

실시간 GPS 정밀 측위를 위한 소프트웨어의 실험적 비교 Experimental Comparison of Software for Real-time GPS Precision Positioning

이기도* · 최윤수** · 이임평***

Lee, Kido · Choi, Yunsoo · Lee, Impyeong

要 旨

GPS 기술의 빠른 발전에 힘입어 정밀 측위 분야에도 GPS의 활용은 증가하고 있다. GPS로부터 정밀한 좌표를 획득하기 위해서 GPS 신호에서 모호 정수값을 정확하게 결정하는 것이 중요하다. 이를 위해 기존에는 다중시점(multi-epoch) 데이터를 사용한 방법이 일반적이었으나 최근에 단일시점(single-epoch) 데이터를 이용한 방법이 개발되었다. 이에 본 연구는 각각의 방법이 구현된 세 가지 소프트웨어를 활용하여 GPS 기선해석과 관련된 다양한 실험을 수행하여 결과를 분석하였다. 이를 통해 실시간 정밀 측위에 대한 이용 가능성을 검증하였다.

핵심용어 : GPS, 기선해석, 정밀측위, 다중시점, 단일시점

Abstract

GPS has been increasingly used in high precision positioning thanks to rapid advances of GPS technology. In order to acquire precise coordinates from GPS, it is important to solve accurately integer ambiguity inherent in GPS signals. The previous methods to solve this ambiguity were mostly based on multi-epoch data but recently a method based on single-epoch data has been developed. In this study, we selected three sets of software based on these methods, applied them to GPS baseline processing, and analyzed the experimental results. From these analyses, we have also verified the potential of their uses in real time precision positioning.

Keywords : GPS, baseline processing, precision positioning, multi-epoch, single epoch

1. 서 론

GPS의 이용 초기에는 정밀도의 한계로 인해 이용 범위가 항법에 국한되어 있었다. 최근에는 GPS 기술의 빠른 발전으로 인해 높은 정확도를 요구하는 정밀 측량 분야에도 GPS가 폭넓게 이용되고 있다. 국내에도 GPS가 많이 보급되어 현재 측지 및 측량 분야에서는 삼각점 등의 정비를 위하여 GPS를 이용한 정밀 측량을 실시하고 있다.

정밀 측량을 위해 GPS 신호로부터 정밀한 3차원 좌표를 계산하기 위해서는 모호 정수 값(integer ambiguity)이 정확하게 결정되어야 한다. 모호 정수값은 위성에서 수신되는 반송파의 위상의 파수가 확정되지 않아서 발생하는 것이다. 기존에는 모호 정수값을 결정하기 위하여 다중시점(multi-epoch) 데이터를 이용하는 방법이

일반적이었다. 다중시점 데이터가 필요하기 때문에, 위성 신호의 수신 초기에 이 방법을 이용해 모호 정수값을 결정할 때까지 다소 시간이 소요된다. 이러한 문제로 인해 도회지 같이 신호 수신이 자주 차단되는 지역에서는 실시간 정밀 측위에 보편적으로 이용하지 못하고 주로 후처리 정밀 측위에 사용되었다.

최근에 단일시점(single-epoch 또는 epoch by epoch) 데이터를 이용하는 방법이 개발되어서 이를 후처리 측위 뿐만 아니라 실시간 측위에 대한 이용 가능성을 열어주었다. 이에 본 연구의 목표는 단일시점 데이터를 이용하는 방법을 기존의 다중시점 데이터를 이용하는 방법과 그 성능을 실험적으로 비교 분석하여 궁극적으로는 단일시점 데이터를 이용하는 방법을 실시간 정밀 측위에 활용할 수 있는가를 검증하는데 있다. 이를 위해 기존의 다

2005년 3월 8일 접수, 2005년 3월 23일 채택

* 주저자, (주)지오시스템 과장 (kdlee@geosys.co.kr)

** 정회원, 서울시립대학교 지적정보학과 교수 (choiys@uos.ac.kr)

*** 교신저자, 정회원, 서울시립대학교 지적정보학과 교수 (ipllee@uos.ac.kr)

중시점 데이터를 이용하는 방법이 구현된 학술용 소프트웨어인 Bernese GPS(Hugentobler 등, 2001)와 일반 상용 소프트웨어인 GPSurvey와 단일시점 데이터를 이용하는 방법이 구현된 상업용 소프트웨어인 RTD를 선택하여 GPS 기선해석에 적용하여 그 결과를 분석하였다.

