

네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 정확도 향상

이용욱* · 배경호**

Accuracy Enhancement using Network Based GPS Carrier Phase Differential Positioning

Yong-Wook Lee* · Kyoung-Ho Bae**

요 약

GPS의 3차원 위치결정은 코드파와 반송파를 이용한다. 하지만 이동체에 대한 cm 수준의 정확도를 획득하기 위해서는 정확한 기지점의 성과를 이용한 GPS 반송파 상대측위, 즉 RTK-GPS 기법을 수행하여야 한다. 이 때 두 대의 수신기 사이의 거리가 증가할수록 기선장에 따른 오차가 증가하여 기준국과 사용자 수신기의 거리를 10~20km 정도로 제한하고 있다. 따라서 사용자는 깊은 내륙, 연안 해역 등과 같은 기준국과 이동체의 이격이 수십 km로 증대되는 지역에서는 기준국 설치의 문제를 포함하고 있으며 독자적인 기준국을 설치하여야 하는 인력 및 장비의 부담을 가지게 된다.

이를 극복하기 위해 본 연구에서는 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식을 제안하였으며 GPS 네트워크 처리 프로그램인 DAUNet을 개발하였다. 기선장에 따른 오차보정량 산출을 위해 선형보간알고리즘 방식에 기반한 함수모델과 통계모델을 제시하였으며, 오차보정량의 보간은 면보정매개변수 방식을 제안하였다. 기존 단일기준국 방식은 기선장에 따른 오차를 소거하지 못하였지만 본 연구에서는 사용자 수신기와 평균 30km 떨어진 3대의 기준국을 이용하여 기선장에 따른 오차보정량을 소거 혹은 감소시킬 수 있었다. 따라서 사용자는 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식을 이용하여 이동체에 대한 10cm 이하 수준의 정확도를 획득할 수 있었다.

주요어 : 다중기준국, GPS 반송파, 상대측위, 미지정수, 오차보정량

ABSTRACT : The GPS positioning offer 3D position using code and carrier phase measurements, but the user can obtain the precise accuracy positioning using carrier phase in

*대한측량협회 측량정보기술연구원 책임연구원, 공학박사

**대한측량협회 측량정보기술연구원 선임연구원, 공학박사

Real Time Kinematic(RTK). The main problem, which RTK have to overcome, is the necessary to have a reference station(RS) when using RTK should be generally no more than 10km on average, which is significantly different from DGPS, where distances to RS can exceed several hundred kilometers. The accuracy of today's RTK is limited by the distance dependent errors from orbit, ionosphere and troposphere as well as station dependent influences like multipath and antenna phase center variations.

For these reasons, the author proposes Network based GPS Carrier Phase Differential Positioning using Multiple RS which is detached from user receiver about 30km. An important part of the proposed system is algorithm and software development, named DAUNet. The main process is corrections computation, corrections interpolation and searching for the integer ambiguity. Corrections computation of satellite by satellite and epoch by epoch at each reference station are calculated by a Functional model and Stochastic model based on a linear combination algorithm and corrections interpolation at user receiver are used by area correction parameters. As results, the users can obtain the cm-level positioning.

Keywords : network based GPS, GPS carrier phase, differential positioning, ambiguity, corrections

1. 서 론

최근 GPS는 과거 군사 목적뿐만 아니라 민간부분에서도 Telematics, Ubiquitous 등의 도입으로 항공, 해상, 차량 항법 그리고 개인 위치정보 서비스 등 그 이용범주가 실생활 전역으로 광범위하게 확대되고 있다. 이는 다른 측위 시스템에 비해 언제, 어느 곳에서나 저렴한 가격에 정확한 3차원 위치정보를 제공할 수 있기 때문이다(Hofmann-Wellenhof 외, 2004; 강준목외, 2004).

GPS는 위성의 코드파와 반송파를 사용하여 3차원 위치결정을 수행하고 있다. 코드파를 이용하는 경우에는 1m 정도의

정확도로 위치결정이 가능하며, 반송파의 경우 상대측위의 수행을 통해 10cm 이하 수준의 고정밀 측위가 가능하다. 수 cm 수준의 정확도를 획득하기 위해서는 정확한 좌표 성과값을 가지고 있는 기준국과 미지의 이동체로 구성된 두 대의 GPS 수신기에서 취득한 위성의 반송파 관측값에 수학적 원리를 적용한 “상대측위기법”을 이용하여야 한다. 이 때 상대측위기법에서 두 대의 수신기 사이의 거리가 증가할수록 기선장에 따른 오차(distance dependent errors), 즉 위성궤도오차, 전리층 및 대류권 지연이 증가하게 되며, 이로 인해 두 수신기 사이의 거리를 10~20km 정도로 제한되어 사용되고 있다(Wanninger 외, 2004; Chen외, 2003).

본 연구에서는 기존의 단일기준국을 사용하는 대신 3대 이상의 다중기준국을 이용한 GPS 반송파 상대측위(GPS Carrier Phase Differential Positioning using Multiple Reference Stations)기술을 구현하였다.

[그림 1]은 본 연구의 흐름을 나타내고 있으며 다중기준국에 의한 반송파 측위를 위하여 세 곳의 기준국을 이용하여 기선장에 따른 오차 관측 보정량 산출과 이를 사용자 수신기로 보간하는 연구내용을 나타내고 있다.

연구의 핵심적인 내용 및 자료처리는 다음과 같다.

첫째, 기지의 다중기준국에서 취득한 관측값 및 성과값을 이용하여 이동체 수신기에 대한 기선장에 따른 오차보정량 추정 및 오차보정량 모델링 과정을 수행

