

## 전리층 TEC를 이용한 GPS 수신기와 위성의 DCB 추정

최병규<sup>1,2†</sup>, 조성기<sup>1</sup>, 이상정<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>한국천문연구원 위성항법기술그룹  
<sup>2</sup>충남대학교 전자공학과

### GPS Receiver and Satellite DCB Estimation using Ionospheric TEC

Byung-Kyu Choi<sup>1,2†</sup>, Sung-Ki Cho<sup>1</sup>, and Sang-Jeong Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GNSS Technology Group, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

<sup>2</sup>Dept. of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea  
E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

(Received May 7, 2009; Accepted May 19, 2009)

#### 요 약

한반도 상공의 전리층 총전자수(TEC, Total Electron Content)를 추정하는 방법을 통해 GPS 수신기와 위성의 코드 바이어스(DCB, Differential Code Bias)를 함께 추정하였다. 한국천문연구원에서 운영하고 있는 GPS 기준국망 데이터를 사용하였으며, 가중치 최소자승법을 이용하여 매 1시간 간격으로 DCB를 산출하였다. 총 3일간의 데이터를 처리한 결과 9개 GPS 수신기의 DCB는  $\pm 2\text{m}$  이내에서 변화하는 것으로 나타났으며, 3일 동안 크게 변하지 않았다. 또한 일일 평균값으로 산출된 위성의 DCB는 최대 약 4.09ns(nano-second), 최소 약 -6.28ns를 갖는 것으로 나타났다. 그리고 산출된 DCB를 전리층 총전자수 산출에 적용한 결과, 적용 전에 비해 특정 시점에서 최대 약 9TECU 이상의 총전자수 변화가 검출됨을 확인 할 수 있었다.

#### Abstract

We estimated the receiver and satellite differential code bias (DCB) based on the ionospheric total electron content (TEC) estimation method. The GPS network which has been operated by the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) was designed to calculate TEC. The receiver and satellite DCB values were obtained from the weighted least square method with time interval for one hour. The results represented that the receiver DCB values are mostly varying within  $\pm 2$  meter and are derived comparatively stable within three days. The estimated mean values of the satellite DCB show the maximum and minimum values of 4.09 nano-second (ns), -6.28ns respectively. We could detect great variations of TEC over 9 TECU difference at any time when the DCB sets were applied to TEC estimation.

*Keywords:* differential code bias, total electron content, GPS network

---

<sup>†</sup>corresponding author

## 1. 서 론

전리층의 총전자수(TEC, Total Electron Contents)는 전리층의 특성을 이해하는데 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 전지구 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)의 신호가 위성으로부터 지상의 수신기까지 전달될 때, 전리층은 매개체 역할을 수행하여 항법신호의 그룹지연(Group Delay)과 위상 앞섬(Phase Advance)의 원인을 제공한다. 전리층내의 총전자수는 서로 다른 주파수, 즉 GPS L1(1.575GHz)과 L2(1.227GHz) 신호가 전리층을 통과할 때 굴절률이 다르기 때문에 이러한 정보를 이용하여 추정할 수 있다. 그러나 GPS(Global Positioning System) 주파수 각각의 신호에는 기계적인 지연 바이어스가 존재하며, 이 바이어스는 전리층 총전자수 추정의 정확도에 영향을 준다(Lanyi & Roth 1988, Coco et al. 1991).