2. 알고리즘의 이론적 소개

2.1 모호 정수값 결정

반송파 위상 정보를 이용하여 좌표를 정밀하게 계산할 때 가장 중요한 것이 모호 정수값을 결정하는 것이다. L1 및 L2 반송파의 파장은 알고 있으나, 각각의 반송파의 위상 정보를 지상의 GPS 안테나에서 수신할 때 반송파 위상의 파수와 수신시의 일부 파장을 알 수가 없다. 모호 정수값 결정은 이러한 파장을 계산하기 위한 과정으로 두 지점의 위상차로부터 결정할 수 있다.

일반적으로 모호 정수값을 결정하는 방법으로 동 시간대에 측정된 데이터에서 다중시점을 이용하여 결정하는 방법을 많이 사용하며 이 연구에서는 구분을 하기 위해 이러한 방법을 다중시점 알고리즘이라 하였다. 그리고 근래 새롭게 이용되고 있는 단일시점만으로 모호 정수값을 결정하는 방법을 단일시점 알고리즘이라 하였다.

이 연구에서 데이터 처리 시 이용한 소프트웨어 중에서 스위스의 베른 대학에서 개발한 학술용 소프트웨어인 Bernese GPS와 미국 Trimble사의 상업용 소프트웨어인 GPSurvey는 다중시점을 이용하여 모호 정수값을 결정하며 미국 Geodetics사의 상업용 소프트웨어인 RTD는 다중시점이 아닌 단일시점을 이용하여 모호 정수값을 결정한다.

2.2 다중시점 알고리즘

일반적으로 GPS 측위에서 static, kinematic, RTK 모두 다중시점을 이용하여 모호 정수값을 결정한다. 이 중 kinematic 측위는 측정 시간이 static 측위에 비해 월등하게 짧으나(30~45초) 기선의 거리가 길어짐에 따라 모호 정수값 결정에 신뢰성이 떨어지며 모호 정수값을 결정하기 위한 초기화 과정이 필요하고 사이클 슬립이 발생하면 초기화를 다시 해야 하는 문제가 있다.

다중시점을 처리하여 모호 정수값을 결정하는 방식은 모호 정수값을 결정하기 위한 초기화 도중에 위성으로부터 신호수신이 차단되면 다시 초기화해야 하는 과정이 필요하여 실제 측량을 하는데 시간이 지체된다. 따라서 교량 밑이라든가 건물과 같은 구조물에 의해 위성 신호 수신이 차단되는 경우에는 다시 초기화해야 하는 경우가 발생하여 이동하면서 측량하는 경우에는 작업의 효율성

이 떨어질 수 있다.

Rapid static(Blewitt, 1993) 또는 kinematic(Leick, 1995) 측위 방법은 정밀한 위치를 결정하기 위해 몇 분 이하의 측정시간으로 GPS 측량을 할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 하지만 rapid static 및 kinematic 방법은 비교적 짧은 기선(10km 미만)에만 제한적으로 이용할 수 있다. 모호 정수값 결정 문제만 없다면 이론적으로는 단 한번만 측정해도 해를 구할 수 있다. 장시간 동안 측정하는 이유는 모호 정수값을 올바르게 결정하기 위해서이다.

2.3 단일시점 알고리즘

이 방법은 수십 킬로미터 떨어진 기지 점으로부터 미지 점의 위치를 독립적인 단일시점 추정 값에 의해 결정한다. 기존의 다중시점 처리 방법과 달리 각각의 시점마다 처리하여 모호 정수값을 결정하기 위한 초기화 과정이 없으며 단지 단일 시점의 위상 및 pseudorange 데이터를 이용하여 모호 정수값을 결정한다(Dong과 Bock, 1989). 이에 따라 장애물에 의한 위성 신호 차단 시에도 재 초기화 과정이 필요 없다. 따라서 순간적으로 위성 수신이 차단되는 경우에도 다시 초기화 할 필요가 없기 때문에 장애물이 있는 지역에서 이동 측량을 할 때 기존의 kinematic 측위 방법보다 수월한 측량을 할 수 있다고 본다.