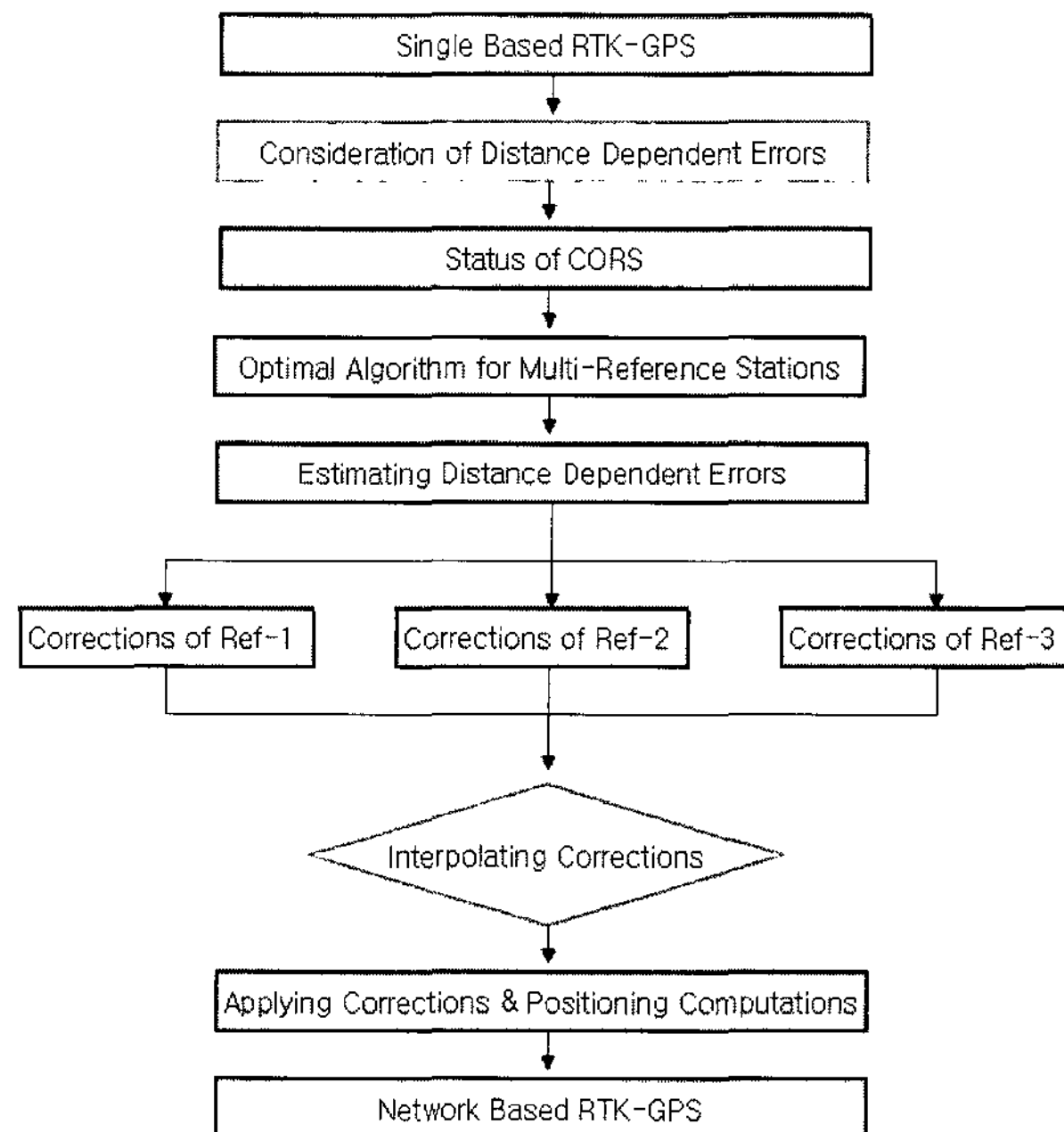
한다.

둘째, 모델링 후 추정된 오차보정량을 다중기준국과 이동체 수신기의 기하구조에 적절한 크기로 보간한 후 이동체의 관측값에 적용 및 이동체의 위치 결정 과정을 수행한다.

2. GPS 관측 및 오차보정량

2.1 GPS 반송파 관측

GPS의 반송파 관측은 수신기에 수신된 반송파와 수신기에서 생성된 반송파 차에 의해 만들어지는 맥놀이 반송파위상(carrier beat phase)을 누적하여 얻어진다. 따라서 반송파 관측은 위상의 개수를 나



[그림 1] 연구 흐름도

타내는 정수 부분과 우수리 부분으로 구성되어 있으며, 또한 누적된 위상 관측값의 초기 부분에 알 수 없는 정수배의 위상수를 포함하고 있다.

이 정수배의 위상수를 미지정수라 부르며 고정밀의 측위를 수행하기 위해서는 수학적 절차에 의해 결정되어야 한다. GPS 반송파 관측은 다음과 같이 표현될 수 있다.(Well, D. E, ·N. Beck, D외, 2000)

$$\lambda_G \cdot \phi_i^s = \rho_i^s + d\rho_i^s + c(dt^s - dT_i) + \lambda_G \cdot N_i^s - di_i^s + dr_i^s + d_{i,\phi}^s + \epsilon_{i,\phi}^s \quad (2-1)$$

- λ_G : GPS 반송파의 파장
- ϕ_i^s : 수신기 i 와 위성 s 사이의 반송파 관측값
- ρ_i^s : i 수신기와 s 위성 사이의 기하거리(m)
- $d\rho_i^s$: 위성의 궤도 오차(m)
- c : 진공중 빛의 속도(m/sec)
- dt^s : 위성의 시계 오차(sec)
- dT_i : 수신기의 시계 오차(sec)
- N_i^s : 미지정수
- di_i^s : 전리층 오차(m)
- dr_i^s : 대류권 오차(m)
- $d_{i,\phi}^s$: GPS 반송파의 다중경로 오차
- $\epsilon_{i,\phi}^s$: GPS 반송파 관측 잡음

2.2 오차보정량 산출기법

다중기준국에서 기준국 자료의 보정치 산출기법은 지난 몇 년 동안 개발되어 오

고 있다. 많은 연구자에 의해 연구되고 적용된 보정치 생성 알고리즘은 다음과 같다(G. Fotopoulos·M. E. Cannon외, 2001).

- 편미분 알고리즘(PDA : Partial Derivative Algorithm)
- 선형보간알고리즘(LIA : Linear Interpolation Algorithm)
- 조건조정알고리즘(CAA : Condition Adjustment Algorithm)
- 격자기반매개변수(GBP : Grid Based Parameterization)
- 가상기준점(VRS : Virtual Reference Station)(Wanniner)

다중기준국 방식의 GPS 반송파 상대측위 방식에서 기준국과 사용자 수신기에서 발생하는 기선장에 따른 전리층 지연 모델링의 선형보간알고리즘은 Gao et al. (1997)에 의해 제안되었고, 개정 알고리즘은 Gao과 Li(1998)에 의해 수정 제안되었다. 전리층 지연 매개변수가 산출되며 오차보정량을 다중기준국 영역 내의 사용자 수신기로 전송되며 다음 식으로 나타낼 수 있다(Han S. 외, 1996).

$$\nabla \Delta \hat{I}_u = \sum_j \frac{s_j}{s} \nabla \Delta \hat{I}_j \quad (2-2)$$

여기서, 특정 기준국 j 의 이중차분 후에 잔존하는 전리층 지연은 $\nabla \Delta \hat{I}_j$ 로 대표되고, 사용자 기준국 $\nabla \Delta \hat{I}_u$ 에 대한 상관값을 산출하는데 사용된다. 식 (2-2)에서 m 은 관측지점의 기준국을 제외한 기준국 수이다.

$$s = \sum_{j=1}^m s_j$$

$$s_j = \frac{1}{d_j} = \frac{1}{\sqrt{(x_j - x_u)^2 + (y_j - y_u)^2}} \quad (2-3)$$

주기준국에서 산출된 전리층 지연 매개변수에 기반한 이 방식은 기지의 기준국 수평좌표(x_j, y_j)를 이용하고 미지의 사용자 수평좌표(x_u, y_u)를 구한다.

Wanniner(1995, 1997)은 기선장에 따른 오차의 다른 영향에 대한 선형보간알고리즘을 제시하였으며 매개변수 과정은 두개의 매개변수에 의해 정의되는 일차선형표면(혹은 평면) 생성을 포함하고 있다. Han과 Rizos(1996, 1997)는 공간상관오차와 다중경로오차와 같은 오차항목을 감소시키는 유사 선형 보간법을 제안하였다.

단기선에 대한 이동체의 미지정수 결정은 위성궤도오차, 전리층 및 대류권 지연이 무시되기 때문에 쉽게 해결된다. 하지만 중·장기선에 대한 미지정수는 L1, L2 반송파에 대한 정확한 의사거리를 사용해야만 미지정수가 결정된다. 또한 장기선에 대한 실시간 처리는 정확한 의사거리를 산출하기 위해 신호차단이 없는 장시간 관측 자료와 정확한 궤도 정보를 사용해야하므로 실시간 처리의 문제를 가지고 있다.

본 장에서는 다중기준국을 이용한 선형결합방식을 이용한 기선장에 따른 오차(위성궤도오차, 전리층 지연, 대류권 지연)를 감소 혹은 제거할 수 있는 함수 모델과 통계 모델을 제시하였다.

