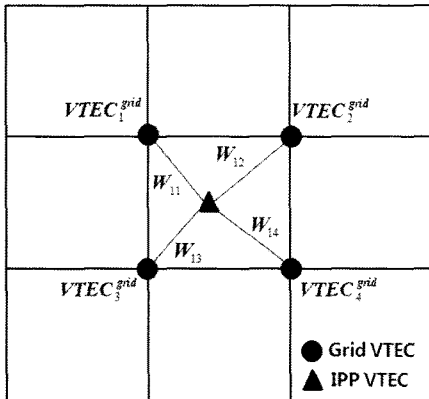


그림 5. 역거리 가중치 기반 격자점의 VTEC 산출(황유라 등, 2003)

수직 방향 총전자수는 W_{ij} 라는 기저 함수에 의해 VTEC_i ($j=1,2,3,4$)들과의 상관관계로 표현될 수 있다(황유라 등, 2003). 수식 (6)에서 b_{sr} 는 GPS 위성파 수신기의 DCB를 의미한다.

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

2.3 DCB 추정

GPS 위성과 GPS 수신기 내부의 P1, P2 신호를 처리하는 기계적인 경로는 서로 다르다. 이러한 이유로 각 신호 사이에는 하드웨어 바이어스가 존재하며 이를 DCB라 한다. DCB는 총전자수 산출 결과에 영향을 미치기 때문에 반드시 추정해야 한다. 일반적으로 DCB는 수 나노 초(ns, nanoseconds)에서 수십 나노 초의 크기로 발생하며 1 ns는 약 0.3m의 거리오차로 환산된다. DCB는 GPS 위성마다 서로 다르며 또한 GPS 수신기 종류와 관측값 종류에 따라 다르게 나타난다. 현재 IGS(International GNSS Service)에서는 모든 IGS 상시관측소의 DCB와 GPS 그리고 GLONASS 위성의 DCB를 제공하고 있다. 우리나라의 상시관측소 중에서는 국토지리정보원의 수원(SUWN) 상시관측소와 한국천문연구원의 대전(DAEJ) 상시관측소가 IGS 상시관측소에 속해 있다.

DCB를 산출하는 방법은 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 방법은 GPS 위성 또는 수신기 내부에 DCB 측정 장치를 설치하여 직접 DCB값을 측정하는 것이다. 두 번째 방법은 코드 의사거리 관측값인 P1, P2를 수학적으로 조합하여 DCB를 추정하는 것이다(Hong, 2007). 이 연구에서는 코드 의사거리 관측값을 조합하여 DCB를 추정하였다.

DCB를 추정하기 위한 대표적인 방법으로 가중 최소자승법을 이용할 수 있다. 가중 최소자승법을 이용하려면 STEC과 VTEC의 관계식을 이용해야 하며 이는 수식 (7)과 같다. 여기서 b_{rec} 와 b^{sat} 는 각각 수신기와 위성의 DCB, 그리고 χ 는 IPP상 시선방향 연결선의 천정각을 의미한다. 위상평할 의사거리 관측값을 이용하면 STEC과 χ 를 산출할 수 있으며 수식 (8), (9)의 과정을 거쳐 DCB를 추정할 수 있다. 수식 (9)에서 x 는 수직방향 총전자수값과 DCB, H 는 디자인 행렬, y 는 시선방향 총전자수를 의미한다(최병규 등, 2009).

$$VTEC = (STEC - b_{rec} - b^{sat}) \times \cos \chi \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \text{sec}\chi_{jk} & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{TEC}_{i1} \\ \vdots \\ \text{TEC}_{iN} \\ b_{s1} \\ \vdots \\ b_{sj} \\ b_{r1} \\ \vdots \\ b_{rk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \text{TEC}_{\text{station}/jk} \quad (8)$$

$$x = (H^T H)^{-1} H^T y \quad (9)$$

이 연구에서는 국토지리정보원 44개소 상시관측소의 DCB를 2시간 단위로 추정하였으며 이를 위해 매 2시간마다 누적된 관측값을 이용하였다. 그림 6과 그림 7은 2011년 3월 1일에 모든 상시관측소와 GPS 위성의 DCB를 나타낸 것이다. 그래프의 시간계는 UTC이며 그림 6을 통해 DCB는 기온이 올라가는 오후 시간에 높은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 DCB가 온도변화에 민감하게 반응하기 때문이다. 그림 6에서 모든 상시관측소의 DCB 평균

