

GPS와 IMU에 의한 현수교 주탑 모니터링에 관한 연구

이재원

동아대학교 토목공학부

Monitoring of Main Tower of a Suspension bridge by GPS and IMU

Jaeeon Lee

Div. of Civil Eng., Dong-A University

요 약 : 실시간 동적 GPS (Real-Time Kinematic Global Positioning System) 측량과 관성항법장치인 IMU(Inertial Measurement Unit)는 보다 정확한 지형정보의 획득과 동체의 모니터링에 이르기 까지 그 활용범위가 확대되어 가고 있다. 실시간 동적 GPS 측량 측량은 점 고정에 의해 실시간 상대위차관측방식으로 고정밀도 관측을 수 초 안에 신속히 수행할 수 있으며, IMU는 정확하게 동적자세를 결정할 수 있기 때문에 교량 등 대형구조물의 거동을 모니터링 하는데 유용한 방법으로 대두되고 있다. 따라서 본 연구에서는 대형구조물의 거동을 모니터링하는 시스템을 구축하기 위해서 GPS 측위방법 중 실시간 동적 GPS 측량 방법을 이용하여 현수교 주탑의 거동을 측량함에 있어, 먼저 GPS에 의한 정확한 위치를 분석하였으며, 이를 바탕으로 실시간 동적 GPS 측량과 IMU를 이용한 모니터링 경보 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템으로 관측한 결과와 비교하여, X축은 1mm, Y축은 1mm, Z축은 2.2mm로서 실시간 동적 GPS 측량과 IMU를 이용한 구조물 모니터링 측량이 가능함을 입증할 수 있었다.

주요어 : 실시간 동적 GPS, 관성항법장치, 대형구조물, 교량, 모니터링

ABSTRACT : Applications of the real-time kinematic GPS surveying and inertial measurement unit have been being extended to the body monitoring in addition to the acquisition of more precise geographic information. RTK GPS allows the use of a static base station and remote rover unit to allow for data collection within several seconds and in real time. It is useful for monitoring the behaviors of massive structures like bridges. And this study purposed to implement a method of deciding the accurate dynamic attitude of structures by IMU. In this study, among GPS methods, we used RTK GPS to analyze the precision of monitoring and then on the basis of it, we developed a monitoring system using RTK GPS and IMU when measured the behavior of main tower of a suspension bridge by using RTK GPS. Comparing a deviation between observation values, X axis was 1mm, Y axis was 1mm and Z axis 2.2mm. It turned out that it was possible to monitor and measure structures by RTK GPS and IMU.

Key words : RTK GPS, IMU, massive structure, bridge, monitoring

1. 서 론

최근 전자장비의 발달로 인해 관성 항법장치와 제어 시스템이 각종 구조물의 동적거동에 적용되고 있다. 이러한 시스템은 구조물의 동적 정보인 현재 위치, 속도 및 자세의 빠른 획득과 갱신을 생성하는 항법체계가 필요하다. 대표적인 항법시스템으로는 GPS(Global Positioning System)와 관성항법시스템인 INS(Inertial

Navigation System)을 들 수 있다.

구조물 안전과 지속적 운영에 필요한 구조물의 연속적 모니터링에 대한 연구의 필요성이 증가하고 있다. 효율적인 모니터링 연구는 관측오차를 제거하여 변형량을 탐색하는 것으로, 일반적인 모니터링 기법은 구조물 자체에 설치된 가속도계, 스트레인 게이지(strain gauges)를 이용함으로써 장기적인 상대적 변형뿐만 아니라 단기적인 구조물 동적 반응에 대하여 평가할 수 있다. 그

리나 이들 방법은 구조물에 부착하기 때문에 고장 시 교체하기 어려워 영구적이지 못하다. 실시간 동적 GPS 측량은 저비용으로 주기적이고 빈번한 모니터링이 가능하고, 관측에 의해 단기간의 구조물 거동을 추적하는데 이용될 수 있기 때문에 장비의 자동화로 관측될 때 모니터링이 효과적이다(Hubiao Lan, 1996).

본 연구에서는 GPS와 IMU를 사용하여 교량의 변위와 가속도를 관측하고, 이를 풍향계 및 풍속계와 연계하여 해석하였고, 교량의 안정성을 평가하는데 효과적으로 적용될 수 있는 가능성을 고찰해 보았다. 또한 측정된 자료를 이용하여 개발된 실시간 정보 시스템에 적용하여 모니터링하였다.

2. 구조물 모니터링에 실시간 동적 GPS와 IMU 적용

GPS는 현재 항법을 비롯한 정밀측위 등 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 사용용도에 따라서 관측방법을 달리하기 때문에 정확도에도 영향을 미친다. 최근에 주로 사용되고 있는 실시간 동적 GPS측량은 짧은 시간에 연속적으로 많은 자료를 취득할 수 있을 뿐만 아니라 반송파 주파수를 이용하기 때문에 그 정확도면에서도 우수한 것으로 보고되고 있다.

구조물 변형에는 다른 형태 즉, 두 가지의 그룹으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 수압, 온도차 또는 느린 지각 활동에 의한 장기간의 느린 움직임이고, 두 번째 종류는 불규칙한 풍속, 지진 또는 차량 하중에 기인하는 단기간의 빠른 움직임이다. 빠른 변형은 일반적으로 재해 격감, 위험 분석에 대해 더욱 중요하고, 일시적인 정적 GPS 관측에 의한 모니터링에 어렵다. 느린 변위, 온도의 팽창·수축 또는 침하는 상대적으로 오랜 시간 동안에 발생하고, 몇 시간 또는 그 이상의 시간에 대한 GPS 자료의 평균 시간은 반복 측량으로 변형 경향을 파악하기 위해서 거의 mm 수준의 정확도로 기선 해석을 제공하는데 사용된다(Ogaja, C., 2001). 몇 초 간격으로 발생하는 빠른 변형을 측량하기 위해서, 고샘플링 비율(20Hz)로서 실시간 동적 GPS측량을 사용한다.