위치결정에 기반한 다중기준국 방식의

핵심은 기선장에 따른 오차, 즉 위성궤도 오차, 전리층 지연, 대류권 지연의 제거 혹은 감소시키는 것이다. 고정밀도의 위치를 알고 있는 몇몇의 기준국이 있다면, 단일차분 관측값의 선형 결합은 다음과 같이 공식화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta \phi_i &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta \rho_i + \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta d\rho_i \\ &\quad - c \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta dT_i + \lambda \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta N_i \\ &\quad - \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta d_{ion,i} + \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta d_{trop,i} \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta d_{mp,i} + \epsilon \sum_{i=1}^n \alpha_i \Delta \phi_i \end{aligned} \quad (2-4)$$

여기서, n : 기준국의 수(L)

i : i 번째 기준국을 지정하는 것(무차원)

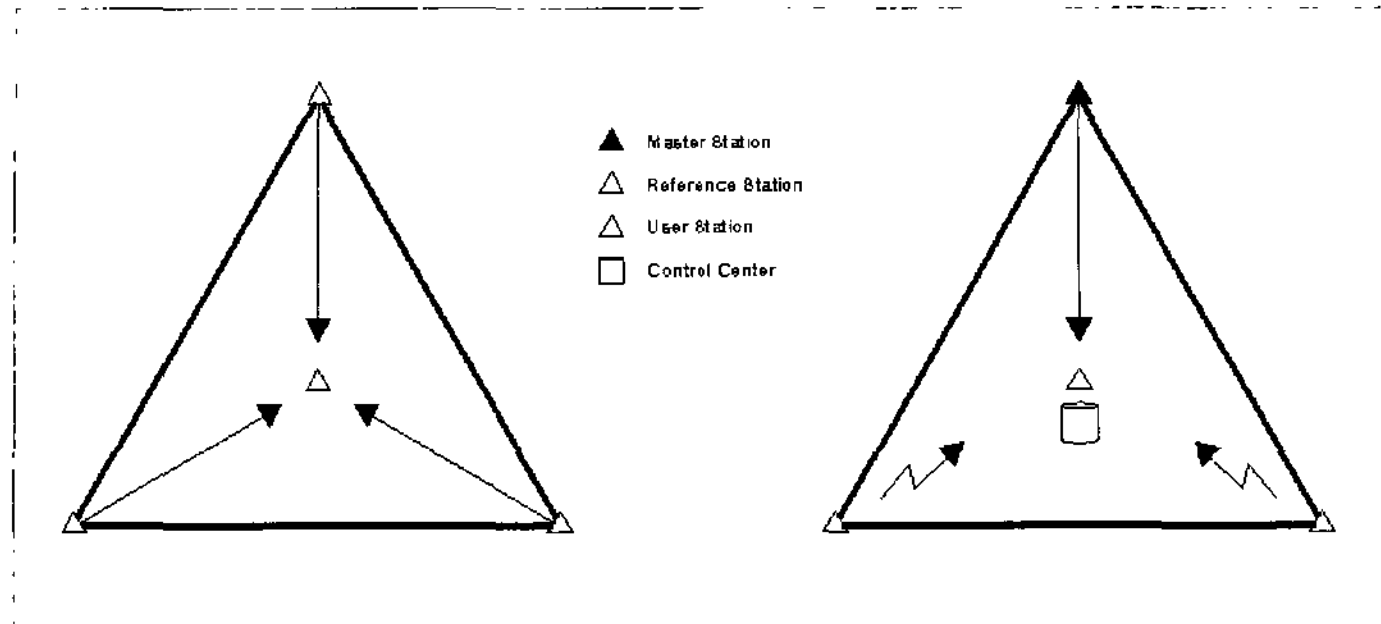
Δ : 단일차분 관측값(L)

ρ : 기준국 위치벡터를 뺀 위성위치벡터(L)

단지 사용자 위치의 근사적인 값을 사용한다면, 적절한 경중률(α)는 아래 조건을 만족시키는 기준국좌표(X_i)에서 사용자좌표(X_u)까지의 거리 비를 결정할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i (X_u - X_i) = 0 \quad (2-5)$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (2-6)$$



[그림 2] 다중기준국 방식

[그림 2]는 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식에서 주기준국과 각 기준국 그리고 사용자 수신기로 구성된 기하구조를 설명하고 있다. 세 개 혹은 그 이상 기준국이 있다면, 식 (2-5)와 식 (2-6)을 만족하기 위한 구속(constraint)이 추가되어 기준국 수가 증가하는 만큼 경중률에 대해 특별한 해는 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i^2 = \min \quad (2-7)$$

만약 하나의 기준국이 주기준국(m)으로 선정된다면, n 의 타당한 기준국으로부터, 등식 (2-5), (2-6)은 다음과 같이 된다.

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \sum_{i=1}^{n-1} \Delta X_{i,m} = \Delta X_{u,m} \quad (2-8)$$

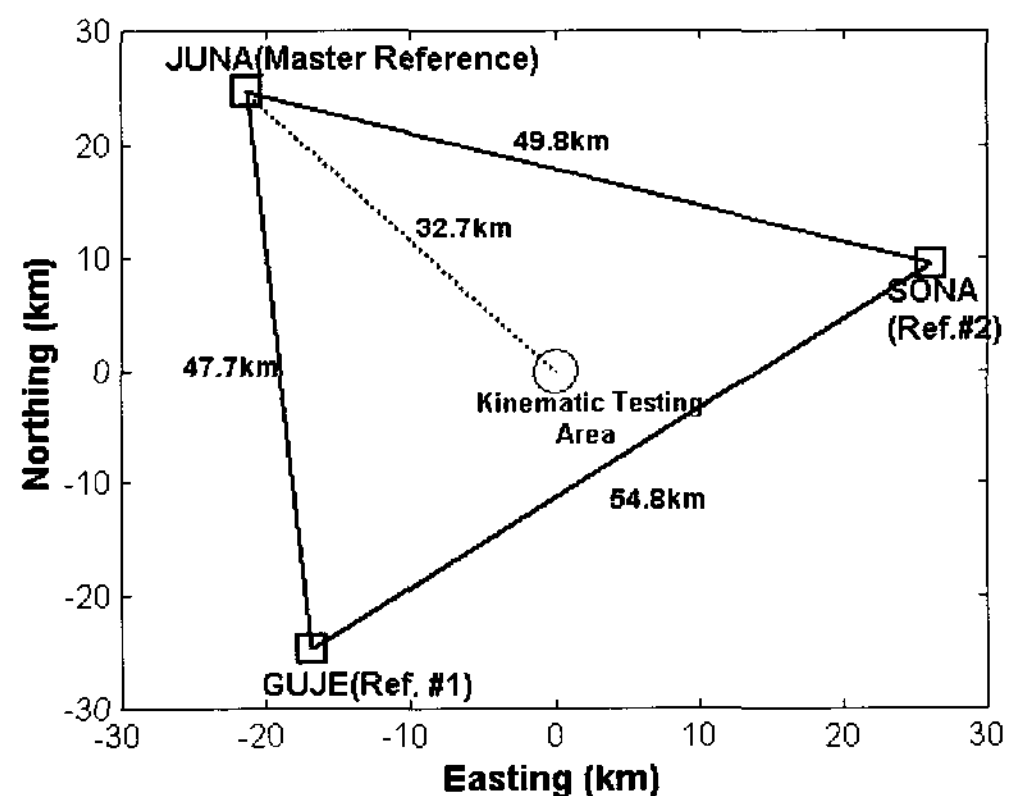
3. 현장실험 및 결과분석

본 연구에서 기선장에 따른 오차의 영향을 극복할 수 있는 다중기준국을 이용한 GPS 반송파 상대측위 방식의 적용을 위해 각 기준국의 간격을 평균 50km 정

도 떨어지게 설치하였다. 이는 기선장에 따른 오차의 명확한 산출과 현재 전국에 평균 30km~50km 정도로 분포되어 있는 각 기관별 상시관측소의 향후 활용 목적에 의의를 두었다.

