

반송파 위상관측을 이용한 실시간 Kinematic GPS 측량기법의 정확도와 효용성 평가

Evaluation of Accuracy and Effectiveness of Real-Time Kinematic GPS Surveying Technology Using Carrier Phase Observations

이진덕* · 정한상**

Lee, Jin-Duk · Jung Han-Sang

要 旨

후처리 없이 cm 정확도의 3차원 좌표를 취득할 수 있는 실시간 이동측량 기법은 GPS 기술에서 중요한 진전으로 인식되어왔다. 이 시스템은 OTF 초기화기법을 이용함으로써 종래의 정지측량 및 이동측량 접근법에서 주요 방해요인으로 작용해 왔던 사이클슬립 문제로부터 벗어날 수 있게 되었다. 본 연구에서는 실시간 이동 GPS 측량의 정확도를 평가하기 위한 목적으로 우선 일정기선에 대한 연속관측을 행하고 정지측량의 결과와 비교한 결과 수평 및 수직성분에서 각각 RMS ± 3 mm와 ± 13 mm의 반복재현성을 확인할 수 있었다. 또한 30점으로 구성된 소지역의 시험망에 대하여 실시간 이동, 후처리 이동, 신속정지 GPS 및 종래의 기법으로 각각 측량을 행하여 그 결과를 비교 분석하고 실시간 이동측량 기법의 효율성을 검토하였다. 아울러 GPS와 직접수준측량 성과의 조합에 의해 유도된 지오이드고를 PNU95와 EGM96 중력지오이드 모델에 의한 결과와 비교하였다.

ABSTRACT

Real-time kinematic (RTK) GPS surveying which allows centimeter level accuracy of three-dimensional coordinates without post-processing has become recognized as a major advance in GPS technology. Employing On-The-Fly initialization technique, the RTK system can escape from cycle slip problems that have affected as a main obstacle factor in traditional kinematic and static approaches. The objective of this research was to evaluate accuracy and effectiveness of the RTK-GPS surveying. First, the continuous RTK observation of a base line was conducted for the purpose of finding out the repeatability of the RTK surveying and the results which were then compared against results from static surveying showed RMS errors of ± 3 mm and ± 13 mm for their respective horizontal and vertical components. On a test network of 30 stations covering the small area, the results of RTK testing were compared against those from not only post-processing kinematic and rapid-static surveyings but conventional surveyings and also the efficiency of RTK were analyzed. In addition, geoid heights which were derived by combination of GPS and spirit leveling about all of the points within the network were compared against those derived by the PNU95 and EGM96 models respectively.

1. 서 론

실시간 이동(kinematic) GPS 시스템은 이동 중에도 자동으로 미지정수(integer ambiguity)를 해결할 수 있는 On-The-Fly 초기화 방법을 이용하므로 종래의 후처리 방식 이동 측량에 있어서 커다란 문제점으로 되어 왔던 싸

이클슬립(cycle slip)으로 인한 측량결과의 무효화 문제를 극복하고 cm 정확도의 3차원 좌표를 실시간으로 기대할 수 있는 기법으로서 GPS 기술에 있어서 또 하나의 중요한 진전으로 평가되어 왔다.¹⁾

실시간 이동 GPS는 기준점에 설치된 기준국 수신기로 관측한 반송파 위상데이터에서 각 위성에 대한 보정량을 계산하고 이를 측정상의 이동국 수신기로 전송하여 측정간의 거리, 방위, 고도차 등을 계산하고 이동수신기 지점의 좌표성고를 실시간으로 구할 수 있는 측량기법이다.

*금오공과대학교 토목·환경 및 건축공학부 부교수

**금오공과대학교 측량/지형공간정보 연구실

비록 측정 가능한 범위가 시스템의 성능과 작업조건에 따라 수 km 이내로 한정되어 있지만 반송파 위상 관측값을 이용함으로써 2~5 cm의 정확도를 성취할 수 있는 실시간 GPS 시스템의 능력은 GPS의 응용분야를 획기적으로 확장시켰다.²⁾ 최근에는 실시간 이동 GPS 시스템을 건설현장의 설계자료 획득을 위한 측량에 응용하여 그 효율성을 크게 인정받았으며, 또한 이 시스템의 수신기에 연결된 휴대용 PC에 공사의 평면도, 단면도 및 기타 필요한 도면을 디스플레이하고 그 위에 측정결과를 실시간으로 표시해 가며 측량자 자신의 위치는 물론 측정점까지의 최적경로를 인식할 수 있는 휴대용 토지측량시스템을 개발하고, 위험지역에서 원격조종되는 건설기계의 유도측정시스템으로 이용되기도 하였다.³⁾ 특히 수 km 이내 범위의 건설공사에의 응용, 즉 좌표 측설(stakeout work), 지형측량, 중·횡단측량 등의 실시설계 및 공사측량, 도로, 댐, 단지조성 등을 위한 토공량 산출, 그리고 해양측량 등에 그 효율성이 크게 기대될 수 있다.⁴⁾

국내에서는 코드위사거리를 이용한 실시간 DGPS 방식으로 항법시스템의 적용을 위한 연구들이 주로 발표되었고 반송파 위상을 이용한 실시간 GPS에 관한 연구로서 썬 등은 100m~200m 거리에서 실시간 이동기법이 정지 측량결과에 비해 ± 0.021 m의 3차원 편차를 확인한 바 있었고,⁵⁾ 심 등은 실시간 GPS를 기반으로 하는 현장성토다짐 관리시스템을 개발하였다.⁶⁾