기계적인 지연은 각각의 GPS 관측값과 주파수마다 다를 수 있고, 보통 이러한 지연은 관측값과 주파수의 상대적인 측면에서 결정이 된다. 어느 특정 주어진 시각에서 두 개 또는 그 이상의 관측정보 사이에는 바이어스(DCB, Differential Code Biases)가 존재하게 되는데, 이 DCB는 전리층의 총전자수를 추정하는데 있어서 정확도에 영향을 주기 때문에 반드시 결정해야 하는 값이다. 전리층은 항법신호의 전달과정에서 가장 큰 오차요인으로 작용하기 때문에 전리층 총전자수 추정의 정확도는 사용자의 위치정확도와도 직결된다. 특히, 자기폭풍과 같은 기간에는 단일주파수 수신기의 위치오차가 더욱 커진다. 이를 위해 미국의 WAAS(Wide Area Augmentation System), 유럽의 EGNOS(European Geostationary Navigation Satellite System)와 같은 위성항법보강시스템(SBAS, Satellite Based Augmentation System)은 정밀항법 및 측위응용을 위해 지상에서 전리층 오차를 추정하여 GPS 사용자들에게 준실시간으로 전리층 보정변수들을 제공한다(Hofmann-Wellenhof et al. 2008).

국제적으로는 1998년도 6월에 결성된 IGS(International GNSS Service) Ionosphere Working Group이 2시간 간격의 해상도를 갖는 전리층 총전자수 맵과 더불어 GPS 위성과 수신기의 DCB 값을 하루단위로 계산하여 제공하는 임무를 수행하고 있다. 총전자수 맵과 DCB의 계산은 국제 GPS 기준국망에 의해 수집된 이중주파수 데이터를 기반으로 한다(Mannucci et al. 1998, Schaer 1999, Hernandez-Pajares et al. 1999, Gao & Liu 2002). 현재 5개의 전리층 분석센터(IAAC, Ionosphere Associate Analysis Centers)에서 전리층 산출물을 생성하여 제공해 주고 있는데, 유럽의 CODE(Center for Orbit Determination in Europe)와 ESOC(European Space Operation Centre), 미국 JPL(Jet Propulsion Laboratory), 캐나다 NRCAN(National Resources Canada), 스페인 UPC(Poly-technical University of Catalonia) 등이 이에 해당한다. 전리층 분석센터에서는 현재 전지구적으로 고르게 분포하고 있는 GPS 기준국망 데이터를 이용하여  $5^{\circ}(N) \times 2.5^{\circ}(E)$ 의 해상도를 갖는 격자기반의 수직방향 총전자수값을 계산하는 동시에 GPS 위성과 기준국 수신기 각각의 DCB값도 함께 추정하여 산출하고 있다. 추정된 총전자수값은 일일단위로 IONEX(Ionosphere Exchange) 형식으로 제공되며, 또한 DCB는 RMS(Root Mean Square)값을 갖고 단위는 nanosecond로 주어진다.

이 연구에서는 한반도 상공의 총전자수를 추정하는 방법을 통해 GPS 위성과 한국천문연구원 GPS 기준국 수신기의 DCB를 추정하는 방법을 제시한다. 2003년 10월 태양 플레어 폭발로 인해 전리층의 총전자수가 급격히 증가했을 때를 기준으로 GPS 기준국망의 데이터를 한 시간 간격으로 처리하여 GPS 위성의 DCB와 기준국 수신기의 DCB를 함께 추정하였다.

표 1. GPS 수신기 데이터 타입 및 형태.

코드 타입	데이터 형태
P1/P2	C1, P1, P2
C1/X2	C1, X2=C1+(P2-P1)
C1/P2	C1, P2

## 2. 관측타입 및 총전자수 계산

일반적인 GPS 수신기의 데이터 타입은 다음 표 1과 같이 크게 3개의 형태로 나눌 수 있다. 표 1에서 C1/X1 타입은 Cross-correlation 수신기로 인식이 되며, Rogue와 Trimble 4000 시리즈에서 사용되는 형태이다. 최근의 GPS 수신기 즉, Leica, Novatel 그리고 Trimble사의 제품들은 C1/P2 타입에 해당한다. 이 연구에서는 C1/X2 데이터 타입의 수신기 DCB를 추정하게 된다.

