

연구논문

국토해양부 GPS 상시관측소를 활용한 한반도 전리층의 총전자수 추정 Estimation of Total Electron Content in the Ionosphere over the Korean Peninsula using Permanent GPS Stations Operated by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

김경희* · 박관동**
Kim, Kyeong Hui · Park, Kwan Dong

요旨

한반도 상공에서의 전리층에 의한 GPS 측위오차를 정량적으로 파악하기 위해 국토해양부의 44개 상시관측소 데이터를 이용해 2차원 전리층 지도를 작성하였다. 한반도를 위경도 방향으로 0.1°×0.1°의 조밀한 격자로 나눈 뒤 각 격자점에서의 VTEC을 산출하였으며, 관측치로는 이중주파수 의사거리 관측치와 반송파위상 관측치의 선형조합에 의한 위상평화 의사거리를 사용하였다. 국토해양부와 천문연구원의 45개 상시관측소 데이터를 이용해 2003년 1월 25부터 5일 동안의 TEC 값을 2시간 단위로 산출하고 Center for Orbit Determination in Europe의 Global Ionosphere Map과 비교한 결과 8.0 TECU의 차이를 보였다.

핵심용어 : GPS, 전리층, 위상평화 의사거리, 총전자수

Abstract

To quantitatively analyze the positioning error due to the ionosphere over the Korean peninsula, we created 2-dimensional ionosphere map using 44 permanent Global Positioning System (GPS) stations operated by Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs. We estimated Vertical Total Electron Content (VTEC) in a fine rectangular grids of 0.1°×0.1° resolution. The observables we used were phase-leveled pseudoranges which are linear combinations of pseudoranges and carrier phases. VTECs were computed for five days during January 25-29, 2003 using the data from 45 permanent stations. In comparison with the Global Ionosphere Map of the Center for Orbit Determination in Europe, RMS differences were at the level of 8 TECU (TEC Unit).

Keywords : GPS, Ionosphere, Phase-leveled Pseudorange, TEC

1. 서 론

전리층에 의한 GPS 신호의 지연은 2000년 5월 1일 GPS의 고의적 오차인 SA(Selective Availability)가 해제된 이후, GPS 정밀측위의 가장 큰 오차요인으로 작용하고 있다. GPS는 L 밴드 상의 두 주파수(L1 = 1575.42 MHz, L2 = 1227.60MHz)를 사용하는데, 이 주파수 영역에서의 전파는 전리층을 통과하면서 전리층 내에 존재하는 자유전자들에 의해 전파 경로가 굴절되며, 이로 인하여 신호가 지연된다. 전리층 신호 지연을 결정함에 있어 중요한 요소는 총전자수(TEC, Total Electron Content)이

다. 총전자수의 단위는 TECU(TEC Unit)로 1m² 단면적에 10¹⁶개의 전자가 포함되어 있는 것을 의미하는데, 이는 거리로 환산할 경우 0.1624m의 거리 오차에 해당한다.

전리층에 의한 GPS 측위오차를 다루는 모델로는 Klobuchar 모델(Klobuchar,1987), Center for Orbit Determination in Europe(CODE)의 Global Ionosphere Map(GIM), Jet Propulsion Laboratory(JPL)의 GIM(Schaer et al.,1996), IRI(International Reference Ionosphere) 모델 그리고 PIM(Parameterized Ionospheric Model) 등이 있다. Klobuchar 모델은 방송궤도력에 의한 함수기반 모델로 약 50% 정도의 전리층 오차만을 보정할 수 있다(Klobuchar,1987). 반

2009년 2월 24일 접수, 2009년 3월 20일 채택

* 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 석사과정 (kyeong-hui@inha.edu)