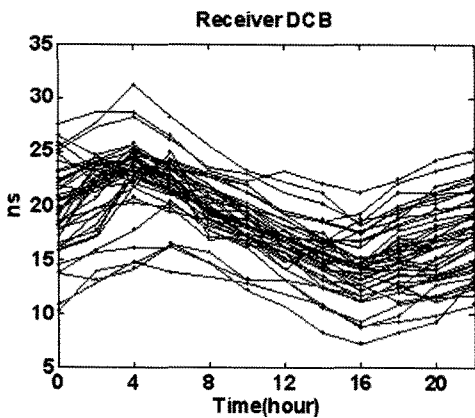


그림 6. 2011년 3월 1일 국토지리정보원 상시관측소의 2시간 간격 DCB

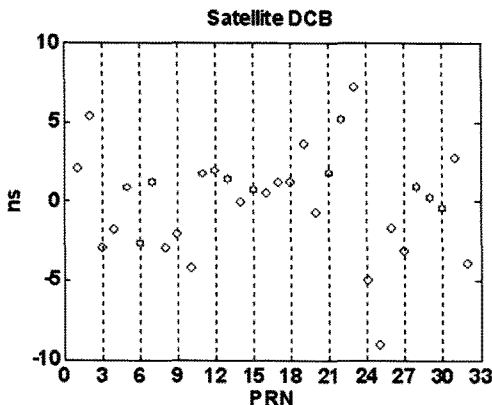


그림 7. 2011년 3월 1일 모든 위성에 대한 일일 DCB

은 18.4ns, 최대값은 청주 상시관측소에서 31.2ns, 그리고 최소값은 남원 상시관측소에서 7.1ns로 나타났다. 그림 7에 나타난 위성의 DCB는 IGS에서 제공하고 있기 때문에 그 값을 그대로 이용하였다.

이 연구에서 추정된 DCB의 정확도를 검증하기 위해 2011년 3월 1일 수원 상시관측소를 대상으로 IGS에서 제공하는 DCB와 비교하였다. IGS에서 제공되는 DCB는 하루 평균이므로 이 연구에서 2시간 간격으로 산출된 DCB를 평균하여 그 결과를 비교하였다. 비교한 결과, 표 1에 나타난 것처럼 두 DCB간 차이는 0.224ns로 나타났다. 이를 거리오차로 환산하면 약 7cm로 이를 통해 이 연구에서 추정된 DCB가 상당히 정확한 값을 확인하였다.

표 1. IGS의 DCB와 추정된 DCB 비교 (수원 상시관측소)

구분	IGS	추정값	차이
DCB	25.853ns	25.629ns	0.224ns

일반적으로 DCB는 수신기 종류에 따라 서로 다른 크기로 나타나는 것으로 알려져 있다(최병규 등, 2009). 이를 확인하기 위해 국토지리정보원 상시관측소에서 사용하고 있는 Trimble사의 NetR5, NetR8, NetRS 수신기의 DCB를 비교하였다. 표 2는 수신기 종류별 DCB 평균과 2011년 3월 1일을 기준으로 각 수신기를 사용하고 있는 상시관측소의 개소 수를 나타낸 것이다. 분석 결과, NetRS를 이용하는 관측소는 14개소이며 DCB 평균이 21.8ns로 가장 높은 값을 나타냈고 NetR8이 12.4ns로 가장 낮은 DCB 값을 나타냈으며 표준편차는 수신기 종류에 관계없이 유사한 값을 나타냈다.

