

Least-Squares Collocation을 이용한 GPS 수신기 시계오차 보간 Interpolation of GPS Receiver Clock Errors Using Least-Squares Collocation

홍창기¹⁾ · 한수희²⁾

Hong, Chang-Ki · Han, Soohye

Abstract

More than four visible GPS (Global Positioning System) satellites are required to obtain absolute positioning. However, it is not easy to satisfy this condition when a rover is in such unfavorable condition as an urban area. As a consequence, clock-aided positioning has been used as an alternative method especially when the number of visible satellites is three providing that receive clock error information is available. In this study, LSC (Least-Squares Collocation) method is proposed to interpolate clock errors for clock-aided positioning after analyzing the characteristics of receiver clock errors. Numerical tests are performed by using GPS data collected at one of Korean CORS (Continuously Operating Reference Station) and a nearby GPS station. The receiver clock errors are obtained through the DGPS (Differential GPS) positioning technique and segmentation procedures are applied for efficient interpolation. Then, LSC is applied to predicted clock error at epoch which clock information is not available. The numerical test results are analyzed by examining the differences between the original and interpolated clock errors. The mean and standard deviation of the residuals are 0.24m and 0.49m, respectively. Therefore, it can be concluded that sufficient accuracy can be obtained by using the proposed method in this study.

Keywords : GPS, DGPS, Receiver Clock Error, Least-Squares Collocation

초 록

GPS (Global Positioning System)를 이용하여 위치를 결정하기 위해서는 4개 이상의 가시위성이 있어야 한다. 하지만 도심지역과 같은 환경에서는 이러한 조건을 만족하기 어려운 경우도 있다. 특히, 가시위성이 3개뿐인 경우 외부로부터 위치결정에 필요한 시계오차정보를 활용하는 측위기법이 대안으로 사용되기도 한다. 본 연구에서는 먼저 수신기 시계오차특성을 분석한 후 시계오차의 보간에 적합한 방법으로 LSC (Least-Squares Collocation)을 제안하였다. 실험을 위해 국내 상시관측소와 상시관측소 근처에 설치된 수신기로부터 수신된 GPS 데이터를 이용하였다. DGPS (Differential GPS)기법을 통해 먼저 시계오차를 계산했으며 효율적인 보간을 위해 구간을 나눈 후 보간하는 방법을 적용하였다. 시계오차의 계산이 불가능한 epoch에 대해 LSC 보간법을 적용함으로써 시계오차를 계산하였다. 실험결과를 분석하기 위해 원래 데이터로부터 계산된 시계오차와 보간된 시계오차와의 차이인 잔차를 계산하였다. 계산결과 잔차의 평균은 0.24m 그리고 표준편차는 0.49m로 충분한 정확도의 확보가 가능한 것으로 판단된다.

핵심어 : GPS, DGPS, 수신기 시계오차, 최소제곱 콜로케이션

Received 2018. 12. 06, Revised 2018. 12. 15, Accepted 2018. 12. 24

1) Member, Dept. of Geoinformatics Engineering, Kyungil University (E-mail: ckhong@kiu.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Geoinformatics Engineering, Kyungil University (E-mail: scivile@kiu.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

