

태양폭풍에 의한 전리층 교란이 신속정지측위 정확도에 미치는 영향

Effects of ionospheric disturbances caused by solar storm on rapid-static positioning accuracy

홍창기¹⁾

Hong, Chang-Ki

Abstract

There exists a high correlation between the ionospheric delays and the integer ambiguity in GPS observation equation, so that the sufficient time span is required to revolve the integer ambiguity. This means that the ambiguity resolution plays a key role especially in rapid-static positioning mode. To analyze the effect of ionospheric disturbances on the positioning accuracy, 02/19/2011 day of dataset was selected processed in rapid-static positioning mode. The total of 141 30-minute sessions were processed, i.e., the estimation procedure started every 10 minutes, and the time-to-fix information of each data interval is obtained. In this study, the analysis is performed by comparing the time-to-fix with the magnitudes of ionospheric delays. The computed correlation coefficient between the time-to-fix and the magnitudes of ionospheric delays is 0.31, which indicates the ionospheric disturbances affect the positioning accuracy in rapid-static positioning mode. Therefore, it is required to collect and process sufficient data when the GPS surveying is performed in unfavorable ionospheric conditions.

Keywords : rapid static positioning, ionospheric disturbance, integer ambiguity

초 록

GPS 관측방식에서 전리층 지연값과 모호정수는 상관관계가 높기 때문에 충분한 시간동안 취득된 자료가 있어야 모호정수의 결정이 가능하다. 특히, 짧은 시간 동안 취득된 자료를 이용하여 정밀측위를 수행하는 신속정지측위의 경우 모호정수의 결정 여부는 측위정확도에 영향을 주는 핵심 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 전리층 교란이 상대적으로 심했던 2011년 2월 19일 서산, 수원, 원주 상시관측소에서 수신된 GPS 관측자료를 이용하여 신속정지측위를 수행한 후 모호정수가 결정되는 데 필요한 시간을 계산하였다. 총 141개의 세션에 대해 신속정지측위를 수행하였으며 동일한 시간대에 해당되는 이중차분 전리층 지연 평균값과의 상관관계를 분석함으로써 전리층 교란이 신속정지측위 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 모호정수를 결정하는데 필요한 시간과 이중차분 전리층 지연 평균값과의 상관계수는 0.31로 나타났으며 이로부터 전리층의 교란이 신속정지측위 정확도에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 태양폭풍 발생 시 불가피하게 GPS 측량을 수행하는 경우 충분한 시간 동안 취득된 자료를 사용하여야 정밀측위가 가능하다.

핵심어 : 신속정지측위, 전리층 교란, 모호정수

1. 서 론

대략 11년 주기로 증감하는 태양흑점수의 변화에 기인하여 태양폭풍이 발생하며 이때 방출된 대전입자들이 지자기장과 충돌하여 오로라 혹은 지자기 폭풍을 일으킨다.

태양의 흑점수는 2013년을 전후하여 극대화 될 것으로 예상되며 따라서 항공, 통신 등의 장애는 물론 위성항법시스템(GPS: Global Positioning System)에 다양한 형태로 영향을 줄 것으로 예측되고 있다. 태양폭풍이 발생하게 되면 GPS신호의 수신율이 현저히 떨어지는 것으로 조사되

1) 경일대학교 위성정보공학과 교수(E-mail:ckhong@kiu.ac.kr)

었으며 때로는 신호의 수신 자체가 불가능한 경우도 발생하는 것으로 알려져 있다(ChronicleOnline, 2006). 이러한 수신율의 저하는 절대측위의 정확도에 직접적인 영향을 주게 되며 상대측위를 기반으로 한 정밀측위에도 상당한 영향을 줄 것으로 예상된다. 특히 2003년에 발생한 태양폭풍은 최근에 발생한 태양폭풍 중 가장 강력했던 것으로 DGPS(Differential GPS)의 정확도는 평소에 비해 대략 10~20배 정도 낮아지는 것으로 나타났다(Skone and Coster, 2009). 또한 실시간 위치결정 서비스인 WASS(Wide Area Augmentation System)의 경우 평상시에는 2m 이내, 태양폭풍 발생 시에는 25m 정도의 오차를 보이는 것으로 보고되었다(Komjathy et al., 2005). 이동측위의 경우도 마찬가지로 반복정확도(repeatability)가 태양폭풍 발생 시 평상시보다 대략 10배 정도 낮아지는 것으로 나타났다(Bergeot et al., 2010).