앞서 설명하였듯이 GPS 관측정보는 코드와 반송파 위상(Carrier Phase)으로 분류되고, 이 관측값에는 코드 바이어스가 내재되어 있으며 오차를 고려한 관측방정식은 식 (1), (2) 처럼 나타낼 수 있다.

$$P_i = \rho + c \cdot (dT - dt) + \Delta_i^{iono} + \Delta_i^{trop} + b_i^{P,r} + b_i^{P,s} + m_i^P + \epsilon_i^P \quad (1)$$

$$\Phi_i = \rho + c \cdot (dT - dt) + \lambda_i N_i - \Delta_i^{iono} + \Delta_i^{trop} + b_i^{\phi,r} + b_i^{\phi,s} + m_i^\phi + \epsilon_i^\phi \quad (2)$$

여기에서  $P$ 는 의사거리 측정치,  $\rho$ 는 위성과 수신기의 기하학적인 거리,  $c$ 는 빛의 속도,  $dT, dt$ 는 수신기와 위성의 시계오차,  $\Delta^{iono}$ 는 전리층 지연오차,  $\Delta^{trop}$ 는 대류층 지연오차,  $b^r, b^s$ 는 각각 수신기와 위성시계 바이어스,  $m$ 은 다중경로 오차,  $\epsilon$ 은 수신기 잡음,  $\Phi$ 는 반송파 위상 측정치,  $N$ 은 모호정수이다.

전리층의 TEC은 코드 또는 반송파 위상의 선형조합(Linear Combination)에 의해서 추정될 수 있으며, 다음 식 (3), (4)와 같이 'Geometry-Free' 조합을 주로 사용하여 계산한다 (Blewitt 1990).

$$TEC_p = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} \cdot (P_2 - P_1) + b^{r,s} + m + noise \quad (3)$$

$$TEC_\phi = \frac{2(f_1 f_2)^2}{k(f_1^2 - f_2^2)} \cdot (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + b^{r,s} + m + noise \quad (4)$$

여기에서  $f_1$ 과  $f_2$ 는 각각 GPS L1과 L2신호의 주파수이며,  $k$ 는 전리층 굴절과 관련된 값으로 약  $80.62(\text{m}^3/\text{s}^2)$ 의 값을 갖는다.

## 3. DCB 추정 알고리즘

전리층 내의 총전자수는 이중주파수 관측정보에 의해 정확히 추정될 수 있다. 그러나 두개의 GPS 주파수 신호에는 각각 기계적인 지연 바이어스가 존재한다. DCB를 추정하는 가장 간단한 방법은 같은 수신기에 의해 수신된 서로 다른 타입의 코드정보를 동시에 이용해서 비교하는 것이다.

GPS 수신기와 위성의 바이어스를 각각  $b_r$ 와  $b^s$ 라 놓으면, 수직방향 총전자수는 다음 식 (5)에 의해 계산된다.

$$TEC = (TEC_{slant} - b^s - b_r) \times \cos \chi \quad (5)$$

여기에서  $\chi$ 는 전리층 투과지점에서의 천정방향에 해당하는 각을 의미한다.

특정 시간(t)에 위성  $j$ 로부터 수신기  $k$ 까지의 시선방향 총전자수 성분에 대해 다시 정리하면 식 (6)과 같이 표현이 된다.

$$\sec \chi_{jk} \times TEC + b_j^s + b_{rk} = TEC_{slant} \tag{6}$$

추정해야하는 전체 미지수, 즉 수직방향 총전자수와 위성과 수신기의 DCB를 구하기 위해 행렬로써 다시 전개하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \sec \chi_{jk} & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} TEC_1 \\ \vdots \\ TEC_i \\ b_1^s \\ \vdots \\ b_j^s \\ b_{r1} \\ \vdots \\ b_{rk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ TEC_{slant/jk} \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \tag{7}$$

일반적으로 위성과 수신기의 DCB 추정은 수신기의 데이터 타입 및 자료처리 전략에 따라 달라진다. 이 연구에서는 1시간의 관측값에 대하여 가중치 최소자승법(Weighted least square method)을 적용하는 식 (8)의 정규방정식(Normal Equation)을 사용하여 DCB를 산출하였다.

$$x = \left( \sum_{i=1}^n H_i^T W_i H_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n H_i^T W_i y_i \tag{8}$$

여기에서  $H$ 는 디자인 행렬,  $y$ 는 시선방향 총전자수값,  $W$ 는 위성 고도각에 따른 가중치 함수, 그리고  $x$ 는 수직방향 총전자수값과 위성과 수신기 각각의 DCB를 의미한다.