GPS (Global Positioning System)를 이용한 절대측위(absolute positioning) 혹은 단독측위(point positioning)란 일반적으로 위성으로부터 수신된 코드데이터를 이용하여 수신기의 3차원 위치를 결정하는 것을 말한다. 데이터 처리에 사용되는 L1의 코드데이터는 관측오차가 미터 수준으로 위상데이터의 관측오차에 비해 상대적으로 크다는 단점이 있으나 모델링이 복잡한 모호정수(integer ambiguity)를 포함하지 않는다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). 따라서 절대측위는 GPS측위 기법 중 계산이 비교적 간단하다는 장점이 있으며 자동차 등 항법 분야에 주로 활용되고 있다. 하지만 대기효과 등을 포함하여 신호에 포함된 다양한 오차요인들로 인해 위치정확도는 20m~30m 수준에 그친다. 상대적으로 낮은 위치정확도를 갖는 절대측위의 단점을 극복하기 위해 DGPS (Differential GPS) 개념이 도입되었으며 DGPS 기법을 추가적으로 활용하는 경우 기준국과의 거리에 따라 차이가 있으나 대략 1m-5m 수준의 정확도 확보가 가능한 것으로 알려져 있다(Zhang, 1997; Bednarz, 2002; Ali and Montengro, 2014). 따라서 코드데이터를 이용하여 측위를 수행하는 경우 DGPS 기반의 절대측위 기법을 사용하는 것이 정확도 확보 측면에서 효과적이고 할 수 있다. 절대측위에서는 수신기의 시계오차가 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 수신기의 좌표(X,Y,Z)와 함께 미지수에 포함하여 조정계산을 수행한다(Langley, 1997; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2008). 따라서 절대측위를 수행하는 경우 최소 4개의 위성으로부터 수신된 데이터가 필요하며 일반적인 환경에서는 이러한 조건을 만족할 수 있다. 하지만 도심지역 등 GPS신호 수신에 제한 혹은 단절된 장소에서는 최소 가시위성수의 확보가 어려울 수도 있으며 가시위성이 3개인 경우 수신기의 시계오차 정보가 있다면 측위가 가능하다(Bednarz, 2004; Chang and Wang, 2009; Teng *et al.*, 2011). 가시위성이 2개인 경우에는 고도계(기압계 기반) 혹은 고도가 일정하다는 제약조건을 활용하기도 한다(Jan *et al.*, 2008). 실시간 측위를 위해서는 이전까지 계산된 시계오차를 기반으로 예측된 값을 사용할 수 있으며 후처리 방식의 측위에서는 보간법을 적용하여 특정 시간에서의 시계오차를 계산할 수 있다. 이 두 경우 모두 시간에 따른 수신기의 시계오차 특성에 대한 면밀한 분석이 선행되어야 한다. 일반적으로 상시관측소 등에 설치되어 있는 비교적 고가의 수신기는 시계오차의 변화가 시간에 따라 작은 편이나 측량용으로 판매되는 일부 수신기의 경우 시간에 따른 변화량이 크게 나타나기도 한다. 이러한 수신기는 시계 발진기(oscillator)를 GPS시간과 동기화(synchronization) 하도록 설계되어 시계오차의 차이가 커지게 되면 주기적으로 시계를 리셋

한 후 특정 시간(millisecond 수준)을 더해준다. 그 결과 수신기의 시계가 리셋이 될 때마다 시계오차는 오프셋(offset)이 반영되어 톱니형태(sawtooth receiver signature)의 변화를 보인다(Filho *et al.*, 2003; Guo and Zhang, 2013). 시계오차를 모델링하기 위해 2차함수를 활용하거나 이동평균기법을 사용할 수 있으나 톱니형태의 시계오차에 직접 적용하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 후처리를 가정하되 시계오차가 톱니형태로 나타나는 경우에 적합한 보간방법을 제시하였다. 먼저 시계오차로부터 오프셋을 결정했으며 오프셋을 기준으로 구간을 나눈 후 각 구간별 LSC (Least-Squares Collocation)를 적용함으로써 보간을 수행하였다. LSC는 공간데이터의 보간 특히 중력데이터의 처리에 널리 사용되고 있는 방법으로 데이터 사이의 상관관계를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서 제안한 알고리즘을 통해 가시위성의 개수가 3개인 경우에도 충분한 정확도를 갖는 절대측위가 가능할 것으로 예상된다.

2. 연구 방법

GPS 수신기의 시계오차특성은 수신기의 종류에 따라 다르게 나타난다. 따라서 이에 대한 분석이 선행되어야 하며 이를 토대로 시계오차를 보간하는 필요한 적절한 방법을 선택할 수 있다. 본 연구를 위해 먼저 국내 상시관측소와 근처에 설치된 수신기를 이용하여 데이터를 취득하였다. DGPS기법을 이용하여 절대측위를 수행함으로써 시계오차를 계산하였으며 시계오차의 특성에 대한 분석을 수행하였다. 분석을 통해 시계오차를 구간으로 나눈 후 LSC 보간법을 적용하여 시계오차값이 없는 구간에 대해 보간을 실시하였다. 마지막 단계로 시계오차와 보간된 값의 차이인 잔차를 계산 후 분석함으로써 알고리즘의 성능을 검증하였다. Fig. 1은 본 연구에 적용한 연구방법을 도식한 것이다.

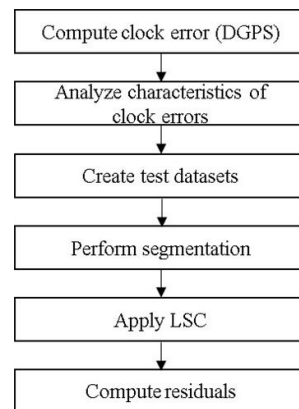


Fig. 1. Flowchart of data processing

3. 이론적 배경

3.1 절대측위

절대측위란 수신된 코드데이터를 이용하여 독립적으로 위치를 계산하는 방법으로 정의할 수 있으며 수신기의 좌표요소인 X, Y, Z와 시계오차를 결정해야하기 때문에 최소 4개 이상의 가시위성이 필요하다. 각 위성으로부터 수신된 코드데이터는 위성과 수신기의 기하학적 거리, 수신기 및 위성의 시계오차, 대류층 및 전리층 지연, 다중경로오차(multipath) 등의 함으로 표현되며 수식으로 나타내면 Eq. (1)과 같다(Goad and Yang, 1997).

$$P_i^k = \rho_i^k + c(dt_i - dt^k) + T_i^k + I_i^k + M_i^k + e_i^k \quad (1)$$

where i : GPS receiver (station), k : GPS satellite, ρ : geometric distance between the receiver and the satellite, c : speed of light, dt : clock error, T : tropospheric delay, I : ionospheric delay, M : multipath, e : measurement error.