** 교신저자·정회원·인하대학교 공과대학 지리정보공학과 조교수 (kdpark@inha.ac.kr)

면에 전세계 100여 개소 이상의 GPS 상시관측소의 데이터를 이용하여 만들어지는 CODE와 JPL의 GIM은 Klobuchar 모델보다 높은 정밀도를 가진다. CODE와 JPL 모델은 각각 전리층을 약 5°의 변을 갖는 1280개의 삼각형들로 덮은 삼각형 격자를 이용한 보간법(Wilson and Mannucci, 1993)과 구면 조화함수(spherical harmonics)를 사용한다. IRI 모델은 COSPAR(Committee on Space Research)와 URSI(International Union of Radio Science)의 후원을 받아서 진행된 국제적인 연구 과제로 전리층의 여러 물리현상을 설명하기 위해 제작된 모델이다. 주어진 장소, 시간과 데이터에 의해서 IRI는 고도 60km에서 3000km까지의 전자밀도, 전자 온도, 이온 온도, 이온 구성과 총 전자함유량을 계산한다. PIM은 이론적인 전리층 모델로서 고위도, 중위도, 저위도 지역 모델을 결합하여 지구 전체의 전리층 상태를 분석할 수 있도록 미 공군의 필립스 연구소에서 개발되었다(표유선 등, 1999).

국내에서는 황유라 등(2003)이 천문연구원 운영 중인 9개 상시관측소를 사용해 최초의 지역적인 전리층 모델(RIM, Regional Ionosphere Model)을 개발하였다. 황유라 등(2003)은 한반도와 인근지역을 1°×1° 격자로 나눈 뒤 2시간 간격으로 TEC를 추정하고 결과 약 4-5 TECU 정확도를 달성하였다. 하지만 한반도 지역을 1°×1° 격자로 나눌 경우 조밀한 RIM을 만들 수 없다. 일본의 경우 약 1000여 개소의 GPS 상시관측소를 이용해 0.15°×0.15° 격자크기의 매우 조밀한 RIM을 생성한 바 있다(Otsuka et al., 2002). 따라서 이 연구에서는 국토해양부 국토지리정보원에서 운영하고 있는 44개 GPS 상시관측소를 포함함으로써 보다 조밀한 한국형 RIM 작성을 시도하였다. 먼저 한반도 상공을 0.1°×0.1° 공간 해상도로 나눈 후 위상평할 의사거리(phase-leveled pseudorange)를 이용하여 시선방향 총전자수(STEC, Slant TEC)를 산출하였다. 산출된 STEC에 칼만 필터를 적용하여 각 격자에서의 수직방향 총전자수(VTEC, Vertical TEC)를 추정하고, 추정된 총전자수의 정확도 평가를 위해 CODE의 GIM 결과 및 한국천문연구원의 9개 상시관측소를 이용한 결과와 비교하였다.

2. TEC 추정 이론

2.1 위상평할 의사거리

총전자수 결정에 사용할 수 있는 GPS 관측치는 반송파 위상(carrier phase)와 의사거리(pseudorange)가 있다. 반송파 위상은 시스템에 의한 잡음이 적지만, 사이클슬립(cycle slip)을 고려해야 하고 모호정수(integer ambiguity)를 결정해야 하는 어려움이 있다. 반면에 의사거리는 사

이클슬립이 발생하지 않고 모호정수를 찾을 필요가 없다는 장점이 있지만, 다중경로 오차(multipath error)와 시스템의 잡음이 많이 내재되어 있다. 이와 같은 이유로, 총전자수는 의사거리와 반송파 위상 데이터의 장단점을 상호 보완한 위상평할 의사거리 데이터를 이용하여 계산하는 것이 일반적이다(황유라 등, 2003).

의사거리와 반송파 위상 관측치의 선형조합으로 이루어진 위상보정 의사거리 데이터는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)과 식 (2)는 의사거리 관측치(P_1 , P_2)를 이용한 관측방정식이다.

$$P_1 = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \frac{40.3}{f_1^2} TEC + \delta T + \delta M_1 + \varepsilon_1 \quad (1)$$

$$P_2 = \rho + c(\delta t_r - \delta t^s) + \frac{40.3}{f_2^2} TEC + \delta T + \delta M_2 + \varepsilon_2 \quad (2)$$

여기서 ρ 는 GPS 위성과 수신기 사이의 기하학적 거리, c 는 빛의 속도, f_i ($i = 1, 2$)는 L1, L2 주파수이다. δt^s 와 δt_r 는 GPS 위성 시계 오차와 수신기 시계 오차, δT 는 대류권 오차, δM_i ($i = 1, 2$)는 L1, L2 주파수상의 다중경로 오차, ε_i ($i = 1, 2$)는 L1, L2 주파수상의 우연오차(random error)이다.