표 2. 수신기 기종에 따른 DCB 평균 및 표준편차

수신기 기종	NetRS	NetR5	NetR8
DCB 평균 (표준편차)	21.8(±3.42)ns	17.1(±3.21)ns	12.4(±3.13)ns
상시관측소의 개소 수	14	24	6

3. 전리층 총전자수 지도의 정확도 분석

3.1 DCB 적용에 따른 총전자수 산출 결과

그림 8은 DCB 적용 유무에 따른 전리층 총전자수 산출 결과를 나타낸 것이다. 2011년 3월 1일의 위도 35°, 경도 130°에서의 VTEC를 산출하였으며 가로축의 시간은 UTC

를 의미한다. DCB를 적용하지 않은 경우와 DCB를 적용한 경우를 비교했을 때 최대 50 TECU 이상의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 DCB를 적용하지 않은 경우에는 우리나라 시간으로 야간에 총전자수 값이 높게 나타나는 이상 현상이 관찰되었다.

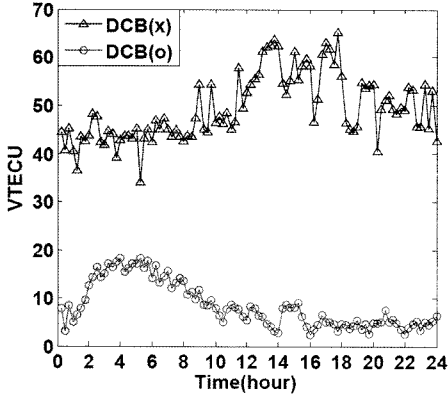


그림 8. 위도 35°, 경도 130° 격자점의 DCB 적용 전·후의 VTEC 비교

DCB 적용에 따른 전리층 총전자수 지도의 정확도를 분석하기 위해 GIM을 기준으로 각 격자점 VTEC값의 RMS 오차를 산출하였다. 분석 기간은 2011년 3월 1일에서 3일까지 3일간 11시, 13시, 15시를 대상으로 하였다. DCB를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우 각각을 비교하였으며 그 결과를 그림 9에 나타냈다. DCB를 적용한 경우에는 RMS 오차가 모든 시각에서 3~4 TECU 수준으로 나타난 반면 DCB를 적용하지 않은 경우에는 3월 1일 11시에 최대 44.1 TECU의 RMS 오차가 발생했다. 또한 관측 시각별

로 비교 해본 결과 DCB를 적용한 경우에는 15시에 가장 큰 RMS 오차를 나타냈지만 DCB를 적용하지 않은 경우에는 반대 경향을 나타냈다. 이를 통해 총전자수 산출시 DCB를 적용하지 않으면 정확한 총전자수 결과를 얻을 수 없음을 확인하였다.

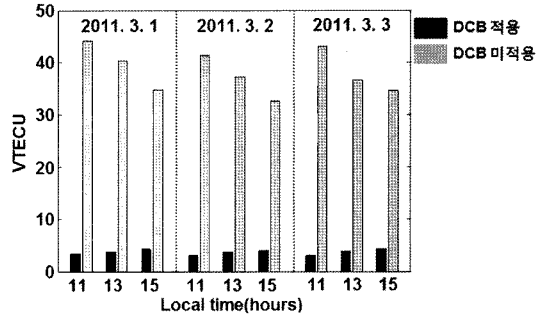


그림 9. 전리층 총전자수 지도 정확도 분석

3.2 전리층 총전자수 지도의 정확도 분석

이 연구에서는 전리층 총전자수 지도를 생성하는데 이용된 상시관측소의 개소 수 증가에 따른 총전자수 지도의 정확도를 확인하였다. 상시관측소의 개소 수는 10개소, 20개소, 30개소, 44개소로 선정하였으며 선정된 지점을 그림 10에 나타냈다. 이때 상시관측소 선정은 한반도 전체에 고르게 분포하도록 임의로 결정하였다. 분석에 이용된 날짜는 3월 1일에서 3일까지 3일간이며 분석 시각은 13시와 15시로 결정하였다. 13시와 15시로 결정한 이유는 해당 시각에 전리층 활동이 활발하여 전리층 총전자수 분포 변이가 뚜렷하게 나타나기 때문이다(이영재 등, 1995; 최병규 등, 2005).