Eq. (1)에서 보듯이 코드데이터에는 다양한 오차들이 포함되어 있으며 각각의 오차를 제거하거나 최소화하기 위해 모델링 기법을 사용하기도 한다. 하지만 충분한 정확도의 확보가 가능한 모델링이 어렵기 때문에 절대측위 정확도(약 20~30m 수준)는 상대적으로 낮은 편이다. Eq. (1)은 비선형식이므로 테일러급수 전개를 통한 선형화 한 후 행렬형태로 나타내면 수식 Eq. (2)와 같다.

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}}_\xi + e, \quad e \sim (0, \sigma_0^2 P^{-1}) \quad (2)$$

with:

$$y = \begin{bmatrix} y_i^k - \rho_{i,0}^k \\ y_i^\ell - \rho_{i,0}^\ell \\ y_i^m - \rho_{i,0}^m \\ y_i^n - \rho_{i,0}^n \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} \frac{x^k - x_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & \frac{y^k - y_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} & \frac{z^k - z_{i,0}}{\rho_{i,0}^k} \\ \frac{x^\ell - x_{i,0}}{\rho_{i,0}^\ell} & \frac{y^\ell - y_{i,0}}{\rho_{i,0}^\ell} & \frac{z^\ell - z_{i,0}}{\rho_{i,0}^\ell} \\ \frac{x^m - x_{i,0}}{\rho_{i,0}^m} & \frac{y^m - y_{i,0}}{\rho_{i,0}^m} & \frac{z^m - z_{i,0}}{\rho_{i,0}^m} \\ \frac{x^n - x_{i,0}}{\rho_{i,0}^n} & \frac{y^n - y_{i,0}}{\rho_{i,0}^n} & \frac{z^n - z_{i,0}}{\rho_{i,0}^n} \end{bmatrix}$$

$$, A_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \xi_1 = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \end{bmatrix}, \quad \xi_2 = [c dt_i]$$

where y : measurements, A : design matrix, ξ : parameters

to be estimated, e : measurement errors, σ_0^2 : unit variance, P : weight matrix for the measurements.

Eq. (2)에 최소제곱법을 적용하여 파라미터($\hat{\xi}$), 잔차(\tilde{e}), 단위분산($\hat{\sigma}_0^2$), 파라미터에 대한 분산을 Eqs. (3)-(6)과 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\xi} = (A^T P A)^{-1} A^T P y \quad (3)$$

$$\tilde{e} = y - A \hat{\xi} \quad (4)$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\tilde{e}^T P \tilde{e}}{n - rk(A)} \quad (5)$$

$$D(\hat{\xi}) = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (6)$$

where n : number of measurements, $rk(\cdot)$: rank of matrix, .

Eq. (2)에서 확인할 수 있듯이 가시위성이 3개일지라도 ξ_2 에 해당되는 수신기의 시계오차 정보가 제공된다면 관측값 y 로부터 $A_2 \xi_2$ 를 뺀 후 다시 조정계산을 수행함으로써 수신기 좌표의 계산이 가능하다.

3.2 DGPS 측위

DGPS는 두 수신국이 일정한 거리 이내에 있는 경우 관측데이터에는 위성의 위치오차, 대기효과 등 공통오차가 포함되어 있으므로 관측값에 대한 보정을 통해 공통오차를 제거한 후 측위를 하는 방법이다. 이때 기준국은 수신된 데이터와 이미 알고 있는 기준국의 좌표정보를 이용하여 각 위성별 관측값에 대한 보정값을 계산할 수 있다. 수신된 관측데이터와 보정값은 RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services) 포맷으로 주변 지역에 전파되어 이동국(rover)의 DGPS 측위가 가능하도록 한다. DGPS는 기준국과의 거리가 멀수록 공통오차의 상관관계가 떨어지므로 DGPS 측위정확도도 낮아지게 된다. 이동국 j 에서 위성 k 로부터 수신된 관측데이터에 대한 보정값 ΔC_j^k 은 Eq. (7)과 같이 계산할 수 있다(Hofmann-Wellenhof, 2008; Ali and Montenegro, 2014).