태양폭풍의 발생은 전리층의 교란을 유발하게 되고 교란된 전리층으로 인해 지자기의 교란이 동시에 일어나게 된다. 따라서 지자기의 변화와 전리층의 변화는 밀접한 관계를 가지고 있으며 지자기의 변화를 나타내는 척도로 우리나라의 경우 Korean K인덱스를 사용하고 있다. 최근 발생한 X급 태양폭발에 의한 영향은 2011년 2월 18일(한국시간)에 있었으며 한국천문연구원 지자기 관측소에서 관측되었다. 이때 관측된 GPS 자료를 이용하여 절대측위를 수행한 후 측위오차를 분석한 연구가 국내에서 수행된 바 있다(유운자 외, 2011).

하지만 측량과 같이 상대적으로 높은 정확도를 요구하는 분야에서는 상대측위를 기반으로 측위를 수행하여야 하며 비용 대비 효율 측면에서 짧은 시간 동안 취득한 자료를 이용하되 높은 정확도를 확보하는 것이 관건이다. 이를 위해 신속정지측량 기법이 널리 사용되고 있으며 이때 반송파에 포함되어 있는 모호정수를 결정하여 측위정확도를 향상시키는 것이 핵심이다. 본 연구에서는 태양폭발에 의한 전리층의 변화가 신속정지측위 정확도에 미치는 영향을 분석하였으며 이를 위해 이중차분 전리층 지연량과 모호정수 결정에 필요한 시간과의 상관관계를 조사하였다. 모호정수 결정에 필요한 시간을 기준으로 정한 이유는 모호정수가 일단 결정이 되면 충분한 측위정확도의 확보가 가능하기 때문이다.

2. 연구방법

태양폭풍에 의한 전리층의 변화가 신속정지측위 시

모호정수를 결정하는데 미치는 영향을 분석하기 위해 Korean K인덱스가 상대적으로 큰 날짜를 선택하였다. 2011년 2월 19일 Korean K인덱스 값이 상대적으로 높은 것으로 조사되었기 때문에 서산, 수원, 원주 상시관측소에서 동일 날짜에 수신된 GPS 관측자료를 이용하였다. 먼저 서산-수원, 원주-수원을 연결하는 기선을 선택한 후 모든 수신기의 좌표를 고정하여 이중차분 전리층 지연값을 계산하였다(기준 자료 생성). 계산된 이중차분 전리층 지연값 크기와 신속정지측위 시 모호정수를 결정하는 데 걸리는 시간과의 상관관계를 분석함으로써 그 영향을 분석하였다. 본 연구에서는 이중차분 GPS 관측값을 기본으로 사용하였으며 기선 길이를 고려하여 중장기선에 해당되는 관측방정식을 생성하였다. 일반적으로 10km 이내에 해당되는 기선에서는 이중차분 대류 지연 및 전리층 지연값이 0인 것으로 가정할 수 있으나 그 이상의 기선길이에 대해서는 대류층 및 전리층 지연에 대한 모델링을 수행하여야 보다 정밀한 측위가 가능하다.

2.1 GPS 자료 모델링

이중주파수 수신기에서 수신된 코드(P_1, P_2) 및 반송파 위상(Φ_1, Φ_2)자료를 사용하였으며 Φ_1 과 wide-lane 신호를 이용하여 이중차분 관측방정식을 구성하였다. 수식 (1)은 본 연구에서 GPS자료 처리를 위해 사용한 관측방정식을 행렬 형태로 나타낸 것이다. Φ_1 과 wide-lane 신호를 사용하는 이유는 모호정수의 결정이 상대적으로 용이하다는 점과 관측값에 대한 분산·공분산 모델링이 간단하기 때문이다.

$$E \left\{ \begin{matrix} \Phi_{ij,1}^{kl} - \Phi_{ij,1,c}^{kl} \\ \Phi_{ij,2}^{kl} - \Phi_{ij,2,c}^{kl} \\ P_{ij,1}^{kl} - P_{ij,1,c}^{kl} \\ P_{ij,2}^{kl} - P_{ij,2,c}^{kl} \end{matrix} \right\} = \frac{[A_i \ A_j \ A_T \ A_N \ A_I]}{A} \begin{matrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \\ \Delta z_i \\ \Delta x_j \\ \Delta y_j \\ \Delta z_j \\ \Delta TZD_i \\ \Delta TZD_j \\ N_{ij,1}^{kl} \\ N_{ij,w}^{kl} \\ I_{ij}^{kl} \end{matrix} \quad (1)$$