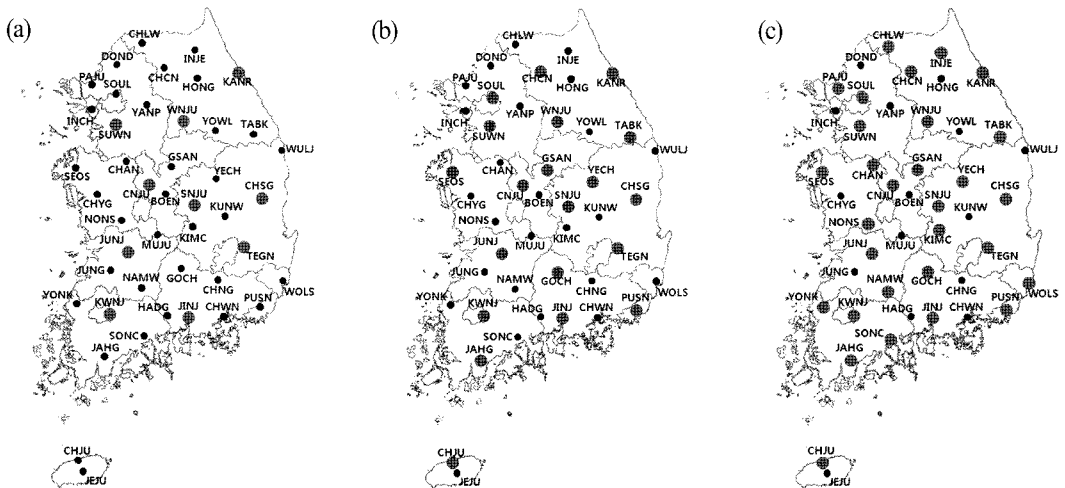


그림 10. 총전자수 지도 산출에 이용된 GPS 상시관측소 (a) 10개소 (b) 20개소 (c) 30개소

생성된 총전자수 지도의 정확도를 비교하기 위해 GIM을 기준으로 각 격자점 VTEC의 RMS 오차를 산출하였고 이를 그림 11에 나타냈다. 분석 결과, 전리층 총전자수 산출에 이용되는 상시관측소의 개소 수가 증가할수록 GIM과의 RMS 차이가 작아지는 경향을 나타냈다. 이는 상시관측소의 개소 수가 늘어남에 따라 격자점 VTEC 산출에 이용할 수 있는 IPP의 개수와 보간법에 적용할 수 있는 STEC의 수가 많아지기 때문이라고 판단된다. 3월 3일 13시의 경우 상시관측소가 10개소에서 44개소로 증가함에 따라 5.3 TECU에서 3.9 TECU로 1.4 TECU 감소하였고, 3월 1일 13시의 경우 5.8 TECU에서 3.7 TECU로 2.1 TECU 감소하여 최대변화를 보였다. 또한 각 상시관측소 증가에 따른 감소크기의 평균은 10개소에서 20개소로 변화할 때 가장 큰 감소폭을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

