

전리층 지연 효과의 통계적 모델을 이용한 반송파 정밀측위 Precise Positioning from GPS Carrier Phase Measurement Applying Stochastic Models for Ionospheric Delay

양효진¹⁾ · 권재현²⁾

Yang, Hyo Jin · Kwon, Jay Hyoun

Abstract

In case of more than 50km baseline length, the correlation between receivers is reduced. Therefore, there are still some rooms for improvement of its positional accuracy. In this paper, the stochastic modeling of the ionospheric delay is applied and its effects are analyzed. The data processing has been performed by constructing a Kalman filter with states of positions, ambiguities, and the ionospheric delays in the double differenced mode. Considering the medium or long baseline length, both double differenced GPS phase and code observations are used as observables and LAMBDA has been applied to fix the ambiguities. The Ionospheric delay is stochastically modeled by well-known 1st order Gauss-Markov process. And the correlation time and variation of 1st order Gauss-Markov process are calculated. This paper gives analyzed results of developed algorithm compared with commercial software and Bernese.

Keywords : GPS, medium baseline, Ionospheric effect, stochastic model, LAMBDA

초 록

GPS를 이용한 상대측위에 있어서 기선의 길이가 길어질수록 측위지점 사이의 상관관계 저하로 인하여 전리층 지연 효과와 같은 오차가 관측치내에 존재하는 문제가 여전히 남아있다. 본 연구에서는 중기선 이상의 상대측위에서 가장 큰 오차요인으로 알려져 있는 전리층 지연 효과를 통계적 모델을 이용하여 모델링하고, 이론적·경험적으로 가장 좋다고 알려져 있는 LAMBDA방법을 이용하여 모호정수를 결정하였다. 상시관측소데이터를 이용하여 통계적 모델을 경험적으로 Gauss-Markov 1차를 결정하였으며, 모델 파라미터인 상관시간(correlation time) 및 모델의 분산을 산출하였다. 최종적으로 개발된 알고리즘의 적용 및 정확도 분석을 위하여 상용소프트웨어 및 Bernese와 비교하였다.

핵심어 : GPS, 중기선, 전리층 지연 효과, 통계적 모델, LAMBDA

1. 서 론

1980년대부터 개발되어 사용되어온 GPS는 위치결정의 정확도를 크게 향상시켰다. GPS는 측지분야 뿐만 아니라 과학 및 항법과 같은 공학분야 등에 다양하게 사용되고 있는데, GPS를 사용하는 각 분야에서의 요구되는 정확도 및 위치결정에 소요되는 시간에 따라서 사용되는 신호 및 측위방법 그리고 데이터 처리방법이 다양하다. 위치결정

에 사용되는 GPS 신호는 코드와 반송파로 분류할 수 있으며, 측위방법으로는 정지측위 및 이동측위 방식이 있고, 처리 방법으로는 절대측위, 상대측위 등이 있다. 이중 GPS가 측지분야의 위치결정에 사용되는 경우에는 수 mm에서 cm에 이르는 정확도를 요구하기 때문에 코드보다는 정확도가 높은 반송파를 이용하게 되며, 정지측위 방식으로 데이터를 취득하고, 상대측위를 이용하여 데이터를 처리하는 경우가 대부분이다. 반송파를 이용할 경우

1) 정희원 · 서울시립대학교 대학원 공간정보공학과 박사과정(E-mail:y11h11j11@uos.ac.kr)

2) 연결저자 · 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 부교수(E-mail:jkwon@uos.ac.kr)

높은 정확도를 갖기 위하여 모호정수 및 초기 위상값 등의 미지수를 결정해야 하며(Hofmann-Wellenhof, 1992), 상대측위 방식의 경우에는 관측치의 차분을 이용하는데 기선의 길이가 길어질수록 각 수신기에 도달하는 위성 신호의 상태가 달라지기 때문에 기선의 길이에 따라 정확도가 크게 달라진다.

