

# RTK GPS를 이용한 대형구조물의 실시간 경보 시스템 Real Time Alarm System of Enormous Structure Using RTK GPS

박운용<sup>1)</sup> · 송연경<sup>2)</sup> · 이현우<sup>3)</sup>

Park, Woon Yong · Song, Youn Kyung · Lee, Hyun Woo

## Abstract

Such social structures as bridges, buildings, dams and towers have been transformed by their own load or fundamental ground. They have been behaved by other external causes. These regular or irregular behaviors threaten to do their users safety. Therefore, to monitor the load of the structures or reaction shown by them could help to verify their behaviors. 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. 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 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.

Keywords : RTK GPS, Structure monitoring, Alarm system

## 요 지

교량, 빌딩, 댐, 타워 등 대형의 사회기반 구조물들은 하중이나 지반 등에 의해 변형을 일으켜 왔거나 다른 외부 원인에 의해 운동한다. 이러한 규칙적이거나 불규칙적인 거동은 구조물뿐만 아니라 이를 이용하는 사용자의 안전을 위협하고 있다. 구조물에 작용하는 자체의 하중이나 이들 하중에 의한 반응의 모니터링은 구조물의 거동을 확인하는데 도움을 줄 수 있다. RTK GPS(Real-Time Kinematic Global Positioning System)는 한점 고정에 의해 실시간 상대위차관측방식으로 고정밀도 관측을 수 초 안에 신속히 수행할 수 있기 때문에 교량 등 대형구조물의 거동을 모니터링 하는데 유용한 방법으로 대두되고 있다. 따라서 본 연구에서는 대형구조물의 거동을 모니터링하는 시스템을 구축하기 위해서 GPS 측위방법중 RTK GPS 방법을 이용하여 현수교 주탑의 거동을 측량함에 있어, 먼저 GPS에 의한 정확한 위치를 분석하였으며, 이를 바탕으로 RTK GPS를 이용한 모니터링 경보 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템으로 관측한 결과와 비교하여, X축은 1mm, Y축은 1mm, Z축은 2.2mm로서 RTK GPS 방법을 이용한 구조물 모니터링 측량이 가능함을 입증할 수 있었다.

핵심용어 : RTK GPS, 구조물 모니터링, 경보시스템

## 1. 서 론

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. 특

히 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 관측 및 모니터링에 의해 재해를 사전에 예방하고자 하는 방재분야에서의 응용이 국내외적으로 큰 주목을 받고 있다(김진수, 2000).

1) 연결저자 · 정희원 · 동아대학교 토목해양공학부 교수(E-mail:uyupark@smail.donga.ac.kr)

2) 정희원 · 동아대학교 토목공학과 대학원 박사과정(E-mail:aaong@hanmail.net)

3) 정희원 · 동아대학교 토목공학부 공학박사(E-mail:hyunu@metro.pusan.kr)

일반적인 모니터링 기법은 구조물 자체에 설치된 가속도계, 스트레인 게이지(strain gauges)를 이용하므로써 장기적인 상대적 변형뿐만 아니라 단기적인 구조물 동적 반응에 대하여 평가할 수 있다. 그러나 이들 방법은 구조물에 부착하기 때문에 고장시 교체하기 어려워 영구적이지 못하다. RTK GPS는 저비용으로 주기적이고 빈번한 모니터링이 가능하고, 관측에 의해 단기간의 구조물 거동을 추적하는데 이용될 수 있기 때문에 장비의 자동화로 관측될 때 모니터링이 효과적이다(Hubiao Lan, 1996).

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 단기변형 모니터링이나 장기변형 모니터링을 하기 위해서는 구조물에 부착되는 센서뿐만 아니라 상대적 관측이 가능한 위성 측량 시스템을 이용하는 것이 바람직하다고 판단된다(V. Ashkenazi et. al.).

따라서, 본 연구에서는 GPS를 이용하여 교량 주탑의 거동상태를 확인할 목적으로 거동해석을 하기 위하여 연구 대상 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 기여 할 수 있을 것으로 생각된다.

## 2. RTK GPS을 이용한 모니터링

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 설치해야 하고, 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 발견

한다면, 비정상적 변형량을 야기하는 요소들의 확인에 가장 적합하게 나타내는 사진 측량 분석으로 이들 위치에 추가 관측을 해야 한다.

구조물 변형에는 크게 두 가지 그룹으로 구분할 수 있다. 첫 번째는 수압, 온도차 또는 느린 지각 활동에 의한 장기간의 느린 변형이고, 두 번째는 불규칙한 풍속, 지진 또는 차량 하중에 기인하는 단기간의 빠른 변형이다. 단기간의 빠른 변형은 일반적으로 재해 격감, 위험 분석에 중요하지만 일시적인 정적 GPS 관측으로는 불가능하다. 따라서 몇 초 간격으로 발생하는 빠른 변형을 측량하기 위해서, 고샘플링의 RTK GPS를 사용할 수 있으며, 이는 유동성이 큰 구조물 즉, 현수교, 타워, 큰 빌딩에 대한 모니터링에 이용하는 것으로 차량이나 풍속의 영향에 대해 발견 가능한 거동의 크기와 빈도를 파악할 수 있다(Ogaja, C., 2001).