$$\Delta C_j^k = \rho_i^k - P_i^k + c(dt_i - dt^k) \quad (7)$$

where i indicates reference station

3.3 LSC를 이용한 보간

LSC는 공간 혹은 시간에 따라 분포된 데이터로부터 특정 위

치 혹은 시간에서의 값을 예측하는 기법으로 측지학에서는 중력 관련 데이터의 보간 등에 주로 사용된다. LSC는 데이터의 전체적인 경향을 나타내는 부분과 랜덤신호(random signal)를 나타내는 부분으로 나누어 모델링을 하며 이를 수식으로 나타내면 Eq. (8)과 같다(Moritz, 2001).

$$y = A\xi + s + e, \begin{bmatrix} e \\ s \end{bmatrix} \sim \begin{pmatrix} 0 & C_{ee} & 0 \\ 0 & 0 & C_{tt} \end{pmatrix} \quad (8)$$

where y : vector of observations, A : design matrix, ξ : fixed parameters to be estimated, s : random parameters to be predicted, e : measurement errors, C_{tt} : signal covariance matrix, C_{ee} : noise covariance matrix for the measurements.

Eq. (8)에 대해 최소제곱법을 적용하여 경향을 나타내는 ξ 와 랜덤신호에 해당하는 s 를 각각 Eq. (9)와 Eq. (10)와 같이 계산할 수 있다.

$$\hat{\xi} = (A^T \bar{C}^{-1} A)^{-1} A^T \bar{C}^{-1} y \quad (9)$$

with $\bar{C} = C_{tt} + C_{ee}$

$$\tilde{s} = C_{st}(C_{tt} + C_{ee})^{-1}(y - A\hat{\xi}) \quad (10)$$

where C_{st} is signal cross-covariance matrix between the estimate and observation sites.

4. 데이터 처리 결과

4.1 GPS 데이터

절대측위 정확도는 상대적으로 낮기 때문에 DGPS 기반으로 절대측위를 수행하는 것이 보다 효과적이다. 또한 시계오차 보간에 의한 위치결정이 필요한 경우일지라도 절대측위 단독으로는 충분한 정확도를 기대하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 DGPS 기반 절대측위를 바탕으로 수신기 시계오차 보간방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 국내 상시관측소 중 경상북도 경산에 위치한 TEGN에서 취득된 GPS 데이터와 TEGN에

서 북서 방향으로 약 350m 떨어진 지점에 임시로 설치한 GPS 수신기(T007)로부터 취득한 GPS 데이터를 활용하였다. 실제 이동측위 데이터를 사용하는 것이 바람직하나 연구목적상 정지측위 데이터를 사용하여도 무방할 것으로 판단하여 정지상태에서 데이터를 취득하였다. 지역수평좌표계(local horizontal coordinate system)로 표시된 두 지점의 좌표차이는 North 방향으로 328.142m, East 방향으로 -35.796m, Up방향으로 18.211m이며 상대측위를 통해 결정하였다. 데이터 취득에 사용된 수신기 및 안테나 정보, 자세한 위치정보는 Table 1과 같다.

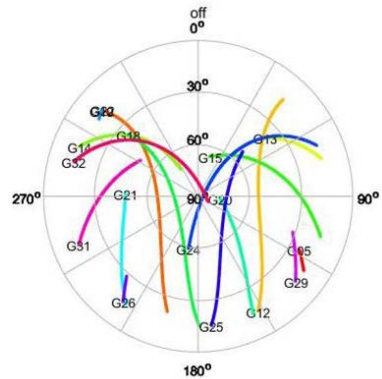


Fig. 2. Azimuth and elevation angles of GPS satellite (T007)

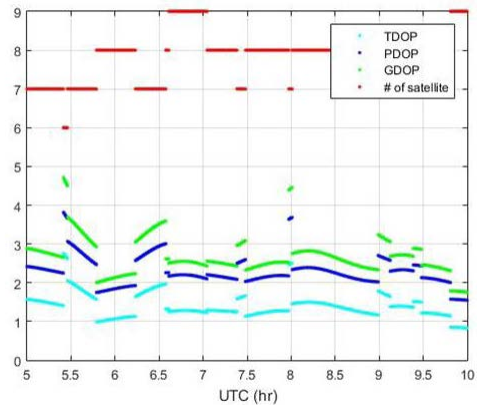


Fig. 3. Number of GPS satellites and DOPs (T007)

취득 데이터 간격은 1초이며 UTC 기준으로 5시부터 10시가

Table 1. Station informations used in this study

Station name	TEGN			T007		
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
Cartesian coordinates	-3241051.551	4030771.747	3719838.477	-3240912.307	4030655.700	3720114.945
Receiver type	TRIMBLE NETR9			TRIMBLE R8		
Antenna type	TRM59800.00 NONE			TRMR8S NONE		

지 총 5시간 동안 데이터를 취득하였으며 임계고각은 15도로 설정하였다. 이때 위성의 기하학적 배치 및 DOP (Dilution Of Precision)은 각각 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