데이터 처리는 제시한 선형보간 알고리즘과 DAUNet 프로그램을 적용하여 분석하였다. 현장 내 설치한 GPS 네트워크를 통해 L1, L2 반송파에 대한 오차보정량을 산출하고 이동체 수신기의 크기로 보간하였다. [그림 3]은 기준국 삼각망과 사용자 수신기의 위치를 도시한 것이다.

반송파 상대측위에 있어 기선장의 한계를 극복할 수 있는 다중기준국에 의한 반



[그림 3] 다중기준국과 이동체 수신기의 배치도

송파 상대측위를 연구하기 위해 사용자 수신기와 30km 이상 떨어진 창원외의 주남 기준점(JUNA Station)을 주기준점으로 사용하였으며, 송정기준점(SONA Station) 및 거제기준점(GUJE Station)의 다중기준국을 사용하였다.

관측장비는 GPS수신기는 L1, L2 반송파 관측이 가능한 TOPCON사의 JAVAD 제품을 사용하였다. 안테나는 외부형 Microstrip 타입이며, 133MHz 혹은 192MHz에서 사용이 가능한 LEGANT 제품을 이용하였다. 수신기는 GPS L1/L2(L1-C/A와 L1/L2-Full Cycle Carrier Phase, P1/P2) 관측이 가능한 LEGANT-H의 GD Type을 사용하였다.

3.1 오차보정량 분석

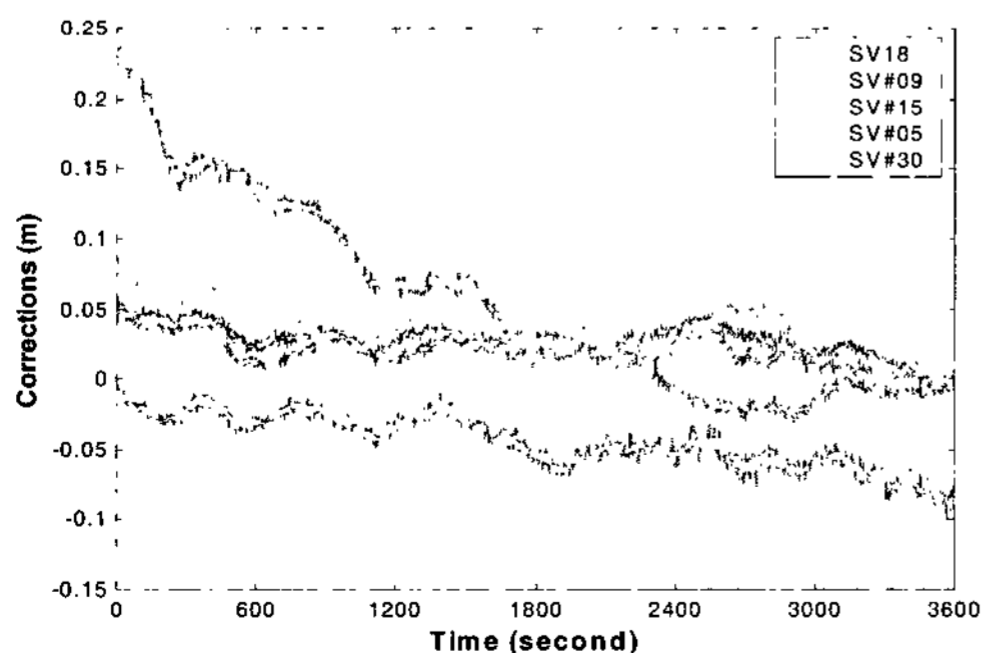
다중기준국을 이용한 GPS 반송파 상대측위 방식의 적용을 위해 먼저 기준국의 정확한 성과값을 이용해 각 기준국에서 관측된 L1, L2 반송파의 위성별 오차보정량을 산출하였다.

기선장에 따른 오차의 명확한 산출을

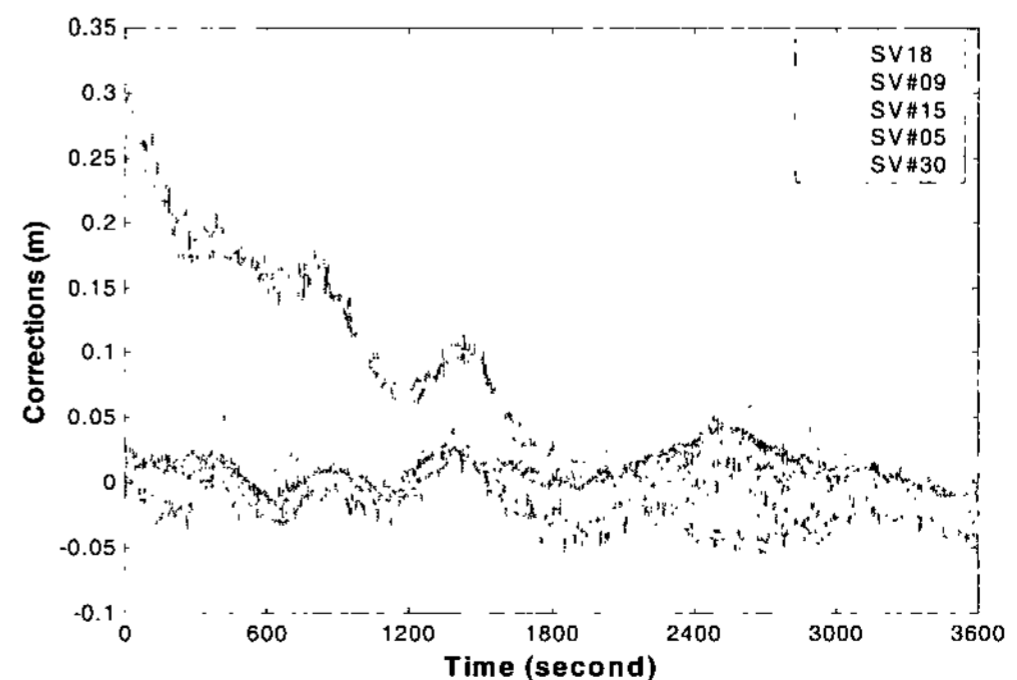
위해 사용자 수신기와의 거리는 30km 이상으로 하였으며 총 3시간 관측시간동안 산출된 오차보정량을 명확히 보여주기 위해 초기 1시간 동안의 관측자료를 [그림 4~5]에서 도시하였다. [그림 4]와 [그림 5]는 송정기준국에서 산출된 L1, L2 반송파에 따른 오차보정량을 나타내고 있다. GPS 가시위성 30번의 오차보정량이 비교적 큰 이유는 위성수신고도각이 30° 미만으로 위성기하구조가 불량하기 때문으로 사료된다. 다른 가시위성에서는 위성수신고도각이 60° 이상의 기하구조를 가지고 있으며 균일한 오차보정량을 보이고 있다. [그림 6]과 [그림 7]은 거제기준국에서 산출된 L1 반송파 오차보정량과 L2 반송파 오차보정량을 나타내고 있다. 송정기준국과 동일하게 GPS 가시위성 30번이 큰 값을 보이고 있다.

