

4 수신기를 이용한 GPS 다중경로의 검출과 축소 Detection of GPS Multipath Errors Using 4-Receivers

박운용* · 정창식** · 김진수*** · 곽두호***

Park, Woon-Yong · Cheung, Chang-Sik · Kim, Jin-Soo · Kwak, Doo-Ho

要 旨

본 연구는 GPS 보조에 의한 항공삼각측량 및 자동차량항법장치 등과 같은 고정밀 측량에서 주요 오차 원인이 되고 있는 다중경로 오차를 검출하고 이를 요구 정확도로 축소시키는데 그 목적이 있다. 수신점의 다중 수신기를 고정된 후 동적 수신기가 연속적으로 이동할 때, 망조정시 smoothed 코드 측정과 순수 코드 측정을 실행하여 동적 수신기에 대한 단차분법 코드와 위치 해석에서 3차원 RMS 오차가 약 30% 축소됨을 알 수 있었다. 이러한 망조정 들은 다중 수신점에서 실행되었지만, 위치결정은 항상 동적 수신기와 하나의 기준 수신점 사이의 단차분법에 의해 실행된다는 것에 근거한 것이고, 서로 매우 근접한 수신기로부터 이중차를 이용하여 대기 오차를 포함한 모든 상관성 오차를 상당히 축소할 수 있을 뿐만 아니라 다른 처리 기법들과 조합하여 사용할 있으리라 생각된다.

ABSTRACT

This study aims to detect and to reduce the multipath errors which are main errors source in high precious surveying such as GPS-aided aerial triangulation and Car Navigation. which reference receivers being fixed, when kinematic receivers move continuously, multipath is performed using smoothed code measurement and pure code measurement in the network. Through this methods, 3D RMS errors are reduced into about 30% in the single differential code solution to the kinematic receiver. This is based on the fact that the network adjustment are performed at multiple reference receivers, but positioning is carried out by the single differential methods between a reference receiver and a kinematic receiver. So it was supposed that this methods reduced the correlation errors including the atmospheric errors using the nearest receivers and can be mixed with another methods.

1. 서 론

측지학이란 고전적인 의미에서 단지 지구표면을 측량하여 세 점간의 위치를 결정하고 이를 지도화하는 학문에 국한되었다. 그러나 이후 측량기술과 장비의 발전으로 지하 및 해양은 물론 우주공간상의 문제해결에 이르기까지 확산되었으며, 60년대 이후 지구관측위성의 실용으로 지구상의 위치결정문제를 신속·정확하고 광역적으로 해결 가능케하여 고전적 의미를 완전히 변화시켜 놓았다.¹⁾ 특히, GPS 위성은 완전한 배치와 수신기의 향상으로 지구상의 언제, 어디에서나 시간대에 관계없이 cm 정확도의 3차원 위치결정이 가능하였으며,

국가 기준점 설치, 지적측량과 같은 직접적인 위치 결정뿐만 아니라 선박과 차량 등의 위치추적, 항공기나 위성탑재기의 궤적 및 자세결정에까지 그 범위가 확대되고 있는 실정이다.²⁾

GPS 측정값의 활용방법에서는 코드 측정, 반송파 수정에 의한 코드 측정 및 순수 반송파 측정 등으로 구분되며, 이들 위치 결정 정확도는 매우 다르다. 코드 측정은 낮은 정확도 때문에 측지 측량에서는 완전히 제외되며, 반송파 개선에 의한 코드 측정은 현재 그 정확도가 0.5~1.5 m에 이르고 있으나 고정밀도 측량문제 해결에서는 역시 부족하므로 반송파 측정에 의해 고정밀측량이 가능하다. 반송파 측정의 기본 원리는 위성에서 송신한 반송파와 지상의 수신기에서 수신된 반송파의 위상차를 측정하는데 있으며, 위상변이의 크기는 항상 한 파장이 0~2π내에 있기 때문에 매우 정확한 결정이