이 방법은 정밀한 L1 pseudorange를 결합함으로써 개발된 전리층 구속 알고리즘의 일반화를 포함한다. 기존의 모호 정수값 결정을 위한 방법과 달리 특히 짧은 측정 시간에 대한 모호 정수값 결정 방법인 LAMBDA (Least squares Ambiguity Decorrelation Adjustment) 방법을 더욱 발전시킨 것으로 모호 정수값 탐색 공간을 변경하고 추정한다. 이러한 변경들이 하나의 시점의 2주파 위상 및 pseudorange 측정값으로 모호 정수값을 결정하게 함으로써 단일시점 알고리즘의 이론적인 기초를 제공한다(Bock 등, 2000).

실시간 처리 시에도 이와 같은 알고리즘을 이용하여 처리할 수 있으나 기선 거리가 멀어지면 신뢰성이 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 후처리 방식만 처리하는 것으로 실험하였다.

3. 실험 방법 및 데이터 처리

3.1 실험 방법

첫 번째 실험에서는 국내 공항 중 김포, 예천, 강릉, 광주, 김해, 제주 공항에서 측정한 데이터를 Bernese GPS 소프트웨어와 GPSurvey 소프트웨어를 이용하여 처리하였으며 기준이 되는 점으로는 수원 국립지리원 내에 있는 VLBI 점을 이용하였다. 동일한 데이터를 Geodetics

사의 단일시점 처리 소프트웨어인 RTD 소프트웨어를 이용해서 처리했으며 이를 Bernese GPS 소프트웨어로 처리한 결과와 비교해 보았다.

두 번째 실험에서는 기선 거리가 26km 정도인 국토지리정보원의 청주, 한국천문연구원 대전 GPS 상시관측소 데이터를 활용하였으며 Trimble사의 GPS 측량 처리 프로그램인 GPSurvey를 이용하여 기존의 kinematic 방법으로 처리하고 RTD를 이용하여 24시간 데이터와 1분, 2분, 3분, 4분, 5분의 데이터 처리결과를 비교해보았다.

세 번째 실험에서는 기선길이가 9.8km, 1.9km인 데이터를 RTD와 GPSurvey를 이용하여 처리한 결과를 비교해 보았다.

3.2 Kinematic 처리

국토지리정보원의 청주 GPS 상시관측소(CNJU)를 기준으로 하고 한국천문연구원 대전 GPS 상시관측소(DAEJ)를 kinematic 측량 데이터로 처리하였다. 그리고 이를 24시간 static 측량 데이터와 비교하였다.

24시간 static 측량 데이터는 Bernese GPS와 GPSurvey로 처리하였으며 처리한 DAEJ 좌표는 표 1과 같다. 여기서 B는 Bernese GPS 처리한 좌표를 G는 GPSurvey로 처리한 결과를 나타낸다. 표 1에서 볼 수 있듯이 24시간 Static 측량 데이터 처리 결과는 학술 및 연구용으로 사용하는 소프트웨어인 Bernese GPS software와 일반 상용 프로그램인 GPSurvey로 처리한 결과가 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있다.

표 1. DAEJ 24시간 측량 ITRF2000 좌표(CNJU 기준)

	X [m]	Y [m]	Z [m]
B	-3120041.902	4084614.911	3764026.906
G	-3120041.900	4084614.907	3764026.906

GPSurvey를 이용하여 kinematic 방법으로 처리하였을 때 해의 결과에서 모호 정수 값이 제대로 결정되었는 표시로 fixed 해가 나타난다. Fixed 해의 좌표 값을 비교해 보았을 때에는 24시간 측량 데이터를 static으로 처리한 결과와 상당한 차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 따라서 kinematic 데이터를 처리할 때 해당 소프트웨어에서 fixed 해가 나타났다면 하더라도 이를 신뢰할 만한 해인지 판단할 명확한 방법이 없다는 것을 확인할 수 있었다. 표 2는 GPSurvey를 이용하여 kinematic 데이터를 처리할 때 fixed 해에 의해 나타난 결과이다. 표 3은 표 2의 결과와 24시간 Static 측량 결과(B)와의 3차원 좌표 차이를 나타낸다. 표 3에서 보는 바와 같이 GPSurvey로

26km 정도 기선의 kinematic 데이터 처리시 Bernese GPS 소프트웨어로 24시간 Static 측량결과와 많은 차이가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다.