식 (1)과 식 (2)의 선형 조합으로 전리층 오차가 제거된 GPS 측정치를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ion-free} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_2 \quad (3)$$

식 (3)을 L1 관측 데이터 값을 나타내는 식 (1)로부터 빼면 L1 의사거리에 내재된 전리층에 의한 오차 값이 계산된다.

반송파 위상의 전리층 오차 또한 의사거리 데이터를 이용한 것과 같은 방법으로 나타낼 수 있다. 즉, 의사거리와 반송파 위상 관측치의 선형조합에 의한 위상평할 의사거리 상의 총전자수는 식 (4)로 표현된다(Mannucci et al., 1993).

$$\overline{(P_1 - P_2)}_k = (P_1 - P_2)_k + \{ \overline{(P_1 - P_2)}_{k-1} + \delta(\Phi_1 - \Phi_2)_{k,k-1} \} \quad (4)$$

이 식에서 $\overline{(P_1 - P_2)}_k$ 와 $\overline{(P_1 - P_2)}_{k-1}$ 는 각각 k 와 $k-1$ 시각에서 위상보정 의사거리 데이터를 이용하여 계산한 총

전자수를 나타낸다. $\overline{(P_1 - P_2)}_k$ 는 시각 k 에 의사거리 데이터로부터 유도된 총전자수이고 $\delta(\Phi_1 - \Phi_2)_{k,k-1}$ 는 시각 k 와 시각 $k-1$ 사이의 반송파위상 데이터를 이용하여 계산한 총전자수 차이를 나타낸 것이다(황유라 등, 2003).

2.2 단일층 전리층 모델

일반적으로 태양 활동이 활발하지 않은 날의 낮 시간 동안 전자밀도 분포는 대부분의 전자가 450km 높이에 밀집되어 있다(Mannucci et al.,1998). 따라서 이 연구에서도 가상의 단일층(single-layer) 높이를 450km로 가정하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 GPS 위성으로부터 수신기까지 시선 방향의 연결선이 450km 상공에 있는 가상의 단일층과 만나는 점을 IPP(Ionospheric Pierce Point)로 정의 한다(Hofmann-Wellenhof et al.,1992). 여기에서 a 는 지구중심을 기준으로 쥘 수신기와 IPP사이의 각이고 E 는 위성의 고도각, R 은 지구 반경(약 6378.136 km) 이다.

IPP는 그림 1에서의 벡터 D 를 결정하여 위도와 경도로 나타낸 것이다. 식 (5)에서 (7)까지를 이용하여 IPP의 위도(φ_{pp})와 경도(λ_{pp})를 계산 할 수 있다(Biel,1990). 식 (6)과 식 (7)에서 A 는 위성의 천정각, φ_u 와 λ_u 는 사용자의 위도와 경도를 의미한다.

$$a = \frac{\pi}{2} - E - \sin^{-1}\left(\frac{R}{R+h} \cos E\right) \quad (5)$$

$$\varphi_{pp} = \sin^{-1}(\sin \varphi_u \cos a + \cos \varphi_u \sin a \cos A) \quad (6)$$

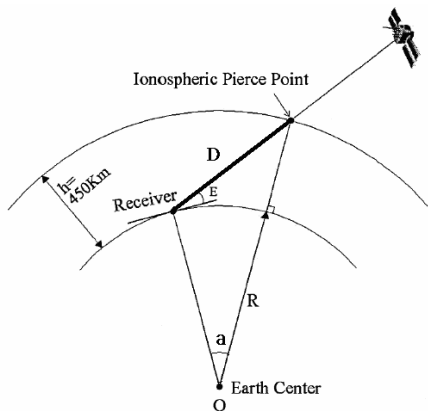


그림 1. IPP의 기하학적 배치도 (황유라 등, 2003)

$$\lambda_{pp} = \lambda_u + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \alpha + \sin A}{\cos \alpha}\right) \quad (7)$$