*동아대학교 공과대학 건설공학부 교수
**정회원 · 공학박사
***동아대학교 대학원 토목공학과 박사과정

가능하므로 측정오차는 단지 0.2~0.3 mm 정도로 매우 작다.^{3,5)}

1982년 Hatch는 코드파와 반송파 측정을 smoothing 처리로 코드파 다중경로를 축소하는 방법을 연구하였고,³⁾ Tranquilla(1994)은 저-다중경로 환경에서 GPS 수신기를 설치하여 실험하였으며,⁶⁾ Hardwick(1995)은 다중경로를 모델화하기 위해 시도했다.⁴⁾ 또한 Spradley(1993)은 다중경로 환경에서 오차축소를 위해 다중 수신기 이용을 제안했고, Axelrad(1996)은 신호대잡음비를 이용하여 반송파 다중경로를 추정하였으며, Raquet(1996)은 망조정 방법을 이용하여 각 수신기의 코드파와 반송파 측정으로 다중경로를 추정하여 축소하기 위해 연구하였다.⁷⁾

본 논문에서는 이러한 코드파와 반송파 다중경로의 정확한 검출을 위해 4개의 수신기를 GPS 수신점에 설치한 후, 각각의 수신기/위성에서 다중경로 오차를 검출하였다.^{7,8)} 또한 처리는 반송파 smoothed 코드파 측정과 순수 코드파 측정을 실행하여 두 결과들을 비교하였다. 이 방법의 장점은 서로 매우 근접한(약 50 m 이하) 수신기로부터 이중차를 사용하여 대기 오차를 포함한 모든 상관성 오차들을 상당히 축소할 수 있을 뿐만 아니라 다른 처리 기법들과 결합하여 사용할 수 있다는 것이다.

2. GPS 수신점의 다중경로 검출 이론

2.1 다중경로 오차 추출

Network 조정방법에 최소제곱 조건조정은 모든 관측에 대한 보정 결과로서 각각의 관측 epoch에 적용되며, 조건은 조정된 관측의 모든 이중차-계산된 거리가 0이다. 계산된 거리(벡터 R)는 수신기의 기지 위치와 궤도력 데이터로부터 계산된 위성 사이의 거리이다. 이때, 의사거리의 기본방정식은

$$P = \rho + c(dt - dT) + d_{ion} + d_{trop} + e \quad (1)$$

보정된 관측을 \hat{P} 로 놓으면, 보정된 의사거리 방정식은

$$\hat{P} = \rho + \delta\rho$$

그때 관측에 대한 보정은

$$\hat{\delta\rho} = -C_p B^T [B C_p B^T]^{-1} \nabla \Delta \Xi \quad (2)$$

$$B = \frac{\partial(\nabla \Delta \Xi)}{\partial \rho} \Big|_{\rho} \quad (3)$$

여기서, P: 의사거리 관측값

ρ : 위성과 수신기 사이의 거리

c: 빛의 속도

dt, dT: 위성과 수신기의 시계오차

d_{ion} , d_{trop} : 전리층과 대류권 지연오차

e: 의사거리에 대한 다중경로

$\nabla \Delta \Xi$: 모든 독립적인 이중차된 관측-거리값 ($\nabla \Delta(\rho - R)$)의 벡터

C_p : 의사거리 측정 ρ 에서 오차의 분산-공분산 행렬

의사거리와 반송파 측정은 식 (1)처럼 여러 오차에 영향을 받는다. 이들 오차를 제거하거나 축소하기 위한 효과적인 방법은 수신기와 위성 사이의 측정을 차별하는 것이다. 동일 위성에 대해 두 수신기에 연속적으로 수집된 차별측정은 위성 시간 오차를 제거할 것이고, 위성궤도와 대기 오차를 상당히 축소할 것이다. 이러한 처리는 수신기 사이의 단차분(Δ)이라 부른다. 만약 두 개의 다른 위성에 관련된 연속적인 수신기 사이의 단차분이 또 차별된다면, 수신기 시간 오차는 소거되고, 이러한 관측을 이중차($\Delta \nabla$)라 부른다. 이중차 관측방정식은 일반적으로 아래처럼 전개된다.

$$\nabla \Delta p = \nabla \Delta p + \nabla \Delta dp + \nabla \Delta d_{ion} + \nabla \Delta d_{trop} + \nabla \Delta \epsilon(p_{multi}) + \nabla \Delta \epsilon(p_{rx}) \quad (4)$$

$$\nabla \Delta \phi = \nabla \Delta p + \lambda \nabla \Delta N + \nabla \Delta dp - \nabla \Delta d_{ion} + \nabla \Delta d_{trop} + \nabla \Delta \epsilon(\phi_{multi}) + \nabla \Delta \epsilon(\phi_{rx}) \quad (5)$$

$$\nabla \Delta \dot{\phi} = \nabla \Delta \dot{p} + \nabla \Delta \dot{dp} - \nabla \Delta \dot{d}_{ion} + \nabla \Delta \dot{d}_{trop} + \nabla \Delta \epsilon(\dot{\phi}_{multi}) + \nabla \Delta \epsilon(\dot{\phi}_{rx}) \quad (6)$$

