

GPS/INS 통합에 의한 고정밀 장기선 동적 측위를 위한 다중 기준국 네트워크 데이터 처리 알고리즘

Multiple Reference Network Data Processing Algorithms for High Precision of Long-Baseline Kinematic Positioning by GPS/INS Integration

이흥규*

Lee, Hung-Kyu

Abstract

Integrating the Global Positioning System (GPS) and Inertial Navigation System (INS) sensor technologies using the precise GPS Carrier phase measurements is a methodology that has been widely applied in those application fields requiring accurate and reliable positioning and attitude determination; ranging from 'kinematic geodesy', to mobile mapping and imaging, to precise navigation. However, such integrated system may not fulfil the demanding performance requirements when the baseline length between reference and mobil user GPS receiver is grater than a few tens of kilometers. This is because their positioning/ attitude determination is still very dependent on the errors of the GPS observations, so-called "baseline dependent errors". This limitation can be remedied by the integration of GPS and INS sensors, using multiple reference stations. Hence, in order to derive the GPS distance dependent errors, this research proposes measurement processing algorithms for multiple reference stations, such as a reference station ambiguity resolution procedure using linear combination techniques, a error estimation based on Kalman filter and a error interpolation. In addition, all the algorithms are evaluated by processing real observations and results are summarized in this paper.

Keywords : GPS, multiple reference stations, distance dependent errors, ambiguity

요 지

GPS 반송파를 사용하는 GPS/INS 통합 측위 기술은 서로가 가지는 기술적 한계를 상호 극복하여 그 성능을 최대화 할 수 있어 측량과 항법의 다양한 분야에 활용되고 있다. 그러나 GPS/INS 통합 측위를 통하여 수 센티미터의 정확도를 확보 하기 위해서는 기준국과 이동국 수신기 사이의 간격이 10~20Km 이내로 제한되어야 하는 단점을 가지고 있으며 이는 두 시스템 관측데이터를 통합 처리하더라도 그 정확도는 여전히 GPS 위성궤도 오차, 전리층 영향 그리고 대류권 지연과 같은 기선장에 따른 오차의 영향을 받기 때문이다. 이것은 3대 이상의 기준국 관측데이터를 사용하여 기선장에 따른 오차 보정량을 추정하여 이동국 관측데이터에서 그 영향을 최소화하여 극복 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다중의 기준국 관측데이터를 사용하여 기선장에 따른 오차 보정량 결정을 위한 기준국 반송파 미지정수 결정, 칼만필터에 의한 기선장에 따른 오차 추정 그리고 기준국과 이동국의 기하관계에 의한 오차 보간을 통한 보정량 산출 알고리즘 제안하고 실제 관측데이터 처리를 통해 그 성능을 평가 하였다.

핵심용어 : 범지구위치결정체계(GPS), 다중 기준국, 기선장에 따른 오차, 미지정수

1. 서 론

두 대의 GPS(Global Positioning System) 수신기에서 동시에 취득된 위성의 반송파 관측데이터에 수학적 차분의 원리를 적용하는 "상대 측위기법"에서 정확한 미지정수의 결정이 이루어지면 이동 중에 있는 사용자 수신기의 위치를 센티미터 수준으로 결정할 수 있다. GPS 기준국과 이동국 수신기 사이에 통신이 확보 되어 기준국 관측데이터를 이동국으로 전송 할 수 있다면 실시간적으로 센티미터 수준의 측

위의 수행이 가능하여 "실시간 GPS 반송파 상대측위" 또는 관용적으로 "GPS-RTK(Real-Time Kinematic) 측위"라고 한다. 이러한 GPS 반송파 동적 측위 기법들은 공공 및 지적 기준점측량 및 측설, 항공사진측량에 의한 제도제작, 대형 구조물 거동의 모니터링, 항만 크레인과 같은 기계의 유도과 제어, 항공기의 정밀 접근 및 착륙등과 같은 항법 분야에서 광범위하게 활용되고 있다.

GPS 반송파 동적 상대측위는 수 센티미터 수준의 측위 정확도를 확보 할 수 있음에도 불구하고 측위 환경과 위성

*정희원 · 창원대학교 토목공학과 조교수 (E-Mail : hkyulee@changwon.ac.kr)

신호의 수신기술의 한계에 의해 다음과 같은 제약을 가지고 있다(Hofman-Wellenhof et al., 2002; Leick 2004; Rizos 1996). 첫째 고층 빌딩이 밀집한 도심지나 옥내 혹은 지하 주차장 그리고 산림이 무성한 산악 지역 등과 같이 주위의 지형지물이 위성 신호의 수신에 장애를 유발하는 경우 GPS 측위에 필요한 4개 이상의 위성 신호 추적 할 수 없어 고정밀 측위를 연속적으로 수행하기가 불가능하다. 둘째 현재의 기술 여건으로는 제공되는 위치정보의 출력율이 1~20Hz 정도로 구조물 모니터링과 같은 높은 출력율을 필요로 하는 분야의 응용에 제한이 있으며, 이동 중에 있는 항체의 자세 각(attitude)을 GPS 수신기에 의해 추정하기 위해서는 2대 이상의 안테나가 설치되어야 하는 번거로움이 있다. 셋째 기준국과 이동국 수신기 사이의 거리에 비례하여 증가하는 “기선장에 따른 오차(위성의 궤도 오차, 전리층 및 대류권 영향)”들로 인하여 센티미터 정확도의 측위의 수행이 가능한 범위가 일반적으로 10~20km 정도로 제한된다. 이로 인하여 측위의 범위가 기준국 수신기에서 수 십 에서 수 백 킬로미터에 이르는 경우는 이동국 수신기가 이동함에 따라 고정밀 측위에 필요한 수신기 사이의 거리를 유지하기 위하여 기준국 수신기도 함께 이동해야 하기 때문에 작업의 능률성이 크게 저하된다. 특히 기준국 수신기 설치에 어려움이 있는 습지나 산지 혹은 해양에서의 경우는 센티미터 수준의 위치 정확도 확보에 어려움이 있다.

GPS 반송파 동적 상대측위의 제약들 중 첫 번째와 두 번째는 INS(관성항법장치: Inertial Navigation System)의 관측데이터와 통합 처리에 의해 해결할 수 있다(Da et al., 1997; Gerjner-Brzezinska et al., 1998). 이는 INS의 시간에 따라 누적되는 위치 오차를 미지정수가 결정된 이중차분 GPS 반송파 관측데이터를 사용하여 칼만필터에 추정하여 보정함으로써 100Hz 이상의 높은 출력율로 GPS 신호가 일정한 시간동안 단절되는 경우에도 위치, 속도, 각속도와 같은 항법 정보를 연속적으로 제공 할 수 있기 때문이다. 그러나 GPS/INS 통합 측위를 수행하더라도 수 센티미터의 정확도를 확보하기 위해서는 여전히 기준국과 이동국 수신기 사이의 간격이 10~20Km 이내로 제한된다. 이것은 칼만필터에 의한 두 시스템의 통합에서 GPS 이중차분 반송파 관측데이터가 INS의 항법 및 센서 오차 추정에 사용되어 기선장이 증가함에 따라 위성궤도, 전리층 영향 그리고 대류권 지연과 같은 오차의 영향을 받기 때문이다. 이를 해결하기 위해서는 단일 GPS 기준국을 사용하는 것을 대신하여 3대 이상의 다중의 GPS 기준국의 사용으로 “기선장에 따른 오차”를 모델링하고 이동국 수신기에 취득된 관측데이터의 오차를 최소화해야 한다(Wanninger, 1995; Han and Rizos ,1996; Wbbena et al., 1996, 1997).