표 2. DAEJ kinematic 측량 결과 좌표(GPSurvey)

시 각	X [m]	Y [m]	Z [m]
00:02	-3120041.939	4084615.114	3764026.762
00:08	-3120041.919	4084615.084	3764026.751
00:14	-3120041.932	4084615.094	3764026.748
00:19	-3120041.897	4084615.037	3764026.744
00:25	-3120041.868	4084615.005	3764026.736
00:30	-3120041.857	4084614.989	3764026.732

표 3. DAEJ kinematic 측량 결과 3차원 좌표차이 (GPSurvey)

시 각	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
00:02	0.0373	-0.2026	0.1438
00:08	0.0173	-0.1726	0.1548
00:14	0.0303	-0.1826	0.1578
00:19	-0.0047	-0.1256	0.1618
00:25	-0.0337	-0.0936	0.1698
00:30	-0.0447	-0.0776	0.1738

표 4는 표 2의 결과와 24시간 Static 측량 결과와의 기선장 차이를 나타낸다. 표 2, 표 3, 표 4의 결과에서 보듯이 26km 정도의 기선을 처리할 때 kinematic 측량은 잘못된 결과를 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 GPS 상시관측소를 이용하여 kinematic 측량을 활용할 경우에는 기선 거리가 중요하다는 것을 알 수 있다. 즉 기선 길이에 따라 정밀도 및 정확도에 차이가 많이 발생할 수 있으며 이는 실제 측량에 적용하기에는 신뢰성이 떨어진다고 볼 수 있다.

표 4. DAEJ kinematic 측량 결과 기선장 차이 (GPSurvey)

시 각	기선장[m]	기선장차이 [m]
00:02	26411.22	-0.2463
00:08	26411.21	-0.2343
00:14	26411.22	-0.2443
00:19	26411.18	-0.2063
00:25	26411.17	-0.1903
00:30	26411.16	-0.1813

3.3 단일시점 처리

단일시점 처리 소프트웨어인 RTD를 이용하여 24시간 측량 데이터의 모든 시점과 각 시간대별로 2, 4, 6, 8, 10 개의 시점의 데이터를 처리하여 비교해 보았다. 먼저 24시간 측량 데이터의 결과는 표 5와 같다. 24시간 측량 데이터를 단일시점 처리했을 때 기존 다중시점으로 처리하는 static 측량 데이터와 별 차이가 없는 것을 알 수 있다.

표 5. DAEJ 24시간 처리 결과 좌표 및 좌표값의 차이 (RTD)

	X [m]	Y [m]	Z [m]
좌 표	-3120041.902	4084614.911	3764026.912
차 이	0.0004	0.0005	-0.0058

그림 1과 그림2는 각 시간대별 그리고 시점별 처리 결과이다. 일부 시간대에서 24시간 측량 결과와 큰 차이가

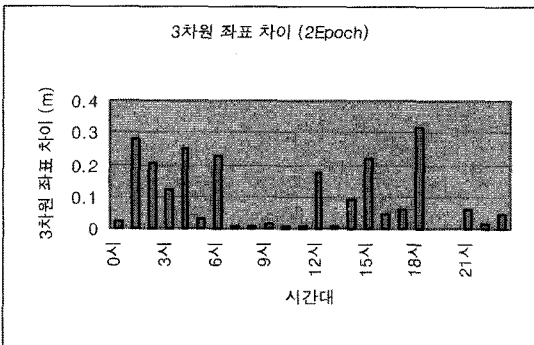


그림 1. 시간대 및 시점별 처리시 3차원 좌표 차이 (2 시점 처리)