단기선의 경우에는 cm 이하의 정확도로 위치를 결정할 수 있게 되었으나 중기선 이상의 경우에는 측위지점 사이의 상관관계가 저하되어 GPS 관측치를 차분한다 하더라도 오차가 크게 남아있으며, 따라서 현재까지 중기선 이상의 위치결정에 대한 관심이 높다. 전리층 지연 효과는 중기선 이상의 상대측위에서 가장 큰 오차 요인으로 알려져 있는데, 전리층은 지표면으로부터 50km에서 1000km 상공에 존재하는 대기층으로써 자유전자가 존재하여 GPS와 같은 전파 신호에 영향을 주어 신호의 속도를 변화시킨다(Hofmann-Wellenhof, 1992). 전리층 지연 효과에 의하여 GPS신호에 나타나는 오차는 수cm에서 수십cm에 이른다고 알려져 있다(Klobuchar, 1991). 현재까지 전리층 지연 효과를 제거하거나 최소화하는 방법, 또는 전리층 지연 효과를 모델링 하는 등의 다양한 방법이 개발되어 적용되어 왔다. 대부분이 무전리층 결합(ionosphere-free combination) 방식을 사용하였는데, 무전리층 결합 방식이란 GPS 관측방정식에서 주파수가 다른 두 개의 관측치를 선형결합함으로써 전리층 지연 효과를 제거하는 방법이다. 하지만 무전리층 결합은 반송파의 모호정수를 정수로 제약할 수 없고, 전리층 지연 효과가 완전하게 제거되지 않기 때문에 위치결정의 정확도가 저하된다(Hofmann-Wellenhof, 1992). 따라서 모호정수를 결정하는 동시에 전리층 지연 효과를 정확하게 모델링하는 것은 높은 정확도의 위치결정에 필수적이다.

본 연구에서는 중기선의 위치결정을 위한 알고리즘을 개발하였는데, 우선 전리층 지연 효과를 확인하고, 다양한 통계적 모델을 적용함으로써 경험적으로 가장 적합한 모델과 그것의 매개변수를 결정하였다. 관측방정식으로는 이중차분(double-differenced observaton)을 이용하였으며, 전리층 지연 효과의 모델링을 위하여 경험적으로 최종 결정된 모델을 적용하였고, 조정 계산 방법으로 칼만필터를 사용하였다. 또한 모호정수의 결정을 위하여 이론적경험적으로 가장 좋다고 알려져 있는 LAMBDA방식을 사용하였으며, 적합성 판단을 통하여 모호정수를 제약조건으로 사용하여 최종적으로 중기선을 결정하였다.

2. 기본이론

2.1 관측방정식

GPS신호가 위성으로부터 수신기까지 도달하는 동안 여러 오차를 포함하게 되므로, 이와 같은 효과를 고려한 관측방정식은 식 (1)과 (2)와 같다. P , ϕ 는 각각 코드와 반송파 관측치이고, 위첨자 k 는 위성, 아래첨자 i 는 수신기를 의미한다. ρ 는 수신기와 위성사이의 기하학적인 거리, I 는 전리층 효과, T 는 대류층 효과, M 과 m 은 멀티패스, dt_i , dt^k 는 각각 수신기와 위성의 시계오차이다. 사용된 상수 f , c 는 각각 주파수와 빛의 속도이다.

$$P_{i,1}^k = \rho_i^k + \frac{I_i^k}{f_1^2} + T_i^k + c(dt_i - dt^k) + b_{i,2} + M_{i,1}^k + e_{i,1}^k \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \phi_{i,1}^k &= \rho_i^k - \frac{I_i^k}{f_1^2} + T_i^k + \lambda_1 N_{i,1}^k + c(dt_i - dt^k) \\ &+ \lambda_1 (\phi_0^k - \phi_{i_0}^k) + m_{i,1}^k + \epsilon_{i,1}^k \end{aligned} \quad (2)$$

식 (3)과 (4)로 표현되는 이중차분관측방정식(double-differenced observation)은 두 개의 수신지점에서 동시에 수신되는 두 개의 위성으로부터의 관측치를 차분함으로써 유도된다. 이중차분 관측방정식을 사용함으로써 위성 및 수신기의 시계오차를 소거할 수 있으며, 반송파 초기 위상이 소거되며 또한 모호정수에 정수라는 제약 조건을 사용할 수 있게 된다.

$$P_{ij,1}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} + \frac{I_{ij}^{kl}}{f_1^2} + T_{ij}^{kl} + M_{ij,1}^{kl} + e_{ij,1}^{kl} \quad (3)$$

$$\phi_{ij,1}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} - \frac{I_{ij}^{kl}}{f_1^2} + T_{ij}^{kl} + \lambda_1 N_{ij,1}^{kl} + m_{ij,1}^{kl} + \epsilon_{ij,1}^{kl} \quad (4)$$