기준국과 이동국 수신기의 거리가 수십에서 수 백 킬로미터에 달하고 일정기간 동안 GPS 신호의 수신 장애가 발생하더라도 연속적으로 센티미터 수준의 실시간 동적 측위를 수행하기 위해서는 그림 1과 같이 3대 이상의 다중 GPS 기준국에서 취득된 관측데이터의 사용에 의해 기선장에 따른 오차를 추정하여 이동국에 적용하여 그 영향을 최소화한 이후 시스템 통합 칼만필터에 의해 INS의 항법(위치, 속도, 자세) 및 센서 오차를 추정하여 계산된 항법 요소에 보

정하는 “다중 기준국에 기반한 GPS/INS 통합 측위 시스템”의 개발이 필요하다. 따라서 이러한 시스템 구현에 필요한 측위 알고리즘은 “GPS 다중 기준국 관측데이터 처리”와 “GPS/INS 통합 데이터 처리”로 구분할 수 있으며, 본 연구는 GPS 다중기준국 관측데이터 처리를 위한 핵심 알고리즘을 개발하여 향후 다중 기준국에 기반한 GPS/INS 통합 실시간 측위 시스템 구현의 기반 기술을 확보하는 것이 그 목적이다.

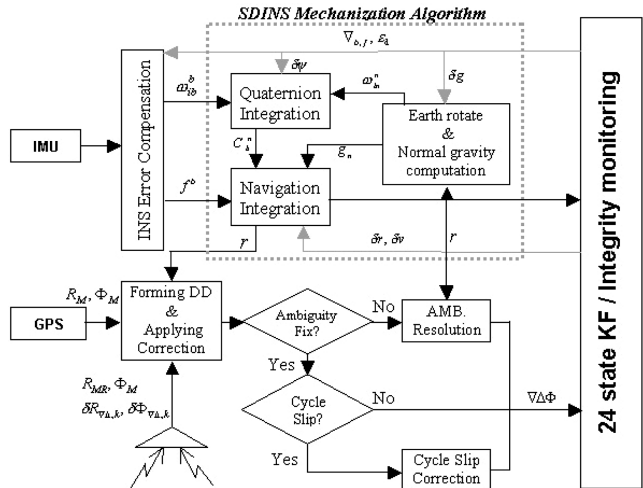


그림 1. 다중 기준국에 기반한 GPS/INS 통합 측위의 개요

본 논문에는 기준국 관측데이터 처리를 위해 개발된 기준국의 좌표와 GPS 관측데이터의 선형결합을 이용한 반송파 관측데이터의 미지정수 결정, 칼만필터에 의한 기준국에서의 기선장에 따른 오차 추정 그리고 기준국 네트워크와 이동국 수신기의 기하관계를 이용한 오차의 보간 알고리즘을 요약하고 실제의 관측데이터의 처리를 통해 그 성능을 평가하였다.

2. 기준국 반송파 관측데이터의 미지정수 결정

GPS 반송파 관측데이터에서 “미지정수”는 누적 위상의 초기 부분의 알 수 없는 정수배의 반송파 위상의 수로 GPS 수신기의 반송파 관측기술의 제약에 의해 발생한다. 따라서 GPS 상시관측소 관측데이터의 사용에 의해 기선장에 따른 오차를 정확히 모델링하기 위해서는 데이터처리를 위한 초기화 단계에서 미지정수의 결정이 이루어 져야 한다. 그러나 GPS 수신기 사이의 간격이 수 십에서 수 백 킬로미터에 이르는 경우 위성 궤도오차와 대기권 영향과 같은 기선장에 따라 증가하는 오차 성분이 L1과 L2 반송파 파장이 1/2 이상 되어 이들을 직접 사용하는 경우 정확한 미지정수의 결정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 그림 2와 같이 파장이 86.2cm인 광폭결합(L5) 미지정수 결정 후 Ionosphere-free(L3) 결함을 통해 L1과 L2 미지정수를 계산하는 알고리즘을 제안하였다.

2.1 광폭결합 미지정수 결정

GPS L1 및 L2 반송파 관측데이터의 이중차분 광폭선형결합(L5) 관측방정식은 다음 식으로 나타낼 수 있다(Hofman-

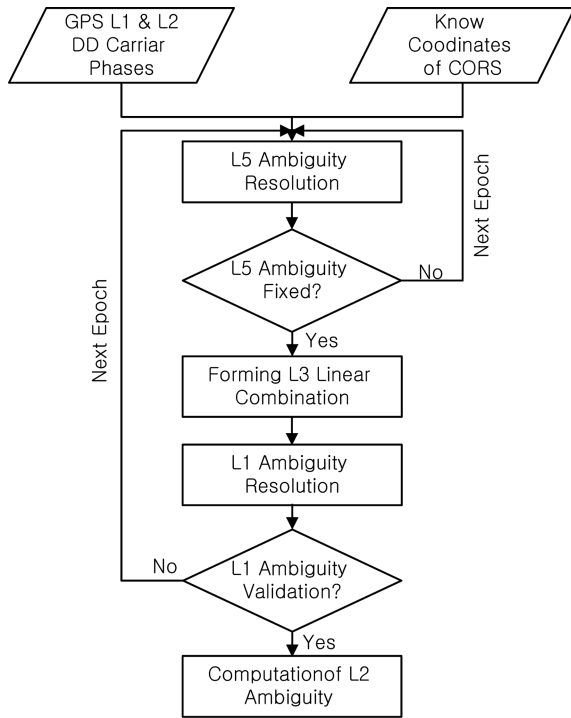


그림 2. 제안된 미지정수 결정 알고리즘

Wellenhof et al., 2002; Leick, 2004; Rizos, 1996).

$$\lambda_{1,-1}\phi_{1,-1} = \rho_{1,-1} + d\rho_{1,-1} + \lambda_{1,-1}N_{1,-1} - di_{1,-1}/f_{1,-1}^2 + dm_{\phi_{1,-1}} + \varepsilon_{\phi_{1,-1}} \quad (1)$$

여기서, $\phi_{1,-1}$ 는 반송파 관측데이터, $\rho_{1,-1}$ 위성과 수신기 사이의 거리, $N_{1,-1}$ 는 미지정수, $d\rho_{1,-1}$ 는 위성의 궤도오차, $di_{1,-1}$ 는 전리층효과, $dm_{\phi_{1,-1}}$ 은 대류권 지연, $dm_{\phi_{1,-1}}$ 은 다중경로오차, $\varepsilon_{1,-1}$ 는 수신기 잡음, $\lambda_{1,-1}$ 과 $f_{1,-1}$ 은 광폭결합 파장과 주파수이다.