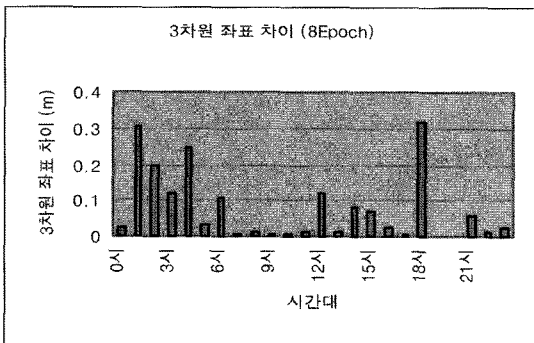


그림 2. 시간대 및 시점별 처리시 3차원 좌표 차이 (8 시점 처리)

없었으나 일부 시간대에서는 큰 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 실험 결과 분석 및 토의

4.1 Bernese GPS 및 GPSurvey 기선해석 결과 분석

그림 3에서 나타나는 바와 같이 Bernese GPS 소프트웨어로 처리했을 때에는 기선 길이가 증가하더라도 RMSE 값이 거의 동일한 값으로 아주 작게 나온 반면에 GPSurvey 소프트웨어로 처리했을 때에는 기선 길이가 증가함에 따라 RMSE 값의 변동이 커지는 것을 알 수 있다.

표 6. 측정의 기선 길이

측 점	SE03	YC01	KU02	KG01	KG08	PA02	CE01	CE03
길이(km)	36.8	137.2	175.7	237.8	238.9	286.9	421.1	422.5

4.2 Bernese 및 RTD 기선해석 결과 분석

그림 4는 Bernese GPS 소프트웨어와 RTD 소프트웨어로 처리했을 때의 3차원 좌표차이의 비교표이다. 기선장에 비례하여 두 소프트웨어로 처리했을 때의 3차원 좌표 차이의 변동 폭이 커지는 것을 알 수 있다.

표 7. 측정의 기선 길이

측 점	SE03	YC01	KU01	KG01	PA01	CE01
길이(km)	36.8	137.2	175.7	237.8	286.0	421.1

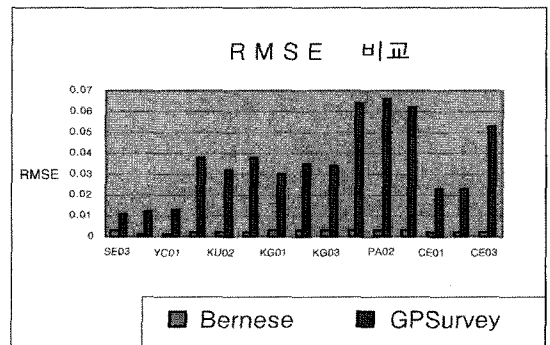


그림 3. Bernese와 GPSurvey을 사용한 기선해석에서 RMSE 비교

그림 5는 Bernese GPS 소프트웨어와 RTD 소프트웨어로 처리했을 때의 기선장차이의 비교표이다. 기선장에 비례하여 두 소프트웨어로 처리했을 때의 기선장 차이의 변동 폭이 커진다.

4.3 GPSurvey 및 RTD 기선해석 결과 분석

기선 길이가 9.8km인 데이터를 RTD와 GPSurvey 소프트웨어로 처리한 결과를 비교해보면 그림 6, 그림 7과 같다. 3차원 좌표 차이가 1시간의 데이터 보다 2시간, 3시간 측정했을 때가 다소 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 반면에 기선장 차이는 오히려 1시간의 데이터가 2시

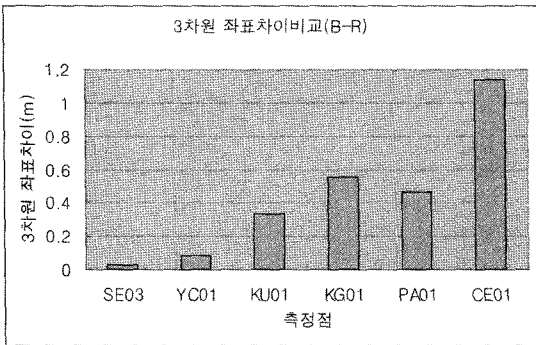


그림 4. 3차원좌표 차이 비교

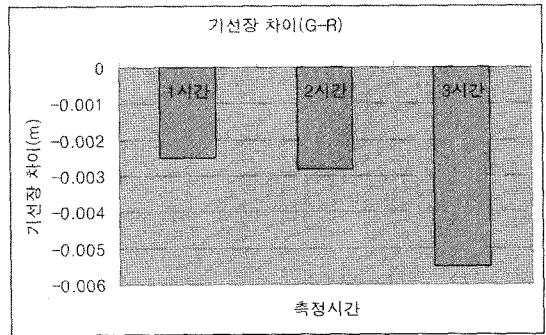


그림 7. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(기선장의 차이) (1, 2, 3 시간측정, 기선길이 9.8km)