다중 안테나 시스템에서 다중 안테나 사이의 짧은 기선 거리에 의해, 즉, 일반적으로 <50 m일 때, 방정식 (4), (5), (6)에 표시된 공간적으로 상관된 전리층과 대류권 오차뿐만 아니라 궤도 오차가 실제로 이중차에 의해 소거되고, 상대위치결정에서 이들 오차의 영향은 무시될 수 있다. 남겨지는 오차는 단지 수신기 잡음과 다중경로 영향이다.^{7,10)} 또한 본 연구의 다른 형태의 2 수신기를 사용했으므로, 수신기의 위상 offset을 고려해야 하지만, 두 수신기 상의 위상 offset 차가 X와 Y에 대해 1 cm 이하라서 고려하지 않았다.¹¹⁾

이러한 차분법에 의해 아래 그림 1은 수신기와 위성 수의 함수로서 이 방법의 유효성을 보여주는 그림이다. 이 그림에서는 망조정을 적용하여 획득된 다중경로와 잡음의 표준편차 감소율을 보여주고 있다. 그것은 더 많은 수신기와 위성이 더 좋은 결과를 나타내며, 단지 두 수신기와 7~8개의 가시 위성일 때 25% 축소될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

그러나 이 그림에서 다중경로 오차는 가우스 분포이며, 모든 수신기와 위성 사이가 동일하다고 가정하고, 이들 가정이 상황마다 사실이 아닐지라도 그들은 만족스럽게 작업할 수 있는 방법으로 어느 정도의 개략적 추정을 획득하기에는 적당하다.

2.2 다중경로의 이론적 계산 결과

이론적 계산은 야외 실험의 결과가 그림 1과 일치한다는 것을 보여주기 위해 계산되었다. 먼저, 아래 과정을 풀기 위한 가정 조건은 다중경로 외의 다른 모든 오차가 없다는 것이고, 이동하는 동적 수신기의 다중경로가 가장 낮은 표준편차이며, network 비조정 동적 수신기(σ_{mob})와 기준 수신기(σ_{ref})에서 다중경로와 잡음에 대한 표준편차가 아래 식으로 가정되면,