그림 2는 시선방향 총전자수를 격자상에서의 수직방향 총전자수로의 변환 과정을 나타낸 것이다. 그림 2의 점 $P(\varphi, \lambda)$ 는 GPS 위성의 시선방향에 존재하는 총전자수를 의미하고, $VTEC_j$ ($j = 1,2,3,4$)는 격자점에서 추정될 수직 방향의 총전자수를 나타낸다. 점 $P(\varphi, \lambda)$ 의 총전자수에 사상함수(mapping function)를 적용하면 수직 방향 총전자수로 변환되고, 변환된 수직 방향 총전자수는 기저 함수 W_{ij} 에 의해 식 (8)과 같은 $VTEC_j$ ($j = 1,2,3,4$)들과의 상관 관계로 표현 될 수 있다(황유라 등, 2003).

$$STEC_i = f(E)_i \sum_{j=1}^4 (VTEC_j) \cdot W_{ij} + b_{S_i} \quad (8)$$

$STEC_i$ 는 IPP에서 시선방향으로 관측된 총전자수이고 $VTEC_j$ 는 4개 격자점 상의 수직 방향으로 추정되는 총전자수를 나타낸다. W_{ij} 는 $STEC_i$ 과 $VTEC_j$ 의 상관 관계를 나타내는 기저함수(base function)이다. b_{S_i} 는 각각 GPS 위성고 수신기의 주파수간 편향(interfrequency bias) 오차, $f(E)$ 는 사상함수로 식 (9)와 같다.

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - [\cos(E)/(1+h/R)]^2}} \quad (9)$$

위상평할 의사거리를 이용하여 식 (8)을 통해 칼만 필터를 적용하여 수직 방향 총전자수를 추정하며, 이 연구에서는 수신기의 주파수간 편향이 수직 방향 총전자수 추정 과정에서 동시에 추정된다.

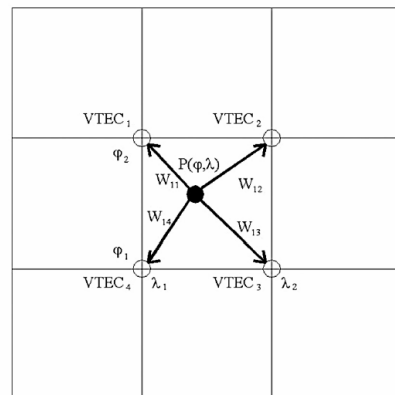


그림 2. STEC와 VTEC의 상관 관계 (황유라 등, 2003)

매 2시간 간격으로 모아진 충전자수 값을 측정값으로 사용하고 식 (10)과 같이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & W_{12} & W_{13} & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & 0 & W_{13} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \cdots & 0 & \vdots & \cdots & \cdots & 1 & \\ 0 & \cdots & \cdots & W_{nm} & 1 & \cdots & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11} \\ x_{12} \\ \vdots \\ x_{nm} \\ \vdots \\ x_{nm+q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)의 y_k 는 한반도 상공의 격자점에서 2시간 동안 수집된 k 개의 시선방향 충전자수 값으로 측정값을 의미하며, 각 측정값이 수집된 관측소의 주파수간 편향은 격자점의 수직 충전자수와 함께 추정된다. x_{nm+q} 는 격자점 상의 위도 n , 경도 m 그리고 상시 관측소의 개수 q 를 나타낸다. 식 (10)은 설계행렬(design matrix) H_k 에 의해 식 (11)과 같이 나타내며, 각각의 위도와 경도에 해당하는 격자점에 W_{ij} 기저 함수를 적용한 이중 격자 보간법(bi-linear interpolation)에 의한 수직방향 충전자수를 추정한다. 식 (11)의 \hat{x}_k 는 상태벡터로 식 (12)와 같이 표현된다.