#### 4. 자료처리 결과

절대적인 전리층 총전자수값을 계산하기위해 DCB의 산출은 반드시 필요하다. 또한 GPS 수신기와 위성의 DCB는 하루 또는 일주일 이내에서 그리 많이 변하지 않기 때문에 며칠간의 GPS 데이터 처리를 통해 DCB를 추정할 수 있다. 특정 지역에 국한되어 있는 상황에서 위성과 수신기의 DCB를 보다 정확하게 추정하기 위해서는 많은 기준국 관측정보를 필요로 하며, 또한 전리층 총전자수를 정밀하게 추정하는 검증된 알고리즘이 필요하다. 이 연구에서는 한반도 상공의 총전자수 추정 뿐만 아니라 GPS 위성과 수신기의 DCB를 추정하기 위해 한국천문연구원에서 운용하고 있는 9개 GPS 기준국 관측자료를 모두 활용하였으며, 관측자료의 처리는 최병규 외(2005)가 개발한 전리층 감시 프로그램을 이용하였다. 2003년 10월 29일부터 31일까지 총 3일간의 GPS 관측자료를 처리하여 1시간 간격으로 격자기반 총전자수 산출과 동시에 28개 GPS 위성과 9개 수신기의 DCB를 산출하였다. 그림 1은 1시간 간격으로 추정된 총 9개 수신기의 DCB 변화를 나타내는 것이다. 전체적으로 수신기 DCB는 약  $\pm 2m$  이내에서 변화하는 것으로 나타났다. 표 2는 3일간 처리된 수신기들의 DCB값을 기술한 것으로 일일 DCB값은 시간별로 추정된 DCB값을 평균한 것이다. 3일간 처리된 결과를 통해

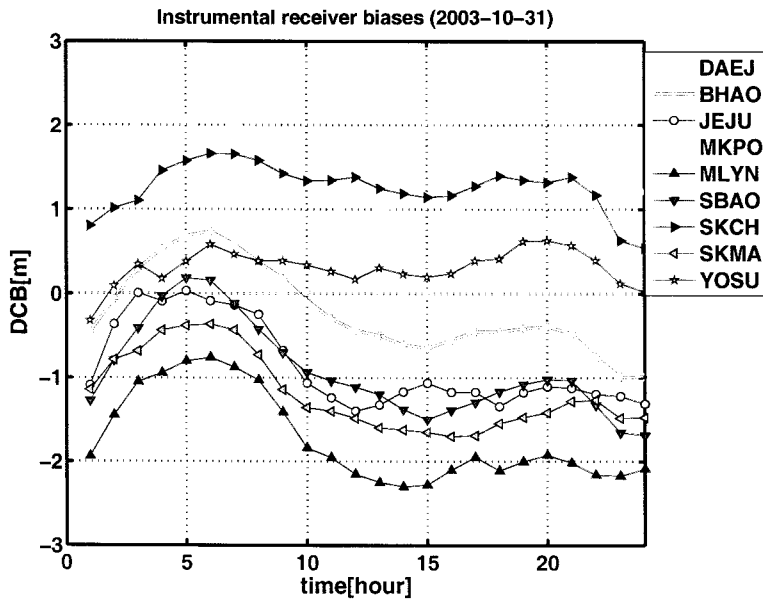


그림 1. 1시간 간격으로 추정된 GPS 수신기의 DCB값(2003년 10월 31일).

표 2. 3일간 추정된 수신기의 평균 DCB값.