대부분 GPS 방법들에 의해 제공된 정확도들이 가장 정밀한 지상기법보다 더 낮을지라도, 실시간 동적 GPS 측량은 장기간의 연속적 모니터링 적용에 충분한 정확도를 제공한다. 그러나 GPS 측량 시스템은 고품질, 고

비용의 2주파 수신기를 사용해야 하며, 기준국과 한 점 또는 그 이상의 이동국으로 구성되며, 기준국은 신호 차단과 반사에 의해 야기되는 측정 독립오차를 최소화하기 위해서 시야가 좋은 장소에 설치하고, GPS 위성에 대한 원시 의사거리와 반송파 자료 또는 그들의 보정값들은 기준국에 저장하여 알맞은 메시지 형식 또는 표준 형식(RTCM)을 이용하여 통신 링크를 통해 이동국에 전송한다. 표준 RTK 배치에서 이동국은 실시간으로 이동국 위치를 해석하기 위해서 자체 측정값과 전송된 자료를 조합함으로써 위성 시계오차, 위성궤도 오차, 전리층 및 대류권 오차 등이 상당히 감소하지만 오차의 공간적 상관성이 수신기 거리에서 많이 좌우되므로 10km 미만이 바람직하다(Hofman Wellenhof, B., 2001).

구조물 모니터링에 RTK-GPS를 사용할 때, 하나 또는 그 이상의 GPS 이동국 안테나를 중요 구조물에 부착시키고, 기준국은 명확히 위성 가시성이 좋은 근처의 위치에 설치한다. 만약 이 관측방법을 단기선에 대해 측량한다면 대류권 영향에 의한 오차는 무시할 수 있다. 그러므로 복잡한 케이블, 타워 크레인에 의한 신호 단절 오차와 교량 상판, 빌딩 벽, 댐의 벽에 의한 신호 반사에 따른 오차 즉, 다중경로 오차는 대부분 피할 수 없기 때문에 특정한 모니터링 환경에 대해 주의 깊게 연구되어야 한다. 구조물상의 중요한 위치에서 RTK-GPS의 사용은 절대적 측량과 상대적 측량의 해석을 통해 구조물 거동의 정밀한 모니터링이 가능하다. 구조물상의 중요 위치에 대해 시간에 따른 변위를 획득할 수 있다. 예를 들면 교량의 경우, 적당한 위치에 설치된 GPS 수신기는 교량 상판, 타워의 변위 진폭뿐만 아니라 국부적 기준점에 대한 상대적인 교량의 주요 요소의 움직임을 실시간으로 나타낸다. 접합부에 대한 상대적인 교각의 움직임, 교량 기초에 대한 타워의 꼭대기, 지반에 대한 지간은 cm 수준의 정확도로 획득될 수 있다. 구조물에 설치된 실시간 동적 GPS 측량에 의해 제공되는 정보는 지연 없이 정보를 획득할 수 있다. 그때 구조물의 반응은 다른 초기 변위 또는 변화하는 동적 특성에 따라 평가할 수 있고, 실시간 모니터링은 불규칙적인 구조물 활동에 대해 정보 시스템으로 사용할 수도 있다.

또한 IMU는 주로 항법과 계측용 장비에 사용되는 관성항법 장치로서 연속적인 속도, 위치 정보를 단기간에서는 정확하게 획득할 수 있지만 시간이 지날수록 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 하지만 GPS에서 제

공되는 위치정보는 시간에 따라 변하지 않는 지속성을 가지고 있기 때문에 두 기술을 함께 사용하는 것이 유리하다. 따라서 최근에 개발된 관성항법장치들은 자체적으로 Kalman filter 방법을 이용하여 자동으로 오차를 보정한다든지 아니면 GPS와 결합하여 사용할 수 있도록 하는 통합 시스템이 주를 이루고 있다.

GPS 관측값은 시계오차, 수신기 잡음, 위성궤도 등의 오차와 지구 대기권의 전리층과 대류권 지연, 수신기의 환경적 요인인 다중경로와 같은 오차를 포함하고 있다. 따라서 정확한 모니터링 결과를 산출하기 위해서는 이들 오차를 소거하여야 하지만, 수신기 잡음과 다중경로를 제외한 거의 대다수의 오차요소들은 처리 과정에서 소거된다. 그러나 이들 두 오차는 소거할 수 없기 때문에 본 연구에서는 수신기 잡음은 급속 푸리에 변환을 이용하여 관측값에서 이들 오차를 제거하고, 다중경로 영향은 현장과 비슷한 환경 조건을 만들어 실험함으로써 획득된 관측값에서 제거하였다. IMU의 가속도계로 획득된 관측값은 앞에서 언급했듯이 IMU 자체의 자동 보정으로 소거되었다고 가정하였다. 이들 관측값에서 정확한 결과를 산출함으로써 실시간 동적 GPS 측량 결과값에 대해 검증하였고, 이를 바탕으로 본 연구에서 개발하고자 한 실시간 동적 GPS 측량에 의한 경보 시스템은 구조물의 유지관리 정보를 제공할 뿐만 아니라 각종 자료들은 교량 내하력 평가의 중요자료로 사용할 수 있다. 또한 구조물에 이상변형이 발생했을 때 그리고 바람, 지진과 같은 자연적 재해로 인하여 붕괴 상태에 가까워졌을 때 경보시스템의 작동으로 차량 및 보행자의 안전을 확보할 수 있다.