$$\sigma_{mob} = 0.75 sm \quad (7)$$

$$\sigma_{ref} = sm \quad (8)$$

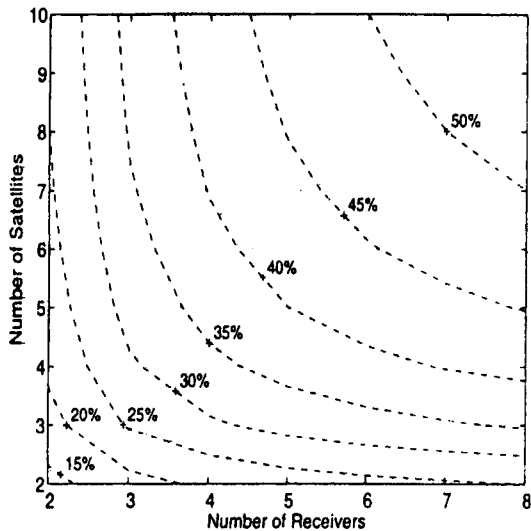


그림 1. 수신기와 위성 수에 따른 다중경로와 잡음의 오차 감소율

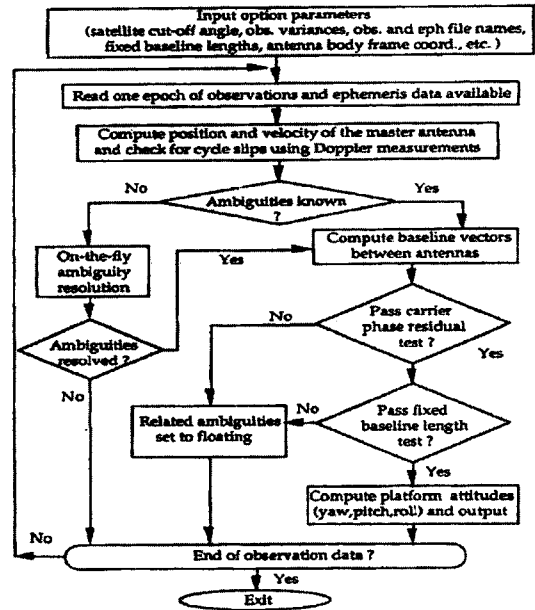


그림 2. Prism 데이터 처리 흐름도

여기서, s 는 scaling 상수이고, m 은 다중경로 오차이다. 이때, 전체 위치결정 오차(σ_{pos})는

$$\sigma_{pos} = PDOP \sqrt{\sigma_{mob}^2 + \sigma_{ref}^2} = 1.25(PDOP)s \quad (9)$$

만약 4 수신기와 6.6개의 가시 위성(실험 기간에 대한 평균값)을 가지고 망조정한다면, 그림 1은 다중경로와 잡음 오차에서 대략 40% 축소될 수 있다는 것을 보여준다. 그래서 기준 수신기에서의 조정된 표준편차는 지금 $\sigma_{ref,adj} = 0.6 s$ 이다. 기준 수신기가 조정되었을 때, 전체 위치결정 오차는

$$\sigma_{pos,adj} = PDOP \sqrt{\sigma_{mob}^2 + \sigma_{ref,adj}^2} = 0.96(PDOP)s \quad (10)$$

마지막으로, 기준 수신기에서 망조정을 적용하여 획득된 전체 위치결정 오차에 대한 추정된 감소율은

$$\frac{\sigma_{pos} - \sigma_{pos,adj}}{\sigma_{pos}} = \frac{(PDOP)s(1.25 - 0.96)}{(PDOP)s 1.25} = 23\% \quad (11)$$

3. 실험 및 분석

3.1 수신기 배치

전체 4개의 기준 수신기 중 수신기 1과 2는 Ashtech사의 microstrip형 수신기이고, 수신기 3과 4는 Topcon

사의 choke-ring형 수신기이다. 이들 전체 4 수신기 모두 L_1/L_2 안테나를 가진 이중주파수 12채널 수신기로서 이것은 동아대학교 공대 3호관 건물 옥상 위에 설치되었다. 기준 수신기 1은 임시 기준점 위에 설치되었고, 수신기 2는 수신기 1로부터 약 22 m 떨어진 위치에 설치되었고, 수신기 3은 수신기 1로부터 20 m, 수신기 4로부터 10 m 떨어진 위치에 설치되었고, 수신기 4는 수신기 2로부터 25 m 떨어진 위치에 설치되었다. 모든 기준 수신기로부터의 데이터는 1 Hz 비율로 수집되었으며, 각 기준 수신기의 위치는 그림 3과 같이 배치되었다.

또한 수신기 2, 3, 4의 위치는 Prism 소프트웨어 처리에서 생성된 위치로 결정되었고, 반송파 미지정수를 사용하여 수신기 1에 상대적으로 계산되었다. 한 시간에 대한 평균 위치는 이들 수신기들에 대한 실위치로 획득되었으며, 기준 수신기 사이의 상대위치는 1~2 cm의 정확도로 추정되었다. 정확도 수준은 측점에서 실제 다중경로 조건에 따라 약 0.1~1 m의 정확도를 가진 코드 관측의 조정과 분석을 위해 충분하다. 건물 지붕 위의 몇몇 가능한 반사적인 면이 있다는 것은 과거의 실험에 의해 알맞은 다중경로 환경으로 나타낼 수 있다.

또한 동적 관측을 위해 트럭 지붕 위 25 cm에 설치된 수신기는 Ashtech사의 microstrip형 L_1/L_2 안테나이며, 원시 관측 data는 1 Hz 비율로 수집되었고, 그림 3에서 두꺼운 선은 빠르게 결정된 미지정수를 가진 유효한 이중차 반송파 위치 해석을 한 부분이다. 관측 데이터는 확실히 신뢰할 수 있는 결과로 실행되었다. 실

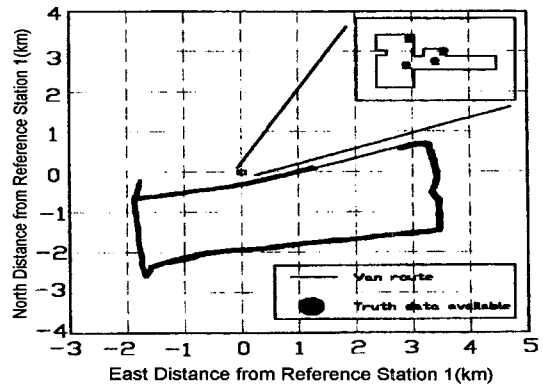


그림 3. 수신기 배치

제 데이터의 추정된 정확도는 2~3 cm이며, 실제 데이터가 없는 지역은 아파트와 같은 건물이 상당히 높은 국부지역이다.