실시간 이동측량의 정확도는 기존의 후처리방식 이동측량과 이론적으로는 동등한 정확도를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있으나 향후 실시간 이동 GPS 시스템의 폭넓은 활용잠재성을 고려할 때 이에 대한 측위특성이 파악될 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 우선 일정거리의 기선에 대한 실측을 통하여 실시간 이동 GPS측량의 반복측위 재현특성을 구명하고, 소지역의 시험망에 대하여 실시간 이동측량은 물론 정지측량, 신속정지측량 및 후처리 방식의 이동측량 방식으로 각각 GPS측량과 아울러 종래의 측량기법으로 실측을 병행함으로써 실시간 이동 GPS측량의 정확도 및 그 효율성을 평가하고자 하였다. 또한 소지역에 대한 신속정지 측량으로 얻은 타원체고와 1등 수준점을 이용하여 종래의 수준측량으로 얻은 정표고를 결합하여 해석한 소지역 지오이드고의 분포양상을 PNU95와 EGM96 지오이드모델에 의한 지오이드고 분포양상을 비교 분석함으로써 각종 건설을 위한 실시설계와 공사측량에서 요구되는 대축척 지형정보데이터

의 획득을 위한 적용성을 검토하고자 하였다.

2. 실시간 GPS 측량시스템의 개요

실시간 처리방식과 후처리 방식 GPS의 근본적인 차이는 실시간 이동측량의 경우 관측 중에 데이터가 병합되어 처리된다는 것이다. 실시간 GPS 시스템은 2대 또는 그 이상의 수신기, 라디오 모뎀 및 컨트롤러로 구성된다. 기지국에서는 기지점 좌표성과와 위성으로부터의 원시 데이터, 즉 반송파 위상과 코드측정 데이터를 라디오 모뎀을 이용하여 이동국으로 무선 전송한다. 측정값들은 이동국 수신기내에서 실시간으로 처리되어 기지국 좌표에 근거하여 이동국의 정확한 좌표를 계산하고, 표시, 기록되어진다.

본 연구에서 사용된 Leica SR9500 수신기의 제작사에서 제시한 정확도는 1 cm + 2 ppm이며, 시스템의 구성은 그림 2와 같다.⁷⁾

GPS 관측에서 미지정수를 결정하기 위해서는 기지점

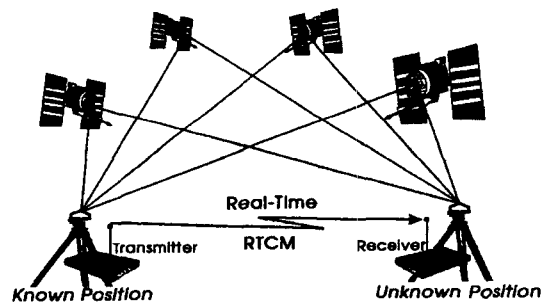


그림 1. Composition of real-time kinematic (RTK) system

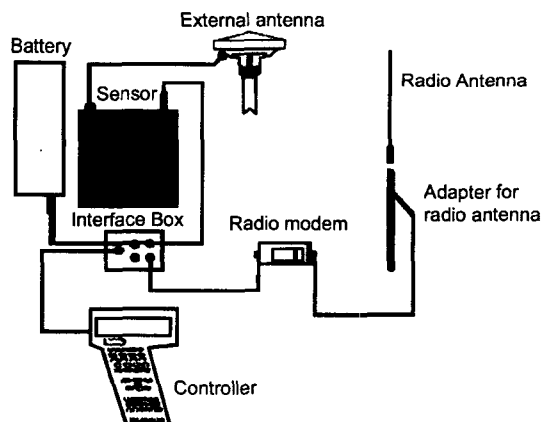


그림 2. Components of Leica GPS system 300

에서의 초기화 뿐 아니라 관측 중이나 이동 중에도 항상 4대 이상의 위성을 추적해야 하며, 위성신호가 손실되면 다시 초기화를 해야한다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위하여 개발된 On-The-Fly(OTF) 초기화 기법이 실시간 이동측량에 적용됨으로써 이동 중에도 초기화가 가능하게 되었다. OTF 초기화를 위해서는 1~3초의 높은 관측률로 신호 단절이 없는 200~300초가 필요하다. 최소 5개 이상의 위성신호를 받아야 하고, GDOP 5이하에서 고도 20° 이상의 위성신호를 받도록 하고, 기지국과 이동국간의 거리는 가까울수록 좋다.⁷⁾

실시간 보정을 위해서는 기준점에서의 기지국 수신기의 보정 데이터를 이동국 수신기에 전송하기 위하여 최소 4800 baud이상의 데이터 전송능력을 가진 UHF/VHF 무선 송수신 시스템이 필수적으로 수반되어야 하며, 이 때 사용되는 보정자료의 형식은 RTCM SC-104을 따른다.^{8,9)}

3. 실시간 이동측량의 반복재현성 평가

3.1 관측

실시간 이동 GPS시스템의 명세(specification)에 의하

면 최대 관측범위가 10 km임을 제시하고 있으나 이는 장애물이 별로 없는 해상과 같은 경우에 해당한다. 육상에서 지형의 기복이 많은 우리나라 여건에서는 변동이 심하여 그 정확한 측정범위를 제시하기는 어려우나 수신기 성능에 따라 500 m 이내 또는 불과 몇 km 이내에 한정된다.