3. 경보 시스템 구현

경보 시스템은 시스템에 의해 공급된 정보의 정확성을 바탕으로 시스템이 정해진 정밀도에 미치지 못할 때, 사용자에게 적절한 경고를 하기 위한 시스템의 능력에 관련된다. 이러한 시스템은 전달된 사용자 위치값에 오차와 편차가 허용 수준(경보 한계)을 초과할 때마다 경고(경보)를 전달하는 것이 요구된다. 따라서 시스템의 성능은 보전성, 정확성, 연속성, 이용성의 네 가지 매개변수를 포함하고 있다.

보전성은 시스템에 의해 획득된 정보의 정확성을 기반으로 한 신뢰로 정의되며, 정확성(Accuracy)은 주어진

시간에 참값과 추측된 위치 결과와의 일치 정도이다. 연속성(Continuity)은 의도된 운영 주기 동안 중단 없이 시스템 기능을 수행하는 능력이다. 연속성 위험(Continuity risk)은 시스템을 신뢰할 수 없는 정도를 측정하는 것 즉, 시스템이 의도된 운영 주기에 중단 될 가능성이 있다. 이용성은 모든 시스템 중지를 고려한 이용할 수 있는 시간 백분율이다. 따라서 정확성, 보전성, 연속성 요구가 만족할 시스템을 이용할 수 있다.

4가지 매개변수 중 보전성은 항공기 정밀도 연구나 이착륙과 같은 안전 기준 적용에 중요한 것 중 하나이다. 유사한 방법으로, GPS 기반 실시간 구조물 안전 모니터링은 잘못된 정보 위험에 대비하기 위해서 안테나 위치 좌표들의 높은 보전성을 요구한다. 보전성 실험, 또는 결점 발견과 배제(FDE; Fault Detection and Exclusion) 알고리즘은 모니터링 시스템에서 불규칙적 거동을 연구하는데 사용할 수 있다. GPS 모니터링 시스템은 지반 기반 모니터링(Ground-Based Monitoring)과 수신기 자체 모니터링(Receiver Autonomous Monitoring)으로 분류할 수 있다. 지반 기반 모니터링은 GPS 위성 자료의 건강성을 모니터링하는 것이며, 다수의 안정하게 위치한 모니터링 측점을 이용하고, 이들의 위치는 정밀한 측지 기법을 이용하여 수립된다. 수신기 자체 모니터링은 다른 위성으로부터 원시 측정에 의해 획득된 위치 결과의 품질을 추정하는 것으로, 잉여 관측과 위성 기하학에 따라 변화한다.

3.1 탐지 모델

동시에 기선해를 생성하는 안정한 플랫폼에 설치된 GPS이동국의 경우에 대해서 고려해보면, 모든 기선해에 대한 평균벡터 모델을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Y_t = (b_t - b_0) + v_t + \Delta_{t_0} = \xi_t + \Delta_{t_0}, \xi_t \sim N(0, \Sigma) \quad (1)$$

여기서, b_t 는 시간 t 에서의 기선벡터이고 b_0 는 사전 기선벡터이고 v_t 는 시간 t 에서의 랜덤 잡음벡터이다. Δ_{t_0} 는 시간 t_0 에서 하나의 센서 오차에 상응하는 오차 벡터이다. 그리고, $\xi_t = (b_t - b_0) + v_t$ 는 일반적인 처리 벡터이다.

$$\Delta_{t_0} = \begin{cases} 0 & \text{if } t < t_0 \\ \Delta & \text{if } t \geq t_0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\Delta = (0, 0, 0, \delta_x, \delta_y, \delta_z, 0, 0, 0)^T$$

그래서 $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ 는 한 센서의 기선해에서 3가지 상호 연관된 오차항을 나타낸다.

그러나 만약 $\Delta_{t_0} \neq 0$ 이라면, 2가지 가능성에 대해서 주목해야 한다. 첫 번째 가능성은 변형신호를 인지하는 것이다. 두 번째 가능성은 모니터링 시스템에 있어서 몇몇의 기능장애를 인지하는 오차항의 벡터라는 것이다.

GPS 측정점의 좌표값을 $Y_i(i)$ ($i = 1, 2, 3, \dots$) 이라고 하면, 기준국과 이동국의 좌표차는 $\Delta Y_t^{ij} = Y_i(j) - Y_i(i)$ 이며, 이때 기능장애가 발생한다면 식 (3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta Y_t^{ij} = \xi_t^{ij} + \Delta_{t_0}^{ij} \quad (3)$$

기능장애 탐지를 위해서는 적절한 변화 탐지 알고리즘을 사용함으로써 위의 각각의 현상들의 변화를 탐지할 수 있다. 만약 2가지 경고가 동시에 발생된다면 의문되는 측정점의 결과는 다수결의 원칙에 의해 실행될 것이다(Joe, H., 1989).

3.2 탐지 기준

변화 탐지 알고리즘에 근거한 기준은 1차원 현상에 대해서 설명할 뿐만 아니라 다차원 데이터에 대해서도 함축하고 있다. 기준에 관한 이전의 내용은 다음과 같이 정립되어졌다. $(y_t)_{1 \leq t \leq n}$ 을 조건부의 밀도 $P_\theta(y_t | y_{t-1}, \dots, y_1)$ 을 가진 관측된 랜덤 변수들의 1차원 현상들로 간주하자. 미지의 변화시간 t_0 전에 조건부의 밀도 매개변수 θ 는 θ_0 와 같다. 변화 후 매개변수는 θ_1 과 같다. 이러한 문제는 t_0 이전에 그릇된 경고의 고정된 입력간격으로 변화 발생을 조사하는 것이며, 변화시간 t_0 의 평가와 매개변수 θ_0 와 θ_1 은 필요 없을지도 모르기 때문이다. 다양한 시간 변화의 경우에 각각의 변화가 빨리 탐지된다고 가정하고, 이러한 탐지는 정지법칙에 의해 수행되어진다(Gnanadesikan, R., 1997).

$$t_a = \inf \{ n : g_n(y_1, \dots, y_n) \geq \lambda \} \quad (4)$$

여기서, λ 은 test 시작이고 $(g_n)_{n \geq 1}$ 은 n좌표의 함수 군

이다. 경고시간 t_a 는 변화를 탐지할 때의 시간이다. 만약 $t_a = n$ 이라면 이는 시간 n까지 샘플들을 관측하는데 충분한 시간이다.