3.2 미지정수 추정 및 검증

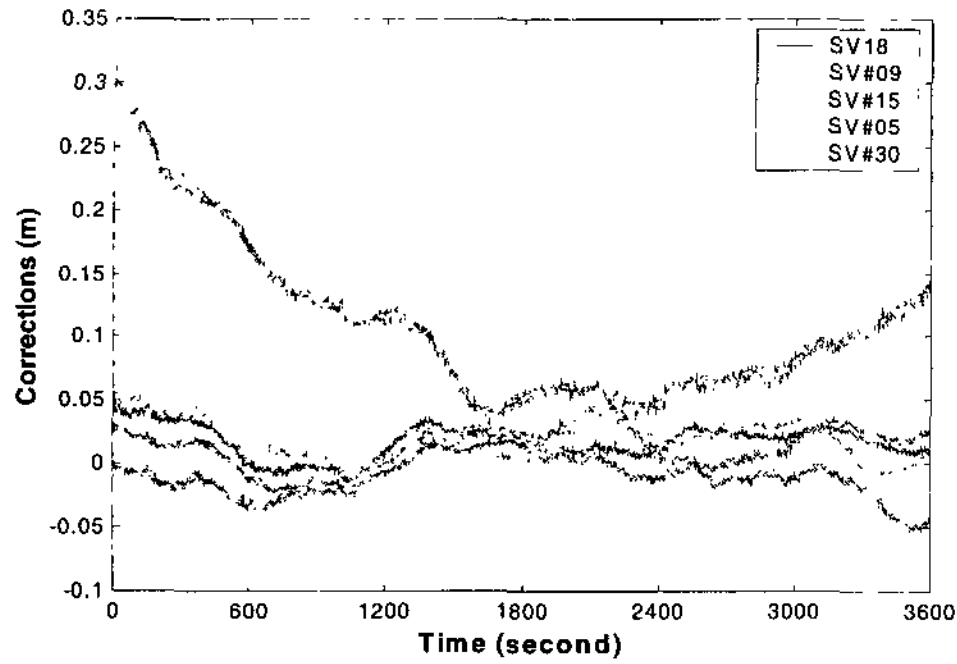
수신기와 위성사이의 정확한 의사거리를 산출하여야 한다. 이를 위해 GPS 반송파를 이용한 상대측위에서 높은 정밀도의



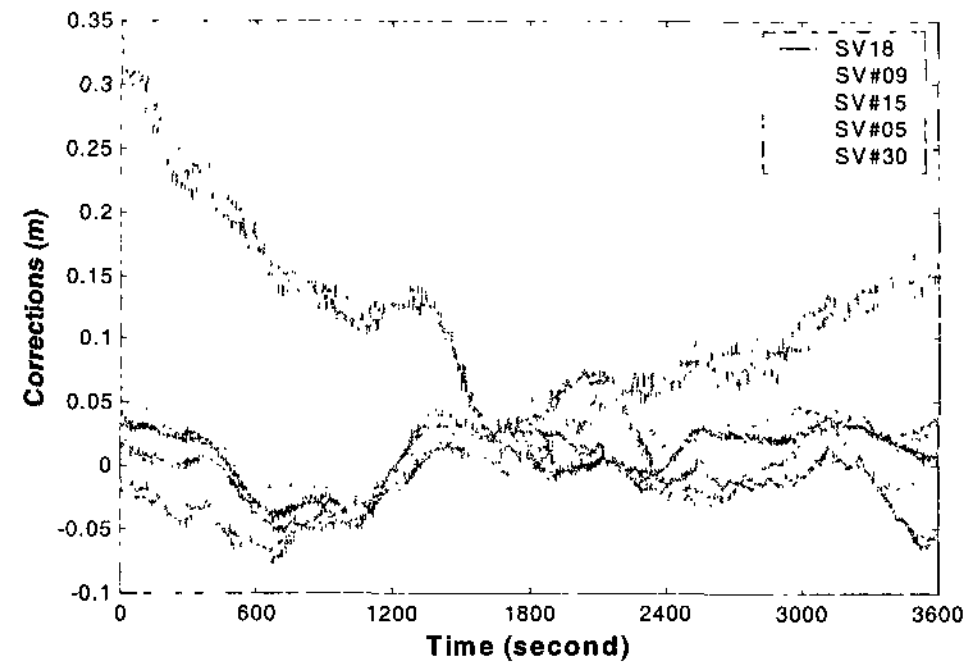
[그림 4] L1 오차보정량 산출(송정)



[그림 5] L2 오차보정량 산출(송정)



[그림 6] L1 오차보정량 산출(거제)



[그림 7] L2 오차보정량 산출(거제)

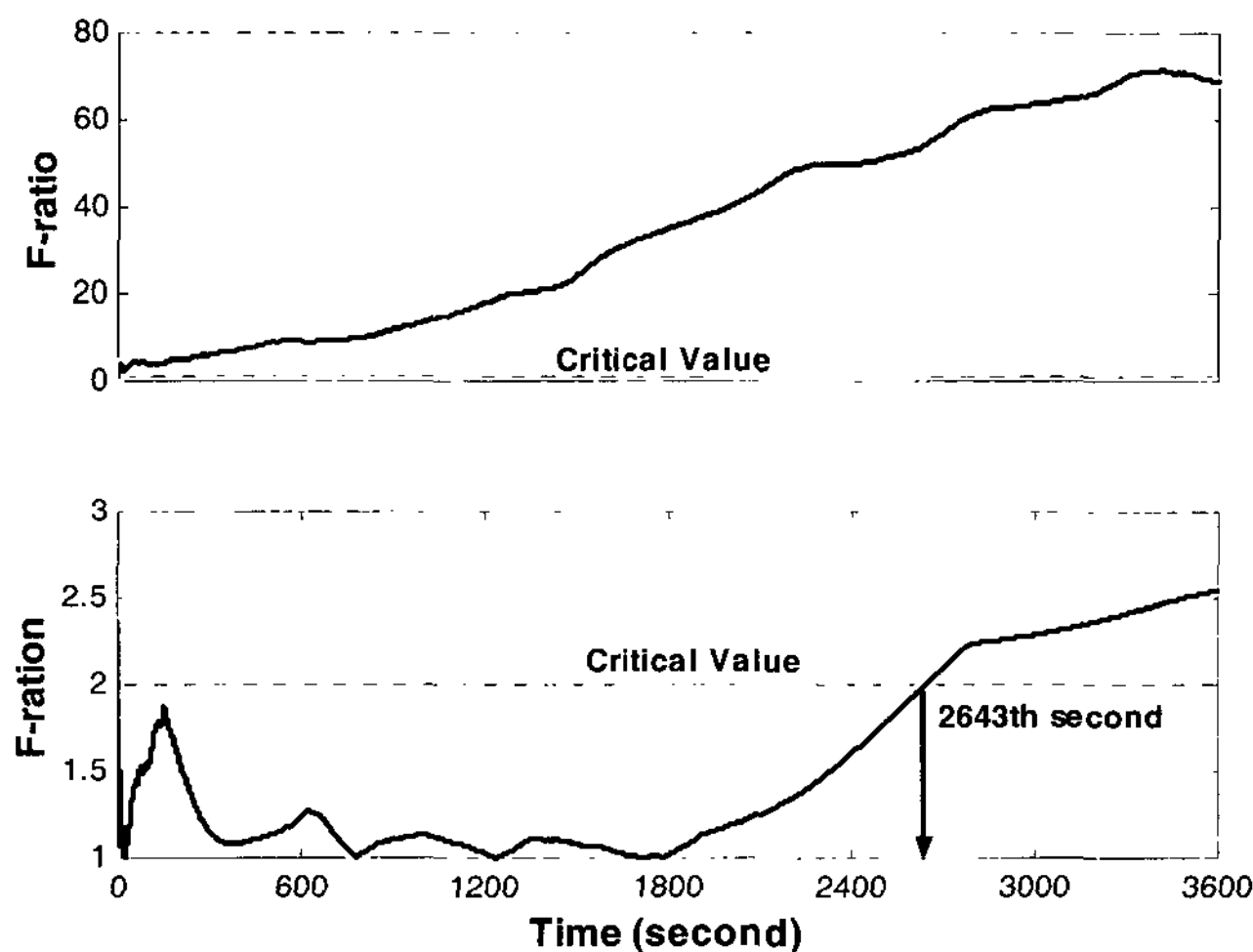
성과를 얻기 위해서는 미지정수의 결정 (Ambiguity Resolution)이 반드시 선행되어야 한다.