본 연구에서는 Leica GPS System 300을 사용하여 일정거리의 기선에 대하여 실시간 이동 GPS측량의 시간에 따른 좌표값들의 변동특성, 즉 반복측위 재현성(repeatability)을 파악하고자 금오공대 GPS 기준점을 기준국으로 하고 약 500 m 떨어진 지점에 이동국 수신기를 설치하여 실시간 이동측량과 정지측량 기법으로 각각 1시간씩 연속 관측하였다.

실시간 이동측량의 경우 보정자료 전송비는 2초로 하여 10초 간격으로 PCMCIA 메모리카드에 저장된 데이터를 아무런 수정 없이 PC에 다운로드하였다. 정지 관측의 경우 데이터 저장간격을 15초로 하여 240 epochs에 대한 관측데이터를 SKI 소프트웨어로 후처리하였다.

3.2 비교 평가

그림 3~5와 표 1은 실시간 이동측량을 통하여 10초

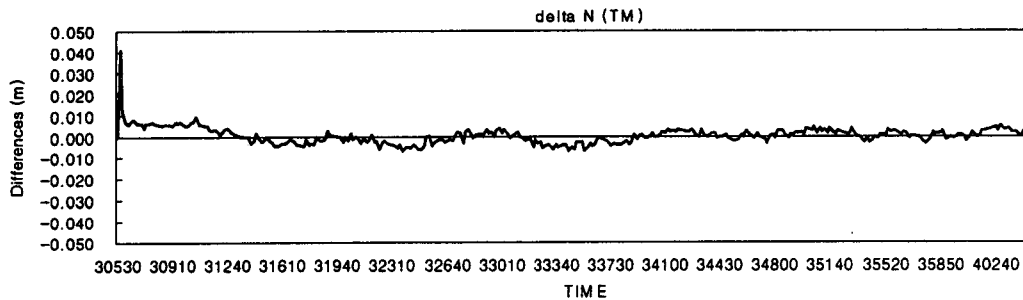


그림 3. Change of the North component in RTK surveying

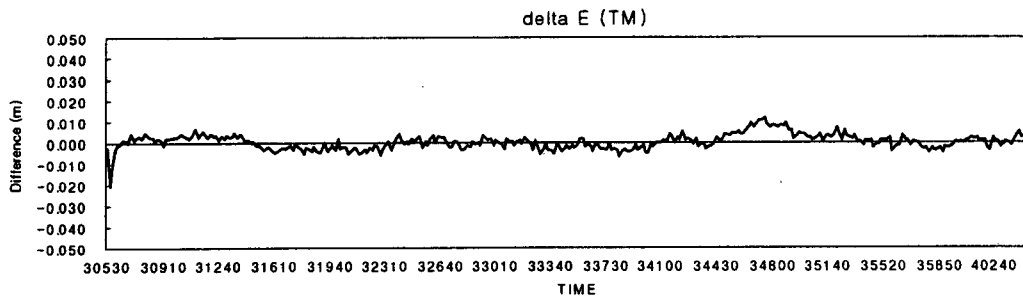


그림 4. Change of the East component in RTK surveying

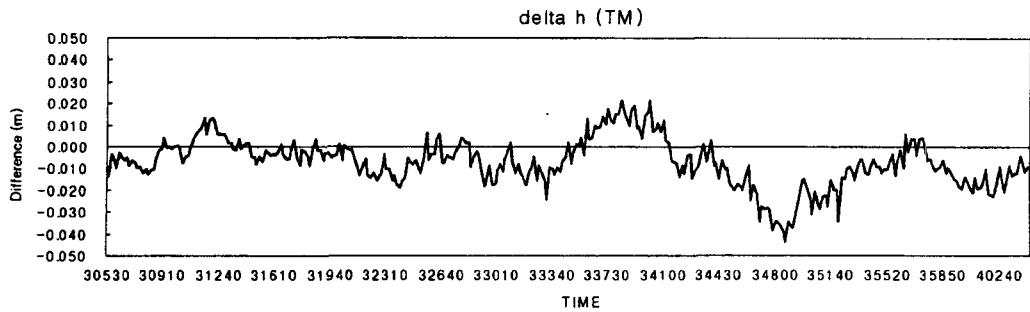


그림 5. Change of the Ellipsoidal Height in RTK surveying

표 1. Differences in N, E, h between RTK and static

	Northing(mm)	Easting(mm)	Ellip. H(mm)
Max.	41.2	11.6	21.3
Min.	-6.9	-20.7	-43.8
Mean	0.3	0.3	-7.3
RMS	±3.9	±3.5	±13.2

간격으로 1시간 동안 얻어진 360개의 WGS84 좌표(위·경도)로부터 WGS84 타원체에 근거하여 TM 투영변환한 결과인 북거(Northing)와 동거(Easting)성분, 그리고 타원체고를 정지측량으로 얻은 성과를 기준으로 그 차를 비교 도시한 것이다.

북거성분에서는 -6.9~ +41.2 mm의 범위에서 평균 +0.3 mm, RMS ±3.9 mm를 보였고, 동거성분에서는 -20.7~+11.6 mm의 범위에서 평균 0.3 mm, RMS ±3.5 mm를, 타원체고에서는 -43.8~+21.3 mm의 범위에서 평균 -7.3 mm, RMS ±13.2 mm를 보였다. 높이성분인 타원체고(h)에 비하여 수평성분인 북거(N)와 동거(E)에서 약 3~4배 정도 높은 재현효과를 확인할 수 있었다.