L1파와 L2파의 위상을 차분함으로써 이중차분된 관측방정식에 widelane 선형결합을 적용할 수 있다(Leick, 1995). L1파와 L2파의 위상을 각각 ϕ_1 , ϕ_2 (단위:cycle)라 했을 때, 두 파의 위상을 차분한 효과는 아래 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \phi_w &= \phi_1 - \phi_2 \\ &= \frac{\rho}{\lambda_1} + N_1 - \frac{1}{\lambda_1} \frac{I}{f_1^2} + \frac{T}{\lambda_1} - \frac{\rho}{\lambda_2} - N_2 + \frac{1}{\lambda_2} \frac{I}{f_2^2} - \frac{T}{\lambda_2} \\ &= \rho \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) + (N_1 - N_2) + T \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) + \frac{I}{f_1^2} \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

이때 대응되는 파장의 길이는 식 (6)과 같다. widelane

선형결합을 사용함으로써 파장이 λ_1, λ_2 보다 길어져 모호정수를 보다 쉽게 결정할 수 있게 된다.

$$\lambda_w = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (6)$$

widelane 선형결합 된 최종 관측방정식은 식 (7)과 같다.

$$\Phi_{ij,w}^{kl} = \rho_{ij}^{kl} + \frac{I_{ij}^{kl}}{f_1^2} \frac{f_1}{f_2} + T_{ij}^{kl} + \lambda_w (N_{ij,1}^{kl} - N_{ij,2}^{kl}) + \epsilon_{ij,w}^{kl} \quad (7)$$

2.2 칼만 필터(Kalman Filter)

칼만 필터는 가장 널리 알려진 최적의 반복적 추정 알고리즘으로 n 차원의 실수 공간에서의 시간에 따른 통계적 성질을 갖는 상태변수 x 는 아래 식 (8)과 같다.

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \quad (8)$$

시간 k 에서의 관측치 z 가 존재한다 하면, 이를 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (9)$$

여기서 w_k 와 v_k 는 각각 프로세스와 관측치의 잡음을 나타내며 분산공분산 행렬 Q 와 R 을 가진다. $n \times n$ 행렬 A 는 각 시간 k 에서의 상태변수를 $k-1$ 시간에서의 값과의 관계를 나타내며, 행렬 B 는 최적의 컨트롤 입력을 나타내고, H 는 관측치와 상태변수와의 관계를 설정하는 설계 행렬이다.

시간이 진행됨에 따라 상태변수 방정식을 사용하여 상태변수 x 와 그것의 공분산행렬 P 를 식 (10), (11)과 같이 예측할 수 있고, 만약 관측치가 존재한다면 관측치를 사용하여 상태변수를 갱신하게 된다.

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (10)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (11)$$

관측치에 따라 kalman gain factor는 식 (12)와 같이 유도되며, kalman gain factor를 이용하면 상태변수 및 공분산행렬을 식 (13), (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-) \quad (13)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (14)$$

2.3 LAMBDA

LAMBDA는 모호정수를 정수로 결정하는 방법으로 Teunissen(1993)에 의해 고안되었는데, 이는 실수 모호정수와 정수 모호정수 사이의 가중치를 가지는 잔차의 제곱의 합이 최소가 되어야 한다는 개념에서 시작한다 (Hofmann-Wellenhof, 1992). 식 (15)에서 \hat{N} 은 추정될 모호정수(정수)이며, N 은 실수형태의 모호정수이다.

$$(\hat{N} - N)^T Q_{\hat{N}}^{-1} (\hat{N} - N) = \text{minimum} \quad (15)$$

두 개의 이중차분된 모호정수와 그것의 공분산 행렬은 식 (16)과 같다.

$$\hat{N} = \begin{bmatrix} \hat{N}_1 \\ \hat{N}_2 \end{bmatrix}, \quad Q_{\hat{N}} = \begin{bmatrix} q_{\hat{N}_1, \hat{N}_1} & q_{\hat{N}_1, \hat{N}_2} \\ q_{\hat{N}_1, \hat{N}_2} & q_{\hat{N}_2, \hat{N}_2} \end{bmatrix} \quad (16)$$

모호정수를 실수에서 정수로 변환하는 정수변환(integer transformation)과정은 식 (17)과 (18)과 같은 Z -matrix를 사용하여 각각의 위성별 모호정수 사이의 상관관계를 감소시키는 방향으로 진행되며, 변환 식은 식 (19)와 같다.