GPS 기준국	일일 DCB (m)			Mean	Std.	RMS
	10.29	10.30	10.31			
DAEJ	$-3.10 \times 10^{-17}$	$-6.28 \times 10^{-17}$	$-1.23 \times 10^{-17}$	$-3.54 \times 10^{-17}$	$-2.55 \times 10^{-17}$	$-4.36 \times 10^{-17}$
BHAO	-0.17	-0.26	-0.21	-0.21	0.04	0.22
JEJU	-0.92	-1.19	-0.86	-0.99	0.17	1.01
MKPO	1.00	1.07	1.25	1.11	0.13	1.11
MLYN	-1.61	-	-1.73	-1.67	0.08	1.67
SBAO	-0.91	-1.03	-0.92	-0.95	0.06	0.96
SKCH	1.12	1.20	1.26	1.19	0.07	1.19
SKMA	-1.19	-1.24	-1.19	-1.21	0.03	1.20
YOSU	0.39	0.18	0.31	0.29	0.11	0.31

수신기의 DCB는 크게 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 표 3은 GPS 위성의 DCB값을 추정한 것이다. GPS 위성의 경우에는 어느 특정지점에서 모든 시간에 걸쳐 관측이 불가능하기 때문에 위성의 DCB는 하루단위로 평균하여 산출하였다. 위성 DCB는 nanosecond(ns) 단위로 산출이 되며, 최대 32기까지 DCB를 산출하도록 설정을 하였다. 또한 표 3에 제시한 것처럼 12번, 19번, 22번 그리고 32번 위성은 이 기간동안 궤도상에 없는 것으로 파악이 되었다. 위성의 DCB값 변화를 살펴보면, 특정위성의 DCB값은 최대 약 4.09ns, 최소 약 -6.28ns를 갖는 것으로 나타났다. 표 3에서 일일단위 DCB 변화를 비교해보면, 몇몇 위성의 DCB가 불안정하게 산출됨을 알 수가 있는데, 이것은 해당되는 위성의 관측자료 부족과 1시간 간격의 데이터 샘플링 및 국한된 지역에 한정된 GPS 기준국 자료 처리로 인한 결과로 인식된다.

표 3. 3일간 추정된 위성의 평균 DCB값.

GPS 위성 번호	일일 위성 DCB (단위: nanosecond)			평균
	10.29	10.30	10.31	
1	-6.6871	-5.7051	-6.0354	-6.1425
2	-5.6292	-6.9241	-6.3022	-6.2852
3	-2.3742	-4.5978	-3.8130	-3.5950
4	0.7086	1.0016	0.7142	0.8081
5	-3.5257	-5.5990	-5.8988	-5.0078
6	-3.6520	-3.9951	-4.3415	-3.9962
7	-5.2568	-2.0817	-3.3490	-3.5625
8	-3.0121	-2.2757	-3.0718	-2.7865
9	-5.0146	-5.1718	-0.4663	-3.5509
10	-1.8920	0.4612	0.8179	-0.2043
11	0.8265	2.9387	-0.5332	1.0773
12	-	-	-	-
13	-1.8098	-0.4065	-0.9090	-1.0418
14	1.0274	-0.3637	-0.6003	0.0211
15	-1.7391	-2.1943	-3.5516	-2.4950
16	-0.1307	-2.6773	-3.2392	-2.0157
17	-1.5954	-2.0100	-3.1593	-2.2549
18	3.7566	4.3090	3.3468	3.8041
19	-	-	-	-
20	-2.6286	-4.4266	-1.9575	-3.0042
21	4.3767	4.7174	3.1942	4.0961
22	-	-	-	-
23	1.8757	-3.1592	2.0627	0.2597
24	-2.9919	-1.1375	-1.2866	-1.8053
25	-3.3890	-4.8570	-4.2200	-4.1553
26	-0.2168	-0.0163	-0.9900	-0.4077
27	-4.0620	-2.0169	-2.6828	-2.9206
28	0.8831	5.4117	2.1333	2.8094
29	0.4566	0.8039	-0.5974	0.2210
30	-1.9219	-2.4919	-2.9584	-2.4574
31	-2.0763	-2.7824	-3.7403	-2.8663
32	-	-	-	-