4. 시험망 관측

4.1 시험망 구성

대부분의 상업용 실시간 이동측량 시스템은 부지조성을 위한 측량(site surveying) 등에 효과적으로 이용되도록 의도되었다. 관련 문헌에서도 RTK 시스템(Site Surveyor)은 반경 1 mile 이내의 소지역 측량구조로 이용될 수 있음을 제시하고 있으며,¹⁰⁾ 실제 본 연구의 예비 실험에서도 1 km 전후에서 radio link의 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

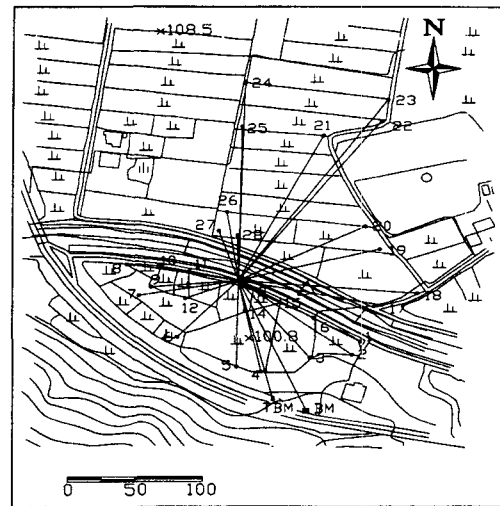


그림 6. Test network

관측모델지역으로서 금오공대 기준점(KNUT)으로부터 10km 떨어진 대상지역(경북 칠곡군 북삼면 일대)내 현장 기준점(reference station)을 1시간 동안 GPS 정지측량 기법으로 관측하였다.

약 250 m×300 m, 즉 7.5ha의 대상지역에 배치한 시험망은 1개의 기준점과 외견상 농지의 경계에 연하여 설치한 28개 측점, 그리고 1등 수준점(BM) 및 임시수준점(TBM)을 포함하여 총 31점으로 구성되며, 기준점으로부터 각 측점간의 거리는 실시간 이동측량 시스템의 라디오 모델 성능을 고려하여 300 m 이내로 제한하였다.

본 대상지역은 실시간 이동측량 시스템의 목적에 부합하는 세부 지형매핑 및 시공 측설(stakeout) 등의 적용을 위한 전형적인 규모로서 연구의 정당성이 있다고 사료된다.

4.2 GPS 관측 및 종래의 측량

사용된 GPS 수신장비는 실시간 이동측량의 기능을 갖춘 한 쌍의 Leica 300 System으로 구성되었다. Leica SR9500 센서는 이중주파수, 10채널 수신기로서 OTF 초기화를 할 수 있는 firmware를 가지고 있으며, 두 대의 무선 라디오가 기준국과 이동국 사이의 무선통신에 이용된다.

관측에 앞서 실시간 GPS시스템에서 권장하는 관측조건을 만족시키기 위하여 사전에 SKI 소프트웨어의 PLAN 모듈을 이용하여 위성영역과 위성 수, PDOP 등에 대한 정보를 얻었다. 모든 관측은 고도각 15° 이상에서 PDOP 5 이하를 가진 최소 5개 이상의 가시위성이 있는 시간에 행하였다.

GPS 관측은 신속정지, 후처리 이동, 실시간 이동측량 방식으로 각각 현장기준점에 기준국 수신기를 고정하고 30개소의 측점에 이동국 수신기를 교대로 이동, 관측하였다. 후처리 이동측량에서는 Stop & Go 방식을 채택하여 각 측점에서 일정한 시간간격으로 데이터를 수집하였다. 위성신호 취득방법은 각 epoch마다 위성신호의 측정치를 평균(압축)하여 취하는 compacted 방법을 사용하였다. 모든 GPS 관측데이터는 2주파 수신기(Leica SR9500)에 의해 얻어졌고, 신속정지측량과 후처리 이동측량은 방송궤도력을 이용하여 후처리하였다.

신속정지측량에서는 측정당 자료를 30초 간격으로 20

epochs동안 수신하였고, 후처리 이동과 실시간 이동측량에서는 측정당 데이터를 1초 간격으로 5 epochs씩 동일한 관측률(obs-rate)로 수신하였다. 실시간 이동측량에서는 기준국 수신기로부터 이동국 수신기로의 실시간 보정자료의 전송 간격을 2초로 설정해 주었다. 관측자료의 실시간 보정을 위한 형식으로서 RTCM SC-104 ver 2.1을 이용하였으며 무선 라디오모뎀을 통하여 4800 bps의 baud rate로 기준국에서 이동국으로 보정자료를 전송하였다. 보정된 데이터는 GPS 컨트롤러 CR344 내부에 있는 Leica PCMCIA 메모리카드에 저장된 후 SKI 프로그램을 이용하여 PC로 다운로드하였고 관측된 데이터에는 어떠한 후처리나 조정도 가하지 않았다. 아울러 종래의 측량성과와의 비교를 위하여 토탈스테이션을 이용하여 기준점으로부터 각 측정점까지의 경사거리, 그리고 시험지역 내에 있는 1등 수준점을 기준으로 정밀레벨을 이용하여 각 측정점의 표고를 관측하였다.

4.3 결과의 분석

실시간 이동, 신속정지, 후처리 이동 GPS측량에 의해 각각 얻어진 시험망의 측정들에 대한 좌표성적을 수평성분과 수직성분으로 나누어 비교 분석하였다.