여기서, $E\{\cdot\}$: 기댓값을 나타내는 연산자

$(\)_{ij}^{kl} = (\)_i^k - (\)_j^l - (\)_j^k + (\)_i^l$: 이중차분을 나타내는 연산자

i, j : 수신기 인덱스

- k, l : 위성 인덱스
- Φ, P : 반송파 위상 및 코드 관측값
- A_i, A_j : 수신기 좌표에 해당되는 설계행렬 요소
- A_T, A_N, A_I : 총천정대류지연, 모호정수, 전리층 지연에 해당되는 설계행렬 요소
- 1, 2: L1, L2 인덱스
- c : 초기값을 이용하여 계산된 위성과 수신기의 기하학적 거리
- $\Delta x, \Delta y, \Delta z$: 수신기의 좌표(초기값에 대한 증가분)
- TZD : 총천정대류지연량
- N_i, N_w : L1, wide-lane에 해당되는 모호정수
- I : 전리층 지연량

대류지연량은 산소, 질소 등에 영향을 받는 건조지연량(hydrostatic delay)과 수증기량에 의해 결정되는 습윤지연량(wet delay)으로 크게 나눌 수 있다. 수식 (2)에서와 같이 건조지연량과 습윤지연량은 연직방향의 천정건조지연량(zenith hydrostatic delay) 및 천정습윤지연량(zenith wet delay)에 각각 사상함수를 곱하여 계산하며 건조지연량의 경우 기존의 모델값들이 비교적 정확한 것으로 알려져 있다. 반면 습윤지연량은 그 크기가 건조지연량의 약 10% 정도로 상대적으로 작으나 정확한 모델링을 하기는 상대적으로 어렵다. 따라서 일반적으로 건조지연량은 모델값을 관측값으로부터 빼주기만 하는 반면 습윤지연량은 나머지 잔차까지 추정함으로써 측위정확도를 향상시킨다(Schuler, 2001). 하지만 본 연구에서는 전리층 지연에 의한 영향만을 분석하고자 습윤지연량 또한 모델값을 이용하여 계산한 후 고정하였다. 이때 MOPS 모델값을 이용하여 온도, 습도, 상대습도 값을 추출한 후 총천정건조지연량(total zenith hydrostatic delay) 및 총천정습윤지연량(total zenith wet delay)을 계산하였다(MOPS, 1998). 또한 사상함수는 건조지연과 습윤지연 모두 Saastamoinen 사상함수를 사용하였다(Saastamoinen, 1972). Saastamoinen 사상함수는 비교적 간단하면서도 높은 정확도를 유지할 수 있다는 장점 때문에 많이 사용된다.

$$T_i^k = m_d(z) TZD_{i,d} + m_w(z) TZD_{i,w} \quad (2)$$

여기서, T_i^k : k 위성과 i 수신기 사이에 존재하는 대기에 의한 신호지연(대류지연)

TZD_d, TZD_w : 총천정건조지연량 및 총천정습윤지연량
 m_d, m_w : 건조지연값 및 습윤지연값에 해당되는 사상함

- 수(mapping function)
- z : 천정각(zenith angle)

2.2 조정계산 모델

수신기의 위치를 포함한 파라미터(미지수)의 결정을 위해 수식 (3)과 같은 조정계산 모델을 사용하였다. 매 epoch마다 관측방정식을 생성한 후 조정계산을 수행하되 전 epoch까지 조정계산을 통해 얻은 파라미터(ξ_1)와 그 파라미터에 해당되는 분산·공분산(P_0^{-1}) 정보를 이용하여 파라미터를 갱신하는 방법을 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} y \\ \xi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ e_0 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} e \\ e_0 \end{bmatrix} \sim \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \sigma_0^2 \begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & P_0^{-1} \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

여기서, ξ_1 : 이전 epoch과 동일한 연속 파라미터(수신기의 좌표, 모호정수)

ξ_2 : 현재 epoch에만 해당되는 파라미터(이중차분 전리층 지연값)