본 연구에서는 이동체의 미지정수 결정 기법인 OTF(On-The-Fly) 모드에서 빠른 미지정수 결정을 가능하게 하는 L1, L2 이주파수를 이용하였으며 LAMBDA(Least squares AMBiquity Decorrelation Adjustment) 기법에 근거한 순환최소자승법(sequential least squares) 기법을 사용하여 최적의 미지정수를 결정하였다. 또한 추정된 미지

정수의 타당성 검증 과정을 수행하여 미지정수 결정의 신뢰성을 증대하였다.

추정 미지정수 타당성 검증은 최적과 차선의 미지정수 후보벡터에서 얻어진 이차 형태의 추정 잔차의 비율인 F-비를 이용하여 검증하였다. 본 연구에서는 여러 참고문헌을 바탕으로 F-비에서 2.0의 임계값을 지정하여 미지정수 타당성 검증을 하였다.

[그림 8]은 32.7km 떨어진 주남기준국을 이용한 단일기준국 방식과 3개의 다중기



[그림 8] 단일기준국과 다중기준국의 미지정수 추정

준국을 이용한 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식에서 추정된 미지정수의 타당성 검증을 나타내고 있다. [그림 8]의 윗 부분은 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식으로 결정된 미지정수의 타당성을 나타내는 것으로 관측 초기에 미지정수가 결정되었으며 아래 그림인 단일기준국 방식은 한 시간의 자료처리동안 초기에는 불량한 미지정수가 결정되었으며 2643초부터 양호한 미지정수가 결정되었다.

따라서, 30km 이상의 기선에서는 불량한 미지정수의 결정으로 정확한 의사거리를 산출할 수 없으므로 사용자 수신기의 정확한 위치를 결정할 수 없었다. 하지만 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식에서는 안정적인 미지정수 결정이 가능하므로 이동체의 실시간 위치결정 성능을 증진시킬 수 있다.

3.3 오차보정량 보간 및 위치결정 분석

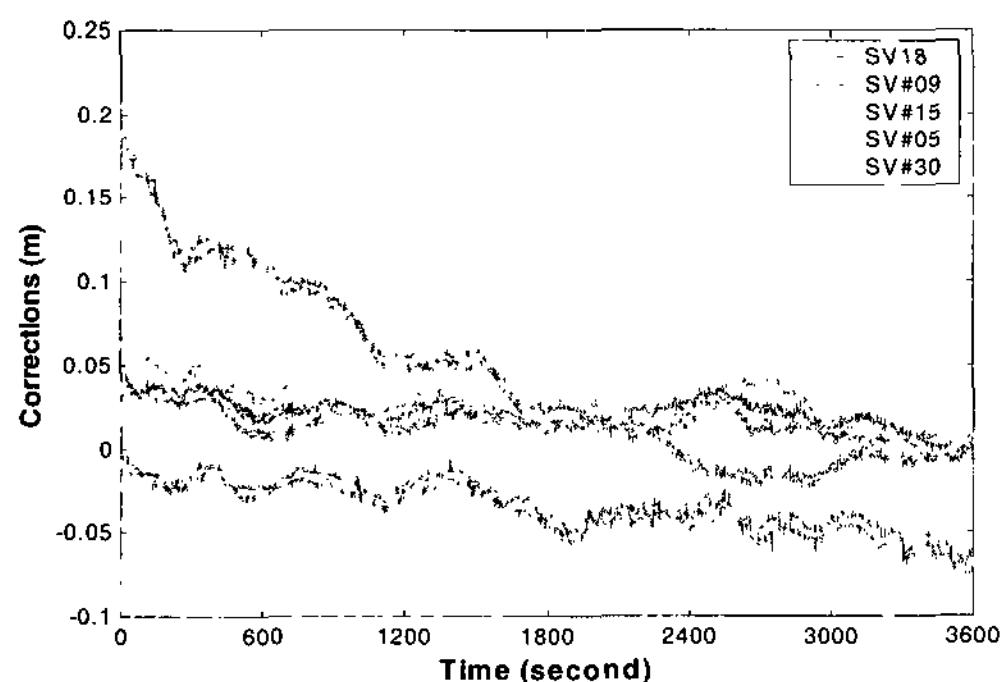
각 기준국에서 산출된 오차보정량을 사용자 수신기의 크기로 L1 반송파와 L2

반송파에 대하여 보간하였다. 처리 프로그램은 본 연구에서 개발한 DAUNet을 사용하였으며 기선길이는 기선장에 따른 오차의 영향을 받는 30km 이상이다. 오차보정량의 보간은 정확한 기지의 성과값을 이용한 기준국에서 산출된 오차보정량을 선형보간알고리즘에 기반한 면보정매개변수를 이용한 방법으로 처리하였다.

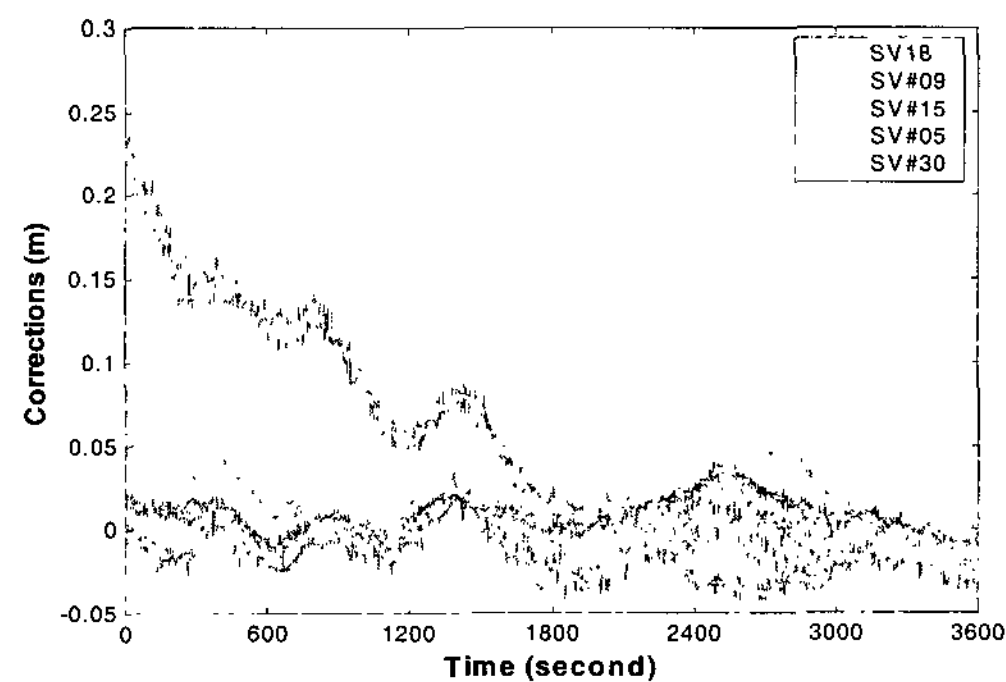
[그림 9]는 L1 반송파에 대하여 사용자 크기로 다중기준국 방식의 GPS 반송파 상대측위를 적용해 각 위성에 대한 오차보정량을 보간한 것이다. [그림 10]은 L2 반송파에 대한 오차보정량을 보간한 결과값이다. 오차보정량 산출에서와 같이 GPS 가시위성 30번은 불량한 기하구조를 가지고 있으므로 결과값에서도 큰 값을 보임을 알 수 있었다.