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_1 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_1 = -INT[q_{\hat{N}_1, \hat{N}_2} / q_{\hat{N}_1, \hat{N}_1}] \quad (17)$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \alpha_2 = -INT[q_{\hat{N}_1, \hat{N}_2} / q_{\hat{N}_2, \hat{N}_2}] \quad (18)$$

$$N = Z_1 Z_2 \hat{N} \quad (19)$$

이때, Z -matrix로 변환된 모호정수의 공분산 행렬은 식 (20)과 같이 유도된다.

$$Q_{\hat{N}} = Z_2 Q_{\hat{N}} Z_2^T Q_{\hat{N}} = Z_1 Q_{\hat{N}} Z_1^T$$

$$Q_{\hat{N}} = \frac{Z_1 Z_2}{Z} Q_{\hat{N}} \frac{Z_2^T Z_1^T}{Z^T} \quad (20)$$

Z -matrix는 정수로 구성되어야 하며, 정수 검색 공간(integer search space)의 부피가 보존되어야 하고, 모호정수의 분산(ambiguity variance)이 작아지는 방향으로 진행된다. 모호정수사이의 상관관계가 최소화된 공분산을 이용하여 정수 검색 공간(integer search space) 타원체로 형성되고, 이 타원체를 구성하는 각각의 그리드는 각각의 모호정수의 후보가 된다(Jonge, 1996). 각 모호정수 후보들과 관측치의 차이인 잔차의 제곱의 합이 최소가 되는 정수가 모호정수로 선택된다. LAMBDA를 통하여 결정된 2개의 정수 후보를 f-검정을 통하여 적합성을 판단하

고(Wang, 2000), 그 기준을 만족하면 모호정수를 정수로 결정하고 제약조건을 부여하게 된다.

2.4 랜덤 프로세스(Random Process)

전리층 지연 효과의 모델링을 위하여 랜덤 프로세스를 고려하였다. 랜덤 프로세스는 확률 공간내에서 시간에 따라 예측할 수 없는 랜덤 값을 갖는 함수의 집합을 의미하는데(Gelb, 1974), 전리층 지연 효과는 그 경향에 일정한 규칙을 보이지 않기 때문에 랜덤 프로세스에 의하여 모델링 될 수 있다. 랜덤 프로세스에는 white noise, sinusoid, gauss-markov, random bias 등이 있는데 각각의 프로세스는 자기상관함수에 의하여 그 특징을 알 수 있다. 전리층 지연 효과와 가장 유사한 형태의 랜덤 프로세스를 결정하고, 그것의 파라미터를 결정하게 되는데, 전리층 지연 효과의 경향은 Gauss-markov의 프로세스와 가장 유사한 형태로 나타났다. $t_1 < t_2 < \dots < t_k$ 일 때, Gauss-markov 1차 모델의 자기상관 함수는 식 (21)과 같고, 2차 모델의 자기상관 함수는 식 (22)와 같으며, 3차 모델의 자기상관 함수는 식 (23)과 같다(Gelb, 1974).

$$\phi_{xx}(\tau) = \sigma^2 e^{-\beta_1|\tau|} \quad (21)$$

$$\phi_{xx}(\tau) = \sigma^2 (1 + \beta_2|\tau|) e^{-\beta_2|\tau|} \quad (22)$$

$$\phi_{xx}(\tau) = \sigma^2 (1 + \beta_3|\tau| + \frac{1}{3}\beta_3^2|\tau|^2) e^{-\beta_3|\tau|} \quad (23)$$

1차, 2차, 그리고 3차 모델의 상관시간은 $\frac{1}{\beta_1}$, $\frac{2.146}{\beta_2}$, 그리고 $\frac{2.903}{\beta_3}$ 이다.