4.2 수신기의 시계오차

수신기 시계오차를 보간하는 적절한 방법을 찾기 위한 전 단계로 시계오차의 변화특성을 먼저 분석해야 한다. 시계오차 변화는 수신기의 종류에 따라 다양한 양상을 보이는 것으로 알려져 있으며 시계오차를 가능한 한 정확하게 계산한 후 변화특성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 L1 및 L2 코드데이터를 모두 사용하였으며 선형조합을 통해 전리층 지연 효과를 제거하였다. 뿐만 아니라 위성의 고각에 따라 관측오차에 가중치를 부여한 후 조정계산을 수행하였다. Fig. 4는 조정계산 결과 계산된 시계오차의 시간에 따른 변화를 보여주고 있다.

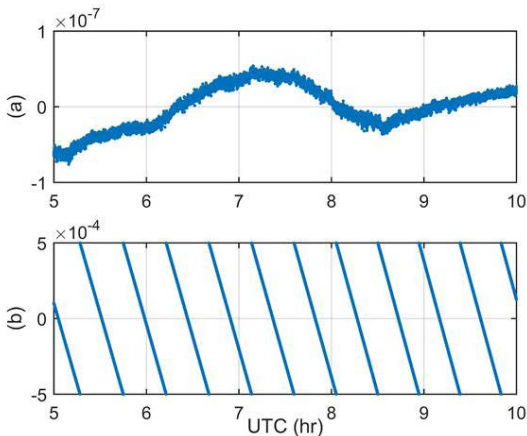


Fig. 4. Estimated receiver clock errors; (a) TEGN and (b) T007

Fig. 4에서 보듯이 TEGN의 시계오차는 변화폭이 상대적으로 작으며 서서히 변하는 특징을 보이고 있다. 반면 T007의 시계오차는 주기적인 오프셋과 일정한 패턴이 반복되어 나타나는 전형적인 톱니형태를 보여주고 있다. 따라서 TEGN과 유사한 형태의 시계오차에 대한 보간은 이동평균법, 다차함수 피팅(fitting) 방법 등을 이용하여도 무방할 것으로 판단되는 반면 T007과 같이 톱니형태로 나타나는 시계오차에는 이러한 보간법을 직접 적용하기 어렵다.

4.3 DGPS 측위를 통한 시계오차 계산

T007의 시계오차 계산은 DGPS 측위를 기반으로 하기 때문에 TEGN에서 생성된 보정값을 이용하여 DGPS 측위를 수행

한 후 결과를 분석함으로써 DGPS 측위성능을 확인하고자 하였다. 본 연구에서는 DGPS 보정값 생성 단계에서 L1 코드 데이터만 사용하였으며 위성고각에 대한 가중치를 부여하지 않은 상태로 절대측위를 수행하였다. 이와 유사하게 T007에서도 L1 코드 데이터에 보정값을 더한 후 절대측위를 수행하였다. Fig. 5은 절대측위 결과를 보여주고 있으며 위성배치의 기하학적 변화(개수)에 따라 측위 결과에 오프셋이 발생하기 한다. Fig. 6은 DGPS기반 절대측위 결과를 보여주고 있으며 Fig. 5과 비교했을 때 큰 폭으로 측위정확도가 향상되었다는 것을 알 수 있다. 측위결과에 대한 자세한 통계는 Table 2에서 확인할 수 있다. 따라서 DGPS 측위 알고리즘이 성공적으로 작동되고 있는 것으로 보이며 이때 계산된 시계오차에 대해 구간별 보간을 하여도 무방할 것으로 판단하였다.

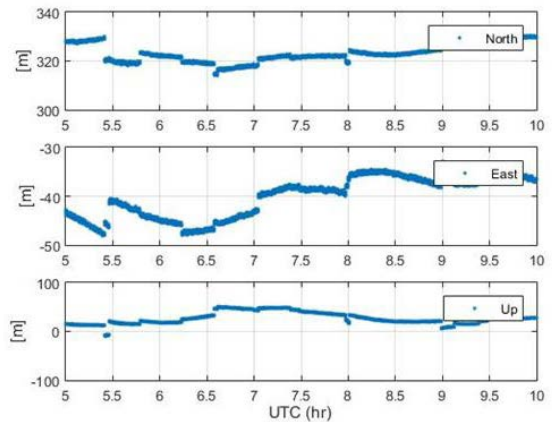


Fig. 5. Absolute positioning results (T007)