3.2 Kinematic 실험 분석

동적 수신기의 위치는 단일 주파수 L_1 데이터를 Prism 소프트웨어를 이용하여 코드 단차분법 위치결정으로 계산되었다. 이들 코드에 의한 해석 정확도는 실제 데이터와 계산된 데이터를 비교하여 평가되었다. 그림 4는 각각의 기준 수신기 1이 망조정없이 순수 코드를 단차분법으로 처리했을 때 차량의 RMS 오차 요소를 보여준다.

또한 그림 4는 기준 수신기와 동적 수신기의 smoothing없이 순수 코드만을 처리하여 나타내었으며, 39분 55초, 56분 35초에서 위성수가 4이하가 되어 RMS 오

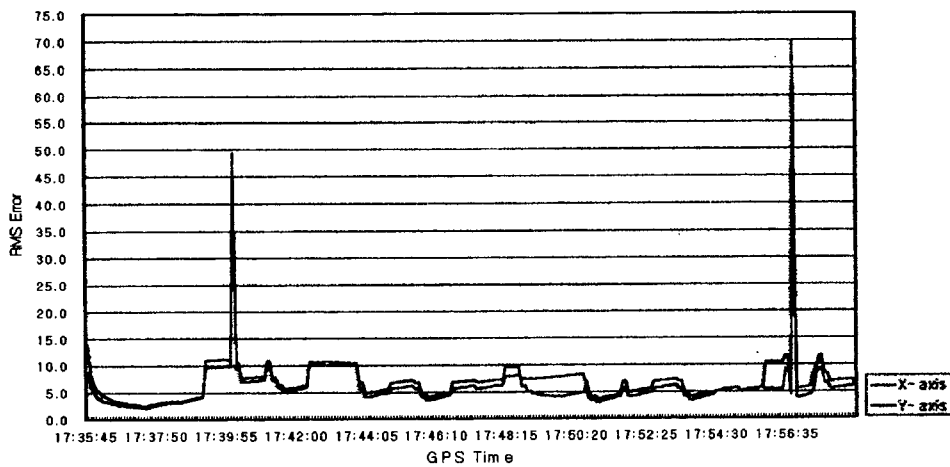


그림 4. 망조정 전 기준 수신기 1에 대한 차량의 단차분 코드 RMS 오차(Unsmoothed).

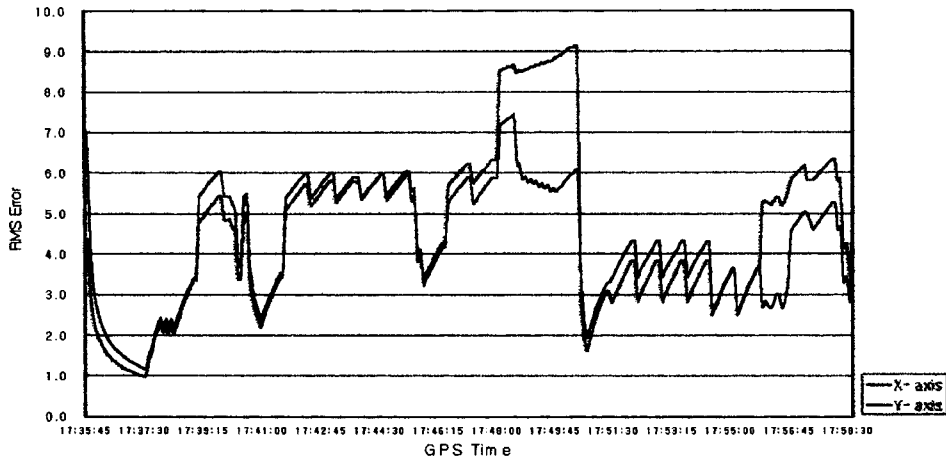


그림 5. 망조정 전 기준 수신기 10에 대한 차량의 단차분 코드 RMS 오차(Smoothed)

차가 각각 50 m, 70 m 정도 발생한 것을 알 수 있다. 이것은 앞서 말한 바와 같이 고층 빌딩에 의한 신호 차단에 의해 순간적으로 발생되었다.