A_1, A_2 : 설계행렬

y, ξ_1 : 이중차분 관측값과 의사관측값

P, P_0 : 이중차분 관측값과 의사관측값에 해당되는 가중행렬

σ_0^2 : 단위분산

2.3 모호정수(integer ambiguity) 결정

신속정지측위 시 GPS 관측방정식을 기반으로 조정계산을 수행하게 되면 수신기의 좌표뿐만 아니라 모호실수(float ambiguity)도 동시에 산출된다. 여기서 모호수가 정수(integer)인 특성을 고려하여 모호실수로부터 모호정수를 찾게 되는 데 이러한 과정을 AR(ambiguity resolution)이라 한다. 모호실수로부터 모호정수를 찾는 방법은 다양하며 최근 이론적·실제적으로 효율적인 것으로 알려진 LAMBDA 방법이 널리 사용되고 있다(Teunissen, 1993; Joosten, 2001). LAMBDA는 모호실수와 분산·공분산 정보를 함께 이용하여 가능성 있는 정수형 모호정수 조합을 찾는 방법이다. 이러한 모호정수 조합으로부터 최적의 조합은 W-ratio 테스트를 통해 결정할 수 있다(Wang et al., 1998). W-ratio란 두 개의 모호정수 조합이 통계적으로 상이한 정도를 알려 주는 값으로 epoch이 증가함에 따라 일반적으로 값도 커지게 되며, 특정 epoch이 지나 W-ratio값이 기준값보다 커지면 모호정수를 결정하게 된다.

3. 자료처리 및 분석

3.1 자료

X급 태양폭발에 의한 영향은 2011년 2월 18일 10시 30분경(지방시)에 한국천문연구원 지자기 관측소에서 관측되었다. 태양폭발의 규모는 다섯 단계(A,B,C,M,X)로 구분하며 X급은 가장 규모가 크다는 것을 의미한다. 하지만 지자기 폭풍의 크기를 알려 주는 지표인 Korean K 인덱스는 UT(Universal Time)를 기준으로 2011년 2월 19일 오전에 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 2월 18일이나 2월 20일에 해당되는 Korean K 인덱스를 확인한 결과 크기가 2~3으로 2월 19일에 비해 작게 나타났다(그림 1).

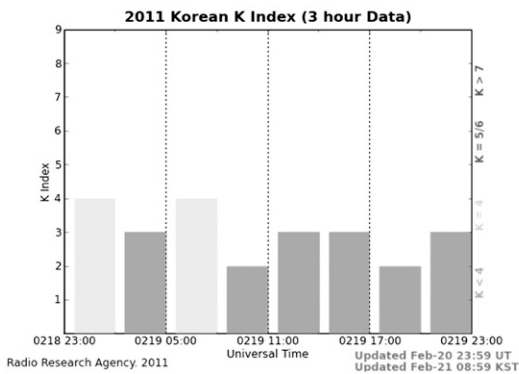


그림 1. 2011년 2월 19일(UT)에 해당되는 Korean K 인덱스(전파연구소)

따라서 2011년 2월 19일에 서산(SEOS), 수원(SUWN), 원주(WNJU) 상시관측소 수신된 30초 간격의 GPS 자료를 사용하였으며 위성의 위치는 정밀궤도력을 이용하여 계산하였다. 그림 2는 서산, 수원, 원주 상시관측소의 위치를 보여주고 있으며 서산-수원, 원주-수원의 각 기선 길이는 중기선에 해당되는 76km와 79km이다.