기준국 수신기 사이의 간격을 약 100km로 가정할 때 기선장에 따른 오차는 약 20~30cm 정도로 광폭선형결합의 관측데이터 파장(0.862m)에 비하여 상대적으로 작아 관측잡음으로 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{1,-1}\phi_{1,-1} = \rho_{1,-1} + \lambda_{1,-1}N_{1,-1} + \varepsilon_{\phi_{1,-1}} \quad (2)$$

정확도가 센티미터 수준 이상인 기준국 좌표를 이용하여 위성과 수신기 사이의 기하거리를 계산한 이후 이중차분 광폭결합($\rho_{1,-1}$)을 계산하여 식 (2)에 차감해 주면 다음과 같다.

$$\lambda_{1,-1}\phi_{1,-1} - \rho_{1,-1} = \lambda_{1,-1}N_{1,-1} + \varepsilon_{\phi_{1,-1}} \quad (3)$$

식 (3)을 n 개의 이중차분 광폭결합 관측데이터를 행렬 형태로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \lambda_{1,-1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{1,-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{1,-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \lambda_{1,-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{1,-1}^1 \\ N_{1,-1}^2 \\ N_{1,-1}^3 \\ \vdots \\ N_{1,-1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{1,-1}^1 - \rho_{1,-1}^1 \\ \phi_{1,-1}^2 - \rho_{1,-1}^2 \\ \phi_{1,-1}^3 - \rho_{1,-1}^3 \\ \vdots \\ \phi_{1,-1}^n - \rho_{1,-1}^n \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 최소제곱법에 의해 미지수를 추정하면 “실수형태의 미지정수”인 $\hat{x}_{1,-1}$ 과 분산-공분산행렬 $Q_{\hat{x}_{1,-1}}$ 이 얻어지고

이를 이용하여 미지정수 검색을 실시하여 최적과 차적의 미지정수 후보군을 검색하고 타당성검정 시험을 통해 미지정수 $N_{1,-1}^i$ 를 확정 할 수 있다. 본 연구에서 미지정수의 검색은 네덜란드 델프트 공과대학에서 개발한 LAMBDA(Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment)를 사용하였다(Teuissen, 1993).

2.2 L1과 L2 미지정수 결정

전리층 효과의 최소화를 위한 Ionosphere-free(L3) 선형결합의 관측방정식은 다음과 같다.

$$\lambda_{77,-60}\phi_{77,-60} = \rho_{77,-60} + d\rho_{77,-60} + \lambda_{60,-77}N_{60,-77} + dm_{\phi_{60,-77}} + \varepsilon_{\phi_{60,-77}} \quad (5)$$

대류권 지연모델과 준실시간으로 이용 가능한 IGS(International GNSS Services)의 초신속(Ultra-rapid) 위성계도력을 이용하여 이들의 영향을 최소화 하고 상대적으로 그 크기가 작은 다중경로와 함께 관측잡음으로 고려하고, 수 밀리미터 수준으로 결정된 기지의 좌표에 의해 위성파 수신기 사이의 기하거리를 계산한 후 식 (5)에 빼주면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{77,-60}\phi_{77,-60} - \rho_{77,-60} = \lambda_{60,-77}N_{60,-77} + \varepsilon_{\phi_{60,-77}} \quad (6)$$

L3 선형결합 데이터를 이용하여 L1과 L2 미지정수의 결정을 위해서 식 (7)과 같은 L1, L3, L5 미지정수 사이의 관계를 이용 할 수 있다(Han, 1997).

$$\lambda_{77,-60}N_{77,-60} = N_1(17\lambda_{77,-60}) + N_{1,-1}(60\lambda_{77,-60}) \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\lambda_{77,-60}\phi_{77,-60} - \rho_{77,-60} = N_1(17\lambda_{77,-60}) + N_{1,-1}(60\lambda_{77,-60}) + \varepsilon_{\phi_{60,-77}} \quad (8)$$

L5 미지정수($N_{1,-1}$)를 정확하게 결정하여 식 (8)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\lambda_{77,-60}\phi_{77,-60} - \rho_{77,-60} - N_{1,-1}(60\lambda_{77,-60}) = N_1(17\lambda_{77,-60}) + \varepsilon_{\phi_{60,-77}} \quad (9)$$

식 (9)를 n 개의 이중차분 L3 관측데이터에 대해 행렬 형태로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 17\lambda_{L3} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 17\lambda_{L3} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 17\lambda_{L3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 17\lambda_{L3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^1 \\ N_1^2 \\ N_1^3 \\ \vdots \\ N_1^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l^1 \\ l^2 \\ l^3 \\ \vdots \\ l^n \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서, $l^i = \lambda_{77,-60}\phi_{77,-60} - \rho_{77,-60} - N_{1,-1}(60\lambda_{77,-60})$

식 (10)를 최소제곱법에 의해 추정하고 미지정수 검색과 타당성 검정을 통하여 L1 미지정수(N_1)을 결정 할 수 있으며, 이 경우 L2 미지정수는 광폭선형결합의 관계로부터 다음과 같이 계산 된다.

$$N_2 = N_1 - N_5 \quad (11)$$

3. 기선장에 따른 오차의 추정

GPS 이중차분 관측잔차를 이용하여 기선장에 따른 오차 성분을 추정하기 위해서는 관측데이터에 포함되어 있는 “관측잡음”과 “다중경로”의 영향을 최소화해야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 그림 3과 같이 이중차분 관측데이터에 미지정수와 위성과 수신기 사이의 기하거리를 차감한 각 위성에 대한 L1, L2 관측잔차를 칼만필터에 의해 최소화 하는 알고리즘을 제안 하였다.

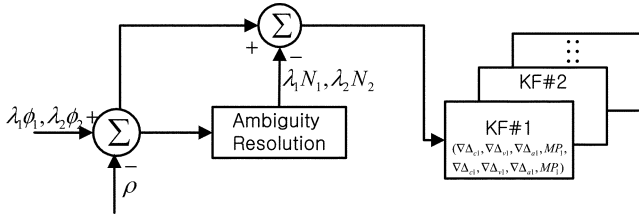


그림 3. 제안된 기선장에 따른 오차 추정 알고리즘

3.1 상태벡터와 동적모델링

본 연구에서는 기선장에 따른 오차 추정을 위한 칼만필터의 상태벡터 식 (12)와 같이 L1과 L2 반송파에 대해 각 4 개씩 총 8개의 상태변수로 구성하였다.

$$x = [\nabla\Delta_{c1} \nabla\Delta_{c1} \nabla\Delta_{c1} MP_1 \nabla\Delta_{c2} \nabla\Delta_{c2} \nabla\Delta_{c2} MP_2]^T \quad (12)$$

여기서, $\nabla\Delta_c$ 추정하고자 하는 기선장에 따른 오차, $\nabla\Delta_v$ 과 $\nabla\Delta_a$ 는 추정 오차의 변화율과 가속도, MP 는 다중경로이다.