그림 5는 동적 수신기와 기준 수신기의 smoothing 처리된 기준 수신기 1에 대한 차량의 단차분 코드 해석으로서 그림 4에서의 과대 오차가 소거됨을 보여주고 있다. 이것은 망조정 방법의 효과성과 반송파 smoothing 처리에 의한 잡음의 축소를 보여준다.

그림 6은 기준 수신기 데이터가 망조정 방법을 사용하여 보정된 것 외에는 그림 4와 동일한 방법으로 처리된 것을 보여주고 있다. 망조정이 기준 수신기의 다중 경로 오차를 축소할 수 있기 때문에 그림 5에 보여준 비-조정된 값에 대한 수신기 잡음 오차는 전체 정확도

에서 반송파 smoothing 처리 결과로 할 수 있다.

기준 데이터는 반송파 smoothed와 망조에 의해 조정될 때, 두 과정의 실행 순서는 중요하지 않다. 이것은 다른 오차 축소 방법과 결합시켜 사용할 때 망조정 방법의 가능성을 명백히 설명할 수 있으며, 망조정 방법이 어떤 다른 오차 축소 방법과 결합하여 사용된다면 다중경로와 수신기 잡음이 점진적으로 축소될 것이다. 이것은 다른 수신기로부터의 관측 또는 단일 수신기내의 관측 사이의 상관성 오차를 야기하지 않는다.

3.3 통계적 분석

망조정들은 다중 기준 수신기에서 실행되었지만 위치결정은 항상 동적 수신기와 하나의 기준 수신기사이

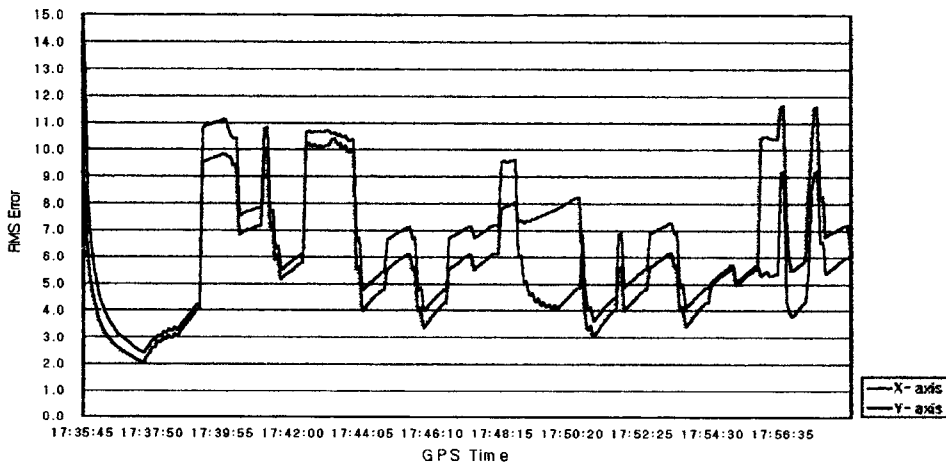


그림 6. 망조정시 기준 수신기 10에 대한 단차분 코드 RMS 오차(Un-smoothed)

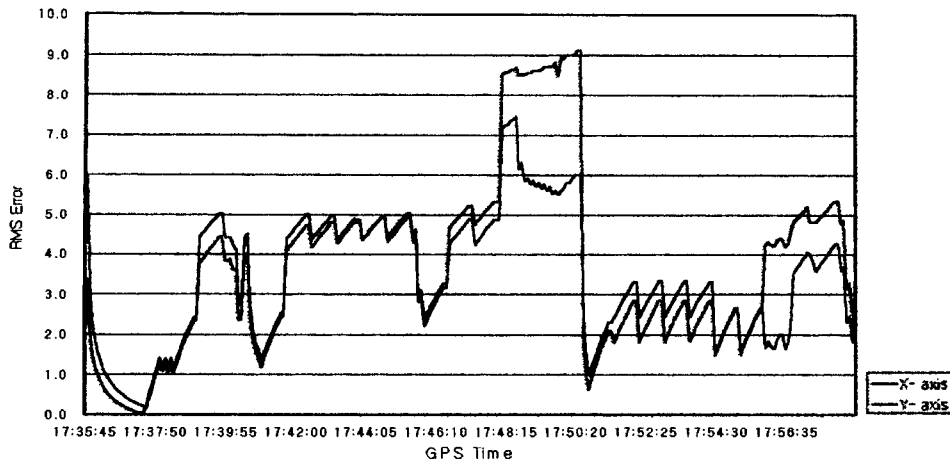


그림 7. 망조정시 기준 수신기 10에 대한 단차분 코드 RMS 오차(smoothed)

