

RTK GPS와 IMU에 의한 대형구조물 모니터링 시스템 구축

Construction of Monitoring System for Enormous Structure using RTK GPS and IMU

박운용^{1)*}, 이용희²⁾, 김희규³⁾, 문두열⁴⁾

Park, Woon Yong, Lee, Yong Hui, Kim, Heu Kyu, Moon Doo Youl

- 1)* 동아대학교 공과대학 토목해양공학부 교수, 공학박사(E-mail:uypark@daunet.donga.ac.kr)
- 2) 양산대학 건설교통정보과 부교수, 공학박사 (E-mail : yhlee@mail.yangsan.ac.kr)
- 3) 경남정보대학 토목과 교수, 공학박사 (kimhg51@hanmail.net)
- 4) 동의대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사 (E-mail:dymun@hyomin.donggeui.ac.kr)

1. 서 론

정밀위치결정에 있어서 인공위성을 이용한 범지구위치결정시스템인 GPS는 초기 군사목적용을 벗어나 자동차, 선박, 비행기 등의 항법은 물론 측량분야, 지각 및 구조물의 변위 감시, 우주, 통신, 국방 분야 등 매우 광범위한 분야에서 활용되고 있으며, 그 이용도가 급속히 증가하는 추세에 있다.

특히 SA (Selective Availability)의 해제 이후, GPS를 이용하여 수 mm의 정도로 위치 및 변위 관측이 가능하므로 지각, 단층 등의 자연물은 물론 가스시설, 교량, 건축물, 댐 등 각종 구조물의 미세 변위 관측과 모니터링에 의해 재해 예방 등의 방재분야에서 그 응용이 국내외적으로 큰 주목을 받고 있다.

대부분의 재래식 모니터링 기법은 기준점이 구조물 자체에 위치해 있으며, 가속도계, 변위 관측기계, 스트레인 게이지 (strain gauges)를 이용한 관측을 이용할 때 장기간의 상대적 변형뿐만 아니라 단기간의 구조물 동적 반응에 대하여 평가할 수 있다. 그러나 이들 방법은 구조물에 부착하기 때문에 고장시 교체하기 어려워 영구적이지 못하다. RTK GPS는 저비용

으로 주기적이고 빈번한 모니터링이 가능하고, 관측에 의해 단기간의 구조물 거동을 추적하는데 이용될 수 있기 때문에 장비의 자동화로 관측될 때 모니터링이 효과적이다.

일반적으로 구조물 안전에 대한 모니터링은 관측과 육안조사로 구성되며, 관측 목적, 구조물 형태와 크기, 위치조건에 따라서 알맞은 기계를 이용하여 영구적으로 관측되어야만 한다. 구조물 안전에 대한 모니터링에서 구조물의 형태에 따라서 변형량과 관측주기가 다를 뿐만 아니라 구조물의 재질에 따라서 구조물에 미치는 영향과 변형이 다르다.

또한 구조물의 종류와 상태에 따른 모니터링 시스템은 단기 하중과 장기 하중 변형에 대한 측량을 필요로 한다. 풍하중, 교통하중, 지진하중에 의한 짧은 시간의 단기간 하중은 비틀림 강재 구조물과 같은 곳에서 변형을 일으키며, 이러한 변형이나 빠른 거동은 많은 횡수로 관측하여야 한다. 그러나 장기적인 영구 변형은 주기적인 관측으로부터 획득된 절대적인 변형과 변위로 평가되며, 외부 기준점으로부터 구조물의 모니터링 점으로 형성되거나 절대적 기준점에 대한 상대적 점으로 형성된다. 따라서 단기변형이나 장기변형 모니터링을 하기 위해서는 구조물에 부착되

는 센서뿐만 아니라 상대적 관측이 가능한 위성측량 시스템을 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 GPS를 이용하여 교량 주탑의 거동상태를 확인할 목적으로 거동해석을 하기 위하여 연구대상 교량의 주탑에 GPS, 가속도계, 풍향계, 풍속계를 설치하였다. 이들 관측기계에 대해 주기적인 관측을 실시하여 풍향·풍속과 변위와의 관계를 분석하였고, 실시간 관측을 하기 위해서 Visual C++로 실시간 동적 RTK 모니터링을 할 수 있는 시스템을 개발함으로써 구조물의 안정성 해석 및 유지 관리에 본 연구가 크게 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다. 짧은 시간의 단기간 하중은 비틀림 강재 구조물과 같은 곳에서 변형을 일으키며, 이러한 변형이나 빠른 거동은 많은 횡수로 관측하여야 한다.