온라인 시스템에서 변화가 시간 t_0 이후에 탐지된다면($t_a \geq t_0$) 그때 탐지는 정확하고, 탐지 지연은 다음과 같다.

$$\tau = t_a - t_0 + 1 \quad (5)$$

반면에 온라인 시스템에서 변화가 시간 t_0 이전에 탐지된다면($t_a < t_0$) 이는 기능장애 경보에 상응한다. 최적 기준은 그릇된 경고없이 변화의 빠른 탐지이다. 그래서 $\tau | t_a \geq t_0$ 은 확률적으로 작아야 하고, $t_a | t_a < t_0$ 는 확률적으로 커야한다. 이러한 기준은 변화가 실제로 발생할 때 알람을 설치하기 위한 알고리즘 능력과도 연관된 것이다. 따라서 이상적인 알고리즘을 위해서는 평균 탐지 지연을 최소화해야 한다.

$$\bar{\gamma} = \xi(\gamma | t_a \geq t_0) \quad (6)$$

기능장애 경고 사이의 고정된 평균시간 T 에 대해서는

$$\bar{T} = \xi(t_a | t_a < t_0) \quad (7)$$

여기서, $\xi(1)$ 은 조건부 기대값이다.

3.3 한계 탐지 알고리즘

한계 검사 탐지기들은 품질 제어 영역에서 최초로 소개되었다. 이 개념은 다음과 같이 수학적으로 설명되어질 수 있다. 고정된 크기의 샘플 N이 획득되고, 각 샘플의 끝에서의 결정 법칙은 식 (8)과 같이 매개변수 θ 와 관련된 2가지 가설사이의 검정으로 계산되어진다고 가정하면

$$\begin{aligned} H_0: & \theta = \theta_0 \\ H_1: & \theta = \theta_1 \end{aligned} \quad (8)$$

만약 결정이 H_0 을 선택한다면 샘플링(표집)과 검정은 계속되지만, 결정이 H_1 을 선택한 경우에는 첫 번째 샘플의 관측이후에 표집이 중지된다. 고정된 샘플 N에 대해서 최적의 결정방법 d는 다음과 같이 주어진다.

$$d = \begin{cases} 0 & \text{if } S_1^N < \lambda; H_0 \text{ is chosen} \\ 1 & \text{if } S_1^N \geq \lambda; H_1 \text{ is chosen} \end{cases} \quad (9)$$

여기서, S_i^N 은 사전에 정의된 결정 함수이고, λ 는 편리하게 선택된 출발점이다. 결정은 정지 법칙의 목적으로 받아들여지며, 다음과 같이 정의된다.

$$t_a = N \cdot \min\{K; d_K = 1\} \quad (10)$$

여기서, d_k 는 샘플 수 K (크기 N)에 대한 결정 법칙이고, t_a 는 경고시간이다. 즉, 결정에 필요한 첫 번째 샘플 크기 N 이 H_1 을 선택한 후에 관측을 중지한다(Cox, M. A. A., 1989).

4. 연구대상과 관측장비

4.1 연구대상

본 연구에서는 실시간 동적 GPS 측량과 다른 센서들을 결합한 구조물의 모니터링 목적에 적합한 Fig 1과 같은 실험대상을 선택하였고, 실험 대상 구조물은 현재 시공이 완료되어 차량이 운행 중인 광안대로의 주탑을 선택하였다. 연구대상 구조물의 거동 모니터링을 해석하기 위해서 하나의 주탑을 대상으로 주탑 최상부에 GPS, 가속도계, 풍향풍속계를 설치하였다. 광안대로는 1994년 12월에 착공하여 2003년 1월에 개통하였으며, 전체 총연장은 7.42km이고 이중 현수교 길이는 0.9km, 폭은 18~25m로서 2층 구조로 되어있다. 최대 풍속은 45 m/sec로 설계되었으며, 부분적으로는 67~72m/sec로



Fig 1. Test subject.

되어 있고, 주탑의 높이는 평균해수면을 기준으로 약 116.5m이다. 실시간 동적측위의 기지국 사용과 모니터링 측량 결과를 분석 목적으로 사용할 측정점의 좌표를 구하기 위해서 4시간 동안 Trimble 5700과 Ashtech 수신기 4대를 이용해서 두 개의 삼각점과 두개의 기지국 그리고 연구대상인 두 주탑으로 관측망을 구성하였다. 이들 관측망에 대한 조정된 각 측정점의 평면직각좌표는 Table 1과 같다.

Table 1 Station coordinates.

St.	X(m)	Y(m)	H(m)	비고
mrbt	183911.706	211461.950	6.317	기준점
jt1t	183249.833	211731.552	116.152	주탑
sibs	183086.092	210614.479	4.820	기준점
bsmt	186870.181	208639.498	255.716	삼각점
hrms	184331.640	207353.923	427.735	삼각점
jt2s	182857.932	211420.976	116.242	주탑

4.2 관측장비

본 연구에서 사용된 장비는 GPS 2set(Fig. 2), 풍향 및 풍속계, 관성항법장치인 IMU(Fig. 3)을 사용하였으며, 풍향 및 풍속계는 시공 중 또는 시공 후 구조물의 거동측정을 위하여 광안대로 주탑에 설치되어 있는 Wind monitor를 이용하였으며, 이 장비는 풍향과 풍속을 동시에 관측하는 장비이다. 관측에 사용된 관성항법장치인 IMU는 선형 가속도와 회전을 그리고 자기관측이 가능하고, 오차보정을 위해 자체에 Kalman filter가 내장되어 있어 동적 조건의 변화에 대하여 자동적으로 조정·보정된다. 이들 장비에 대한 상세한 설명은 Table 2에 나타내었다.