주남기준국을 주기준국으로 한 다중기준국 GPS 반송파 상대측위의 측위 결과를 도출할 수 있었다. 다중기준국 방식과 기존의 기선장에 따른 오차의 영향을 받는 단일기준국 방식을 [그림 11] ~ [그림 12]에서 도시하였다.

현재 이동체의 실시간 측위를 위해서는



[그림 9] L1 오차보정량 보간



[그림 10] L2 오차보정량 보간

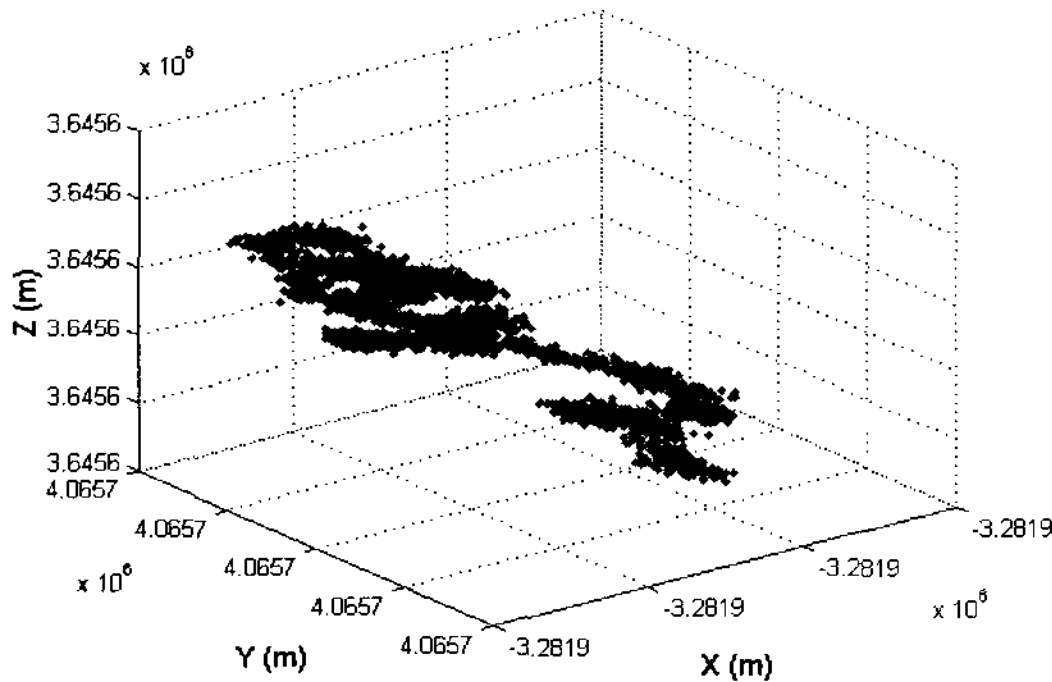
기선장에 따른 오차의 영향을 무시하기 위해 10~20km로 제한되어 있는 기선길이를 극복할 수 있는 다중기준국 GPS 반송파 상대측위 방식의 우수성을 입증하였다. 이를 위해 주남기준국을 기준국으로 한 단일기준국 방식과 3개의 다중기준국을 이용한 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식을 수행하여 비교 분석하였다. [그림 11]은 지심직각좌표(ECEF : Earth Center Earth Fixed)에 대한 결과값을 나타내고 있으며 [그림 12]는 주남기준국을 이용한 단일기준국 방식의 반송파 상대측위의 정확도 분포를 나타내고 있다.

[그림 13]과 [그림 14]는 다중기준국 GPS 반송파 상대측위의 측위 정확도를 나타내고 있다.

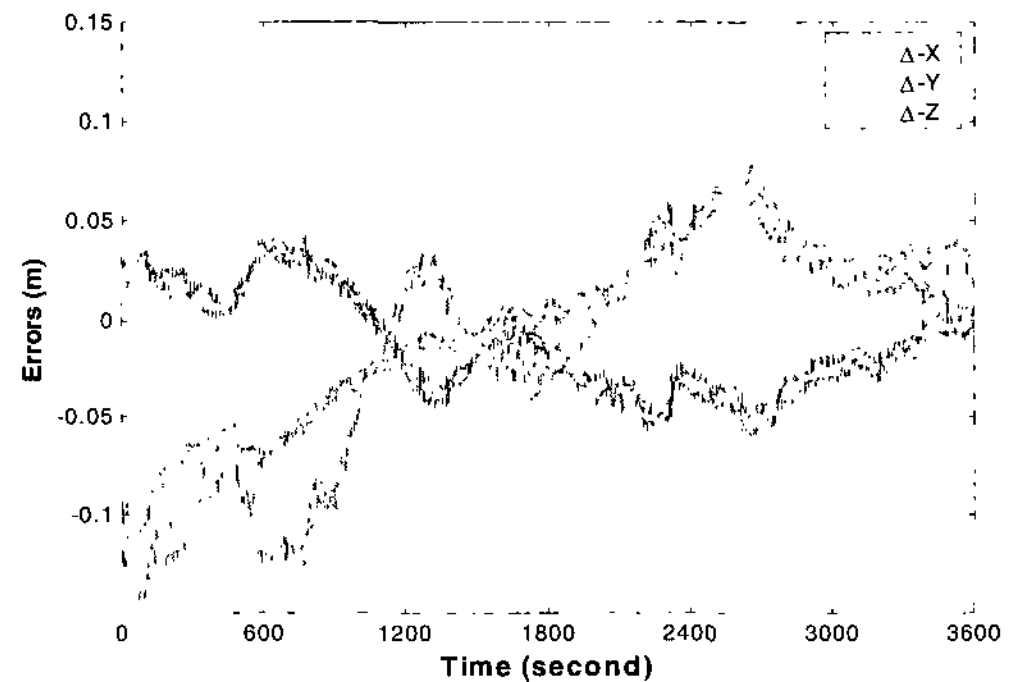
본 연구의 궁극적인 목표인 기선장에 따른 오차의 영향을 극복하여 사용자가 수 cm 수준의 정확도를 획득하는 네트워크 기반의 GPS 반송파 상대측위 방식의 구현을 나타내고 있다.