4.3.1 GPS 측위기법에 따른 TM 투영좌표 및 타원체 고 성분의 비교

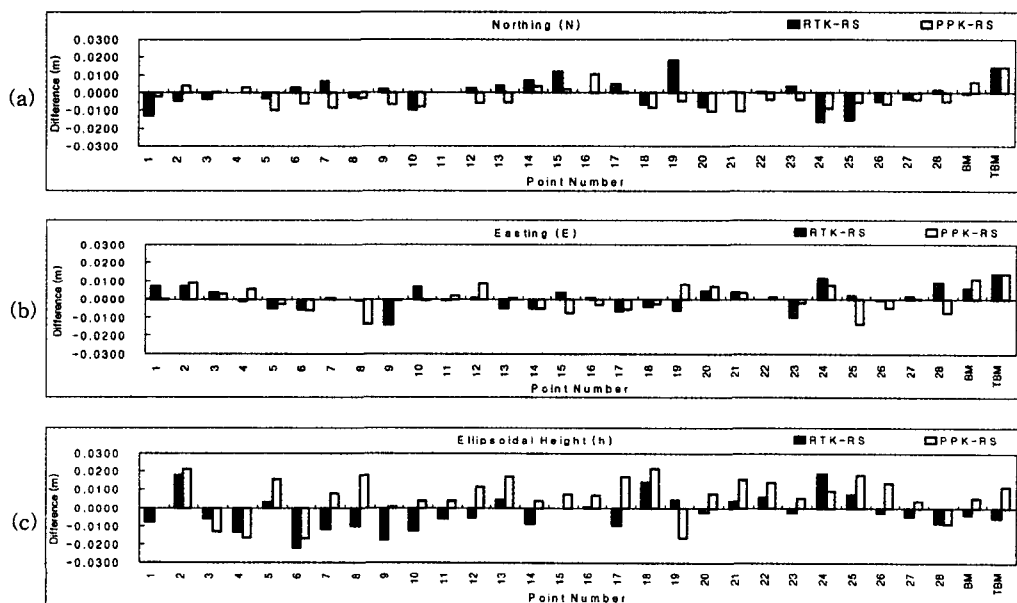


그림 7. Comparison of N, E, h among RTK, PPK and RS

신속정지측량, 후처리 이동측량 및 실시간 이동측량을 통하여 각각 얻어진 WGS84 타원체의 지리좌표(경·위도)를 동부원점(129° 00' 00" E, 38° 00' 00" N)을 기준으로 TM 투영좌표인 북거(Northing)와 동거(Easting) 성분으로 변환해 주었다.

각 측정에서 신속정지측량(이하 RS)에 의한 결과를 기준으로 하여 북거, 동거, 그리고 타원체고별로 각 측정에서 후처리 이동측량(이하 PPK), 실시간 이동측량(이하 RTK) 결과와의 차를 그림 7(a), (b), (c)에 각각 도시하였다.

RTK의 결과를 RS와 비교할 때 북거(N) 성분에서는 -16.3~+18.4 mm의 범위에서 평균 -0.4 mm, RMS ±7.7 mm의 편차를 나타내었고, 동거(E) 성분에서는 -14.0~+13.9 mm의 범위에서 평균 +0.6 mm, RMS는 ±6.3 mm의 편차를 나타내었다. 타원체고(h)의 경우 -22.0~+18.6 mm의 범위에서 평균 -2.7 mm, ±9.7 mm의 RMS를 나타내었다.

또한 PPK의 성과를 RS와 비교할 때 북거(N)와 동거 성분(E)의 범위는 각각 -10.4~+14.3 mm와 -13.4~+13.9 mm를 나타내었고, 평균 -2.6 mm, +0.2 mm, RMS ±6.6 mm, ±6.7 mm를 각각 나타내었다. 타원체고 성분(h)에서는 -16.8~+21.3 mm의 범위에서 평균 +6.3 mm, RMS ±12.5 mm를 보였다.

RTK과 RS간, 그리고 PPK과 RS간의 비교 결과, 두 경우에서 모두 수평성분에 비하여 높이성분에서 약 1.5배 정도의 비교적 높은 편차를 보였다.

이론적으로 동일한 정확도를 가지고 있는 RTK과 PPK간의 차를 비교한 결과, 북거(N)에서는 -10.7~+22.6 mm의 범위에서 평균 +2.3 mm를, RMS ±8.1 mm를 보였고, 동거(E)에서는 -14.5~+16.4 mm의 범위에서 평균 +0.3 mm, 그리고 RMS는 ±7.3 mm를 나타내었다. 타원체고 성분은 -28.0~+21.0 mm의 범위에서 평균 -8.9 mm, RMS ±13.3 mm를 나타냄으로써 역시 수평성분에 비하여 높이성분에서 1.5~2배 정도의 편차가 있음을 알 수 있다.

4.3.2 실시간 이동 GPS측량과 종래의 측량방법 간의 성과 비교

그림 8(a)는 실시간 이동 GPS측량과 토달스테이션으로 각각 얻어진 현장기준점으로부터 30개 측정까지의 경사거리의 차를 도시한 것으로서 -16.0~+13.0 mm의 범위에서, RMS ±7.0 mm를 보였다. 현장기준점으로부터 30개 측정간의 높이성분에서의 차는 -22.0~+12.0 mm의 범위에서 RMS ±11.0 mm로 나타났다(그림 8(b)).