5. 모니터링 시스템과 변위분석

5.1 실시간 동적 GPS 측량 모니터링 시스템

실시간 동적 GPS 측량 시스템에서 획득되는 자료를 컴퓨터에 실시간으로 입력하기 위해서는 먼저 획득된 자료를 컴퓨터에 전송하고, 이후 획득된 자료를 일정한 주기로 컴퓨터로 전송하는 프로그램이 필요하다. 본 연



(a) GPS Base Station



(b) GPS Rover Station

Fig. 2 RTK GPS Positioning.



Fig. 3 IMU.

Table 2 Specification of observation instrument.

Measurement	Specification
Displacement measurement	RTK GPS
	Hori. accuracy : 10mm+1ppm
	Ver. accuracy : 20mm+1ppm Max. sampling rate : 20Hz
Acceleration measurement	Angular rate : ± 100 deg/sec
	Acceleration : ± 2 g
	Sampling rate : 64Hz
Anemometry	Measurement
	Sampling rate : 1 ~ 4 output/sec
	Range : 0 ~ 60m/s
	Accuracy-windspeed : 0.3m/s
	wind direction : ± 3 deg Resolution : 0.01m/s

구에서는 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 Fig. 4와 5와 같고, 이 프로그램의 주요 금속판은 모니터링 시스템의 거동에 대한 모니터링 값을 추출하기 위해서 연속적 자료들을 분석하고, 특별한 기준값과 결과를 비교하는 것이다.

5.2 모니터링 분석

각각의 방법에 의해 관측된 모니터링 측정값을 분석하기 위해서 회귀곡선을 이용하여 각각의 축에 대한 정확한 변위를 분석하고자 한다. 먼저 실시간 동적 GPS 측량으로 측정된 N축의 모니터링 값과 회귀곡선은 Fig. 6과 같고, IMU의 가속도계로 측정된 N축의 모니터링 값과 회귀곡선은 Fig. 7에 나타내었다. 회귀곡선은 한 변수로부터 다른 변수의 값을 예측함으로써 관련변수들 간의 상호 연관성을 규명할 수 있고, 변수들 간의 연관 관계를 적절한 함수식으로 표현하여 자료 분석을 쉽게 하는 통계적 기법이다. 본 연구에서는 matlab 프로그램을 이용하여 관측된 자료에 대해 분석하였다. Fig. 6은 실시간 동적 GPS 측량으로 관측된 실험대상에 대한 N축 모니터링값으로서 오차를 소거하지 않고 관측값의 편차를 나타내었으며, Fig. 7은 IMU로 관측된 N축 모

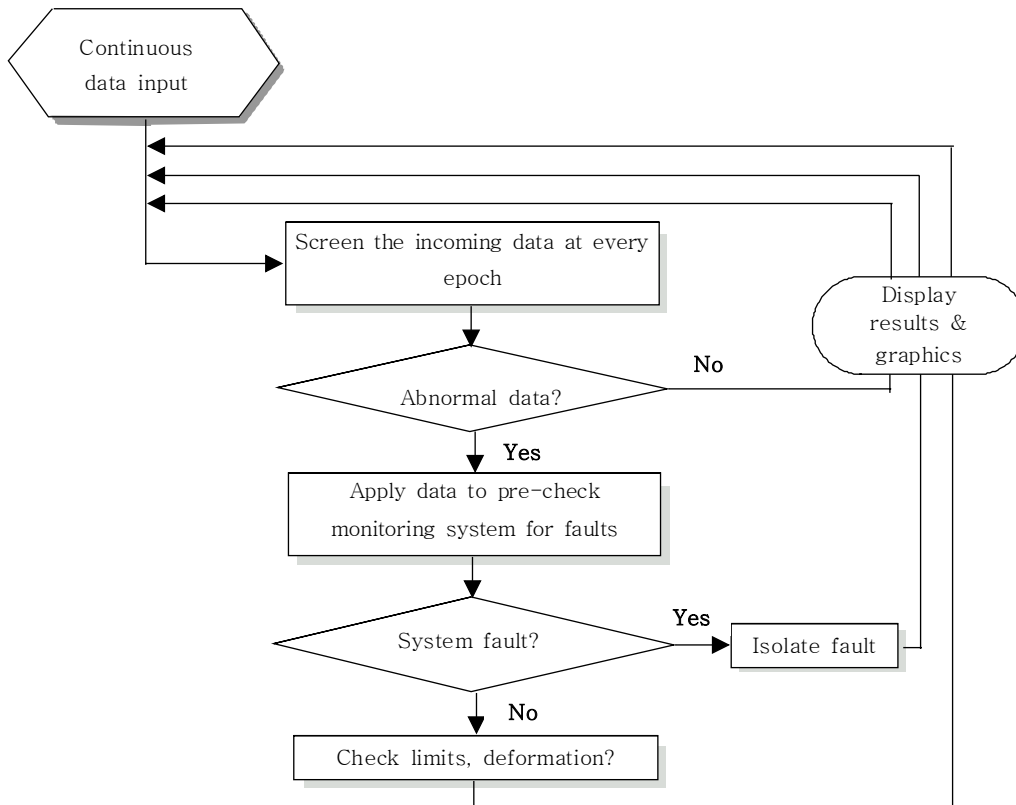


Fig. 4 Flow-chart of developed system.