4. 결 론

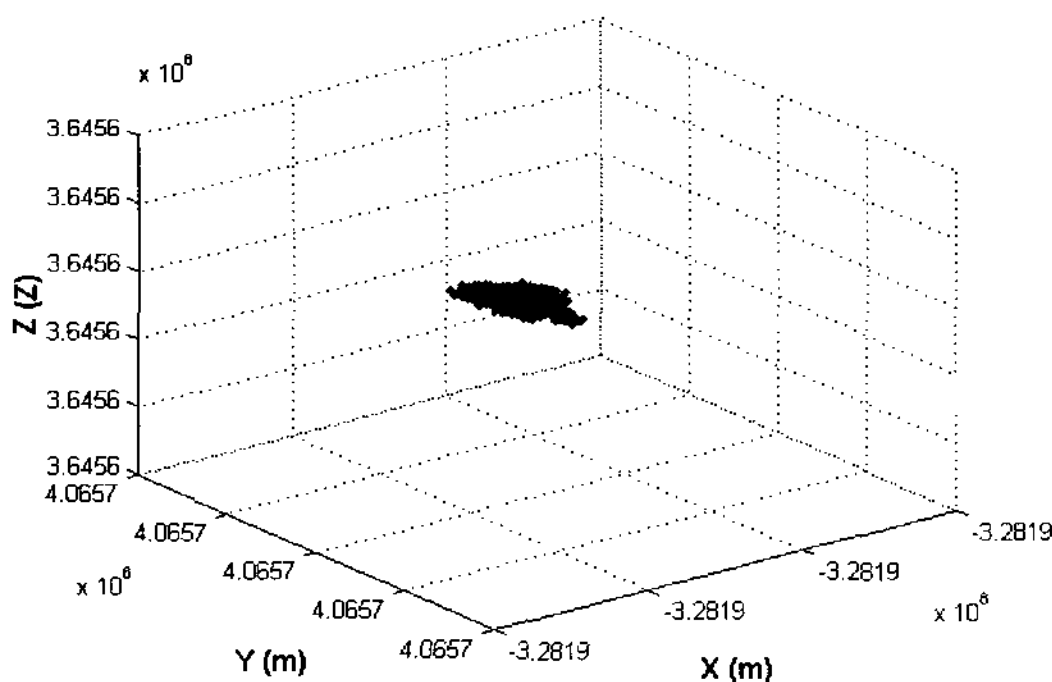
본 연구에서는 기선장에 따른 오차를



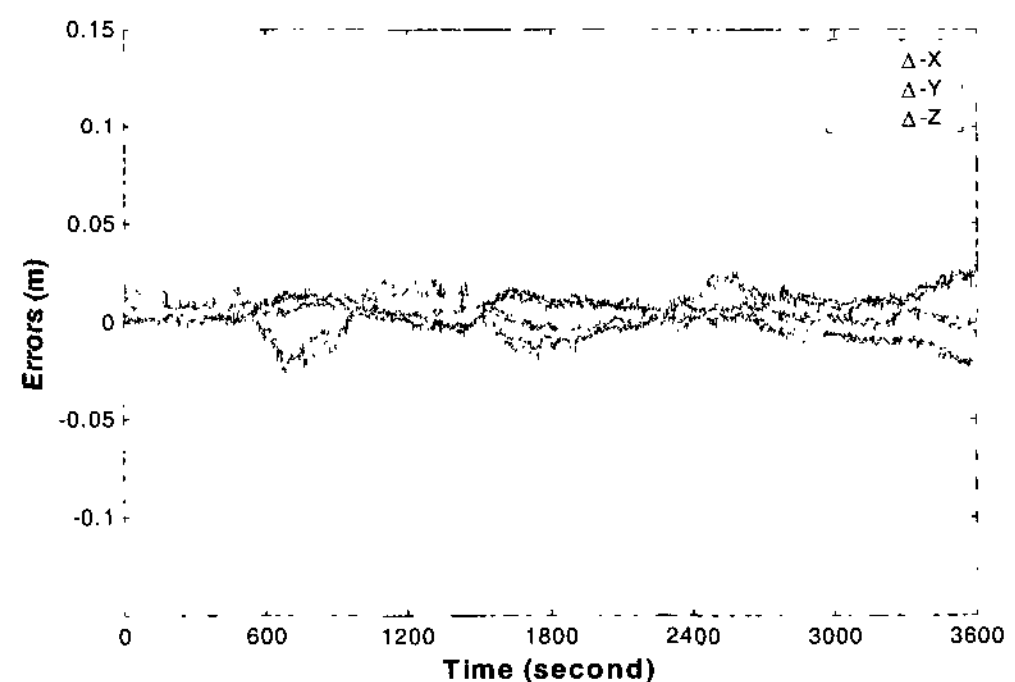
[그림 11] 단일기준국의 좌표변화



[그림 12] 단일기준국의 측위정확도



[그림 13] 다중기준국의 좌표변화



[그림 14] 다중기준국의 측위정확도

극복할 수 있는 다중기준국을 이용한 GPS 반송파 상대측위 구현을 위해 네트워크 처리 프로그램을 개발하였으며 현장 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다중기준국과 사용자 수신기 사이의 각 기선별, 위성별, 반송파별 오차보정량을 산출할 수 있었다.
2. 제안된 선형보간알고리즘을 통해 기선장에 따른 오차보정량을 산출할 수 있었으며, 면보정매개변수를 이용해 산출된 오차보정량을 사용자와 기준국들간의 기하구조에 적합하도록 보간할 수 있었다.
3. 다중기준국 방식은 관측 초기에 미지정수가 결정되었지만, 기존의 단일 기준국 방식은 불안정한 미지정수 결정을 보였다. 따라서 기선장이 증대된 이동체의 실시간 위치결정에 있어 다중기준국 방식의 안정적인 성능을 입증할 수 있다.

현재 국가 인프라로 구축되어 있는 각 기관별 상시관측소를 활용하면 사용자는 독자적인 기준국 설치의 문제를 해결할 수 있으며 이를 위해 통신문제, 각 기관별 상시관측소의 효율적인 통합 운용 및 관리의 문제를 극복하여야 한다. 증진된 통신과 상시관측소의 서비스가 이루어진다면 사용자는 독자적인 기준국 설치없이 일주파 수신기 한대만을 운용하여 2~3cm 수준의 정확도를 가진 위치결정이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

- 강준목·조성호·임영빈, 2004, "LBS를 위한 코드 DGPS 위치 정확도 향상에 관한 연구", 한국측량학회 추계학술발표회 논문집, pp. 29~32.
- Chen X., Landay H., Vollath U., 2003, "New Tools for Network RTK Integrity Monitoring," ION GPS/GNSS, pp. 1355~1360.
- G. Fotopoulos and M. E. Cannon, 2001, "An Overview of Multi-Reference Station Methods for cm-Level Positioning," GPS Solutions, Vol. 4, No. 3, pp. 1-10.
- Han S., Rizos C., "GPS Network Design and Error Mitigation for Real-Time Continuous Array Monitoring System," ION GPS, 1996, pp. 1827~1836.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J., 2004, "Global Positioning System Theory and Practice" Fifth, revised edition, Novographic. Ing, pp. 1~3.
- Wanninger L., 2004, "Ionospheric Disturbance Indices for RTK and Network RTK Positioning," ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, pp. 2849~2854.
- Well, D. E., N. Beck, D. Dlikaraoglou, A. Kleusberg, E. J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R. B. Langley, M. Nakiboglu, K. P. Schwarz, J. M. Tranquilla and P. Vanicek, 2000, "Guide to GPS Positioning" Canadian GPS Associates, Canada.