그림 8(c)는 기준점으로부터 30점의 각 측정들간의 고저차에 대한 실시간 이동측량의 성과를 직접수준측량(spirit leveling)의 결과와 비교한 것으로서 그 편차의 범

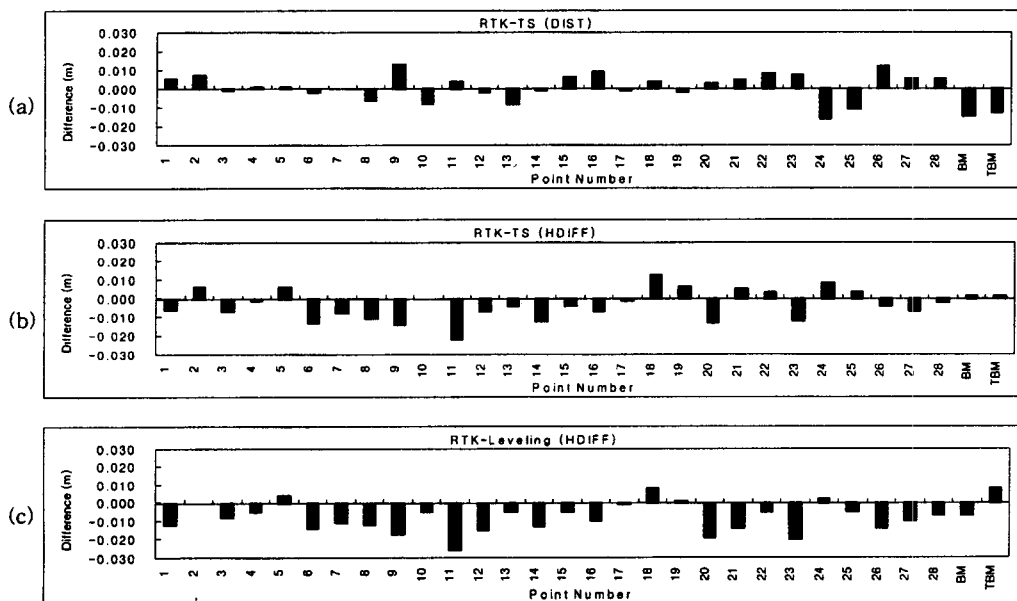


그림 8. Comparison of RTK-minus-conventional surveying results

위는 -26.0~+8.0 mm로 나타났고, RMS ±8.0 mm를 보였다.

실시간 이동 GPS 측량기법을 이용하는 첫 번째 이유는 야외관측시간과 인원에서 기대되는 비용효과일 것이다. 본 시험망의 관측에서 실시간 이동측량의 경우 측정당 약 5초의 점유시간에 OTF 초기화 시간 및 측정간의 이동시간을 포함하여 약 40분 소요되었고, 3차원 동시측위가 가능한 토탈스테이션 관측의 경우 약 48분, 그리고 레벨에 의한 수준측량의 경우 편도관측에 약 45분이 소요되었다. 토탈스테이션과 레벨에 의한 관측에서 각각 최소 2인이 소요되는 반면, 실시간 이동 GPS의 경우 기준점에 수신기가 설치된 상태에서 이동수신기를 운용하는 1명만으로 측량이 가능하다. 실시간 이동 GPS는 종래의 측량방법에 비해 소요시간은 별 차이가 없으나 소요인원까지 고려하면 약 2배 이상의 효율성을 확인할 수 있었다.

다른 평가조사에서는 실시간 이동 GPS가 50~80%의 경비절감을 실현할 수 있다고 제시되기도 하였지만, 실시간 이동에 대한 경험이 축적되고 다양한 프로젝트들이 평가됨에 따라 25~50%의 경비절감 평가가 더 현실적이고, 해당지역의 관측조건에 따라서는 80%까지의 절감효과도 기대할 수 있을 것이다.¹⁰⁾

육상에서 지형기복 등 현실 상황을 고려하여 1~10 km 범위에서의 실시간 이동 GPS 관측을 적절히 평가하기 위해서는 라디오 모뎀 중계기(radio modem repeater)의

추가를 통한 부가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

5. 소지역에서 지오이드 기복 특성 고찰

GPS에서 직접 얻어지는 높이성과는 WGS84 타원체면을 기준으로 타원체고이고, 대부분의 건설공사를 위한 시설계 및 공사측량에서 요구되어지는 높이는 평균해수면 즉, 지오이드를 기준으로 하는 정표고(orthometric height)이다. 이 두 개의 기준면을 기준으로 하는 타원체고(ellipsoidal height), 정표고 및 지오이드고(geoid height)의 높이성분들 간의 관계는 그림 9와 식 (1)과 같다.