3. 자료처리 알고리즘

본 연구를 통하여 개발된 알고리즘은 이론적 배경에서 제시한 바와 같이 이중차분 관측방정식을 이용하여 오차 제거 및 모호정수에 제약조건을 부여할 수 있도록 하였다. 또한 widelane 선형결합으로 파장의 길이를 변형하여 모호정수 결정을 용이하게 하였다. 전리층 지연효과는 시간 및 거리와 상관관계를 갖는데, 정지측위시에는 거리의 변화가 없으므로 시간에 대한 상관관계만을 고려하였다. 전리층 지연 효과를 확인한 결과 Gauss-Markov 모델과 가장 유사한 형태의 특징을 가지고 있기 때문에 Gauss-Markov 모델 1차와 2차 모델을 고려하였으며, 전리층 지연 효과에 자기공분산함수를 적용하여 모델별 그리고 파라미터

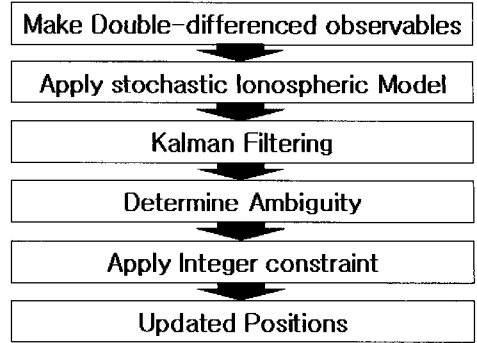


그림 1. 자료처리 알고리즘

별로 맞춰가는(fitting) 과정을 수행하여 경험적인 최종 모델 및 파라미터를 결정하여 적용하였다. 통계적 모델의 결정 및 상관시간 요소의 결정과정은 4절에서 상세하게 다루도록 하겠다. 관측방정식의 수립 및 전리층 지연 효과에 대한 통계적 모델을 적용한 후, 칼만 필터를 적용함으로써 이전의 관측정보를 저장하여, 반복적 처리를 가능하도록 하였다. 이후 모호정수를 결정하기 위하여 LAMBDA 방법을 적용하여 모호정수 후보군을 만들고, 적합성 유무를 판단하여 이를 만족하는 경우에 모호정수에 제약조건을 부여하고, 최종적으로 좌표를 결정하였다.

4. 실험 및 검증

개발된 알고리즘의 실험 및 검증을 위하여 대전, 수원, 전주 등의 상시관측소 데이터를 이용하였다. 실험 및 검증 과정은 전리층 지연 효과를 실제 데이터 내에서 확인하여 모델링하는과정, 그리고 결정된 모델을 적용함으로써 위치결정에 미치는 영향, 그리고 모호정수를 정수로 고정하여 제약조건을 부여하여 나타나는 효과를 보여주고, 최종으로 개발된 알고리즘과 상용소프트웨어(GPSurvey) 및 Bernese로 처리한 결과와 비교하였다.

4.1 전리층 지연 효과의 통계적 모델링 과정

전리층 지연 효과의 통계적 모델링을 위하여 실제 데이터의 전리층 지연 효과를 확인하였다. 두 개의 수신기에 동시에 취득되는 위성의 이중차분된 전리층 지연 효과를 추출하여 시간에 따라서 위성별로 산출하였다. 그림 2는 PRN6번의 이중차분된 전리층 지연 효과를 나타낸다. 전리층 지연 효과에 통계적 모델을 적용하기 위하여 전리층 지연 효과의 자기상관관계를 계산하였다. 그림 3은 PRN6

번의 전리층 지연 효과에 대한 자기상관을 나타낸다. 통계적 모델의 특성은 자기상관관계에 의하여 결정되므로 반드시 필요한 과정이다.

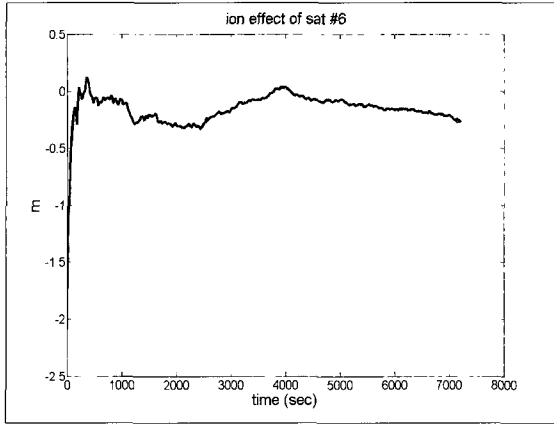


그림 2. 전리층 지연(PRN 6번)