그림 2는 IGS에서 하루단위로 제공하는 위성 DCB값과 이 연구를 통해 추정된 위성 DCB값을 비교한 것이다. GPS 위성 18번(그림 2a)과 21번(그림 2b)에 대해 3일간 자료처리된 결과를 함께 표기했다. 이 연구에서 산출된 GPS 위성 18번의 DCB값은 IGS DCB값보다 3일간 모두 높게 산출되었고, 10월 30일은 최대 약 1.2ns 이상의 차이가 발생했다. 또한 GPS 위성 21번의 DCB값은 10월 29일과 30일은 모두 IGS DCB값보다 약 0.5ns 크게 산출된 반면, 10월 31일은 약 0.7ns 작게 산출되었다. IGS에서 산출한 위성의 DCB값은 안정적인 값이 유지되는 경향을 나타내지만, KASI에서 산출한 값은 IGS보다 불안정함을 보이고 있다. 이것은 IGS가 전세계 약 100여개 이상의 GPS 기준국 데이터와 전리층 분석센터로부터 산출된 값을 서로 조합하여 재산출한 값이기 때문에 좁은 지역의 GPS 기준국망 데이터 처리와 비교했을 때에는 안정성과 정확성에서 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한 IGS는 특정한 날의 DCB 산출을 위해 총 3일간의 데이터 샘플링, 즉 전일, 해당일과 다음날의 데이터를 모두 활용하여 해당일의 DCB를 산출한다. 이러한 작은 자료처리 전략이 DCB의 정확도에도