$$y_k = H_k \hat{x}_k + \varepsilon_k \quad (11)$$

$$\hat{x}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{x}_{k-1} \quad (12)$$

식 (12)의 $\Phi_{k,k-1}$ 은 상변환행렬(state transition matrix)로 이 연구에서는 수직 방향 충전자수를 추정함에 있어

시간에 대한 상관관계가 없으므로 상변환행렬을 단위행렬(identity matrix)로 가정한다(Skone,1998). 추정된 상태 벡터는 지정된 한반도 상공 격자점에 해당하는 매 2시간 마다의 변화를 나타낸 수직 방향 충전자수를 의미하며, 45개의 상시 관측소로부터 수집된 전체 데이터는 매 2시간 해상도마다 수직 방향의 충전자수로 추정된다.

3. 결 과

2008년 4월부터 국토해양부 국토지리정보원에서는 건설교통부와 행정자치부가 운영해오던 각각 14개소, 30개소의 GPS 상시관측소를 통합하여 총 44개 상시관측소를 운영하고 있다. 이 연구에서 이용한 데이터는 2003년 1

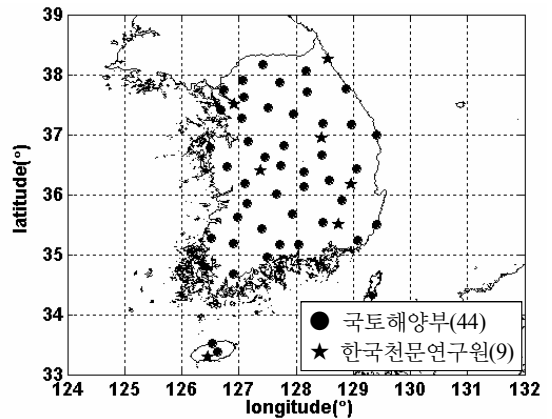


그림 3. 국토해양부와 천문연구원 GPS 상시관측소 분포도

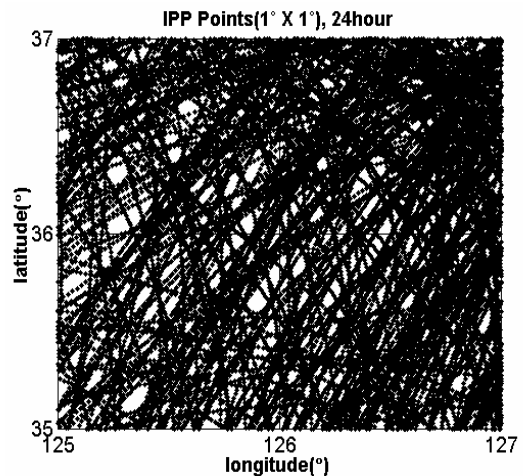
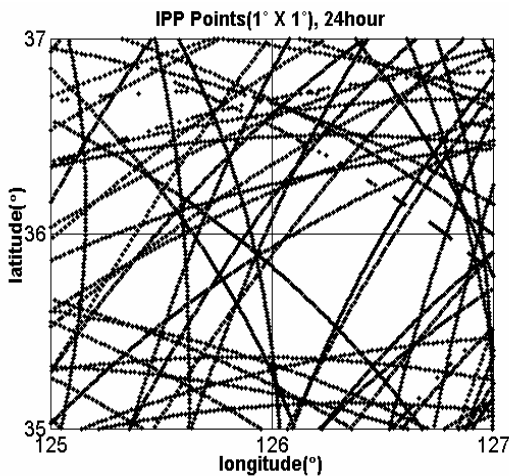


그림 4. 공간해상도 1°×1°에서의 IPP 분포 ((좌) 천문연구원 9개소만을 사용하였을 경우, (우) 국토해양부 36개소를 추가하였을 경우)

월 25일부터 5일간으로, 44개소 중 36개 상시관측소의 데이터가 존재한다. 이는 상시관측소 운영상의 문제 및 장비 오작동의 문제로 인해 8개 상시관측소의 데이터가 없었기 때문이다. 그림 3은 이 연구에 사용된 국토해양부 44개 상시 관측소 및 한국천문연구원 9개 상시관측소의 위치를 나타낸 것이다.