그러나 장기적인 영구 변형은 주기적인 관측으로부터 획득된 절대적인 변형과 변위로 평가되며, 외부 기준점으로부터 구조물의 모니터링 점으로 형성되거나 절대적 기준점에 대한 상대적 점으로 형성된다. 따라서 단기변형이나 장기변형 모니터링을 하기 위해서는 구조물에 부착되는 센서뿐만 아니라 상대적 관측이 가능한 위성측량 시스템을 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 GPS를 이용하여 교량 주탑의 거동상태를 확인할 목적으로 거동해석을 하기 위하여 연구대상 교량의 주탑에 GPS, 가속도계, 풍향계, 풍속계를 설치하였다. 이들 관측기계에 대해 주기적인 관측을 실시하여 풍향·풍속과 변위와의 관계를 분석하였고, 실시간 관측을 하기 위해서 Visual C++로 실시간 동적 RTK 모니터링을 할 수 있는 시스템을 개발함으로써 구조물의 안정성 해석 및 유지 관리에 본 연구가 크게 기여를 할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 모니터링 시스템 설계

모니터링 시스템을 설계할 때에는 검사된 구조물의 거동과 환경이 예상된 형태를 따르는지 검사하기 위해서 불규칙적인 거동이나 변형을 가능한 쉽게 발견할 수 있어야 한다. 불규칙적인 거동의 경우에는 가능한 실제 변형 상태와 동일한 모니터링 시스템이 갖추어져야하기 때문에 시스템 설계는 최대 변형량이 기대되는 점들에 정적으로 설치해야하고, 필요하다면 불규칙적인 거동을 일으키는 점들에 설치할 수 있다. 대개 전체적으로 기대된 변형 또는 거동은 유한 요소 모델링이나 경험적 통계 모델링 기법을 사용하여 예상할 수 있다. 어떤 비정상적 변형량들을 발견한다면, 야기하는 요소들의 확인에 가장 적합하게 나타내는 사전 측량 분석으로 이들 위치에 추가 관측을 해야 한다. 모니터링 시스템의 신뢰성을 검사하기 위해서, 기계와 측점에 대한 정확한 관측이 필요하다. 비록 영구적으로 설치되었다 할지라도 모니터링 기계의 결점과 고장이 유발될 수 있으며, 따라서 기계들을 분리하여 이용하고, 평가 자료를 위한 방법 즉, 다른 방법을 이용한 이중 검사가 필요하다. 알맞게 설계된 모니터링 계획은 다른 관측 방법으로부터 잉여 관측과 자가 검정용 시스템으로 통합해야 한다. 그러므로 모니터링 시스템의 설계는 다음과 같은 것을 포함해야 한다.

- 근사적인 관측값들의 확인
- 모니터링 측점에 알맞는 위치 확인
- 요구된 정확도와 측정 범위의 결정
- 반복 관측 빈도의 결정
- 사용할 기계와 센서 그리고 다른 방법들의 선택
- 자료 관리 시스템의 설계
- 잉여 및 고장 검사 시스템의 설계
- 실험과 Calibration 시설물들의 설계

3. 연구대상

본 연구에서는 시설물 안전관리법에 의해 모니터링이 가능한 대형구조물인 현수교를 대상으로 RTK GPS와 계측 센서들을 결합한 구조물 모니터링 목적에 적합한 그림 1과 같은 실험대상을 선택하였고, 실험 대상 구조물은 현재 시공이 완료되어 차량이 운행중인 광안대로의 주탑을 선택하였다. 연구 대상 구조물의 거동 모니터링을 해석하기 위해서 하나의 주탑을 대상으로 주탑 최상부에 GPS, 가속도계, 풍향 및 풍속계를 설치하였다.