동적모델링은 상태변수의 기선장에 따른 추정오차와 변화율 그리고 가속도는 위치-속도-가속도(PVA) 모델을 그리고 다중경로는 Gauss-Markov 1차 모델을 사용하였으며 이산시간에 대한 전이행렬(transition matrix)로 나타내면 다음식과 같다(Brown and Hwang, 1979; Meyback, 1979).

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\alpha T} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & T^2/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\beta T} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, T 는 샘플링 간격, α 와 β 는 상관시간이다.

동적모델에 대한 분산-공분산 행렬을 이산시간에 대해 나타내면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{k,k-1} = \begin{bmatrix} q_r T^2/20 q_r T^4/8 q_r T^3/6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_r T^4/8 q_r T^3/3 q_r T^2/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ q_r T^3/6 q_r T^2/2 q_r T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma(1-e^{-2\alpha T}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_r T^2/20 q_r T^4/8 q_r T^3/6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_r T^4/8 q_r T^3/3 q_r T^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_r T^3/6 q_r T^2/2 q_r T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma(1-e^{-2\beta T}) \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서, q_i 는 PVA 모델의 파워스펙트럼밀도(power spectrum density), σ 는 Gauss-Markov 모델의 분산으로 이들 값은 경험적 방법에 의해 얻어 질 수 있다(Farrel, 2000).

3.2 관측데이터의 함수모델링

기준국에서 취득된 L1과 L2 GPS 반송파 이중차분 관측데이터에 위성과 수신기 사이의 이중차분 기하거리와 미지정수를 차감해 주면 다음과 같이 관측잔차로 나타낼 수 있다.

$$\nabla\Delta_{k,1} = \lambda_1\phi_1 - \rho - \lambda_1 N_1 = \underbrace{d\rho - d i_{\phi_1} + dr}_{\text{Distant dependent error}} + \underbrace{dm_{\phi_1} + \varepsilon_{\phi_1}}_{\text{Site dependent error}} \quad (15)$$

$$\nabla\Delta_{k,2} = \lambda_2\phi_2 - \rho - \lambda_2 N_2 = \underbrace{d\rho - d i_{\phi_2} + dr}_{\text{Distant dependent error}} + \underbrace{dm_{\phi_2} + \varepsilon_{\phi_2}}_{\text{Site dependent error}} \quad (16)$$

위의 두 식은 이중차분 관측잔차가 기선장에 따른 오차와 관측지점에 따른 오차로 이루어져 있음을 보여 주며 칼만필터를 사용하여 관측지점에 따른 오차를 최소화 할 수 있다. 따라서 각 위성에 대한 관측벡터와 계수행렬을 다음과 같이 구성 할 수 있다.

$$Z_k = \begin{bmatrix} \nabla\Delta_1 \\ \nabla\Delta_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$H_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

관측벡터에 대한 분산-공분산 행렬은 다음 식과 같다.

$$R_k = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 \\ 0 & \sigma_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

4. 기선장에 따른 오차의 보간

이동국 관측데이터에 포함된 기선장에 따른 오차를 축소하기 위해서는 3개 이상의 기준국에서 추정된 오차의 보간을 통해 보정량을 계산하여 그 영향을 최소화해야 한다. 본절은 향후 이동국의 GPS/INS 데이터 처리에 적용할 최적의 보간 기법 선정을 위하여 비교 연구결과를 요약 하고 있다.

4.1 기선장에 의한 보간모델

기선장에 의한 선형보간(DIM: Distance-based Interpolation Model)은 기준국 수신기와 이동국 수신기 사이의 거리(d_i)에 따라 경중율을 부여하여 보간하는 방법으로 다음 식에 의해 이루어진다(Gao, 1997).

$$\nabla\Delta_{CI} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{w_i}{w} \nabla\Delta_C \quad (20)$$

여기서, $w_i = \frac{1}{d_i}$, $w = \sum_{i=1}^{n-1} w_i$

4.2 선형결합모델

선형결합모델(LIM: Linear Combination Model)은 기준국과 이동국의 평면좌표 성분의 차이를 이용하여 각 기준국에 대항하는 계수를 결정하여 식 (21)과 같이 오차 추정값에 곱한 후 합하여 보간값을 계산한다(Han and Rizos, 1996).

$$\nabla\Delta_{CI} = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{n-1}] [\nabla\Delta_C^1 \ \nabla\Delta_C^2 \ \dots \ \nabla\Delta_C^{n-1}]^T \quad (21)$$

계수 α 는 조건식 방정식에 의한 최소제곱법에 의해 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\alpha = A^T(AA^T)^{-1}W \quad (22)$$

여기서, $A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \Delta X_{r,1} & \Delta X_{r,2} & \dots & \Delta X_{r,n-1} & 0 \\ \Delta Y_{r,1} & \Delta Y_{r,2} & \dots & \Delta Y_{r,n-1} & 0 \end{bmatrix}$, $\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}$, $W = \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta X_{r,n} \\ \Delta Y_{r,n} \end{bmatrix}$

식 (22)에 의해서 n 개의 계수가 계산되나 실제 계산에는 $(n-1)$ 개를 사용한다.

4.3 선형보간모델

선형보간(LIM: Linear Interpolation Model)은 기본적으로 최소제곱법에 의해 이루어지며 식 (23)에 의해 보간 파라미터(a, b)를 계산 한다(Wanninger, 1995).

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (ATA)^{-1}ATC \quad (23)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} \Delta X_{m,1} & \Delta Y_{m,1} \\ \Delta X_{m,2} & \Delta Y_{m,1} \\ \vdots & \vdots \\ \Delta X_{m,n-1} & \Delta Y_{m,n-1} \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \nabla\Delta_C^1 \\ \nabla\Delta_C^1 \\ \vdots \\ \nabla\Delta_C^{n-1} \end{bmatrix} \quad (24)$$

계산된 파라미터에 의한 이동국 수신기의 오차의 크기로 보간은 식 (25)에 의해 이루어진다.

$$\nabla\Delta_{CI} = a\Delta X_{m,r} + b\Delta Y_{m,r} \quad (25)$$

여기서 $\Delta X_{m,r}$ 과 $\Delta Y_{m,r}$ 은 기본 기준국과 이동국 수신기 사이의 평면좌표 차이이다.

5. 관측데이터의 처리 및 분석

본 연구에서 제안한 GPS 다중 기준국 네트워크 데이터처리를 위한 알고리즘은 과학기술용 계산 툴인 MATLAB에

의해 구현하고 알고리즘들의 성능을 평가하기 위하여 국토지리정보원의 GPS 상시관측소와 기준국 사이의 거리가 약 50km인 중규모 GPS 관측망에서 얻어진 데이터를 처리 하였다.