3.1 IPP 분포 분석

그림 4는 2003년 1월 25일 24시간 동안 한반도 상공을 1°×1° 공간 해상도에서 위도 35-37°N, 경도 125-127°E

상의 IPP 분포를 국토해양부 36개 상시관측소를 이용한 결과와 한국천문연구원 9개 상시관측소를 이용한 결과를 비교한 것이다. 그림 5는 한반도 상공을 0.1°×0.1° 공간 해상도에서 IPP 위도 36.5-37.0°N, 경도 126.5-127.0°E 상의 IPP 분포를 비교한 것이다. 이 두 그림을 통해 천문연구원의 9개 상시관측소를 이용하였을 때 보다 국토해양부의 36개 상시관측소를 같이 사용하였을 때 IPP의 분포가 훨씬 더 조밀하게 생성됨을 알 수 있다.

표 1과 표 2는 각각 1°×1° 공간 해상도에서 위도 35-36°N, 경도 125-126°E 상의 IPP 분포와 0.1°×0.1° 공간 해상도에서 위도 36.5-37.0°N, 경도 126.5-127.0°E 상

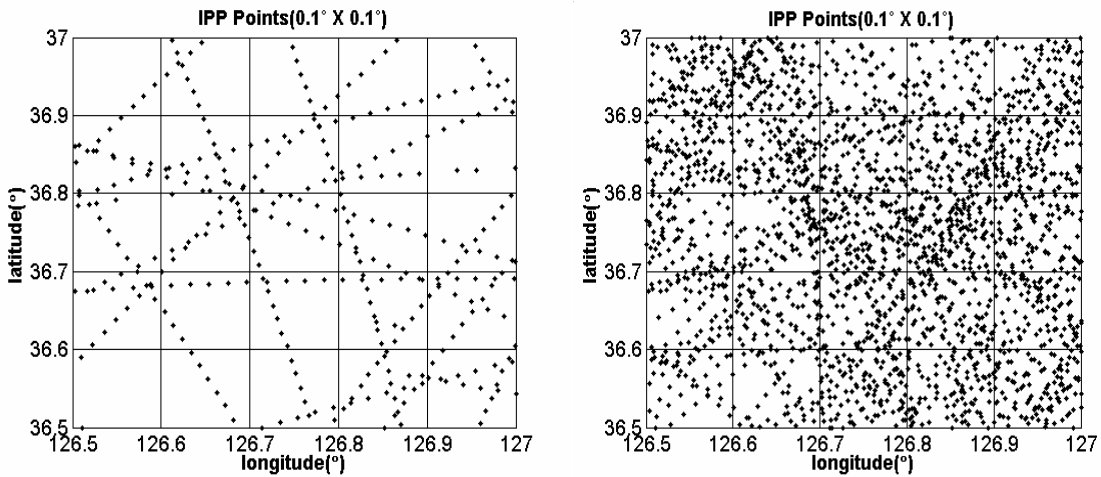


그림 5. 공간해상도 0.1°×0.1°에서의 IPP 분포((좌) 천문연구원 9개소만을 사용하였을 경우, (우) 국토해양부 36개소를 추가하였을 경우)

표 1. 1°×1° 공간 해상도에서 IPP 분포

	125-126°E		126-127°E	
	9개소 상시관측소	45개소 상시관측소	9개소 상시관측소	45개소 상시관측소
35-36°N	948	3406	960	5059
36-37°N	966	4076	1173	6427

