특 집

# 초고층건물 첨단 시공계측 관리
# RTK-GPS Based Verticality Control for Tall Building Construction

현대건설 연구개발본부
초고층연구팀

## 1. 서 론

초고층의 건설이 늘어나면서 골조공사 단계에서 건물의 수직도를 일정 범위 내로 유지하는 것이 시공관리 및 구조안정성 측면에서 중요한 관리대상으로 부각되고 있다. 현재 중·고층건물의 경우, 시공측량은 주로 광파기(Total Station)를 이용하여 지상이나 인접건물 옥상에 설치한 기준점으로부터의 거리를 직접 관측하는 방식이 일반적이다. 그러나 이 방법은 건물이 높아짐에 따라 광파기의 적절한 시준거리 및 각도 확보가 어려워 정확도가 떨어지거나 아예 관측 자체가 불가능하게 된다. 따라서 초고층에서는 지하 바닥레벨에 설치한 기준점에서 레이저연직기(Laser Plumber)로 레이저를 상부로 쏘아 수직도를 확보하는 방법도 있지만 관측기간 동안 별도의 개구부를 유지해야 하고, 일정 높이마다 레이저의 정밀도 확보를 위해 기준점을 이설해야 한다.

이에 대한 대안으로 최근 GPS(Global Positioning System)를 초고층건물의 위치계측에 응용하려는 시도가 증가하고 있다. 건설분야의 GPS는 이미 해상항타, 성토 및 토공량 관리, 댐체 및 대사면 변형관리 등에 활용되고 있으나, 상대적으로 높은 수준의 정확도를 필요로 하는 초고층건물의 시공에 활용 가능한 효율적인 GPS 시공계측관리 시스템의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 초고층건물의 시공계측에 적합한 RTK-GPS 모니터링 시스템을 개발하고 이를 고층건물에 테스트하여 현장 적용성을 살펴보고자 한다.

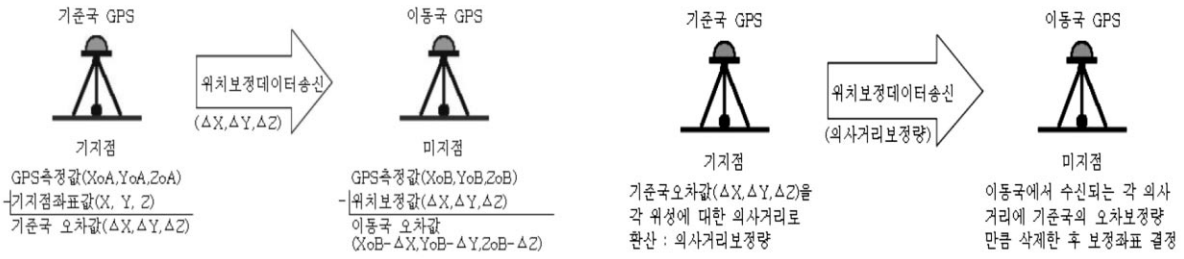
## 2. 측량·계측용 GPS시스템

GPS는 미국에서 군사 목적으로 처음 개발된 것으로 러시아의 GLONASS, 유럽의 Galileo와 함께 대표적인 위성측위시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)중 하나이다. 현재 사용되는 고성능 GNSS 장비는 GPS 신호 뿐 아니라 GLONASS나 Galileo 신호를 함께 수신할 수 있다. GPS는 위성이 송신하는 전파를 수신하는 것이 주 기능이므로 다양한 원인에 의해 측정오차가 발생하게 된다(**표 1**).

GPS의 오차를 줄이고 정확도를 높이기 위해서는 2대 이상의 GPS 수신기를 동시에 가동, 양측에서 동일한 원인에 의해 발생하는 오차를 상대적으로 소거하는 방식이 적합하다(**그림 1**). 대표적으로 DGPS(Differential GPS), RTK-GPS(Real Time Kinematic GPS) 그리고 VRS-RTK(Virtual Reference Station RTK) 방식이

<표 1> GPS의 주요 오차원인

| 분 류 | 오차원인 | 내 용 |
|---|---|---|
| 기본오차 | 기상요인 | 전파가 전리권 · 대기권 통과 시 발생하는 속도변화로 인한 오차 |
| | 기타요인 | 전파혼신 (펄스성 잡음, 통신전파 등) 위성의 궤도운동 오차 |
| 측위환경오차 | 다중경로(Multi-path) | 전파가 지형지물에 반사 후 수신되어 발생하며, GPS의 정확도, 특히 고정확도 측정에 영향 |
| | 주파단절(Cycle Slip) | 직접파와 반사파의 위상관계에 따른 수신강도의 변화에 의해 발생하는 수신신호 불량 |
| 위성배치오차 | 정확도 저하율(DOP) | Dilution of Precision, 위성이 측량지역에 얼마나 고르게 분포하는가에 따른 영향 |