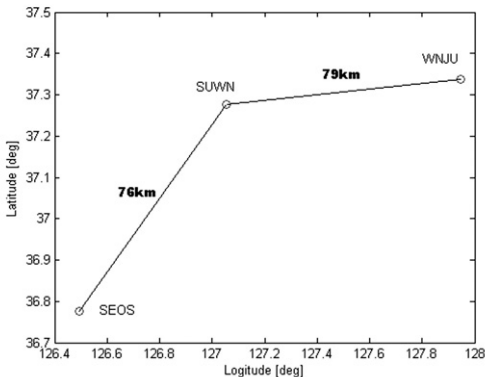


그림 2. 서산, 수원, 원주 상시관측소의 위치 및 기선

3.2 이중차분 전리층 지연값

각 기선의 길이가 대략 80km 정도이므로 이중차분법을 사용하더라도 전리층 지연 효과가 완전히 제거되지는 않는다. 뿐만 아니라 실험날짜는 전리층의 변화가 심한 경우로 평상시 보다 이중차분 전리층 지연값이 상대적으로 클 것으로 예상할 수 있다. 전리층 변화량과 모호정수를 결정하는 데 걸리는 시간과의 상관관계를 분석하기 위해, 먼저 각 수신기의 좌표를 고정화 한 후 이중차분 전리층 지연값을 추정하였다. 그림 3은 서산-수원, 원주-수원 기선에 해당되는 이중차분 전리층 지연값($I_{ij}^{diff} = I_i^e - I_j^e - I_j^s + I_i^s$)으로 위성 쌍(satellite pair)에 따라 동일 epoch에서도 다른 값을 보이고 있다. 즉, 동일 epoch에서 이중차분을 할 수 있는 위성의 조합(쌍)은 여러 개가 될 수 있으며 각각의 위성조합에 해당되는 이중차분 전리층 지연값을 각각 다른 색으로 표현한 것이다.

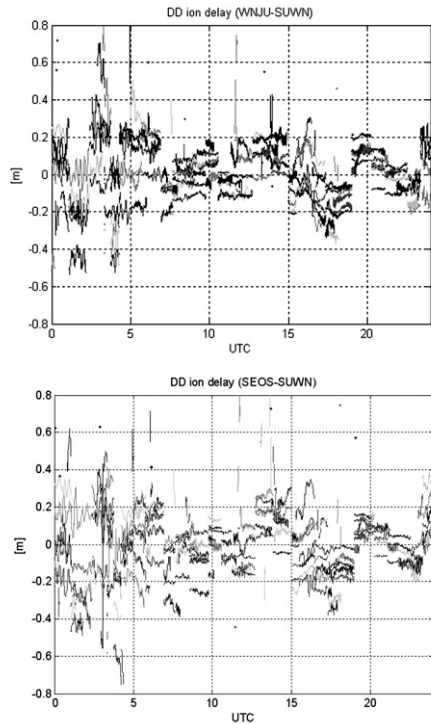


그림 3. 기선별 이중차분 전리층 지연값

그림 3에서 보듯이 Korean K 인덱스 값이 상대적으로 큰 시간대(0~6시)에는 이중차분 전리층 지연값도 상대적으로 큰 값을 보이고 있으며 일부 위성 쌍(pair)의 경우 1m 가까운 크기를 보이기도 한다. 일반적으로 이중차분 전리층 지연값은 100km 기선 거리에 10cm 정도 크기를 보인다

는 것과 비교해 상대적으로 큰 값을 알 수 있다. 24시간에 해당되는 전체 이중차분 전리층 지연값의 평균을 구한 경우 두 기선 모두 0에 가까웠으며 표준편차는 각각 17cm로 서로 유사한 값을 보였다.

3.3 자료 처리

서산 및 원주 상시관측소의 좌표를 고정 한 후 수원 상시관측소를 이동국(rovers)으로 가정하여 신속정지측위로 수원 상시관측소의 위치를 계산하였다. 신속정지측위 실험을 위한 자료 구간은 30분으로 하였으며 이를 하나의 세션(session)으로 정의하였다. 각 세션의 시작 시간은 0시부터 시작하여 10분 단위로 증가시켰으며 총 24시간 자료처리를 수행하였다. 즉, 첫 번째 세션은 0시 0분부터 0시 30분까지 자료에 해당되며 그 다음 세션은 0시 10분부터 0시 40분까지 자료에 해당된다. 이러한 방법으로 총 141개의 세션(session)에 대해 신속정지측위 결과를 얻을 수 있었다.

앞에서 설명하였듯이 각 세션은 epoch 단위로 관측 자료를 처리한 후 갱신하는 방법을 사용하였으며 매 epoch마다 모호정수의 결정을 시도하여 기준값을 통과하는 경우 모호정수를 결정하였다. 일단 모호정수가 결정되면 모호정수를 고정하여 이동국의 좌표를 포함한 미지수를 갱신하였다. 그림 4는 하나의 세션에서 이동국 좌표의 잔차(고시좌표값과 계산한 좌표값의 차이)를 시간에 따라 도시한 것이다. 그림 4에서 보듯이 15분 이후에는 모호정수가 결정되어 이동국의 좌표 정확도가 크게 향상되는 것을 볼 수 있다.