$$N = h - H \tag{1}$$

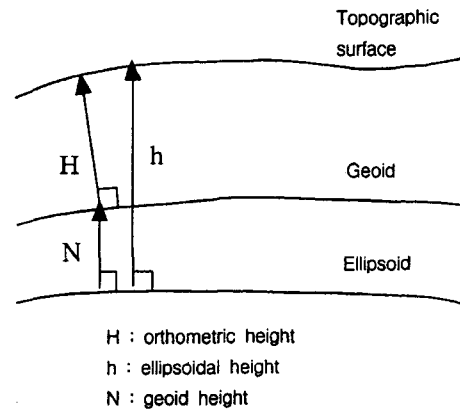


그림 9. Elevation performance surfaces

표 2. Geoid heights derived by GPS/Leveling combination

Point No	h	H	N	Point No.	h	H	N
1	128.2284	100.2323	27.9961	16	128.3555	100.3652	27.9903
2	128.2206	100.2376	27.9830	17	128.1371	100.1298	28.0073
3	128.4171	100.4231	27.9940	18	128.1552	100.1700	27.9852
4	128.4783	100.4695	28.0088	19	129.3536	101.3559	27.9977
5	128.4896	100.4881	28.0015	20	129.7251	101.7400	27.9851
6	128.6027	100.5947	28.0080	21	131.3878	103.4057	27.9821
7	129.6347	101.6335	28.0012	22	131.3237	103.3438	27.9799
8	129.5394	101.5399	27.9995	23	131.4056	103.4219	27.9837
9	129.4593	101.4585	28.0008	24	132.5832	104.5995	27.9837
10	129.6496	101.6417	28.0079	25	131.3891	103.4000	27.9891
11	129.3710	101.3699	28.0011	26	130.2236	102.2339	27.9897
12	129.3340	101.3431	27.9909	27	129.5321	101.5474	27.9847
13	128.9771	100.9862	27.9909	28	129.5638	101.5718	27.9920
14	129.0611	101.0642	27.9969	BM	134.1662	106.1703	27.9959
15	128.3790	100.3831	27.9959	TBM	133.8551	105.8420	28.0131

표 3. Comparison of geoid heights

	Geoid Height (m)	Pt minus Mean (m)	Pt minus BM (m)
Max.	28.0131	0.0184	0.0172
Min.	27.9799	-0.0148	-0.0160
Mean	27.9947	0.0000	-0.0012
Std Dev.	±0.0090	±0.0090	±0.0090

- Pt : 각 측정에서의 geoid height.
- BM : 1등 수준점에서의 geoid height.

정표고는 지오이드면의 법선을 따라 측정된 거리이므로 타원체면의 법선을 따라 측정된 거리인 타원체고와는 연직선 편차로 인하여 서로 일치하지 않지만 이 편차는 대개가 30초 미만이다. 2 km의 정표고에 대하여 30초의 연직선 편차에 의한 두 법선의 차이를 계산하면 수 mm에 지나지 않으므로 두 법선이 같다고 가정할 수 있다.

본 대상지역과 같은 소지역에서 지오이드고의 변화특성을 구명하기 위하여 각 측정에서 얻어진 신속측지측량에 의한 타원체고와 관측지역내 1등 수준점(BM)에 근거하여 정밀레벨로 왕복관측하여 얻은 정표고의 두 성과들을 조합하여 산출한 각 측정에서의 지오이드고(N)와 통계치를 표 2와 표 3에 제시하였다.

1등 수준점에서의 지오이드고(27.9959 m)는 30개 측정의 평균 지오이드고(27.9947 m)와 불과 1.2 mm의 차를 보였다. 30개의 측정에서 얻은 지오이드고와 1등 수준점(BM)에서 얻은 지오이드고 간의 차는 -16.0 mm ~ +17.2 mm의 범위 내에 분포하고 있으며, ±9.0 mm의 표준편차를 보였다. 모든 측정에서 얻은 지오이드고의 평균과 각 측정의 지오이드고를 비교할 때 -14.8 ~ +18.4 mm의 범위에서 역시 ±9.0 mm의 표준편차를 나타내었다. 본 대상지역과 같은 소지역에서 한 점의 정표고가 가지라고 가정할 때, GPS 측량에 의하여 약 ±10 mm이내의 정밀도로 수준측량이 가능할 수 있음을 시사해 준다.

그림 10은 GPS/Levelling 방법으로 산출된 지오이드고에 근거하여 실험지역의 지오이드 기복형태를 도시한 것이다.

GPS/Leveling 방법으로 얻은 본 시험지역 내의 지오이드고를 OSU91A 중력장 모델에 근거하여 우리나라 실정에 적합하도록 개발된 PNU95 지오이드모델,¹¹⁾ 그리고 OSU91A 중력장 모델을 개선한 EGM96 지오이드모델¹²⁾을 이용하여 각각 산출한 값들과 비교하였다. PNU95 지오이드는 WGS84 타원체를 기준으로 OSU91A 지구중력

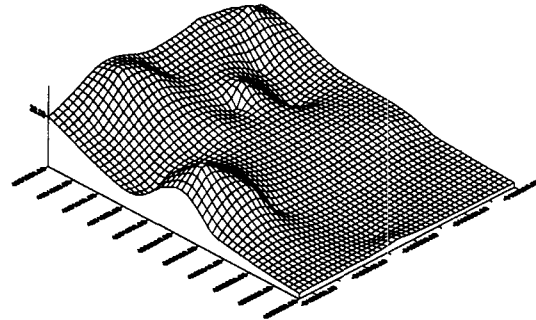


그림 10. Geoid heights in test field

표 4. Comparison of geoid heights derived individually by GPS/Leveling, PNU95 and EGM96 models

	PNU95 minus G/L (m)	EGM96 minus G/L (m)	PNU95 minus EGM96 (m)
Max.	0.1961	-0.3259	0.5230
Min.	0.1639	-0.3581	0.5210
Mean	0.1808	-0.3414	0.5223
Std Dev.	±0.0091	±0.0093	±0.0006

장 모델과 한반도 일원의 중력자료를 이용하여 우리나라의 수준점 망에 적합하게 개발된 것으로서 RMS 오차 0.15 m임을 제시하고 있다.¹¹⁾ 비교 결과, PNU95 모델에 의한 지오이드고와는 +0.16 ~ +0.19 m의 범위에서 교차를 나타내었고, EGM96 모델에 의한 지오이드고와는 -0.36 ~ -0.33 m의 범위에서 교차를 나타냈으며, 따라서 EGM96 모델과 PNU95 모델간에는 평균 0.52 m 정도의 차를 보였다(표 4).