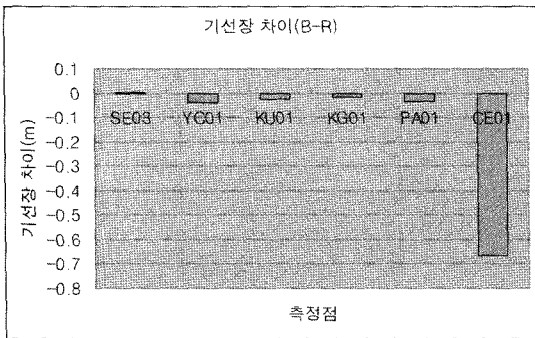


그림 5. 기선장의 차이 비교

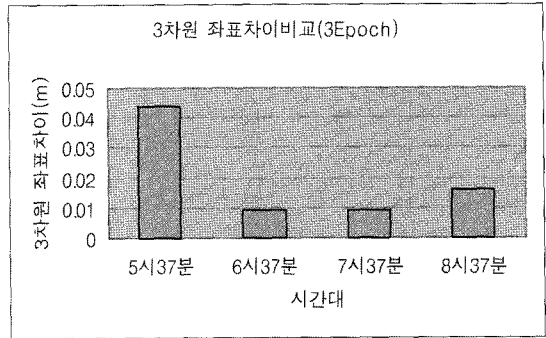


그림 8. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(3차원 좌표 차이) (3 시점 데이터, 기선길이 9.8km)

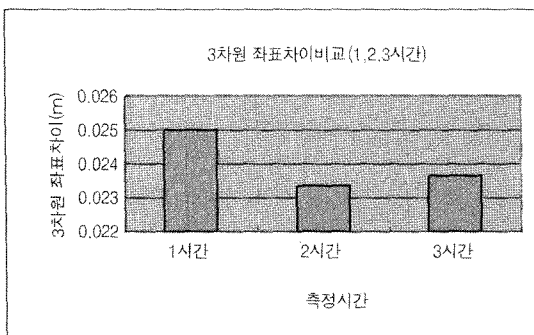


그림 6. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(3차원 좌표 차이) (1, 2, 3 시간측정, 기선길이 9.8 km)

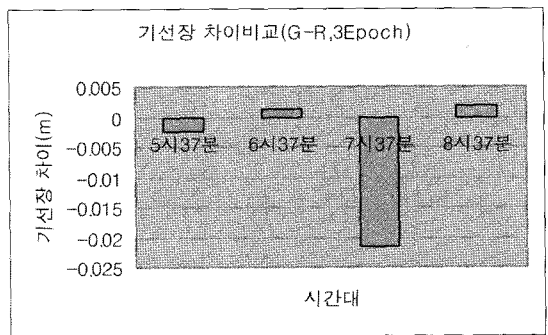


그림 9. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(기선장의 차이) (3 시점 데이터, 기선길이 9.8km)

간, 3시간 측정했을 때보다 다소 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 동일한 기선에서 3 시점의 데이터를 RTD 소프트웨어로 처리한 결과와 GPSurvey로 처리한 결과와의 비교는 그림 8, 그림 9와 같다. 3차원 좌표 차이는 5시 37분대의 데이터만 4cm 이상의 차이가 나타났을 뿐 나머지 데이터는 2cm 미만으로 나타났다. 기선장의 차이는 7시 37분대의 데이터만 2cm 이상이며 나머지 데이터는 5mm 미만인 것을 알 수 있다.