광안대로는 1994년 12월에 착공하여 2003년 1월에 개통하였으며, 전체 총연장은 7.42km로서 현수교 길이는 0.9km, 폭은 18~25m로서 2층 구조로 되어있다. 최대 풍속은 45m/sec로 설계되었으며, 주탑의 높이는 부산 앞바다 평균해수면을 기준으로 116.5m이다. 실시간 동적측위의 기지국 사용과 모니터링 측량 결과를 분석 목적으로 사용할 측점의 좌표를 구하기 위해서 2002년 12월 28일에 4시간 동안 Trimble 5700과 Ashtech 수신기 4대를 이용해서 그림 2와 같이 두 개의 삼각점과 두개의 기지국 그리고 연구대상인 두 주탑으로 관측망을 구성하였다.



그림 1. 실험대상

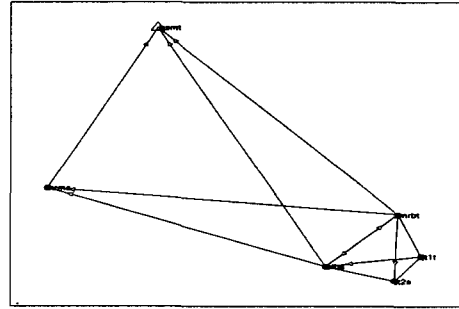


그림 2. GPS 망

4. 개발된 모니터링 시스템과 변위 분석

4.1 개발된 RTK GPS 모니터링 시스템

RTK GPS 시스템에서 획득되는 자료를 컴퓨터에 실시간으로 입력하기 위해서는 먼저 획득된 자료를 컴퓨터에 전송하고, 이후 획득된 자료를 일정한 주기로 컴퓨터로 전송하는 프로그램이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 자료 획득과 전송 프로그램으로 Hyper Terminal을 이용하였다. Hyper Terminal에서 일정시간 획득된 자료를 컴퓨터로 전송하고, 이들 자료를 처리하는 동안 획득된 자료를 다시 컴퓨터로 전송하는 일련의 과정이 이루어진다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어 시스템의 일반적인 흐름도는 그림 3에서 보여지는 것과 같다. 이 프로그램의 주요 금속판은 모니터링 시스템의 거동에 대한 모니터링 값을 추출하기 위해서 연속적 자료들을 분석하고, 특별한 기준값과 결과를 비교하는 것이다.

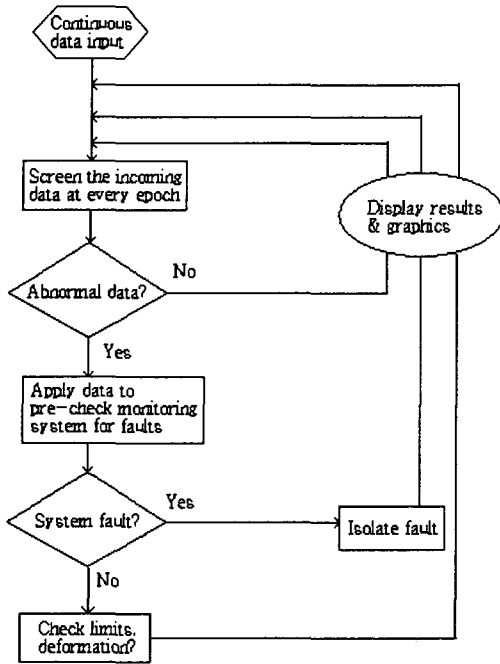


그림 3 개발된 시스템의 흐름도

4.2 모니터링 분석

각각의 방법에 의해 관측된 모니터링 측정값을 분석하기 위해서 회귀곡선을 이용하여 각각의 축에 대한 정확한 변위를 분석하고자 한다. 먼저 RTK GPS로 측정된 N축의 모니터링 값과 회귀곡선은 그림 4에 나타내었고, IMU의 가속도계로 측정된 N축의 모니터링 값과 회귀곡선은 그림 5에 나타내었다. 회귀곡선은 한 변수로부터 다른 변수의 값을 예측함으로써 관련 변수들 간의 상호 연관성을 규명할 수 있고, 변수들 간의 연관관계를 적절한 함수식으로 표현하여 자료 분석을 쉽게하는 통계적 기법이다. 본 연구에서는 matlab 프로그램을 이용하여 관측된 자료에 대해 분석하였다.