5.1 미지정수 결정

본 연구에서 제안된 기선장에 따른 오차 계산을 위한 기준국 수신기 관측데이터의 미지정수 결정 알고리즘의 성능 평가를 위하여 국토지리정보원에서 운영 중에 있는 3곳의 GPS 상시관측소 데이터를 처리하였다. 사용된 상시관측소 데이터는 기선장이 100~110Km에 달하는 JINJ(진주), TEGN(대구), KWNJ(광주)에서 30초 간격으로 취득된 것이다.

제안된 알고리즘의 특성을 살펴보기 위하여 식 (4)와 식 (10)에 최소제곱법을 적용하여 단일 에폭크 관측데이터에 대한 실수형 미지정수(float ambiguity)를 추정하였다. 표 1은 3개의 기선에 대한 L5와 L3에서 계산한 실수형 미지정수를 나타내고 있다. 표의 왼쪽 부분인 L5 단일 에폭크 실수형 미지정수는 모두 정수에 매우 가까운 값을 가져 정확한 미지정수의 결정이 쉽게 이루어 질 수 있을 것임을 예상 할 수 있다(Teunissen, 1997). 이것은 두 수신기 사이의 기선장이 증가함에 따라 그 오차 영향도 커지나 여전히 L5 파장 86cm에 비해 그 크기가 상대적으로 작기 때문이다. 표 1의 오른쪽 부분은 L3 선형결합 형성 후 L5의 관계를 이용하여 계산된 L1 반송파 실수형 미지정수를 나타내고 있다. 이들 값 또한 대체로 정수에 가까운 값을 가지며 이는 전리층 효과가 선형결합을 통하여 크게 축소되었기 때문이다. 그러나 정수에 매우 가까운 값을 가지는 경우에도 기선장에 따른 오차의 크기가 한 파장 이상이 되어 표에 보이는 실수형 미지정수 중 정수 부분이 정확한 미지정수가 아닐 가능성이 있다. 소수 부분이 0.5에 가까운 경우는 정확한 미지정수 결정에 어려움을 줄 수 있으나 LAMBDA기법에 의한 미지정수 후보군의 검색과 정규방정식을 누적하여 오차의 일정 부분을 평활화 한다면 단기간에 정확한 미지정수의 결정이 가능 할 것으로 판단된다.

다양한 경우에 대하여 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 24시간인 상시관측소 데이터를 2시간 간격으로 각 기선에 대해 12개 총 36개의 파일로 나누어 처리하여 첫 번째 미지정수 결정에 필요한 에폭크 수를 살펴보았다. 정규방정식의 누적에 의해 실수형 미지정수 추정을 위해서는 Sequential 최소제곱법을 적용 하였다(Cross, 1983). 미지정수 타당성 검정에서 차적(second best)의 미지정수 조합의 잔차 제곱을 최적의 그것으로 나누어 계산하는 F-비를 하용 하였다

표 1. 단일 에폭크 실수형 미지정수

(단위: cycle)

위성	L5 단일 에폭크 실수형 미지정수			L1 단일 에폭크 실수형 미지정수 (L3)		
	JINJ-TEGN	JINJ-JUNJ	JINJ-KWNJ	JINJ-TEGN	JINJ-JUNJ	JINJ-KWNJ
5	4177527.996	-191144.053	2455707.977	19008556.738	1193270.918	10452489.190
10	7910942.164	786704.884	2210148.855	35878306.779	5621698.635	11329438.139
12	7229866.058	1695899.808	1634916.865	33209544.638	7421970.507	8174793.171
13	4247051.986	1400711.994	3562132.093	19303845.916	7655617.826	9165162.309
17	-4019285.930	-1558363.973	882665.009	-17904403.076	-5645134.055	2184833.173
23	2349111.890	1156633.919	2432938.062	10678939.968	4807019.679	5433903.239

(Hofman-Wellenhof 등 2002). 이를 통해 F-비가 1.5 이상 일 때 최적의 미지정수 조합을 확정하였으며 정확성 여부는 사전에 동일한 알고리즘으로 2시간 데이터를 누적 처리하여 얻어진 미지정수를 사용하여 점검하였다.

L5 미지정수의 경우 표 1에서 예상한 바와 같이 L5 미지정수는 36개의 경우에서 모두 단일 에폭크 데이터에 의해서 정확한 미지정수의 결정이 가능하였다. 그림 4는 L1 미지정수 결정에 소요된 에폭크 수를 도시한 것이다. L2 미지정수는 L1 미지정수가 결정되면 식 (11)에 의해 간단히 계산된다. 그림은 대부분의 경우 기선장이 약 100~110km 될지라도 단일 에폭크 데이터의 사용만으로도 순간적으로 미지정수의 결정이 가능함을 보여주고 있다. 그러나 불량한 경우는 26~27개의 데이터가 필요했으며 이때 가용 위성의 수는 5개 정도였다. 비록 데이터 처리에 사용된 데이터의 샘플링 간격이 30초로 미지정수 결정에 긍정적인 영향을 미치는 위성 기하구조의 충분한 변화가 있었으나 데이터 처리 결과는 1초 간격의 데이터에 적용 할 지라도 수 분 내에 기선장에 따른 오차의 정확한 추정에 필수적인 미지정수의 결정이 가능 할 것으로 판단된다.

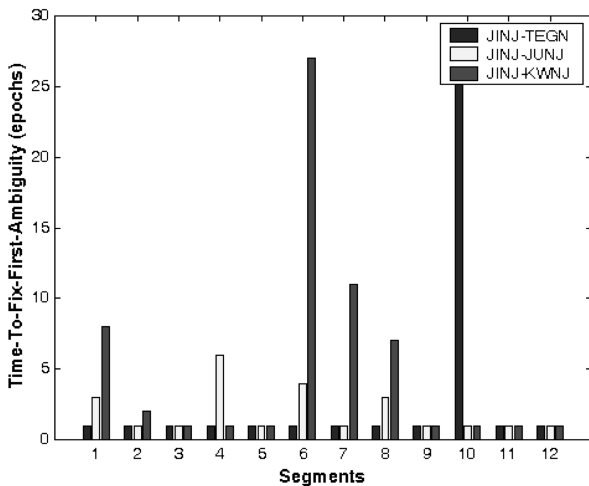


그림 4. 첫 번째 미지정수 결정 소요 에폭크 수

5.2 기선장에 따른 오차의 추정

GPS 동적측위는 1초 이상의 샘플링 간격으로 실시하는 것이 일반적이거나 국내 GPS 상시관측소의 데이터는 30초 간격의 데이터만을 제공하고 있다. 따라서 본 연구에서는 실제의 동적측위 환경에 대하여 제안 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 4대의 GPS 수신기를 사용하여 1시간 동안 정지측위를 실시한 데이터를 이용하였다. 데이터 처리에서는 3대는 GPS 상시관측소 그리고 1대는 이동국 수신기로 고려하였으며 이는 이동국 수신기의 관측데이터오차보정량 보간 알고리즘의 비교연구에 활용 될 것이다. 3대의 기준국 수신기 (Ref. A, Ref. B, Ref. C) 사이의 간격은 약 50km이며 이 중에서 Ref. A를 기본기준국(master reference)으로 하여 제안된 알고리즘을 적용하여 미지정수를 결정 한 이후 식 (15)와 (16)을 사용하여 L1과 L2에 대한 이중차분 관측잔차를 각각 5개 계산하고 본 연구에서 제안한 칼만필터에 의해 각 기준국에서의 기선장에 따른 오차를 추정 하였다.