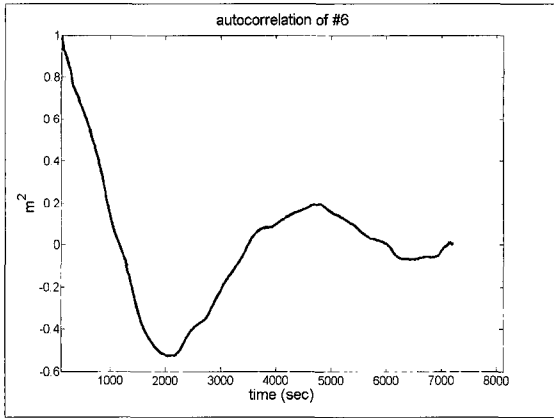


그림 3. 전리층지연의 자기상관(PRN 6번)

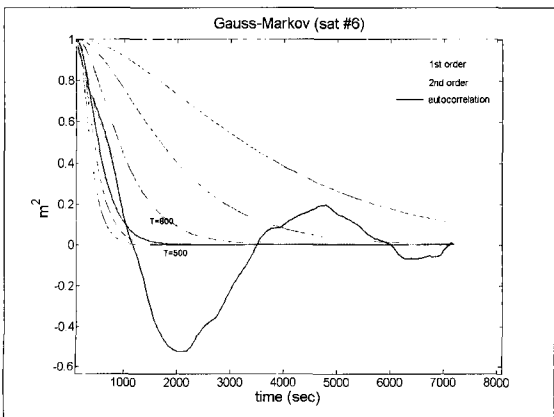


그림 4. 전리층 지연의 경험적 모델링(PRN 6번)

앞에 기술한 여러 가지 통계적 모델 중 전리층 지연 효과와 가장 유사한 형태의 모델을 갖는 Gauss-Markov 모델의 1차, 2차를 고려하여 전리층 지연 효과의 자기상관도에 가장 잘 맞도록 맞추어가는(fitting) 과정이 수행되었다. 그림 4는 그 과정을 설명하는데, 모델과 전리층 지연 효과의 자기상관도가 가장 가까운 상관시간을 그림상에 숫자로 표시하였다.

위와 같은 과정을 통하여 전리층 지연 효과의 통계적 모델로는 Gauss-Markov 1차 모델이 결정되었으며, 상관시간으로는 800초를 사용하였고, 모델의 분산은 1.4765로 결정하였다. 통계적 모델과 상관시간은 실제 전리층 지연 효과에 가장 가깝도록 맞춰가는 과정(fitting)을 통하여 결정되었으며, 모델의 분산은 각 위성별 전리층 지연 효과에 통계적 모델을 적용함으로써 산출되는 분산을 각각 적용하였을 때, 분산의 크기에 따라서 모호정수가 정수로 고정되는 시간이 가장 빠른 것으로 결정하였다.

4.2 위치결정에 전리층 지연 효과 모델링의 영향

전리층 지연 효과의 통계적 모델링을 수행한 결과가 실제 좌표결정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상용소프트웨어를 이용하여 모델링 전후의 좌표결정 결과를 분석하였다. 즉, 기선의 길이가 길어지면 상용소프트웨어는 무전리층 결합에 의하여 해를 구하는데, 이를 기준으로 하여, 전리층 효과가 모델링되기 전과 후를 비교하여 전리층 효과가 좌표에 미치는 영향을 분석한 것이다. 약 100km의 길이의 기선인 대전수원 기선의 경우 2시간 데이터를 처리하였을 때 상용소프트웨어 결과와 비교한 결과, 전리층 지연 효과에 대한 모델링을 수행하지 않은 경

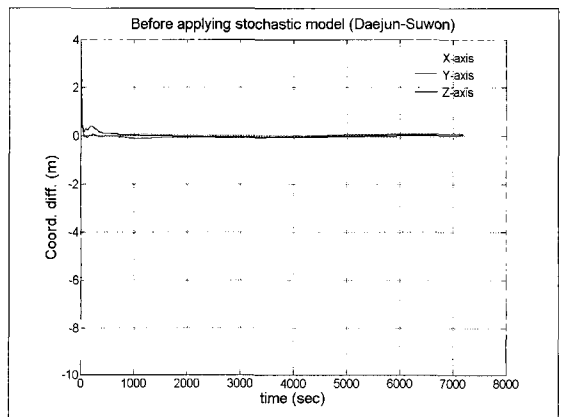


그림 5. 전리층 지연 모델링 이전(대전·수원 기선)

우 모델링을 수행한 결과보다 X축으로 약 5cm, Y축으로 약 7cm, Z 축으로는 수mm의 차이가 더 발생하였다. 기선의 길이가 약 160km인 수원·전주 기선의 경우에는 상

용소프트웨어의 결과를 기준으로 하였을 때, 전리층 효과를 모델링 전후에 X, Y, Z 축 방향으로 모두 수십cm의 차이가 나타났다. 전리층 지연 효과가 위치결정에 미치는 영향은 그림 5부터 그림 8에 나타내었다. 본 연구에서 개발된 알고리즘과 비교된 좌표는 상용소프트웨어로 24시간 데이터를 처리한 결과이다.