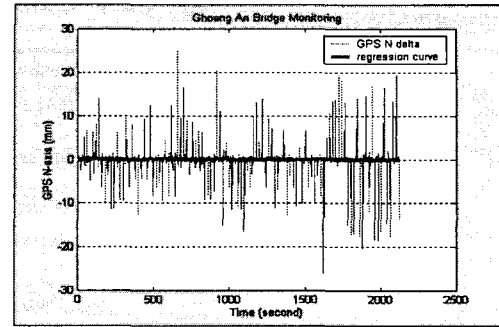


그림 4. N축 거동(RTK GPS)

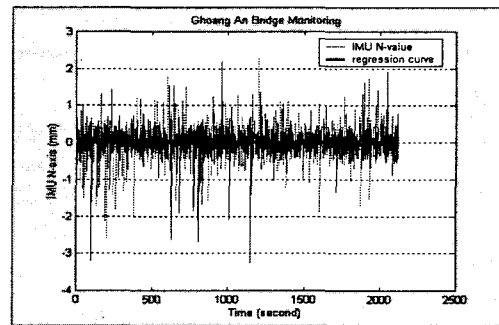


그림 5. N축 거동(IMU)

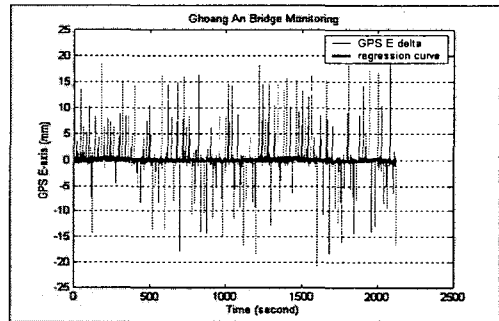


그림 6. E축 거동(RTK GPS)

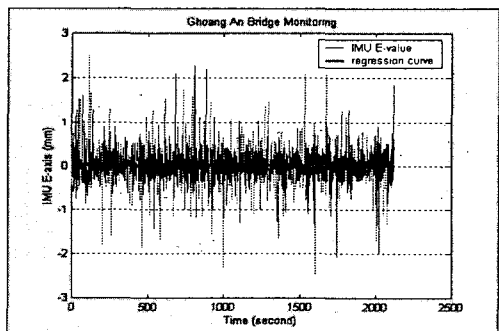


그림 7. E축 거동(IMU)

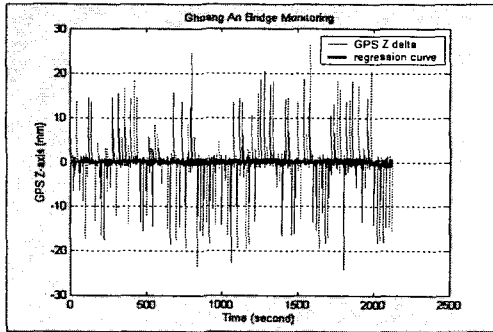


그림 8. Z축 거동(RTK GPS)

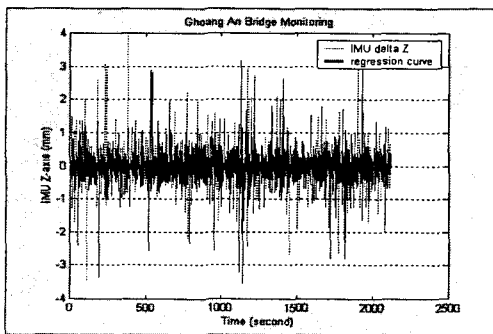


그림 9. Z축 거동(IMU)

그림 5는 RTK GPS로 관측된 실험대상 에 대한 N축 모니터링값으로서 오차를 소 거하지 않고 관측값의 편차를 나타내었 으며, 최대 모니터링 값은 $\pm 25\text{mm}$ 이다. 그림 6은 IMU로 관측된 실험대상 에 대한 N축 모니터링값으로서, 자체적으로 오차를 소 거한 관측값의 편차를 나타내었으며, 최대 모니터링 값은 $+2.5\text{mm} \sim -3.2\text{mm}$ 을 나타 내고 있다. 그림 7은 RTK GPS로 관측된 실험대상 에 대한 E축 모니터링값으로서 오차를 소거하지 않고 관측값의 편차를 나타내었으며, 최대 모니터링 값은 $\pm 20\text{mm}$ 이다. 그림 8은 IMU로 관측된 실험대상 에 대한 N축 모니터링값으로서, 자체적으로 오차를 소거한 관측값의 편차를 나타내었으며, 최대 모니터링 값은 $\pm 2.5\text{mm}$ 을 나타내고 있다.