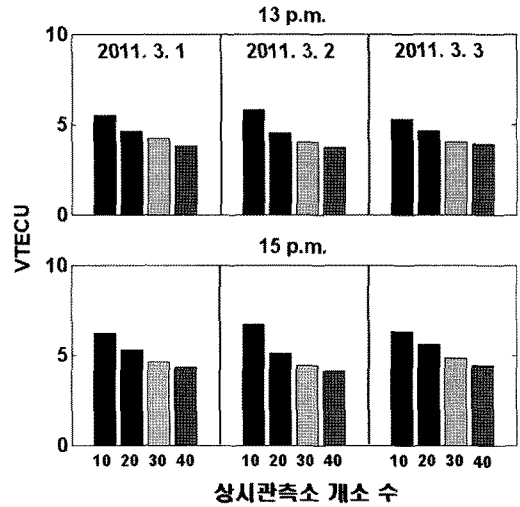


그림 11. 상시관측소 증가에 따른 전리층 총전자수 지도의 정확도 비교

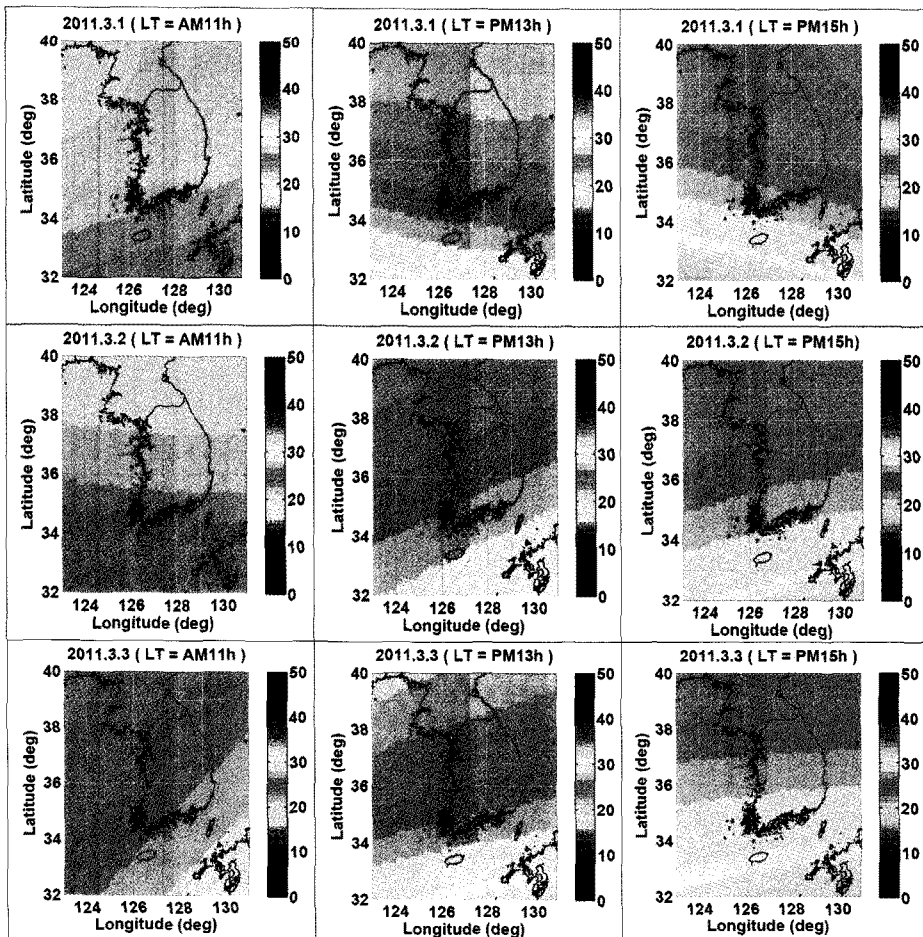


그림 12. 격자형 한반도 전리층 총전자수 지도

44개소 상시관측소를 이용하여 2011년 3월 1일부터 3월 3일까지 3일 동안 2시간 간격의 한반도 전리층 총전자수 지도를 생성하였다. 그림 12은 각 날짜의 11시, 13시, 15시에 해당하는 전리층 총전자수 지도를 나타낸 것이며, 표 3은 각 전리층 지도의 평균 VTEC을 정리한 것이다. 그림 12에 나타난 결과를 보면 시간이 흐름에 따라 총전자수가 증가하는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 이는 하루 중 태양활동이 가장 활발한 시간대인 14시~15시에 전리층 총전자수가 최대값을 나타내는 특징을 잘 반영하고 있다. 날짜에 따른 특징을 보면 동일한 시간대를 기준으로 날짜가 지날수록 전리층 총전자수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 날짜가 점점 춘분에 가까워지면서 전리층 활동이 활발해지기 때문이라고 판단된다(이영재 등, 1995). 각 날짜와 시간에서의 평균 VTEC은 3월 3일 15시에 30.7 TECU로 최대값을 나타냈고, 3월 1일 11시에 20.7 TECU로 최소값을 나타냈다.

표 3. 3일간 각 시간에서의 평균 VTEC [단위: TECU]

날짜 \ 시간	11시	13시	15시
3월 1일	20.7	26.4	28.5
3월 2일	22.3	28.2	29.7
3월 3일	26.1	28.8	30.7

4. 결 론

이 연구에서는 GPS 관측값을 이용하여 추정된 총전자수에 DCB를 적용하여 격자형 한반도 총전자수 지도를 생성하였다. DCB 적용 전·후의 총전자수 추정 결과를 GIM과 비교하여 정확도를 확인하였으며 DCB를 고려했을 때 7~10배 높은 정확도를 나타냈다. 2011년 3월 1일부터 3일까지 3일간 총전자수 추정값은 오후 13~15시에서 최대값을 보였고 각 시간대의 평균 총전자수는 대략 오전 11시에 23 TECU, 13시에 27 TECU, 15시에 29 TECU로 나타났다. 전리층 총전자수 산출에 이용된 상시관측소의 개소수를 상향 조정하며 정확도를 분석한 결과, 10개소 상시관측소에서 44개소 상시관측소로 증가했을 때 평균 1.98 TECU의 RMS 감소를 보였다.