기선 길이가 1.9km인 데이터를 GPSurvey와 RTD 소프트웨어로 처리한 결과를 비교해보면 그림 10, 그림 11과 같다. 1시간의 데이터 보다 2시간, 3시간 측정했을 때 3차원 좌표 차이가 다소 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 동일한 3 시점의 데이터를 RTD 소프트웨어로 처리한 것과 GPSurvey로 처리한 결과를 비교해보면 그림 12, 그림 13과 같다. 3차원 좌표 차이는 5시 27분 대의 데이터만 1cm 미만의 차이가 나타났을 뿐 나머지 데이터는 3cm, 5cm 이상으로 나타났다는 것을 알 수 있다.

이 실험의 결과에서 보는바와 같이 기선길이가 비교적 짧은 1.9 km, 9.8 km인 데이터를 RTD 소프트웨어를 이

용해서 처리해 보았을 때 3 시점의 짧은 측정데이터와 1시간, 2시간, 3시간의 측정 결과가 큰 차이가 발생하지 않는 것을 볼 수 있었다. 그러나 특정 시간대에서 변동성이 다소 크게 나타날 수 있다는 점에서 이 소프트웨어로 처리한 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 RTD 소프트웨어를 이용한 기선 거리별 데이터 처리가 더 이루어져야 할 것이다. 단일시점 처리 시 특정 시간대에서 기선 해석의 차이가 크게 나타나는 것이 위성의 배치 상태에 따른 PDOP과 위성수와는 관계가 없는 것으로 나타나는 데 보다 짧은 기선의 데이터와 거리별 테스트를 통하여 좀 더 신뢰성 있는 결과를 산출해내야 할 것이다.

5. 결 론

이번 연구과정에서 기존 kinematic 측위 방법으로 26 km 기선 해석 시 잘못된 모호 정수값 결정으로 인한 기선 해석의 오류가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 kinematic 측량 시 기선 거리별 정확도를 판단하고 실제 측량에 적용하기 위해서는 좀 더 다양한 실험이

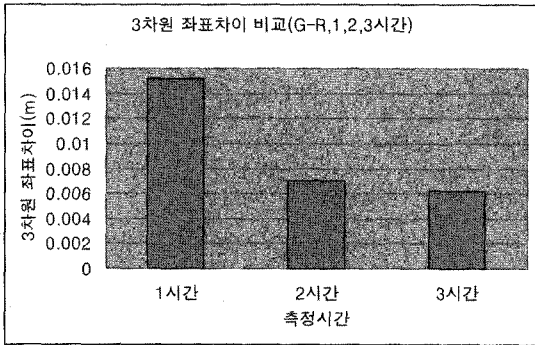


그림 10. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(3차원 좌표 차이)(1, 2, 3 시간측정, 기선길이 1.9km)

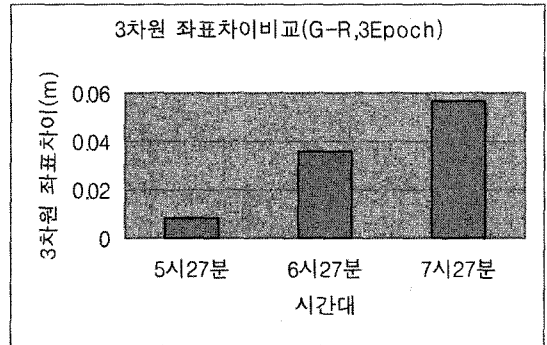


그림 12. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(3차원 좌표 차이 비교)(3 시점 데이터, 기선길이 1.9km)

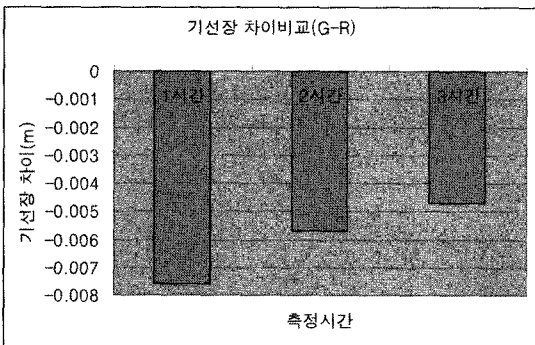


그림 11. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(기선장의 차이) (1, 2, 3 시간측정, 기선길이 1.9km)