5개의 데이터처리 결과 중에서 대표적인 예로 SV5에 대한

추정된 상태변수와 그 표준편차 값을 그림 5와 그림 6에 도시하였다. L1과 L2에 대하여 8개의 상태변수가 추정 되었으며 그 중 첫 번째와 다섯 번째 상태변수가 기선장에 따른 오차 성분이다. 특히 그림 6의 상태벡터의 표준편차가 수렴하여 칼만필터가 적절하게 동작하였음을 보여주고 있다. 칼만필터 적용의 효과를 보다 자세하게 나타내기 위하여 SV5

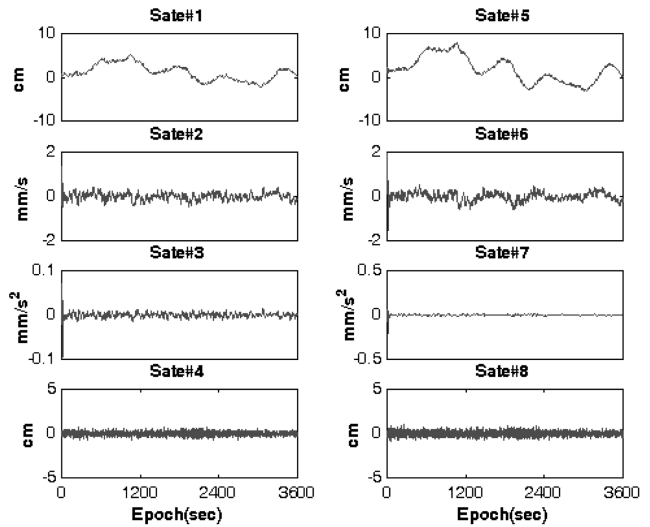


그림 5. 추정된 상태변수 (SV 5)

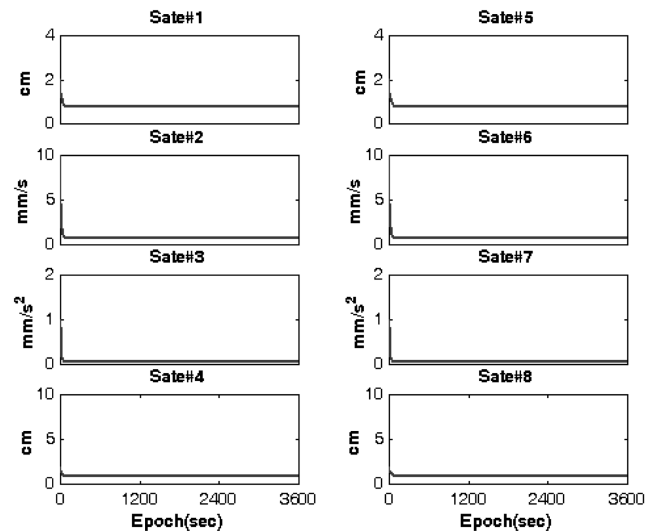


그림 6. 추정된 상태변수의 표준편차 (SV5)

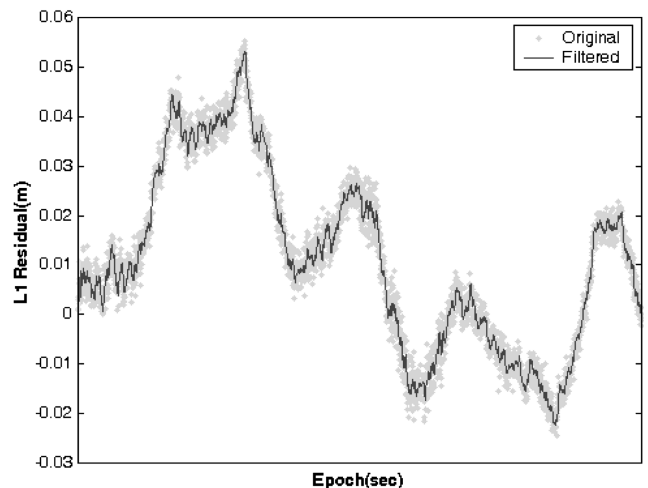


그림 7. SV5의 관측잔차와 추정오차의 비교(L1)

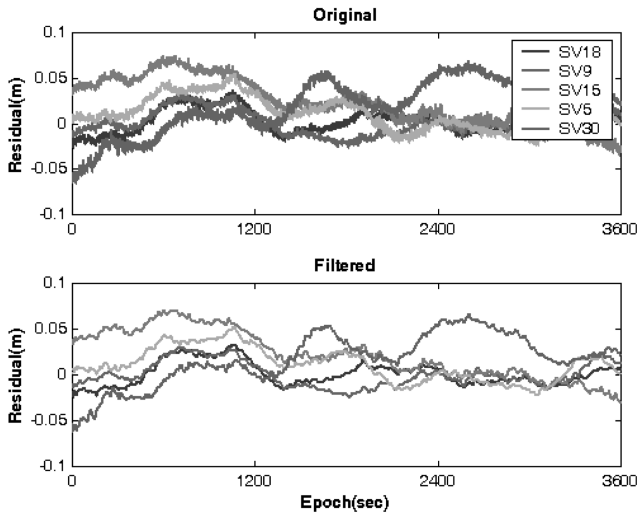


그림 8. Ref. B(L1)에서의 L1 관측잔차와 추정오차의 비교

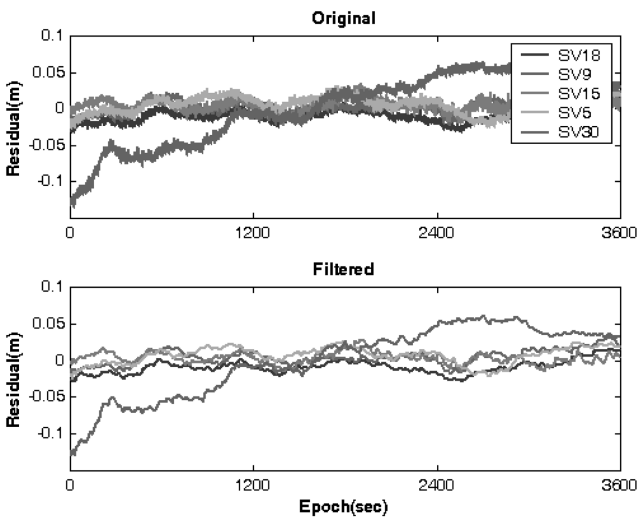


그림 9. Ref. C에서의 L1 관측잔차와 추정오차의 비교

의 L1 관측잔차와 필터의 적용에 의해 추정된 기선장에 따른 오차를 그림 7에 나타내었다. 또한 Ref. B와 Ref. C에서의 모든 위성에 대한 L1 관측잔차와 추정 오차를 그림 8과 9에 도시하였다. 그림들은 필터링을 통하여 고주파 성분의 관측잡음과 다중경로 오차가 축소되었다는 사실을 보여주고 있다.