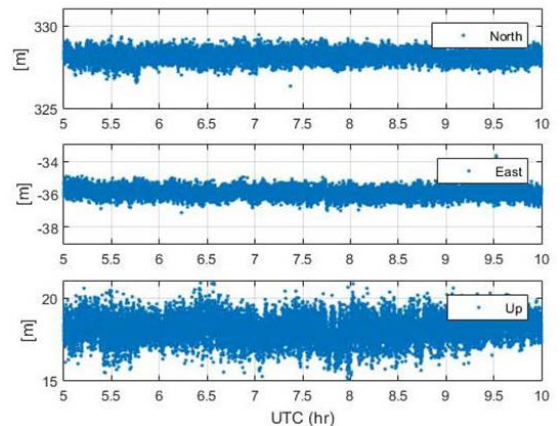


Fig. 6. DGPS positioning results (T007)

4.4 실험 데이터 생성

Table 2. Statistical characteristics of DGPS positioning results (T007)

	Absolute positioning			DGPS positioning		
	North [m]	East [m]	Up [m]	North[m]	East [m]	Up [m]
Mean	323.31	-40.04	26.92	328.14	-35.90	18.10
Std.	3.95	4.36	12.22	0.33	0.28	0.74
Max.	331.11	-32.84	51.28	329.46	-33.66	23.32
Min.	314.01	-48.10	-10.23	326.34	-37.12	12.94

도심지역에서의 DGPS 측위를 가정하여 가시위성이 3개 혹은 4개가 번갈아 관측된 것처럼 데이터를 일부 데이터를 삭제하였다. Fig. 3에서 보듯이 가시위성의 개수는 모든 구간에서 7개 이상이었으나 6시부터 6시 10분 동안 높은 고각의 관측데이터만 3개 혹은 4개만 남기고 나머지는 삭제하였다. 도심에서의 이동측위를 가정하였기 때문에 1분 간격의 가시위성 개수 변화를 가정하였다. 따라서 가시위성이 3개인 구간에서는 시계오차의 계산이 불가능하였다. Table 3은 실험을 위해 나눈 구간에 대한 정보를 보여주고 있으며 Fig. 7은 가시위성 개수의 변화를 보여주고 있다.

Table 3. Data spans with number of satellites information

Span number	Periods	Number of satellites
1	06:00:00 – 06:00:59	4
2	06:01:00 – 06:01:59	3
3	06:02:00 – 06:02:59	4
4	06:03:00 – 06:03:59	3
5	06:04:00 – 06:04:59	4
6	06:05:00 – 06:05:59	3
7	06:06:00 – 06:06:59	4
8	06:07:00 – 06:07:59	3
9	06:08:00 – 06:08:59	4
10	06:09:00 – 06:09:59	3

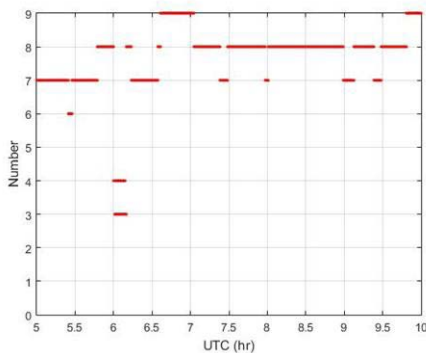


Fig. 7. Number of satellites after data removal

수집된 관측데이터를 이용하여 마찬가지로 DGPS 측위를 수

행하였으며 이때 계산된 시계오차는 Fig. 8과 같다. Fig. 4와 비교했을 때 전반적인 패턴은 유사하나 시계오차의 계산이 불가능한 구간이 있음을 알 수 있다.

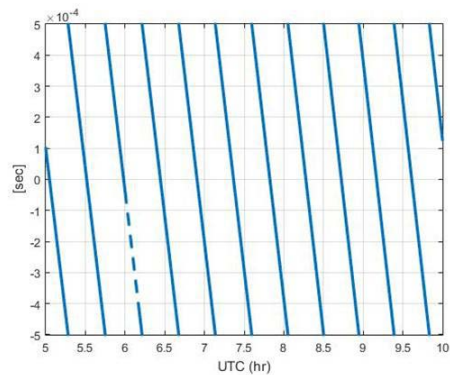


Fig. 8. Estimated receiver clock errors after data removal

4.5 시계오차 오프셋 판별

톱니형태의 시계오차를 보간하기 위해 먼저 오프셋이 발생한 시간을 찾아야 하며 이를 기준으로 구간을 나눌 수 있다. 먼저 오프셋이 발생한 시간을 찾기 위해 Eq. (11)을 이용하여 시계오차의 시간에 따른 변화율(Δdt_j)을 계산하였다.

$$\Delta dt_j(t_{p+1}) = \frac{dt_j(t_{p+1}) - dt_j(t_p)}{t_{p+1} - t_p} \tag{11}$$

where j represents rover, p is index for time tag.