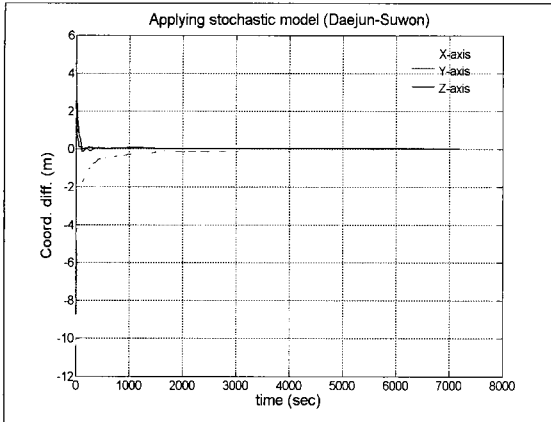


그림 6. 전리층 지연 모델링 이후(대전·수원 기선)

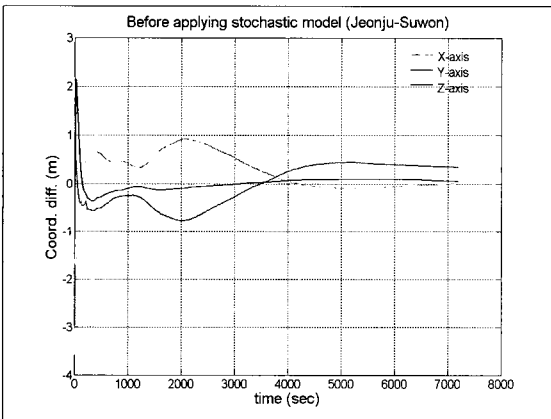


그림 7. 전리층 지연 모델링 이전(전주·수원 기선)

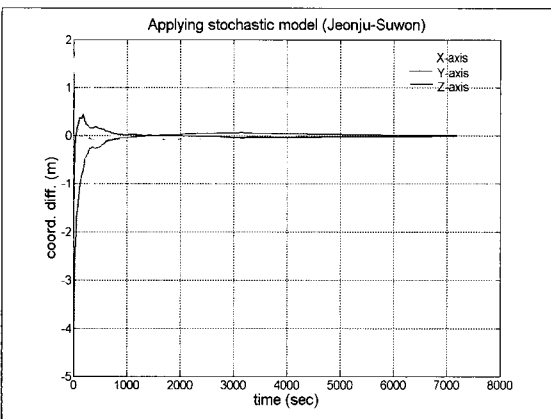


그림 8. 전리층 지연 모델링 이후(전주·수원 기선)

4.3 모호정수 결정 유무에 따른 결과

모호정수의 결정에 있어 LAMBDA 방법을 적용한 효과를 분석하였다. 반송파를 이용하는 경우에 기선의 결정에 사용되는 이포크의 수가 증가할수록 모호정수가 정수로 결정된 영향은 크게 나타나지 않지만, 모호정수가 정수로 결정이 되면 빠르게 정확도가 향상됨을 알 수 있었다. 본 연구에서 사용한 대상 데이터 중에서 대전·수원 기선에 대하여 분석해 보았을 때, LAMBDA를 적용함으로써 Y축과 Z축 방향으로는 그 차이가 크게 1~2cm 이내로 작게 나타났으며, X축의 경우에는 좀더 명확하게 그 효과를 확인할 수 있었다. 그림 9는 LAMBDA 적용 유무에 따른 X축의 효과를 나타내며, 모호정수가 정수로 결정됨으로써 보다 빠르게 정확도가 향상됨을 확인할 수 있다.