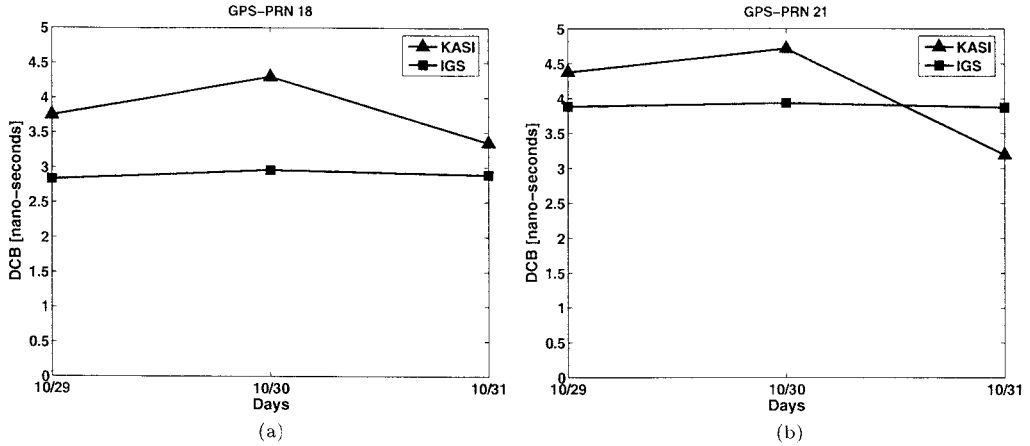


그림 2. 특정 위성들의 DCB값 비교. (a) PRN 18번 위성, (b) PRN 21번 위성

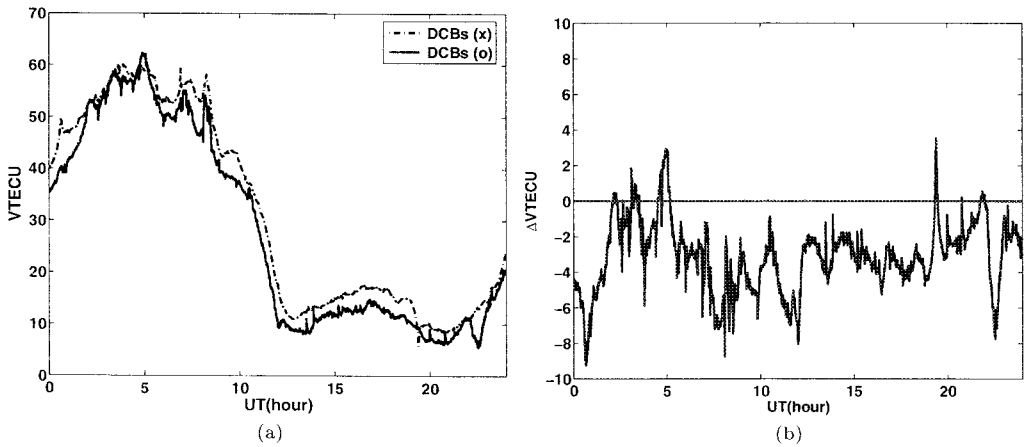


그림 3. DCB 적용 전과 후의 수직방향 총전자수 변화(a)와 차이(b).

영향을 줄 것이다. 그림 3a는 2003년도 10월 한반도 상공의 전리층 총전자수 변화를 나타낸 것으로서, 앞서 추정한 위성과 수신기의 DCB값을 적용 전과 후로 나누어 수직방향 총전자수 변화 추이를 나타낸 것이다. 그림 3b는 DCB 적용 전과 후의 수직방향 총전자수의 차이를 보여주고 있다. 총전자수값의 변화를 자세히 살펴보면, DCB로 인해 총전자수값이 특정시점에서는 약 9TECU(TEC Unit) 이상 차이가 발생함을 알 수 있다. 그림 3의 결과로 DCB는 전리층 총전자수의 정확도에 많은 영향을 주고 있는 것으로 분석이 되며, 또한 DCB를 총전자수 산출에 적용함으로써 절대적인 총전자수값을 산출하는 것이 가능하게 되었다.

### 5. 결론

이 연구에서는 한국천문연구원에서 운영하고 있는 9개의 GPS 기준국 데이터를 이용하여 GPS 위성과 수신기의 DCB를 산출하는 알고리즘을 개발하였다. 1시간 간격으로 GPS 관측정보를 위성의

고도각에 따른 가중치가 적용된 최소자승법을 이용하여 전리층 총전자수값과 DCB를 함께 추정하였으며, DCB를 총전자수 산출에 적용한 결과 크기는 약 9TECU의 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 이 연구를 통해 산출된 특정위성의 DCB를 IGS에서 산출된 DCB와 비교한 결과 0.5ns 이상의 차이를 보였다. 이것은 국한된 지역에서의 많지 않은 GPS 관측정보와 DCB를 추정하기 위한 서로 다른 데이터 샘플링, 자료처리 기간 및 전략의 차이로 인식이 된다.

이 연구에서 산출된 위성과 수신기의 DCB는 한반도 전역의 전리층 총전자수값의 정확도를 향상시키는데 기여할 것으로 판단되며, 상대적인 TEC과 절대적인 TEC를 인식하는데 중요한 자료로 사용되기를 기대한다.

### 참고문헌

- 최병규, 박종욱, 정종균, 박필호 2005, 한국우주과학회지, 22, 3
- Blewitt, G. 1990, JGR letters, 17, 199
- Coco, D., Coker, C., Dahlke, S., & Clynych., J. 1991, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 27, 931
- Gao, Y. & Liu, Z. 2002, Journal of Global Positioning System, 1, 18
- Hernandez-Pajares, M., Juan, J. & Sanz, J. 1999, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 61, 1237
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2008, GNSS - Global Navigation Satellite Systems (Wien: Springer-Verlag), pp.420-426
- Lanyi, G. & Roth, T. 1988, Radio Science, 23, 4
- Mannucci, A., Wilson, B., Yuan, D., Ho, C., Lindqwister, U., & Runge, T. 1998, Radio Science, 33, 565
- Schaer, S. 1999, PhD Thesis, University of Berne