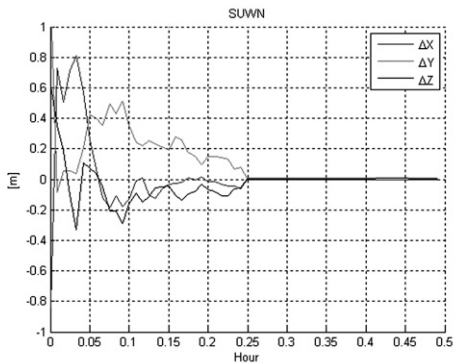


그림 4. 모호정수를 결정하는 데 필요한 시간

4. 결과

상대측위 기반의 신속정지측위에서 측위정확도를 좌우하는 가장 큰 요소는 모호정수의 결정 여부이다. 조정

계산식에서 모호정수는 이중차분 전리층 지연값과 상관관계가 상대적으로 높기 때문에 적당한 시간 동안 취득된 자료가 있어야 두 파라미터의 분리가 가능하다(Hong, 2007). 따라서 이중차분 전리층 지연값의 크기가 모호정수의 결정에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 전리층 지연값의 크기가 신속정지측위에 주는 영향을 분석하기 위해 2011년 2월 19일(UTC기준) 자료를 이용하여 141개 세션 각각에 대해 모호정수가 결정되는데 필요한 시간을 계산하였다. 그림 5는 세션별 모호정수를 결정하는 데 필요한 시간을 보여주고 있다.

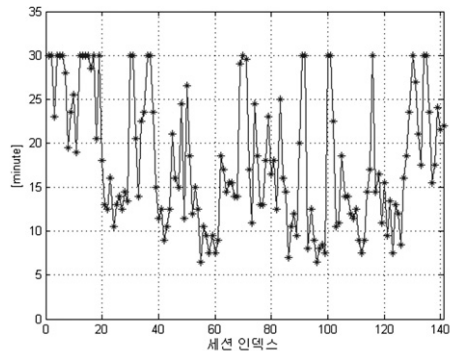


그림 5. 세션별 모호정수를 결정하는 데 필요한 시간(단위: 분)

대부분 세션의 경우 30분 이내에 모호정수가 결정 되었으나 일부 세션에서는 30분 자료를 이용하여도 모호정수를 결정하지 못하는 것으로 나타났다. 이 경우 모호정수를 결정하는 데 필요한 시간을 세션의 크기인 30분으로 가정하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 Korean K 인덱스값이 상대적으로 큰 0~6시 구간에서는 일반적으로 모호정수를 결정하기 어렵다는 것을 알 수 있으며 이 구간에서는 신속정지측위 정확도가 상대적으로 낮을 것으로 예상된다. 즉, 고정해(fixed solution)의 산출이 어렵다는 것을 의미한다. 전리층 지연값의 크기와 모호정수 결정 시간과의 상관관계를 분석하기 위해 각 세션에 해당되는 이중차분 전리층 지연값(그림 3)의 크기에 대한 평균값을 계산하였다(그림 6). 그림 5에서 보듯이 평균 지연값이 Korean K 인덱스와 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있으며 모호정수를 결정하는 필요한 시간과의 상관계수를 구한 결과 0.31로 나타났다. 따라서 전리층 지연값의 크기가 신속정지측위의 정확도에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 하지만 일반적으로 예상되는 값보다는 낮은 값을 보이고 있는데 그 이유는 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 최고 등급의 태양폭풍이 있었지만 K 인덱스에는 실

제적으로 큰 영향을 미치지 못한 경우에 해당되기 때문이다. 즉, 평소 K 인덱스가 2~3인 것에 비해 4 정도 수준으로 뚜렷한 차이를 보이고 있지 못하다. 둘째는 각 세션에서 30분 동안 모호정수가 결정되지 못한 경우라도 모호정수가 결정되는 데 걸린 시간을 30분으로 가정했기 때문이다. 따라서 실제로 모호정수를 결정하는 데 필요한 시간을 고려한다면 보다 뚜렷한 상관관계를 볼 수 있을 것으로 예상된다.