그림 9는 RTK GPS로 관측된 실험대상 에 대한 Z축 모니터링값으로서 오차를 소 거하지 않고 관측값의 편차를 나타내었 으며, 최대 모니터링 값은 $\pm 25\text{mm}$ 이다. 그림

10은 IMU로 관측된 실험대상 에 대한 Z축 모니터링값으로서, 자체적으로 오차를 소 거한 관측값의 편차를 나타내었으며, 최대 모니터링 값은 $\pm 3.5\text{mm}$ 을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 RTK GPS 방법과 관성 항법장치인 IMU를 이용하여 현수교 주탑 의 거동을 측량하였다. 먼저 RTK GPS 방법의 모니터링 정확도를 분석하였고, 이 를 바탕으로 RTK GPS를 이용한 모니터 링 시스템을 개발하고 IMU를 이용한 모 니터링 결과와 비교하였다. 본 논문의 연 구결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있 었다.

1. RTK GPS기법을 적용하여 동일 안테 나에 연결된 이동국에서 좌표값을 연속 적으로 관측 결과에 대해 수신기 잡음 과 다중경로 오차를 제거하여 IMU 가 속도값과 비교한 결과, 각 측방향 변위 차가 1mm정도로서 RTK GPS기법을 이용한 구조물 모니터링 측량이 가능함 을 알 수 있었다.
2. RTK GPS의 정확한 모니터링 결과를 산출하기 위해서 수신기 잡음과 다중경 로 오차에 대해 분석한 결과, 수신기 잡음은 미소하였으나 다중경로 오차는 높게 발생함으로, 모니터링 관측에서 다중경로 차단 수신기 사용이 바람직하 다고 판단된다.
3. 풍향 및 풍속에 대해 RTK GPS, IMU 관측값을 분석한 결과, 최대 풍속인 7.35m/sec에서 N축 방향에서는 거의 일치하는 2.0mm 정도의 변위를 나타내었 고, E축 방향에서는 2.2mm 정도의 변 위를 나타내지만, 변위의 방향은 정확 하게 일치하지 않음을 알 수 있었다.
4. 본 연구에서 개발한 RTK GPS 모니터 링 시스템은 고유진동수가 낮은 대형구 조물의 실시간 모니터링 측량에 이용

가능한 것으로 판단한다.

따라서 RTK GPS에 의한 구조물 모니터링의 정확도를 향상시키기 위해서는 무선통신의 출력범위, 빠르고 정확한 미지정수 결정, GPS를 비롯한 관성센서 오차에 대한 정확한 분석이 가능하다면 향후 더욱 효율적인 원격 모니터링 시스템의 구축이 가능할 것으로 기대된다

참 고 문 헌

1. Hubiao Lan, "Development of a Real-Time Kinematic GPS System; Design, Performance and Results", *Ph. D. Thesis, Dept. of Geomatics Engineering, the University of Calgary, Canada, 1996, pp.14-16.*
2. C. Ogaza, "A Framework in Support of Structural Monitoring by Real Time Kinematic GPS and Multisensor Data", *Ph. D. Thesis, the New South Wales University, 2002, pp. 10-19.*
3. G. Even-Tzur, "GPS Vector Configuration Design for Monitoring Deformation Networks", *Journal of Geodesy, 2002, pp. 455-461.*
4. Wei M. and K. P. Schwarz, "A Strapdown Inertial Algorithm using an Earth-Fixed Cartesian Frame", *Journal of the Institute of Navigation, Vol. 37, No. 2, 1999, pp. 153-167.*
5. Ogaja. C., C. Rizos, J. Wang & J. Brownjohn, "Towards the implementation of on-line structure monitoring using RTK GPS and analysis of results using the wavelet transform", *10th FIG Int. Symp. on Deformation Measurement, Orange, California, March 19~22, 2001, pp. 284~293.*