(a) 좌표차 보정방식 (b) 의사거리 보정방식

[그림 1] 상대오차 소거방법 (DGPS, RTK-GPS)

<표 2> GPS의 종류

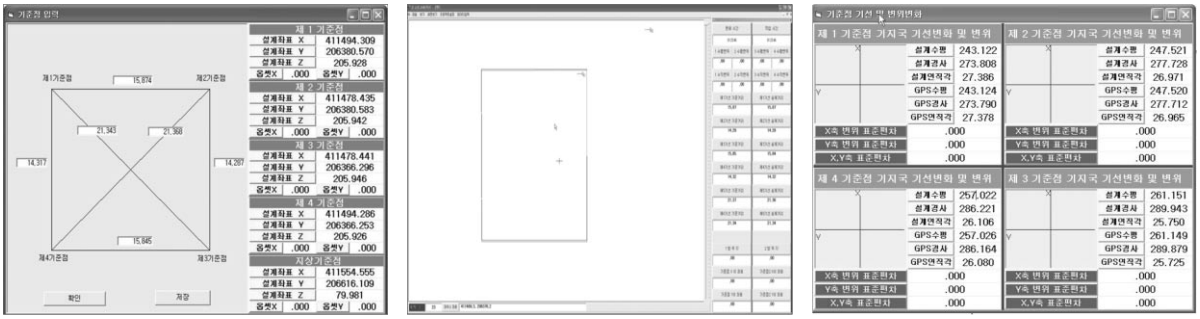
| | DGPS | RTK-GPS | VRS-RTK |
|---|---|---|---|
| 개 념 | RTK와 동일 | 기준국의 데이터로 수신국의 위치신호 보정 | RTK와 동일하나, 기준국을 국가지정 상시관측소 값 사용 |
| 사용신호 | 코드신호 | 반송파신호 | 반송파신호 |
| 정확도 | 30~100cm | 0.3~1cm | 1~3cm |

있으며, 각각의 특징은 다음과 같다(**표 2**). 본 연구에서는 mm 수준의 높은 정확도와 실시간으로 안정된 데이터 취득이 가능한 RTK-GPS 방식을 선택하였다.

## 3. RTK-GPS 모니터링 시스템

초고층건물의 시공계측 관리를 위해 RTK-GPS 모니터링 시스템을 개발하였다. 시스템의 하드웨어는 1대의 기준국 수신기와 4대의 계측용 수신기, 총 5대의 RTK-GPS로 구성된다. GPS로 수신되는 좌표데이터는 프로그램에서 기선해석으로 망조정하는 과정을 거쳐 실시간으로 확인할 수 있다. 프로그램은 사용자 입출력 인터페이스 및 데이터처리 모듈로 구성되며(**그림 2**) 다음과 같은 프로세스로 동작한다.

① 설계도면(CAD file)입력
② GPS 수신점 설계좌표 및 기선거리 입력
③ GPS 신호 수신 및 동기화
④ 망조정 및 오차소거
⑤ 최종 시공좌표 계산



(a) 설계좌표 입력 (b) 설계도면 및 GPS 위치 (c) GPS 수신데이터

[그림 2] RTK-GPS 모니터링 프로그램

(a) 테스트현장 (b) 대상건물

[그림 3] 테스트현장

## 4. 현장 테스트

### *4.1 대상건물*

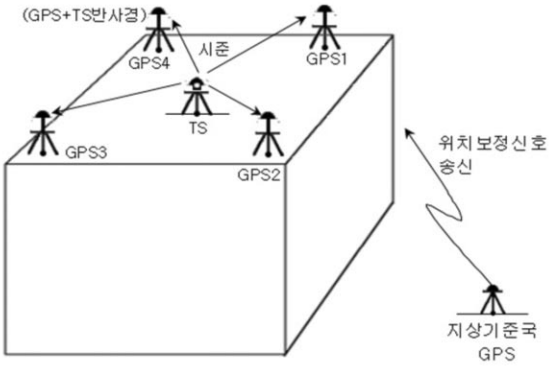
개발된 모니터링 시스템의 검증을 위해, 39층(134 m)높이의 주상복합건물을 대상으로 현장 테스트를 수행하였다(**그림 3**). RTK-GPS 수신기는 건물 옥상의 헬리포트에 설치하였으며, 계측결과는 건물 외부의 지상기준국에서 광파기로 관측한 값과 비교하였다.