시계오차가 톱니형태를 보이는 경우 오프셋의 크기는 millisecond에서 수십 millisecond로 알려져 있으므로 본 연구에서는 Eq. (12)를 기준으로 오프셋을 결정하였다.

$$offset = \begin{cases} 0, & |\Delta dt_j(t_{p+1})| < 1 \times 10^{-4} \text{ sec} \\ 1, & |\Delta dt_j(t_{p+1})| \geq 1 \times 10^{-4} \text{ sec} \end{cases} \tag{12}$$

Fig. 9는 위에서 제시된 기준으로 결정된 오프셋의 위치를 나타내고 있으며 검정색 선으로 표시되어 있다. 빨간색 원은 오프

셋의 크기를 의미한다.

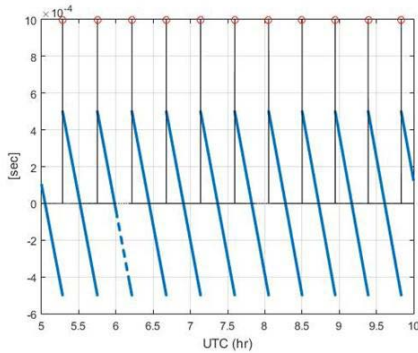


Fig. 9. Receiver clock offsets detected with discriminant criterion (T007)

앞에서 설명하였듯이 DGPS로 결정된 이동국의 시계오차는 기준국의 시계오차와 높은 상관성을 띠고 있다. 따라서 기준국의 시계오차 변화특성도 동시에 고려하여 구간을 좀 더 세분화하여야 보간결과의 정확도를 높일 수 있다. 이를 위해 이동국과 마찬가지로 기준국의 시계오차 변화율을 계산하여 위성의 기하학적 배치변화로 인해 발생하는 오프셋을 결정하였다. 이때 오프셋을 결정하는 기준으로 시계오차 변화율 표준편차의 3배(3σ)에 해당하는 값을 선정하였다. Fig. 10은 시계오차 변화율(검정색)과 오프셋의 크기 및 발생 시간(빨간색 원)을 나타내고 있다.

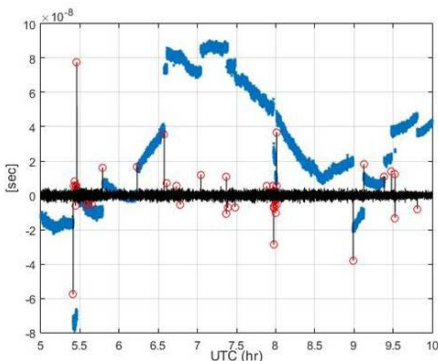


Fig. 10. Change rate of receiver clock errors with respect to time (TEGN)

4.6 LSC 보간 결과

4.5절에서 결정된 이동국과 기준국의 오프셋을 기준으로 구간을 나눈 후 각 구간에 대해 LSC 보간법을 적용하였다. 이동국 시계오차의 경향을 나타내는 $A\epsilon$ 부분은 2차식으로 모델링하였으며 Fig. 11(a)는 시계오차에서 경향에 해당되는 것을 뺀

나머지 성분을 보여주고 있다. 6시부터 6시 10분 사이에 데이터의 불연속이 존재하며 LSC 보간법을 이용해 이 부분의 시계오차를 예측하는 것이 본 연구의 목표이다. 하지만 실제 보간은 데이터가 없는 부분뿐만 아니라 1초 간격의 전체 epoch에 대해 수행함으로써 알고리즘의 효용성을 확인하고자 하였다. Fig. 11(b)에서 빨간색으로 표시된 부분이 보간결과에 해당되며 전체 시계오차에 충분히 부합되는 것으로 나타났다.

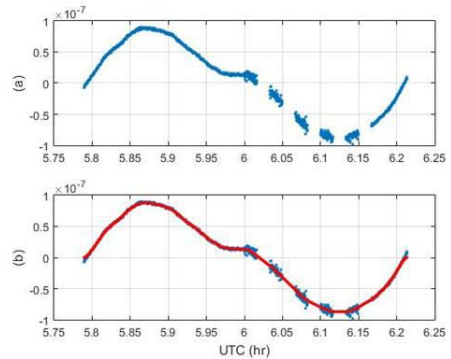


Fig. 11. Results of interpolation using LSC; (a) original clock errors (b) interpolated clock errors

보간결과의 정확도를 분석하기 위해 시계오차에서 보간된 값을 뺀 잔차(residuals)를 계산하였으며 이를 도시한 것이 Fig. 12이다. 데이터가 없는 구간에서는 데이터 수정 이전의 원래 데이터로부터 계산된 시계오차와 보간결과의 차이를 계산했으며 빨간색 부분이 여기에 해당된다. 데이터가 없는 구간에서의 잔차 평균과 표준편차는 각각 8.04×10^{-10} 초, 1.65×10^{-9} 초이며 이를 거리로 환산하면 각각 0.24m, 0.49m에 해당된다. 따라서 코드데이터의 관측오차 수준을 고려했을 때 제안된 보간방법을 통해 충분한 정확도의 확보가 가능할 것으로 판단된다.