표 2. 0.1°×0.1° 공간 해상도에서 IPP 분포

	126.5-126.6°E		126.6-126.7°E		126.7-126.8°E		126.8-126.9°E		126.9-127.0°E	
	9개소	45개소	9개소	45개소	9개소	45개소	9개소	45개소	9개소	45개소
36.5-36.6°N	2	47	6	43	11	47	22	56	18	78
36.6-36.7°N	16	45	8	90	10	80	19	99	20	119
36.7-36.8°N	11	61	18	71	14	121	15	147	13	83
36.8-36.9°N	20	81	21	75	18	91	11	81	6	83
36.9-37.0°N	3	107	10	126	8	99	9	74	14	92

의 IPP 분포를 정량적으로 분석한 결과를 나타낸다. 표 1에서 보면 하나의 격자 안에서 천문연구원 9개 상시관측소만을 사용하였을 경우보다 국토해양부 36개 상시관측소를 추가하였을 경우에 IPP 분포의 조밀도가 약 5배 증가함을 알 수 있다. 표 2의 경도 126.5-126.6°E상의 위도 36.5-36.6°N와 36.9-37.0°N에서 천문연구원 9개 상시관측소만을 사용한 경우 IPP는 각각 2, 3개만 분포하고 있다. 반면에 국토해양부 36개 상시관측소를 추가하였을 경우에 0.1°×0.1° 격자상의 IPP 분포는 천문연구원 9개 상시관측소만을 사용한 경우보다 약 30배 정도 조밀한 IPP의 분포를 보여준다. 이러한 결과에 따라 기존의 천문연구원 9개 상시관측소만을 사용하였을 경우보다 국토해양부 36개 상시관측소를 추가하였을 경우에 조밀한 관측망 형성이 가능함을 확인할 수 있다.

3.2 Vertical TEC 정확도 분석

국토해양부 36개 상시관측소와 한국천문연구원 9개 상시관측소를 이용한 한반도 상공의 총전자수에 대한 정확도 분석을 위하여 2003년 1월 25일부터 5일 동안의 위도 35°, 경도 127°에서 수직방향 총전자수 추정 결과를 CODE의 GIM과 비교 하였다. 또한 VTEC 결정에 사용된 GPS 상시관측소 수에 대한 정확도 분석을 위해 천문

연구원에서 운영하는 9개 상시관측소를 이용한 결과와 국토해양부 36개 상시관측소와 천문연구원의 9개의 상시관측소를 모두 사용한 결과를 CODE의 GIM과 비교하였다. 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

그림 6을 보면, 추정된 총전자수는 CODE GIM 모델과 그 변화양상이 잘 일치하며, 국토해양부 및 한국천문연구원의 45개 상시관측소를 모두 이용한 결과와 CODE GIM 모델의 RMS 차이는 8.0 TECU이며, 한국천문연구원 9개 상시관측소를 이용한 결과와 CODE GIM 모델의 RMS 차이는 9.3 TECU로 나타났다. CODE에서 생성하는 GIM은 위도와 경도를 2.5°×5.0° 크기의 격자로 분할하고, 국내의 GPS 상시관측소 중 수원과 대전에 위치한 International GNSS Service 관측소 두 곳의 데이터만을 사용하기 때문에 한반도 인근에서의 CODE GIM은 실제 총전자수와 차이가 존재할 것으로 예상된다. 따라서 그림 6을 분석한 수치적인 RMS 차이는 큰 의미가 없다고 판단되며, 향후 객관적인 전리층 관측 결과와의 비교 검증이 필요하다. 하지만 전체적인 경향이 매우 유사한 것은 이 연구에서 수행한 방법론이 적절함을 입증하는 것이다.