의 단차분법에 의해 실행되었다. 완전하게 조정되지 않은 관측들은 각각의 기준 수신기와 동적 수신기사이의 단차분법 코드 위치를 개별적으로 실행하여 결정되었고, 동적 수신기에서의 위치 오차는 실제 데이터에 상대적으로 계산하였다. 평균제곱오차(RMS)는 북, 동, 연직 방향(RMS_{east} , RMS_{north} , RMS_{vert})에 대해 개별적으로 계산되었다. 추가적으로, 3D RMS(RMS_{3D})는

$$RMS_{3D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i^2}{n}} \quad (12)$$

여기서, n 은 점의 수이고, ΔP_i 는 3D 위치 오차의 크기이다. 북, 동, 연직 방향에서 평균 오차가 0이라고 가정하고 세 방향에서 오차의 표준편차가 동일하다면, 오차

표 1. 망조정에 사용된 기준 수신기를 이용한 모든 실행

Reference receiver used for single difference positioning	Reference receiver used for network adjustment
1	1 and 2
2	1 and 2
1	1 and 3
3	1 and 3
1	1 and 4
4	1 and 4
2	2 and 3
3	2 and 3
2	2 and 4
4	2 and 4
3	3 and 4
4	3 and 4

크기가 3D RMS 값보다 작은 60.8% 확률을 나타낸다.

또한, 단 하나의 기준 수신기를 사용하여 전체 4 실험을 실행했고, 4개의 RMS 통계치는 각 실행에 대해 개별적으로 계산되고 기록되었다. 그때, 모든 기준 수신기에 대한 평균 또는 대표 값을 측정하기 위해 4 실험으로부터 RMS 값은 동, 북, 연직, 3D 위치 오차에 대한 평균 RMS 값을 획득하여 평균되었다. 이들 평균 RMS 값은 단지 하나의 기준 수신기가 사용될 때 RMS 위치 오차(동, 북, 연직, 3D)의 기대값으로 설명될 수 있다.

그림 8은 동, 북, 연직, 3D에 대한 평균 RMS 오차를 나타내며, X축상의 1은 망조정이 실행되지 않았다는 것을 의미한다. 이 그림은 4개의 기준 수신기보다는 단지 한 수신기를 사용할 때 3D RMS 오차에서 전체 40% 정도의 축소를 보여준다. 하나의 기준 수신기에 대한 그림 8에서의 RMS 값들은 평균 코드 단차분법 위치결정을 나타낸다. 동, 북, 연직오차에 대해 각각 0.324 m, 0.446 m, 0.984 m의 단차분법 RMS 오차로 나타났다. 이것은 그림 8의 우측값인 0.240 m, 0.135 m, 0.293 m과 대조된다.

그림 8은 4개의 수신기를 가지고 망조정을 사용할 때 3D RMS 오차에서 약 30% 축소를 보여주며, 이것은 단지 코드로부터 반송파 smoothing 처리가 기준 수신기와 이동 수신기 둘 다에 실행되었다. 또한 반송파 smoothing 처리를 사용할 때 동, 북, 연직 방향에서의 RMS 오차는 각각 0.194 m, 0.280 m, 0.581 m이며, 이들은 그림 9의 가장 우측에 보여준 0.143 m, 0.081 m,