5.3 기선장에 따른 오차의 보간

적합한 보간 기법은 선정하기 위하여 식 (20), (21), (25)을 이용하여 Ref. B와 Ref. C의 기선장에 따른 오차를 기준망 내부에 위치하는 이동국에 대한 오차로 보간 하여 그림 10과 11에 도시 하였다. 그림에서 횡축은 초 단위의 관측시간을 종축은 보간된 오차의 크기를 나타내고 있다. 보간된 오차의 크기는 선형결합보간법(LCM: Linear Combination Method)과 선형보간법(LIM: Linear Interpolation Model)에 의해 결과는 정확히 일치하였으며, 이것은 오차 보정량의 계산 방법에는 차이가 있지만 수학적으로는 동일한 선형보간 이론에 근거하기 때문인 것으로 보인다. 또한 두 가지 선형보간법과 기선장에 의한 보간(DIM: Distance-based Interpolation Model)에 의해 계산된 오차 보정량도 큰 차이가 없음을 보여 주었다.

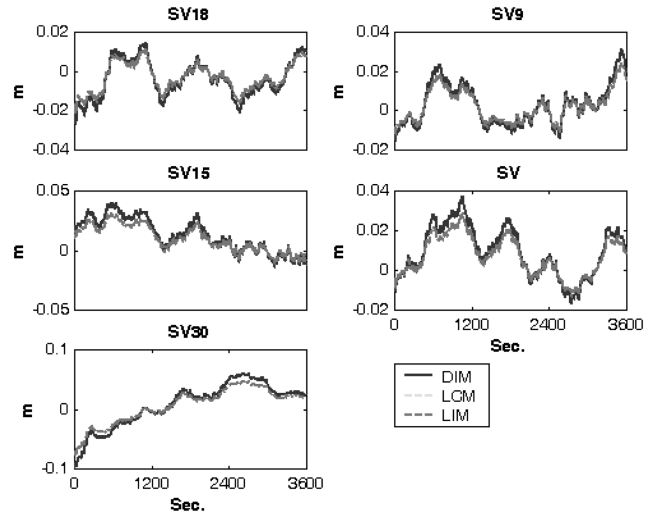


그림 10. 세 가지 기법에 의해 보간된 L1의 오차보정량 비교

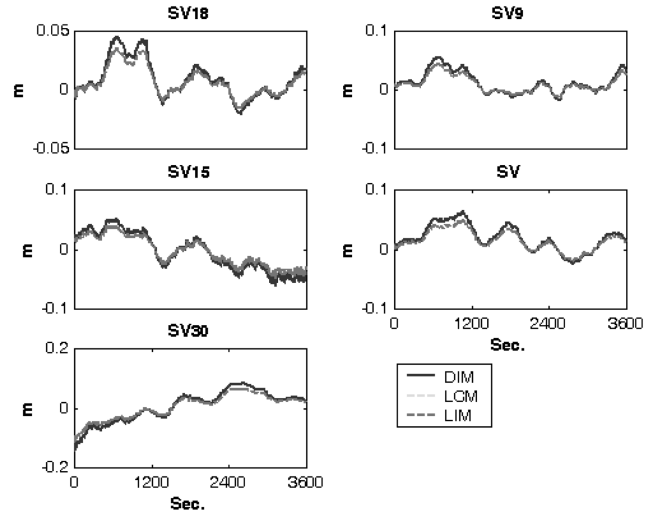


그림 11. 세 가지 기법에 의해 보간된 L2의 오차보정량 비교

그림 12는 세 개의 기준국으로 이루어진 기준망 내부에 위치하는 이동국과 기본기준국의 관측데이터를 이용하여 계산한 반송파 관측잔차에 DIM과 LIM 기법에 의해 계산된 오차보정량의 차감 전후의 예를 SV5에 대해 나타난 것이다. 그림에서 파란색 실선은 오차보정량 적용 전의 관측잔차로 기본기준국과 이동국 사이의 거리 약 33km를 고려 할

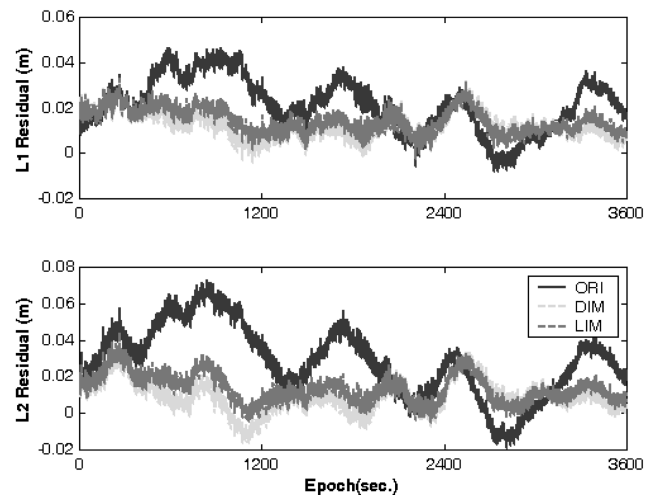


그림 12. 오차보정량 적용 전후의 관측잔차(SV05의 경우)

표 2. 오차보정량 적용 전후 관측잔차의 통계값 비교

(단위: m)

SV		Before Error Correction		After Error Correction					
				DIM		LCM		LIM	
		Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.	Mean	Std.
18	L1	0.001	0.009	0.005	0.006	0.004	0.005	0.004	0.005
	L2	0.010	0.013	0.001	0.009	0.003	0.007	0.003	0.007
9	L1	0.008	0.010	0.005	0.008	0.005	0.007	0.005	0.007
	L2	0.015	0.015	0.002	0.013	0.005	0.011	0.005	0.011
15	L1	0.029	0.008	0.016	0.014	0.019	0.011	0.019	0.011
	L2	0.018	0.017	0.022	0.019	0.022	0.013	0.022	0.013
5	L1	0.021	0.012	0.012	0.006	0.014	0.005	0.014	0.005
	L2	0.029	0.019	0.010	0.009	0.014	0.008	0.014	0.008
30	L1	0.031	0.023	0.023	0.017	0.024	0.011	0.024	0.011
	L2	0.029	0.034	0.022	0.021	0.024	0.013	0.024	0.013