### *4.2 현장계측*

먼저 VRS-RTK 방식으로 지상기준국의 위치와 광파기 관측위치를 결정하였다. 지상기준국의 위치는 대상건물에서 약 250 m 떨어진, 직접 광파기 관측이 가능한 곳으로 설정하였다. 다음으로 대상건물 옥상 헬리포트 4지점에 RTK-GPS 수신기를 설치하고 수신기간 거리와 좌표를 광파기로 관측하였다. GPS 관측은 약 80분 동안 실시하였으며, 테스트에 사용된 장비는 **표 3**과 같다. 현장계측의 구성과 순서는 **그림 4**, **그림 5**에 나타내었다.

### *4.3 계측결과*

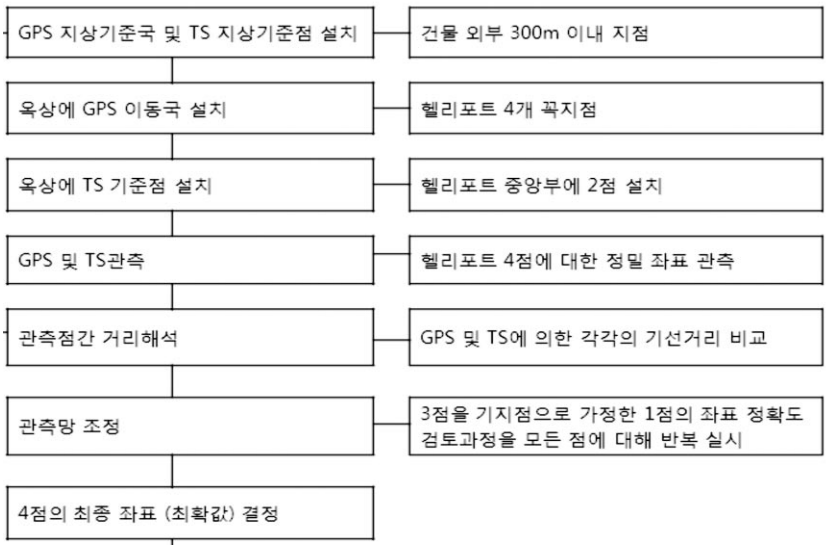
80분 동안 계측한 RTK-GPS의 계측결과는 **표 4**와 같다. 2번을 제외한 다른 세 개의 RTK-GPS




(a) 현장계측 구성도

(b) RTK-GPS 수신기(GPS1~GPS4)

[그림 4] 현장계측 구성




[그림 5] 현장계측 순서

<표 3> 계측장비

| 종류 | 장비명 | 개수 | 용도 |
|---|---|---|---|
| GPS 수신기 | Ashtech ProMark 500 | 4대 | 수신국 3, 기준국 1 |
| GPS 수신기 | Ashtech ProFlex 500 | 1대 | 수신국 1 |
| 광파기 | Leica TCR 802 TS | 1대 | 기선거리 관측용 |
| 반사경 | 360° 전방향 반사경 | 4개 | GPS위치 계측용 |
| 데이터통신기 | 4W UHF 무선송신기<br>2W UHF 무선수신기 | 1대<br>4대 | GPS간 데이터 통신용 |
| 노트북 | Dell Inspiron | 1대 | 데이터취득 및 프로그램 구동 |

<표 4> RTK-GPS 계측결과

| 구 분 | | X좌표 (m) | Y좌표 (m) | 높이 (m) |
|---|---|---|---|---|
| GPS 1 | 평균 | 411494.4173 | 206380.5405 | 205.8862 |
| | 표준편차 | 0.0028 | 0.0015 | 0.0021 |
| GPS 2 | 평균 | 411478.9275 | 206380.3563 | 205.4002 |
| | 표준편차 | 1.3544 | 0.6678 | 1.0002 |
| GPS 3 | 평균 | 411478.5543 | 206366.2646 | 205.8016 |
| | 표준편차 | 0.0024 | 0.0009 | 0.0018 |
| GPS 4 | 평균 | 411494.3957 | 206366.2233 | 205.7908 |
| | 표준편차 | 0.0026 | 0.0003 | 0.0026 |

는 표준편차 0.3 mm ~ 2.8 mm 범위에서 안정적인 수신결과를 보여준다. 2번 수신기의 상대적으로 큰 표준편차는 타 기종의 GPS사용에 따른 일정 데이터 취득구간에서의 고정해(Fix-value) 계산의 불안정에 기인하는 것으로 판단되며, 전반적으로 RTK-GPS로 신뢰할 수 있는 계측결과를 얻을 수 있었다.

RTK-GPS 계측결과의 정확성을 확인하기 위해, 광파기로 관측한 수신기 사이의 거리(기선거리)와 RTK-GPS로 계산된 기선거리를 비교하였다. RTK-GPS는 높은 정확도의 실시간 계측이 가능하므로, 임의의 시각에서의 기선거리와 3분 동안 1Hz로 계측한 결과의 평균값으로 측정된 기선거리를 각각 **표 5**와 **표 6**으로 나타내었다. 표에서 GPS[A]는 RTK-GPS 값으로 계산된 기선거리를, GPS[B]는 측정값에 포함된 오차를 최소화하기 위해 적용한 망조정 후의 기선거리를 의미한다.