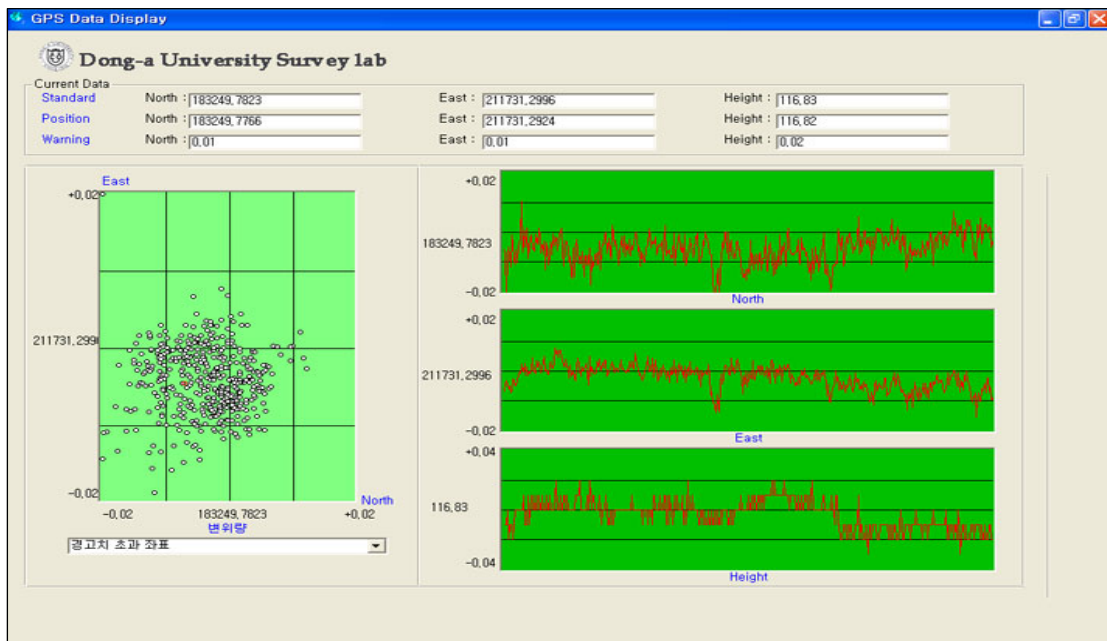


Fig. 5 Overall window of planar coordinate system.

니터링값으로서, 자체적으로 오차를 소거한 관측값의 편차를 나타내었으며, 최대 모니터링 값은 +2.5mm ~ -3.2mm을 나타내고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 실시간 동적 GPS 측량과 IMU로 관측된 E축 모니터링값이고, Fig. 10과 11은 실시간 동적

GPS 측량과 IMU로 관측된 Z축 모니터링값으로서 전자에 대한 모니터링 값은 최대 ±25mm이며, 후자는 자체적으로 오차를 소거한 최대 모니터링 값이 ±3.5mm을 나타내고 있다.

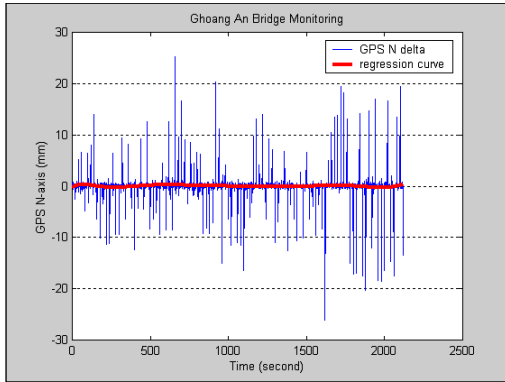


Fig. 6 N-axis behavior of RTK GPS.

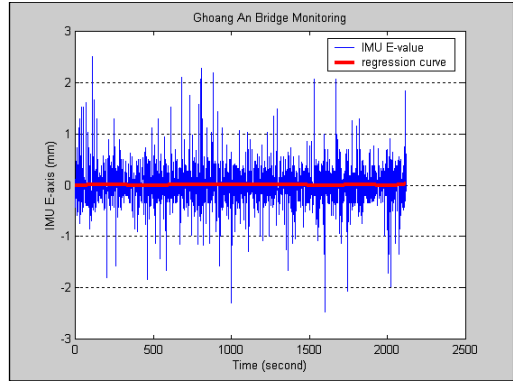


Fig. 9 E-axis behavior of IMU.

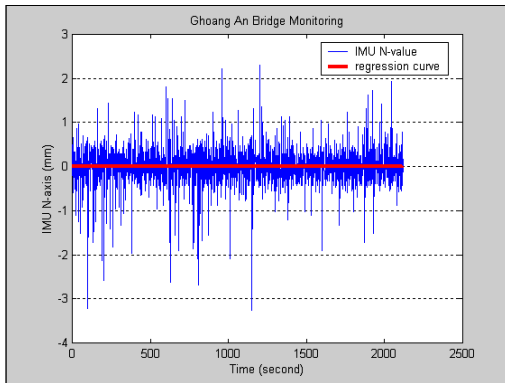


Fig. 7 N-axis behavior of IMU.

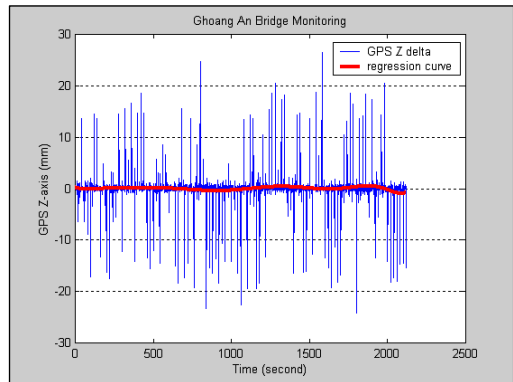


Fig. 10 Z-axis behavior of RTK GPS.