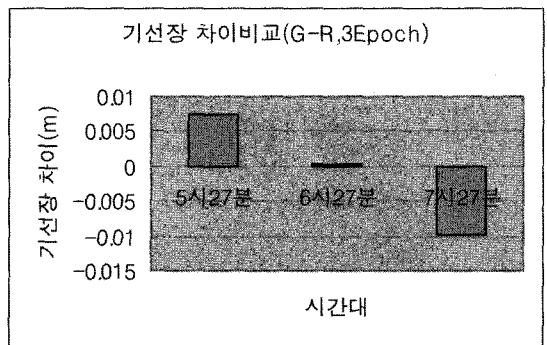


그림 13. RTD와 GPSurvey 처리 결과 비교(기선장의 차이) (3 시점 데이터, 기선길이 1.9km)

이루어져야 할 것이며 전국에 설치되어 있는 GPS 상시 관측소 인프라를 활용하기 위해서도 이를 기준점으로 하여 kinematic 측량 시 기선 거리 제한이 어느 정도 되는지도 다양하게 실험하여 kinematic 측량의 작업 규정을 제정하여 GPS 측량의 활용도를 높여야 할 것이다. 그리고 다소 신뢰성이 문제가 되지만 기존 kinematic 측위 방법과 비교할 때 단일시점 알고리즘을 이용한 측위 방법은 초기화가 필요 없으므로 짧은 시간의 측정 데이터로 GPS 측량의 가능성을 살펴보았다. 도심지와 같이 위성 신호 수신을 차단할 수 있는 구조물이 많은 곳에서는 실시간으로 이동하면서 GPS 측량을 해야 하는 경우 문제점이 발생할 수 있다. 다중시점 알고리즘을 이용하는 kinematic 또는 RTK의 경우 모호 정수값을 결정하기 위한 초기화 과정이 반드시 필요하기 때문에 장애물이 많은 곳에서는 활용도가 다소 떨어진다. 따라서 모호 정수값 결정을 위한 초기화가 필요 없는 단일시점 알고리즘은 도심지에서 GPS VAN과 같이 이동하면서 측량을 해야 하는 시스템에 더 적합하며 효율적일 것이다.

이와 같은 연구 결과에서 GPS 상시 관측소와 같은 정밀 기준점이나 장기선은 Bernese GPS와 같은 학술용 소프트웨어로 처리하고 GPSurvey와 같은 일반 상용 소프트웨어로 Kinematic 측위시 기선 거리에 따른 측위 결과가 다르게 나타나기 때문에 기선 거리를 다양하게 한 더 많은 데이터를 처리하여 측량에 적합한 기선 거리를 산정해야 할 것이다. 그리고 단일시점으로 처리하는 RTD는 기존의 Kinematic 측위에 비해 싸이클 슬립이 발생하더라도 초기화 과정이 필요 없으나 같은 시점의 데이터를 다른 시간대에서 처리해 보았을 때 결과가 다소 차이가 발생하는 것으로 보아 신뢰성이 다소 떨어지기 때

문에 정밀한 측량을 요구하는 시스템에는 적합하지 않다고 판단된다. 따라서 이를 적절하게 활용하기 위해서는 다양한 실험을 통하여 측량 등급별 적합한 측량 방법에 대한 연구가 더 필요하다.

감사의글

이 논문은 2004년도 서울시립대학교 학술연구용 첨단 장비 지원에 의하여 이루어진 것이며 이에 학교당국에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Blewitt, G., 1993, "Advances in Global Positioning System technology for geodynamics investigations: 1978-1992", *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*, AGU, Washington, DC, pp. 195-213.
2. Bock, Y., Nikolaidis, R., de Jonge, P. J. and Bevis, M., 2000, "Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, pp. 28223-28254.
3. Dong, D. and Bock, Y., 1989, "Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, pp. 3949-3966.
4. Hugentobler, U., Schaer, S. and Fridez, P., 2001, *Bernese GPS Software Version 4.2*, Astronomical Institute, University of Bern, Swiss.
5. Leick, A., 1995, *GPS Satellite Surveying*, 2nd ed., John Wiley, NY.