**표 5**의 임의시각에서 광파기와의 기선거리 차이는, 망조정 전 0.5 ~ 11.2 mm, 망조정 후 0.1 ~

<표 5> 기선거리 측정결과 (측정시각 13:51:40)

| | 광파기 | GPS[A] | GPS[B] | 광파기-GPS[A] | 광파기-GPS[B] |
|---|---|---|---|---|---|
| L1 [GPS 1-2] | 15.874 m | 15.8852 m | 15.8718 m | 11.2 mm | 2.2 mm |
| L2 [GPS 2-3] | 14.287 m | 14.2884 m | 14.2875 m | 1.4 mm | 0.5 mm |
| L3 [GPS 3-4] | 15.845 m | 15.8426 m | 15.8451 m | 2.4 mm | 0.1 mm |
| L4 [GPS 4-1] | 14.317 m | 14.3164 m | 14.3162 m | 0.5 mm | 0.7 mm |

<표 6> 기선거리 측정결과 (3분 계측평균값, 14:26:01~14:29:00)

| | 광파기 | GPS[A] | GPS[B] | 광파기-GPS[A] | 광파기-GPS[B] |
|---|---|---|---|---|---|
| L1 [GPS 1-2] | 15.874 m | 15.8737 m (2.7 mm) | 15.8764 m (2.8mm) | 0.2 mm | 2.4 mm |
| L2 [GPS 2-3] | 14.287 m | 14.2851 m (3.0 mm) | 14.2851 m (2.0mm) | 7.1 mm | 7.1 mm |
| L3 [GPS 3-4] | 15.845 m | 15.8408 m (0.1 mm) | 15.8454 m (0.5mm) | 4.2 mm | 0.4 mm |
| L4 [GPS 4-1] | 14.317 m | 14.3165 m (0.1 mm) | 14.3184 m (1.3mm) | 0.5 mm | 1.3 mm |

※ 괄호 안의 값은 계측값의 표준편차임

2.2 mm로 측정되었다. 광파기의 관측오차가 약 2 ~ 3 mm 수준임을 감안하면, 광파기 측정과 유사한 정확도를 갖는 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 마찬가지로 **표 6**에서도 기선거리 차는 망조정 전과 후가 각각 0.2 ~ 7.1 mm, 0.4 ~ 7.1 mm로 각 기기의 측정오차를 고려할 때 안정적이면서도 유사한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 초고층건물 시공현장에서 본 연구에서 개발한 RTK-GPS 모니터링 시스템을 사용하는 경우 광파기와 유사한 수준의 수직도 측정이 가능하며, 실시간 계측을 통해 짧은 시간 내에 정확한 시공좌표 값을 결정할 수 있으므로 수직도관리로 인한 작업 지연 시간을 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초고층건물의 시공계측 관리를 위한 RTK-GPS 모니터링 시스템을 개발하고 현장테스트를 통해 적용 가능성을 확인하였다. 이로부터 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 80분 동안 취득한 RTK-GPS 데이터의 표준편차는 0.3 mm ~ 2.8 mm 범위로 (GPS 2번 제외), 후처리 없이 현장에서 실시간으로 측정한 RTK-GPS 값으로도 신뢰할 수 있는 계측결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

2) 광파기와 RTK-GPS로 측정한 기선거리를 비교한 결과, 망조정을 거친 GPS와 광파기의 기선거리 차는 0.1 ~ 7.1 mm로 측정되었다. 따라서 각 방법의 측정오차를 감안하면 RTK-GPS로도 광파기 수준의 정확한 측정결과를 얻을 수 있다.

3) 본 연구를 통해 개발된 RTK-GPS 모니터링 시스템은 실시간 데이터 취득을 통한 신속하고 정확한 시공좌표 확정이 가능하므로, 광파기로 관측이 어려운 구조물의 수직도 관리가 필요한 현장에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 6. 참고문헌


1. 최윤수, 허민, 서용철(2007), 新 · GPS 측량의 기초, 대한측량협회.
2. 정연백, 석원균, 박순전(2008), GPS계측을 이용한 거푸집 연직도 관리에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제 28권 제 1호, p507-510.
3. Douglas Hayes외(2006), Core Wall Survey Control System for High Rise Buildings,XIII FIG Congress.
4. 박효선, 손홍규, 김일수, 박재환(2005), GPS를 이용한 고층건물의 수평변위 모니터링시스템, 대한건축학회논문집 구조계 21권 5호, p11-18.
5. 동원측량콘설턴트, 최신 GNSS 측량 시스템.