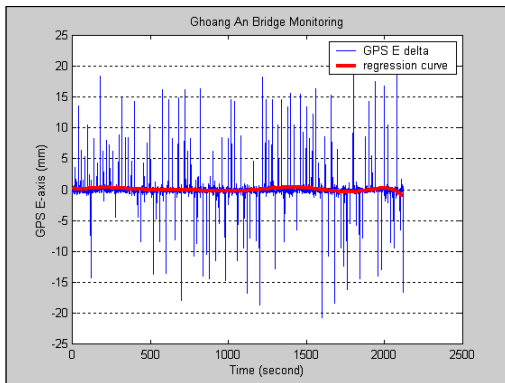


Fig. 8 E-axis behavior of RTK GPS.

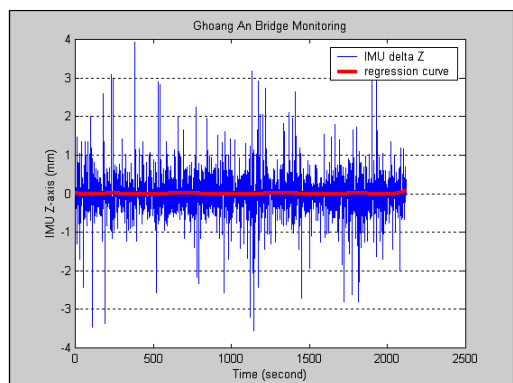


Fig. 11 Z-axis behavior of IMU.

5.3 풍속과 변위의 관계분석

풍속과 각각의 변위와의 관계를 파악하기 위해서, 각각의 축 방향별로 풍속과의 관계를 분석함에 있어, Fig. 12는 N축 방향의 풍속에 대한 실시간 동적 GPS 측량과 IMU의 거동을 나타내었다. 여기서, 관측값들은 관측순서가 아니고 큰 값부터 순차적으로 정렬하여 나타내었고, 이때 최대 풍속 7.26m/s^2 일때 실시간 동적 GPS 측량은 2.03mm , IMU는 2.16mm 의 값을 나타내고 있다. 또한 모든 관측값들은 정(+), 부(-)의 부호에 관계없이 절대값으로 처리하여 나타내었다. 그리고 모든 관측값을 나타낼 수 없기 때문에 제일 큰 풍속에서부터 6.0m/s^2 이상의 풍속에 대해서만 나타내었다.

Fig. 13은 E축 방향의 풍속에 대한 실시간 동적 GPS 측량과 IMU의 거동을 나타내었다. 여기서, 관측값들은 큰 값부터 순차적으로 정렬하여 나타내었고, 이때 최대 풍속 7.53m/s^2 일때 실시간 동적 GPS 측량은 2.35mm ,

IMU는 2.22mm 의 값을 나타내고 있다. 또한 모든 관측값들은 정(+), 부(-)의 부호에 관계없이 절대값으로 처리하여 나타내었고, 제일 큰 풍속에서부터 6.0m/s^2 이상의 풍속에 대해서만 나타내었다.

Fig. 14는 실시간 동적 GPS 측량과 IMU에서 관측된 N축 자료에 대해 오차 요소를 소거한 후 풍속과의 관계를 보기 위해서 나타내었으며, 실시간 동적 GPS 측량과 IMU의 관측값의 거의 비슷한 결과를 보이고 있고, 최대 거동량의 절대값은 $2\sim 3\text{mm}$ 로 나타났다. Fig. 15는 실시간 동적 GPS 측량과 IMU에 대한 E축 방향의 모니터링 값을 보여주는 것으로서 모니터링 값은 대략 $\pm 2.0\text{mm}$ 에 있으며, Fig. 16은 실시간 동적 GPS 측량과 IMU에서 관측된 Z축 자료에 대해 분석한 것으로, 실시간 동적 GPS 측량의 값이 최대 5mm 정도 나타나는데 이는 실시간 동적 GPS 측량의 Z축 오차를 소거할지라도 Z축 정밀도 높지 않기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 특히, 관측 당시에 공사차량이 주행함으로써 약간

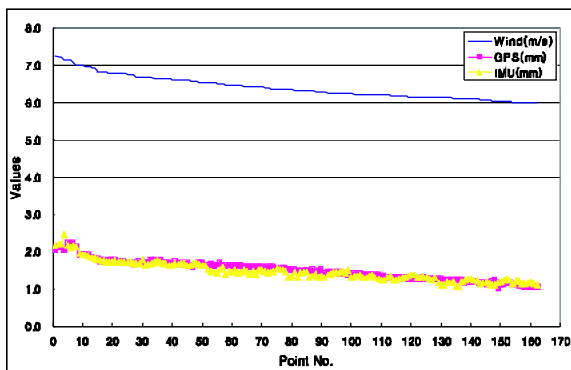


Fig. 12 Comparison of GPS, IMU, Wind(N-axis).

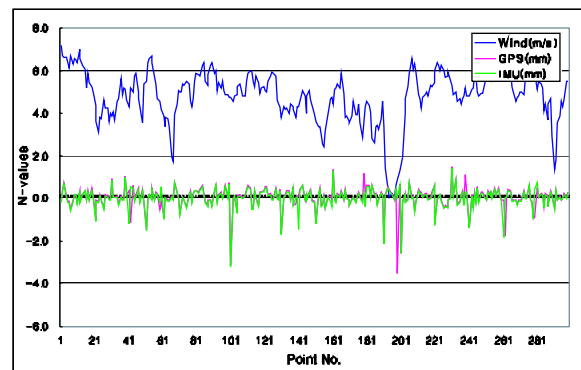


Fig. 14 Wind and displacement(N-axis).