6. 결 론

실시간 이동측량을 포함한 몇가지 방식의 GPS 측량기법과 종래의 측량방법을 병행한 시험관측을 통하여 실시간 이동 GPS측량의 반복재현성, 정확도 및 효율성을 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 약 500 m의 기선에서 정지 측량에 대한 실시간 이동 측량 결과의 편차가 북거와 동거에서 각각 ±3 ~ ±4 mm의 RMS, 타원체고에서 ±13.2 mm의 RMS를 나타냄으로써 수평성분의 반복측위재현성이 수직성분에 비하여 3~4배 정도 높은 것으로 입증되었다.
2. 기준점으로부터 반경 300 m이내 범위의 소지역 시험망에 대한 실시간 이동측량의 결과, 북거에서는 -16.3

~+18.4 mm의 범위에서 평균 -0.4 mm, RMS ± 7.7 mm, 동거에서는 -14.0~+13.9 mm의 범위에서 평균 +0.6 mm, RMS ± 6.3 mm를 나타낸 반면, 타원체고에서는 -22.0~+18.6 mm의 범위에서 평균 -2.7 mm, RMS ± 9.7 mm를 나타내었다.

3. 관측대상지역에서 GPS/Leveling에 의한 지오이드고의 표준편차는 약 ± 9 mm로 나타났으며, 1등 수준점에서 지오이드고에 비하여 -16~+17 mm의 범위에서 역시 ± 9 mm의 표준편차를 나타냈다. 소지역내 1점의 정확한 표고가 알려져 있다면 신속정지 GPS에 의해 ± 10 mm 이내의 정확도로 수준측량이 가능할 것으로 사료된다.

4. 실시간 이동 GPS는 토탈스테이션에 의한 방법에 비하여 소요시간은 별 차이가 없으나 장비대수에 따라 소요인원면에서 최소 2배 이상의 효율성을 갖게 된다. 일반적으로 25~50%의 경비절감 평가가 현실적이고 프로젝트의 관측조건에 따라 80%까지의 절감효과도 기대할 수 있을 것이다.

향후 관련 설계도면을 휴대용 PC에 디스플레이한 상태에서 수신기의 이동경로를 연속적으로 표현하는 실시간 GPS 현장측위시스템이 보편화된다면 각종 목적의 토지측량, 특히 종래의 시행착오적인 좌표측설(stake-out) 등에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 1998년도 한국학술진흥재단 자유공모과제(과제번호 1998-001-E01978) 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로서 이에 심심한 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Timo Allison, Peter Griffioen, and Nicholas Talbot, "Acceptance of Real-Time Kinematic by the Professional Surveyor", Proceedings of ION GPS-94, September 20-23, 1994, 329-337.
2. Dr.-Ing. Hans-Jurgen Euler, Craig Hill and Dipl.-Ing. Urs Muller, "Real-Time Precise Marine Navigation: Description and Results", Proceedings of ION GPS-95, 1995, 1477-1484.
3. Satoru Miura, "GPS Application in Construction Site in JAPAN", 163-166.
4. Tatsunori Sada, Tomonori Takada, "Hard-Hat GPS: Real-Time Kinematic Surveying on Construction Sites", GPS World, November 1994, pp.26-28.
5. 강준목, 최종현, 송승호, "효율적 GIS D/B 구축을 위한 GPS 관측자료의 실시간 보정", 대한토목학회 논문집, 제 19권, 제 III-4호, 1999, 719-727.
6. 심정민, 윤홍식, "실시간 GPS를 이용한 현장성토다짐 관리시스템 개발", 한국측지학회지, 제16권 제2호, 1998, 271-280.
7. Leica Korea Survey System, "Leica GPS Manual System 300".
8. J. P. Thomas Goguen and Time Allison, "Precise RTK Positioning Using the New RTCM-104 V2.1 Standard", ION GPS-96, 1461-1466.
9. Gregory T. French, "Understanding the GPS", GEO, 1996, 123-135.
10. Carl W. Sumpster and Gregory W. Asher, "Real-Time Kinematic GPS for Cadastral Surveys", ASPRS/ACSM, 1994, 147-155.
11. 최광선, 김정희, 양철수, "중력과 GPS자료의 해석에 의한 한반도 남부의 정밀지오이드(PNU95 지오이드), 박회인교수 정년퇴임기념논문집, 1997, 218-225.
12. http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/egm96.html.
13. Seeber G., Wuebbena G., "Kinematic positioning with Carrier Phases and 'On-The-Fly' Ambiguity Resolution", Proc. 5th DMA, II, 1989, 600-609.
14. Jay Satalich, Ralph Ricketson, "Field Test of Trimble 4000 Real-Time Kinematic GPS Survey System", Journal of ASCE Surveying Engineering, Vol. 124, No. 1, February 1998, 40-48.
15. Herbert Landau, Christian Pagels, Ulrich Vollath, "Development and Implementation of a Centimeter-Accurate Real-Time-Kinematic Positioning System", ION GPS-96, 1996, 1485-1491.