4. 결 론

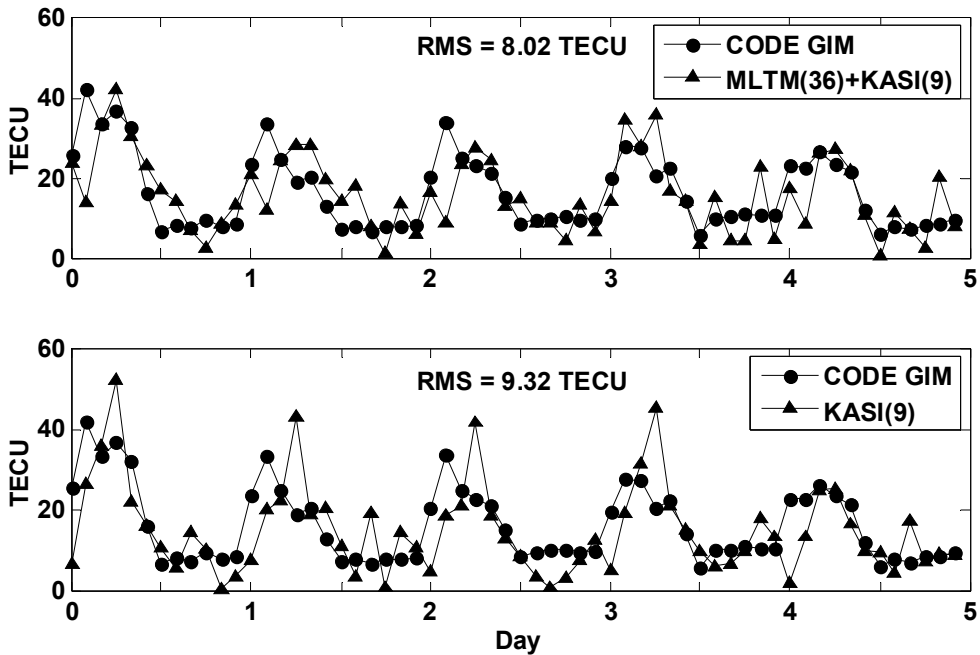


그림 6. 한반도 상공 VTEC값과 CODE GIM 비교 결과

국토해양부 및 천문연구원의 총 45개 상시관측소의 위상평형 의사거리 데이터를 이용해 산출한 STEC 값을 산출하고, 이를 기반으로 2차원 격자형 전리층 모델을 생성하였다. 기존 연구의 한계를 벗어나기 위해 한반도 상공을 위경도 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 공간 해상도의 조밀한 격자로 구성하고, 각 격자점에서의 VTEC값을 성공적으로 추출하였다. 추정된 총전자수를 전세계 모델인 CODE의 GIM과 비교한 결과 8.0 TECU의 차이만을 보이고 있어 개발된 모델의 정확도가 1차적으로 검증되었다. 하지만, 보다 객관적인 전리층 모델과의 비교가 필요할 것이다. 이 연구에서 개발한 조밀한 2차원 전리층 모델은 향후 한반도형 3차원 전리층 모델의 정확도 향상에 기여하는 바가 클 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 지식경제부 및 산업기술연구회의 협동연구과제의 일환으로 수행하였음. [08AR2310, GPS/Galileo 환경에서의 위성항법신호생성/수신처리 및 측위성능향상 기초연구]

참고문헌

1. 표유선, 이황재, 김민근, 김은화, 송성희, 이진이, 이동훈, 1999, 전리층, 지자기 변화 연구를 위한 종합 모델 구축, *한국우주과학회지*, 제 16권, 제 2호, pp. 293-306.
2. 황유라, 박관동, 박필호, 임형철, 조정호, 2003, 지역적인 GPS 관측 데이터를 이용한 이온층 모델링 및 추정, *대한원격탐사학회지*, 제 19권, 제 3호, pp. 277-284.

3. 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.
4. Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, 1992, GPS theory and practice, fourth revised edition, Springer.
5. Klobuchar, J., Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, 1987, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems*, Vol. AES-23, No. 3, pp. 325-331.
6. Mannucci, A. J., B. D. Wilson, and C. D. Edwards, 1993, A new method for monitoring the earth's ionospheric total electron content using the GPS global network, *Proceedings of the Institute of Navigation GPS-93*, Salt Lake City, Utah, pp. 1323.
7. 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*, Vol. 33, No. 3, pp. 565-582.
8. 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*, Vol. 54, pp. 63-70.
9. 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, Vol. 77, No. 12, pp. 71.
10. Skone, S., 1998, Wide area ionosphere grid modeling in the auroral region, Ph.D. Thesis, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, pp. 36-44.
11. 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.