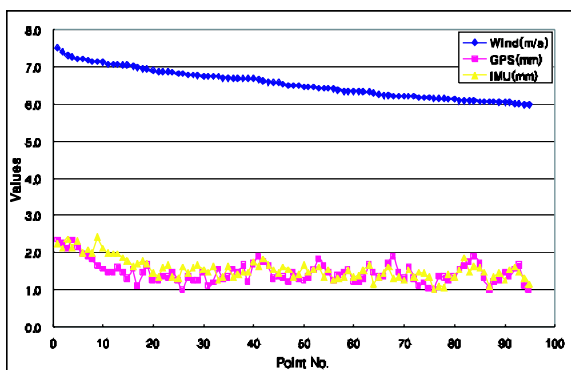


Fig. 13 Comparison of GPS, IMU, Wind(E-axis).

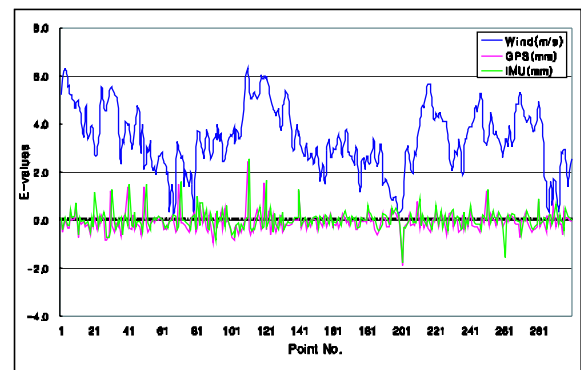


Fig. 15 Wind and displacement(E-axis).

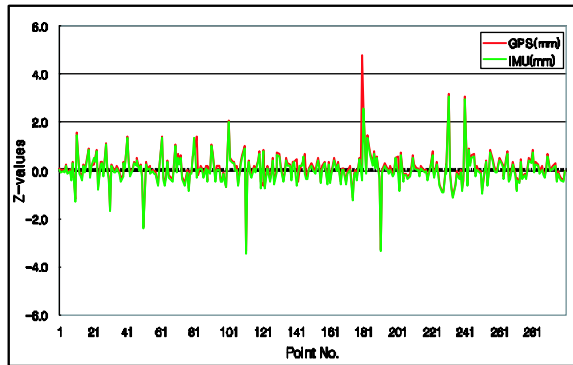


Fig. 16 Z-axis displacement.

의 움직임이 나타난 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 GPS 측위기법중 실시간 동적 GPS 측량과 관성항법장치인 IMU를 이용하여 현수교 주탑의 거동을 측량하였다. 이를 바탕으로 실시간 동적 GPS와 IMU를 이용한 모니터링 경보 시스템을 개발하고 가능성에 대해 검증하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실시간 동적 GPS측량을 적용하여 동일 안테나에 연결된 이동국에서 좌표값을 연속적으로 측정한 결과에 대해 수신기 잡음과 다중경로 오차에 대해 분석한 결과, X축 편차 1.5~(-1.2)cm, Y축 편차 2.0~(-1.5)cm, Z축 편차 ±2.5cm가 발생하였다.
2. IMU로 관측된 각 측방향별로 X축 2.5~(-1)cm, Y축 2.8~(-0.5)cm, Z축 0.13~0.25cm가 발생하여, 실시간 동적 GPS 측량의 편차와 비교한 결과 X축은 1cm, Y축은 1cm, Z축은 2.2cm로서 구조물 모니터링 측량이 가능함을 알 수 있었다.
3. 풍향 및 풍속에 대해 실시간 동적 GPS 측량, IMU 관측값을 분석한 결과, 최대 풍속인 7.35m/sec에서 N축 방향에서는 2.0mm 정도의 변위를 나타내었고, E축 방향에서는 2.2mm 정도의 변위를 나타내지만, 변

- 위의 방향은 정확하게 일치하지 않음을 알 수 있었다.
4. 실시간 동적 GPS 측량의 정확한 모니터링 결과를 산출하기 위해서 수신기 잡음과 다중경로 오차에 대해 분석한 결과, 수신기 잡음은 미소하였으나 다중경로 오차는 높게 발생하므로, 모니터링 관측에서 다중경로 차단 수신기 사용이 바람직하다고 판단된다.

구조물의 유지관리 및 재해예방차원에서의 경보시스템을 실시간 동적 GPS 측량과 IMU를 이용하여 적용한 결과, 모니터링 측량에 이용 가능함을 알 수 있었고, 측정된 자료를 online을 통해 시스템에 전송하는 기술이 개발된다면 향후 더욱 효율적인 원격 모니터링 시스템의 구축이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Barbara G. T. and Linda S. F., 1989, "Using Multivariate Statistics". 2nd ed., Harper & Row, New York, p.746.
- Cox, M.A.A., 1989, "Control charts on spreadsheets : A tutorial guide or poor man's persuader", Quality Engineering, pp.135 ~ 155.
- Gnanadesikan, R., 1997, "Methods for Statistical Data Analysis of Multivariate Observations", John Wiley & Sons, New York, p. 384.
- Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, 2001, "GPS Theory and Practice", 5th Edition, Springer Wine New York, pp.205-212.
- Hubiao Lan, 1996, "Development of a Real-Time Kinematic GPS System; Design, Performance and Results", Ph. D. Thesis, Dep. of Geomatics Engineering, The Univ. of Calgary, Canada, pp.14-16.
- Joe, H., 1989, "Multivariate Models and Dependence Concepts", Chpman & Hall, London , New York, pp. 369~399.
- Leick, A., 1995, "GPS Satellite Surveying", 2th Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 352-357.
- Ogaja, C., 2001, "on-line GPS integrity monitoring and deformation analysis for structural monitoring application", 14th Int. Tech Meeting of th satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation, pp.989~999.
- V. Ashkenazi, A. H. Dodson, T. Moore and G. W. Roberts, 1997, "Monitoring the Movements of Bridges by GPS", ION GPS-07 Part 2 of 2, pp. 1165-1172.