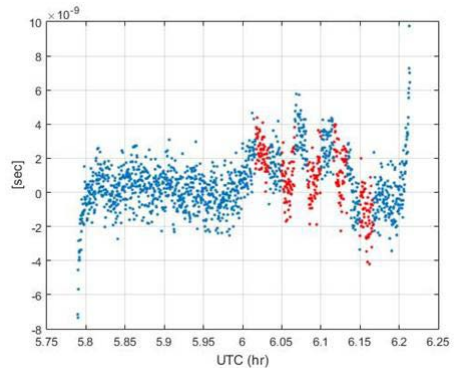


Fig. 12. Differences between the original and interpolated clock errors

5. 결론

GPS를 이용하여 절대측위를 수행하는 경우 최소 4개 이상의 가시위성의 확보가 필요하다. 본 연구는 도심지역과 같이 가시위성의 확보가 보장되지 않는 지역에서 측위에 필요한 시계오차를 효율적으로 제공하기 위한 보간법을 제안하였다. 이를 위해 수신기 종류에 따라 다른 형태로 나타나는 시계오차의 특성을 분석하였으며 톱니형태 보이는 시계오차의 보간을 위해서는 구간을 나누어 각 구간별로 보간법을 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단되었다. 이때 이동국의 시계오차뿐만 아니라 기준국의 시계오차도 동시에 고려하여 구간을 설정함으로써 DGPS 측위특성이 충분히 반영되도록 하였다. 또한 구간을 결정하기 위해 시계오차 변화율을 분석하여 구체적인 임계값(threshold value)을 결정하였으며 본 연구에 사용된 방법은 다른 종류의 수신기에 적용하여도 무방할 것으로 판단된다. 일반적인 데이터 보간에 활용되는 다차함수 혹은 이동평균법은 톱니형태의 시계오차 보간에는 적합하지 않은 것으로 판단되었으며 시계오차 특성과 시간에 따른 상관관계를 고려하여 LSC 보간법을 선택하였다. 국내 상시관측소와 주변에 설치된 수신기에서 동시에 취득한 데이터를 처리하여 제안한 방법의 정확도를 검증하였다. 보간 결과의 정확도 분석을 위해 원래 데이터와 보간결과와의 차이인 잔차를 계산하였으며 잔차의 평균은 0.24m, 표준편차는 0.49m로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 활용하게 되면 도시지역 등 가시위성이 3개인 경우에도 DGPS 기반 절대측위 정확도 확보가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2018년 경일대학교 교원연구년제 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ali, Q. and Montenegro, S. (2014), A Matlab implementation of differential GPS for low-cost GPS receivers, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 8, No. 3, pp. 343-350.
- Bednarz, S.G. (2004), *Adaptive Modeling of GPS Receiver Clock for Integrity Monitoring During Precision Approaches*, Master's thesis, Dept. of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 100p.
- Chang, T.-H. and Wang, L.-S. (2009), A solution to the ill-conditioned GPS positioning problem in an urban environment, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 135-145.
- Filho, E.A.M., Kuga, H.K., and Lopes, R.V.F. (2003), Real time estimation of GPS receiver clock offset by the Kalman filter, *Proceedings of COBEM 2003, 17th International Congress of Mechanical Engineering*, November 10-14, 2003, Sao Paulo, Spain.
- Goad, C.C. and Yang, M.A. (1997), New approach to precision airborne GPS positioning for photogrammetry, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 63, No. 9, pp. 1067-1077.
- Guo, F. and Zhang, X. (2013), Real-time clock jump compensation for precise point positioning, *GPS Solution*, Vol. 18, pp. 41-50.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Waskle, E. (2008), *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Wien New York, 518p.
- Jan, S.S., Egziabher, D.G., and Walter, T. (2008), Improving GPS-Based landing system performance using an empirical barometric altimeter confidence bound, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, Vol. 44, No. 1, pp. 127-146.
- Langley, R.B. (1997), GPS receiver system noise, *GPS world*, Vol. 8, No. 6, pp. 40-45.
- Moritz, H. (2001), *Advanced Physical Geodesy, Course Notes, Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science*, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- Schaffrin, B. (2002), *Adjustment Computations, Lecture Notes (GS650)*, Dept. of Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.
- Teng, Y., Shi, Y., and Zheng, Z. (2011), The clock-Aided method for GPS receiver positioning in an urban environment, *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, Vol. 3, No. 3, pp. 389-393.
- Zhang, Z. (1997), *Impact of Rubidium Clock Aiding on GPS Augmented Vehicular Navigation*, Master's thesis, Dept. of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada. 135p.