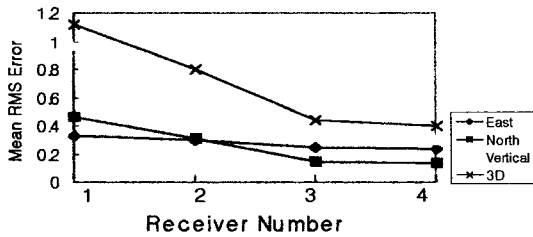


그림 8. 망조정(Unsmoothed) 기준 수신기의 위치 결정 정확도

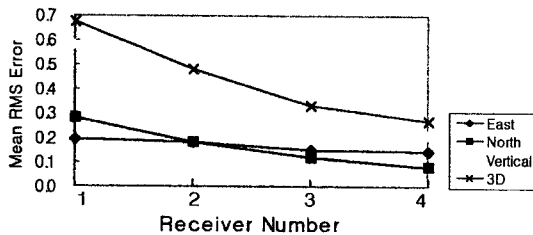


그림 9. 망조정(smoothed) 기준 수신기의 위치 결정 정확도

0.211 m의 결과와 대조된다. 이 망조정 방법은 반송파 smoothing 처리가 있던지 없던지 간에 동일하게 작업할 수 있다는 것을 보여주며, 망조정 방법이 관측에 의한 중요한 상관성이 야기되지 않는 다른 다중경로 축소 기법과 결합하여 효과적으로 적용될 수 있다는 것을 보여 준다.

4. 결 론

본 연구에서는 GPS를 이용한 고정밀도 측량시 발생 되는 오차를 검출하여 축소할 수 있는 새로운 방법을 제시하고자 다중경로와 수신기 잡음 오차를 검출하고, 다중 수신기를 이용한 망조정과 smoothing 처리 기법을 결합하여 이들 오차를 축소시켜 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 관측시 발생하는 다중경로와 수신기 잡음 오차를 효과적으로 처리하기 위해 망조정과 smoothing 처리기법을 동시에 처리하여 동적 매개체에 대한 단차분별 위치오차가 3D RMS에서 약 30% 정도가 축소됨을 알 수 있었다.

2. 다중 수신기를 이용한 망조정 방법은 code파와 반송파 둘 다에서 사용될 수 있으며, 다른 다중경로 축소 기법과 결합하여 효과적으로 적용될 수 있다는 것을 보

여주었다. 또한 모든 실행이 실시간으로 각각의 기준 수신기의 데이터를 조합함으로써, 기준 수신기 위치에서 다중경로 원인을 간파할 수 있는 장점이 있다.

3. 가장 최적의 기하학적 수신기 위치에 다중경로 오차에 가장 효과적인 choke-ring 안테나를 사용하여 관측된 데이터를 반송파 smoothing 기법으로 처리한다고 할지라도 다중경로 오차는 여전히 존재하지만, 반송파와 코드파의 최적 결합으로 다중경로 오차를 수 cm 정도로 감소시킬 수 있다.

참고문헌

1. 신상철, "GPS 보조에 의한 항공사진측량의 블록조정", 동아대 대학원 박사논문, 1998.
2. Bradford W. Parkinson, James, J. and Spilker Jr., "Global Positioning System: Theory and Applications", Vol. 1, pp. 469-483.
3. Cannon, M. E. and Lachapelle, G., "Analysis of a High Performance C/A Code GPS Receiver in Kinematic Mode", Journal of ION, Vol. 39, No. 3, 1992, pp. 285-299.
4. Hardwick, C. D. and Liu, J., "Characterization of Phase and Multipath Errors for an Aircraft GPS Antenna", in Proceedings of the Eighth International Technical Meeting of The Satellite Division of The Institute of Navigation(ION GPS-95), Palm Springs, CA, 1995, pp. 491-498.
5. Hatch, R., "The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements", in Proceedings of Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Washington, D. C., 1982, pp. 1213-1232.
6. Tranquilla, J. M., Carr J. P. and Al-Rizzo, H. M., "Analysis of a Choke-ring Groundplane for Multipath Control in Global Positioning System(GPS) Applications", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 42, No. 7, 1994, pp. 905-911.
7. Raquet, J., "Multiple Reference GPS Receiver Multipath Mitigation Technique", in Proceeding of the 52nd Annual Meeting of the Institute of Navigation, Cambridge, MA, 1996, pp. 681-690.
8. Townsend, B. and Fenton, P., "a Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver", in Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation(ION GPS-94), Salt Lake City, UT, 1994, pp. 143-148.

9. Kumar, R. and Lau, K., "Deconvolution Approach to Carrier and Code Multipath Error Elimination in High Precision GPS", in Proceedings of the 1996 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, Santa Monica, CA, 1996.
10. Gang, Lu., "Development of a GPS Multi-Antenna System for Attitude Determination", Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, 1995.
11. GRD ant_info, "http://www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/Projects/ANTCAL/Files/ant_info.002"