때 기선장에 따른 오차를 나타내는 것이다. 연두색과 붉은색 점선은 푸른색의 관측잔차에 DIM과 LIM 기법을 적용하여 오차보정량을 계산하여 차감한 것을 나타내고 있다. 이를 통해 관측잔차에 포함되어 있던 기선장에 따른 오차가 크게 축소되었음을 알 수 있으나 DIM과 LIM에 의한 보간 기법의 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

표 2는 이동국에서 관측된 모든 위성에 대해 본 연구의 비교 대상인 세 가지 보간법에 의해 계산된 오차 보정량 적용 전후 관측잔차의 통계값을 나타낸 것이다. 이들 결과는 기선장에 따른 오차의 적용을 통하여 관측잔차를 축소하였음을 보여주고 있다. 그러나 각기 다른 보간법의 적용에 대한 영향은 크지 않아 본 연구의 데이터처리 결과를 고려 할 때 비교대상인 어느 보간법을 적용하더라도 상시관측소 기반의 동적측위의 결과의 차이는 없을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문은 GPS 반송파 동적 상대측위 및 INS와의 통합 측위의 한계를 극복하여 기준국과 이동국 수신기의 거리가 수십에서 수 백 킬로미터에 달하고 일시적인 GPS 신호의 수신에 장애가 발생하더라도 연속적으로 센티미터 수준의 실시간 동적 측위가 가능한 “다중의 GPS 기준국과 관성항법 장치의 관측데이터의 통합측위 시스템” 개발에 기반이 되는 기준국 관측데이터 처리 알고리즘에 대한 연구를 이론과 실험을 병행 실시한 것으로 그 결과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

첫째, 기선장에 따른 GPS 오차의 정확한 추정에 필수적인 상시관측소 미지정수 결정에 필요한 소요시간을 최소화 할 수 있는 알고리즘을 제안 하였다. 이것은 L5 미지정수를 결정 한 이후 전리층 영향을 최소화 할 수 있는 L3 선형결합을 형성한 이후 L1과 L5 미지정수 관계를 이용하여 L1과 L2 미지정수를 결정 하는 것이다. 알고리즘의 성능 평가를 위하여 국토지리정보원 상시관측소 데이터를 이용하여 36가지 경우에 대해 데이터처리를 실시하였다. 그 결과 대부분 단일 에포크 데이터 사용에 의해 정확한 미지정수 결정이 가능하였으나 가장 불량한 경우는 최대 27개의 데이터가 필

요하였다.

둘째, GPS 반송파 이중차분 관측잔차에 포함되어 있는 관측지점에 의한 오차를 축소하여 기선장에 따른 오차를 추정 하기 위하여 PVA와 Gauss Markov 모델을 이용하여 각 위성에 대하여 8개의 상태 변수를 가지는 칼만필터를 제안하였다. 구현된 필터의 성능을 평가하기 위하여 3개의 기준국으로 구성된 기준망 관측데이터를 이용하여 관측잔차를 계산하고 필터링을 실시한 결과 구현된 필터가 적절히 동작하였으며, 이를 통하여 고주파의 관측잡음과 다중경로를 축소하여 기선장에 따른 오차를 추정 할 수 있었다.

셋째, 향후 이동국의 GPS/INS 데이터 처리에 적용할 최적의 기법선정을 위하여 추정된 기선장에 따른 오차를 이동국 수신기의 위치에 대한 오차 보정량으로 보간 하는 기법들에 대한 비교 연구를 실시하였다. 3가지 모델에 대한 이론적 연구를 수행한 이후 DIM, LCM, LIM을 적용하여 실제 각 기준국에서 추정된 오차를 기준망 내부의 한 점에 대해 보간 하고 그 결과를 비교한 결과 LCM과 LIM은 동일한 결과를 얻을 수 있었고 DIM 또한 두 가지 기법과 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한 관측잔차에 오차 보정량을 차감한 결과 기선장에 따른 오차를 축소 할 수 있음을 확인 하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2007-331-D00481). 본 연구의 관측데이터를 제공해준 국토해양부 국토지리정보원 관계자와 대한측량협회 배경호 박사에게 사의를 포함합니다.

참고문헌

Brown, R. and Hwang, Y. (1992) Introduction to random signals and applied Kalman Filtering, New York, 484pp.
 Cross, P.A. (1983) Advanced least squares applied to position fixing, Working paper No. 6, Department of Surveying, Polytechnic of East London, 205pp.

- Da, R. (1997) Investigation of a low-cost and high-accuracy GPS/IMU system, Proceedings of ION-NTM, Santa Monica, CA, 14-16 January, pp. 955-963.
- Farrel, J. (2000) Differential GPS reference station algorithm - Design and analysis. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 519-531.
- Gao, Y., Li, Z., and McLellan, J.F. (1997) Carrier phase based regional area differential GPS for decimeter-level positioning and navigation, *10th Tech. Meeting of the Satellite Division of the US Inst. of Navigation*, Kansas City, Missouri, 16-19 September, pp. 1305-1313.
- Grejner-Brzezinska D., Da, R., and Toth, C. (1998) GPS error modeling and OTF ambiguity resolution for high-accuracy GPS/INS integrated system. *Journal of Geodesy*, Vol. 72, pp. 626-638.
- Han, S. and Rizos, C. (1996) GPS network design and error mitigation for real-time continuous array monitoring systems. *Proceedings of ION GPS-'96*, Kansas City, Missouri, 17-20 September, pp. 1872-1836.
- Han, S. (1997) *Carrier Phase-based Long-range GPS Kinematic Positioning*, PhD. Thesis, School of Surveying and Spatial Information Systems, Uni. of NSW, Sydney, Australia, 185pp.
- Rizos, C. (1996) *Principles and Practice of GPS Surveying*. Monograph 17, School of Surveying & SIS, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 555pp.
- Teunissen, P.J.G. (1993) A new method for fast carrier phase ambiguity estimation, *Proceedings IEEE Position, Location and Navigation Symposium*, Las Vegas, 11-15 April, pp. 562-573.
- Teunissen, P.J.G. (1997) A canonical theory for short GPS baselines (Part I-IV). *Journal of Geodesy*, No. 71, pp. 320-336, pp. 389-401, pp. 486-501, pp. 513-525.
- Wanninger, L. (1995) Improved ambiguity resolution by regional differential modelling of the ionosphere. *Proceedings of ION GPS-'95*, San Diego, CA, 12-15 September, pp. 55-62.
- Wbbena, G., Bagge, A., Seeber, G., Bder, V., and Hankemeier, P. (1996) Reducing distance dependent errors for real-time precise DGOS application by establishing reference station networks. *Proceedings of ION GPS-'96*, Kansas City, Missouri, 17-20 September, pp. 368-377.
- (접수일: 2008.8.6/심사일: 2008.10.22/심사완료일: 2008.11.18)