4.4 데이터 처리 결과 및 분석

본 연구에서 개발된 알고리즘의 결과를 분석하기 위하여 서울, 수원, 대전, 전주 상시관측소 데이터를 2시간 단위로 처리하여 그 결과를 나타내었다. 결과 비교의 대상의 Bernese 및 GPSurvey로 처리한 결과이며, 처리한 결과 상용소프트웨어와는 X축으로 최대 4cm, Y축으로 3cm, Z 방향 최대 2.9cm의 차이가 발생하였고, Bernese와는 X축

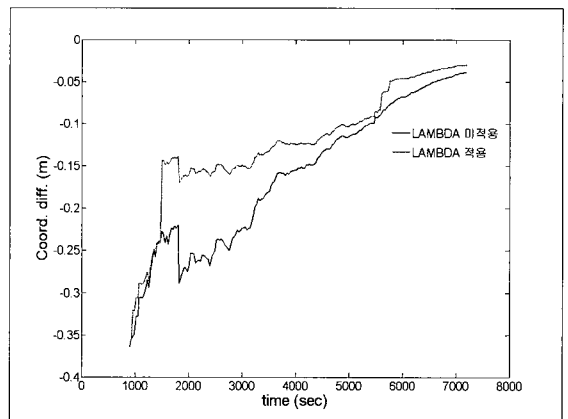


그림 9. LAMBDA 적용에 따른 X축의 오차

표 1. 상용소프트웨어 및 Bernese와의 비교

	상용소프트웨어(GPSurvey)		Bernese	
	dx		dx	
서울수원 기선		-0.006		-0.005
	dy	0.030	dy	0.029
	dz	0.029	dz	0.029
수원대전 기선	dx	-0.009	dx	-0.015
	dy	0.012	dy	0.018
	dz	0.008	dz	0.016
수원전주 기선	dx	-0.041	dx	-0.030
	dy	0.028	dy	0.017
	dz	0.010	dz	-0.003

으로 최대 3cm, Y축 방향으로 최대 2.9cm, Z축 방향으로 2.9cm의 차이가 발생하였다. 3D-RMSE를 계산한 결과 상용소프트웨어와는 2~5cm의 차이가 발생하였고, Bernese와 비교한 결과는 2~4cm의 차이가 발생하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 전리층 지연 효과를 관측치 내에서 확인하고 통계적 모델을 적용하여 중기선에 대한 정밀측위 알고리즘을 개발하였다. 최적의 모델링 방법으로 Gauss-Markov 1차 모델을 선택하였고, 그 결과를 상용소프트웨어 및 Bernese와 비교한 결과 상용소프트웨어와는 2~5cm, Bernese와는 2~4cm의 차이를 보였다. 이 차이는 대류층효과의 모델링 유무에 따른 영향일 것으로 예측되며, 전리층 지연 효과를 합리적으로 결정하고 모호정수를 정수로 고정하여 제약조건을 부여함으로써 정확도가 향상됨을 확인하였다.

향후 대류층 효과의 모델링을 수행한다면 좀 더 높은 정확도를 가진 정밀측위가 가능할 것으로 예상되며, 이포크 별로 처리되는 본 알고리즘을 이용한다면 정지측위뿐 아니라 이동측위에도 적용할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- 최병규, 박종욱, 이상정 (2006), GPS 네트워크 기반의 전리층 모델을 이용한 단일 주파수 수신기의 측위 정밀도 향상, 한국측량학회지, 제 24권, 제 2호, pp. 167-173.
- Gelb, A. (1974), *Applied Optimal Estimation*, The MIT Press, pp. 35-45, pp. 102-110.
- Hofmann-Wellenhof, B., Kchtnegger, H. and Collins, J. (2001), *Global Positioning System Theory and Practice*, Springer-Verlag, Wien, New York, pp. 99-106, pp. 237-247.
- Jonge, P. and Tiberius, C. (1996), *The LAMBDA method for integer ambiguity estimation : implementation aspects*, TU Delft.
- Klobuchar, J. (1991), Ionospheric Effects on GPS, *GPS world*, 2(4), pp. 48-51.
- Leick, A. (1995), *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 324-334.
- Wang, J., Stewart, M. P. and Tsakiri, M. (2000), A comparative study of the integer ambiguity validation procedures, *Earth Planets Space* 2000, pp. 813-817.
- Yang, M. (1995), *New GPS Measurement Modeling Techniques of Orbit Determination and Precise Kinematic Positioning*, Ph. D. Dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

(접수일 2007. 6. 18, 심사일 2007. 7. 30, 심사완료일 2007. 8. 7)