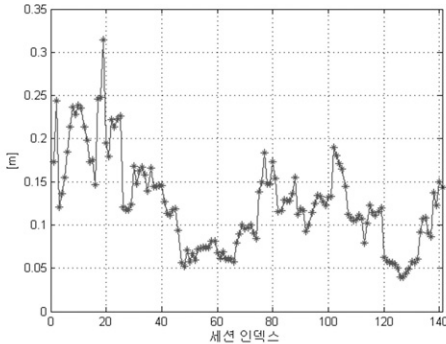


그림 6. 각 세션에 해당되는 이중차분 전리층 지연평균값

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 전리층 교란이 상대적으로 심했던 2011년 2월 19일 서산, 수원, 원주 상시관측소에서 수신된 GPS 관측자료를 사용하여 신속정지측위를 수행한 후 태양폭풍에 의한 전리층 변화가 측위정확도에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각 세션별로 모호정수를 결정하는데 필요한 시간을 추출하였으며 동일한 시간대에 해당되는 이중차분 전리층 지연 평균값과의 상관계수를 결정하였다. 이때 상관계수는 0.31로 전리층 지연값의 크기가 신속정지측위의 정확도에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 태양폭풍 발생 시 불가피하게 신속정지측위 방법을 이용하여 측량을 수행하는 경우 충분한 시간 동안 자료를 취득한 후 처리해야 요구 정확도의 확보가 가능할 것으로 판단된다.
2. 상관계수가 상대적으로 낮게 나타난 이유는 최고 등급에 해당되는 태양폭풍임에도 불구하고 K 인덱스 값이 평소와 뚜렷한 차이를 보이지 못하고 있기 때문이며, 따라서 향후 다양한 태양폭풍 환경에서 취득된 자료를 통해 태양폭풍이 신속정지측위에 미치는 영향에 대해 보다 정량적인 연구가 수반되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 경일대학교 신입교원정착연구비 지원에 의하여 수행된 것임

참고문헌

- 유운자, 조득재, 박상현 (2011), 태양 흑점활동이 측위오차에 미치는 영향: 태양폭풍 사례연구, 한국항해항만학회지, 제35권, 제6호, pp. 477-482.
- Bergeot, N., C. Bruyninx, P. Defraigne, S. Pireaux, J. Legrand, E. Pottiaux, and Q. Baire (2010), Impact of the Halloween 2003 ionospheric storm on kinematic GPS positioning in Europe, *GPS Solution*, Vol. 15, No. 2, pp. 171-180.
- ChronicleOnline (2006), *Solar flares cause GPS failures, possibly devastating for jets and distress calls*, Cornell researcher warn.
- Hong, C. -K. (2007), *Efficient Differential Code Bias and Ionospheric Modeling and Their Impact on the Network-based GPS Positioning*, PhD Thesis, The Ohio State University, Columbus, OH, USA.
- Joosten, P. (2001), *The LAMBDA-Method: Matlab™ Implementation, Version 2.1*, Mathematical Geodesy and Positioning, DelftUniversityofTechnology, TheNetherlands.
- Komjathy, A., L. Sparks, J. Mannucci, and A. Coster (2005), The ionospheric impact of the October 2003 storm event on Wide Area Augmentation System, *GPS Solution*, Vol. 9, pp. 41-50.
- MOPS (1998), *Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment*, Document No. RTCA/DO-229A, June 8, 1998, prepared by SC-159.
- Saastamoinen, J. (1972), Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites, in: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph*, No. 15, AGU, Washington, D.C.
- Schuler, T. (2001), *On ground-based GPS tropospheric delay estimation*, PhD thesis, Institute of Geodesy and Navigation University FAF Munich, Germany.
- Skone, S. and A. Coster (2009), Studies of storm-enhanced density impact on DGPS using IGS reference station data, *Journal of Geodesy*, Vol. 83, pp. 235-240.

- Teunissen, P.J.G. (1993), Least squares estimation of the integer GPS ambiguities. *Paper presented at the General Meeting of the IAG at Beijing, P.R. China, August 8-13.*
- Wang, J., M. P. Stewart, and M. Tsakiri (1998), A discrimination test procedure for ambiguity resolution on-the-fly, *Journal of Geodesy*, Vol. 72, pp. 644-653.

(접수일 2011. 12. 02, 심사일 2011. 12. 24, 심사완료일 2011. 12. 25)