이 연구에서 DCB는 2시간 간격의 관측값을 누적하여 추정하기 때문에 준실시간으로 전리층 총전자수 지도를 생성할 수 있다. 따라서 이 연구 결과는 단일주파수 사용자가 준실시간 또는 후처리 GPS 측위시 전리층 지연오차를 제거하기 위해 이용할 수 있으며 총전자수 지도에서

사용자가 원하는 지점의 총전자수를 거리오차로 환산하여 처리하면 된다.

향후 연구에서는 국토지리정보원 44개소의 상시관측소 외에 한국천문연구원, 위성항법중앙사무소, 기상청, 지질자원연구원 등에서 운영 중인 상시관측소를 추가하여 더 높은 정확도의 총전자수 지도를 생성할 예정이다. 또한 장기간 분석을 통해 태양활동 주기에 따른 한반도 상공 전리층 총전자수 변화의 특성을 분석할 필요가 있으며 위성고도계인 Topex/Poseidon에서 제공하는 총전자수와 비교하여 정확도 검증의 신뢰성을 높여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 소관 연구개발사업 “지상파 DMB기반 DGPS 서비스 광역화 및 상용화 기술개발” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김경희, 박관동 (2009), 국토해양부 GPS 상시관측소를 활용한 한반도 전리층의 총전자수 추정, 한국지형공간정보학회지, 한국지형공간정보학회, 제 17권, 제 1호, pp. 149-155.

이영재, 곽현호, 지규인, 박찬식, 김일선, 이장규, 김춘식 (1995), GPS를 이용한 위치측정에 Klobuchar 전리층 지연시간 모델의 적용, 한국항공우주학회지, 한국항공우주학회, 제 23권, 제 6호, pp. 128-135.

최병규, 박종욱, 정종균, 박필호 (2005), 지역적 GPS 관측망을 이용한 준실시간 전리층 모델링, 한국우주과학회지, 한국우주과학회, 제 22권, 제 3호, pp. 283-292.

최병규, 조성기, 이상정 (2009), 전리층 TEC를 이용한 GPS 수신기와 위성의 DCB 추정, 한국우주과학회지, 한국우주과학회, 제 26권, 제 2호, pp. 221-228.

황유라, 박관동, 박필호, 임형철, 조정호 (2003), 지역적인 GPS 관측 데이터를 이용한 이온층 모델링 및 추정, 대한원격탐사학회지, 대한원격탐사학회, 제19권, 제 4호, pp. 277-284.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J. (2001), *Global Positioning System: theory and practice*, fifth, revised edition, springer

Hong, C. K. (2007), *Efficient differential code bias and ionosphere modeling and their impact on the network-based GPS*

- positioning, PhD dissertation, The Ohio State University, Ohio
- Jee, G., Lee, H.-B., Kim, Y. H., Chung, J.-VK., and Cho, J. (2010), Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: Ionospheric perspective, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, pp. A10319
- Klobuchar, J. (1987), Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions Aerospace Electronic Systems AES-23*, pp. 325-331.
- Wilson, B.D. and Mannucci, A.J. (1993), Instrumental biases in ionospheric measurements derived from GPS data, *Proceeding of the Institute of Navigation GPS-93*, Salt Lake City, Utah, pp. 1343-1351.
- Ya'acobi, N., Abdullah, M. and Ismail, M. (2008), Determination of GPS Total Electron Content using Single Layer Model(SLM) ionospheric mapping function, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol. 8, No. 9, pp. 154-160.

(접수일 2011. 05. 23, 심사일 2011. 06. 10, 심사완료일 2011. 06. 21)