대부분 GPS 방법들에 의해 제공된 정확도들이 가장 정밀한 지상기법(TS)보다 더 낮을지라도, RTK GPS 기법은 장기간의 연속적 모니터링 적용에 충분한 정확도를 제공한다. 그러나 GPS 측량 시스템은 그림 1에서와 같이 고품질, 고비용의 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 10km미만이 바람직하다(Hofman-Wellenhof, B., et al., 2001).

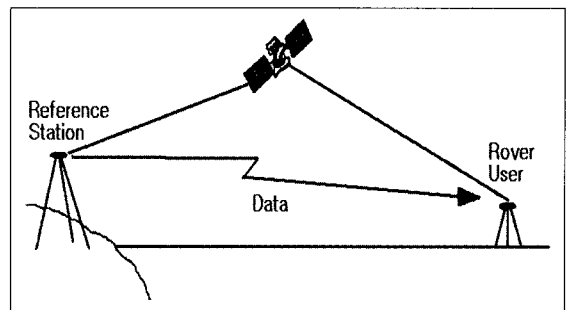


그림 1. RTK-GPS 개념

또한 실시간에서 높은 측위 정확도를 성취하기 위해서 이중차분 반송파 측정값을 처리하여야 하며, 이 경우에 위성과 기준국 그리고 이동국 사이의 다량의 L1/L2 사이클이 결정되어야 한다. 변화하는 다량의 사이클을 수신기에 측정한다면 그 문제는 본질적으로 초기의 모호정수를 결정하는 방법이다. 올바른 모호정수를 결정하기 위해서 반송파 잔차의 제공의 합이 최소가 될 때 모호정수의 조합은 최적의 해로 결정되며, 이때 Ratio값이 한계값을 초과하며, 그때 최적의 반송파 모호정수를 수용한다.

구조물에 설치된 실시간 능력을 가진 RTK-GPS 시스템에 의해 제공되는 정보는 지체없이 획득할 수 있으며, 구조물의 반응은 다른 초기 변위 또는 변화하는 동적 특성에 따라 평가할 수 있을 뿐만 아니라 실시간 모니터링은 불규칙적인 구조물 활동에 대해 정보 시스템으로 사용할 수도 있다.

### 3. 온라인 변화 탐지 알고리즘

모니터링에 의한 정보 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 편이가 허용 수준(경보 한계)을 초과할 때마다 경고(경보)를 전달하는 것이 요구된다.

시스템과 데이터에 포함되어 있는 오차 탐지와 자료의 품질에 관련된 수많은 알고리즘들이 제안되어 있다. 그러나 수학적 복잡성과 폭넓은 적용으로 인해 실제 적용에서 적절한 알고리즘을 선택하는 것은 상당히 어렵다.

변화탐지 처리과정을 설계함에 있어서 2가지 현안을 가지고 있다. 첫 번째, 데이터에서 직접적인 변화들을 반영한 잔차는 일반화되어야 한다는 것이다. 이들 잔차들은 아무런 변화가 없을 때와 변화가 발생할 때의 값들이 불변값(평균값, 표준편차)에 이상적으로 접근되어야 한다는 것이다. 두 번째는 알고리즘 개발이다. 즉, 데이터내의 일시적인 변화를 알리기 위해서는 통계적 방법들을 사용하고, 변화의 정확한 시간을 평가해야한다(Barbara G. T., et al., 1989).

#### 3.1 탐지 모델

동시에 기선해를 생성하는 안정한 플랫폼에 설치된 GPS 이동국의 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 기선 벡터이고  $v_t$ 는 시간  $t$ 에서의 랜덤 잡음벡터이다.  $\Delta_{t_0}$ 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 기능 장애를 인지하는 오차항의 벡터라는 것이다.

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

$$\Delta Y_t, \ddot{y} = \xi_t, \ddot{y} + \Delta_{t_0}, \ddot{y} \quad (3)$$

기능장애 탐지를 위해서는 적절한 변화 탐지 알고리즘을 사용함으로써 위의 각각의 현상들의 변화를 탐지 할 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 정립되어 졌다.  $(y_t)_{1 \leq t \leq n}$ 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  $\theta$ 는  $\theta_0$ 와 같다. 변화 후 매개변수는  $\theta_1$ 과 같다. 이러한 문제는  $t_0$  이전에 그릇된 경고의 고정된 입력간격으로 변화 발생을 조사하는 것이며, 변화시간  $t_0$ 의 평가와 매개변수  $\theta_0$ 와  $\theta_1$ 은 필요 없을지도 모르기 때문이다. 다양한 시간 변화의 경우에 각각의 변화가 빨리 탐지된다고 가정하고, 이러한

탐지는 정지법칙에 의해 수행되어진다(Gnanadesikan, R., 1997).

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

여기서  $\lambda$ 은 test 시작이고  $(g_n)_{n \geq 1}$ 은 n좌표의 함수 균이다. 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  $\theta$ 와 관련된 2가지 가설사이의 검정으로 계산되어 진다고 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  $d$ 는 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  $S_1^N$ 은 사전에 정의된 결정 함수이고,  $\lambda$ 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 N이  $H_1$ 을 선택한 후에 관측을 중지한다(Cox, M. A. A., 1989).

## 4. 연구대상과 관측장비

### 4.1 연구대상

본 연구에서는 그림 2와 같이 시설물 안전관리법에 의해 모니터링이 가능한 대형구조물인 현수교를 대상으로 RTK GPS와 계측 센서들을 결합한 구조물 모니터링 목적에 적합한 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

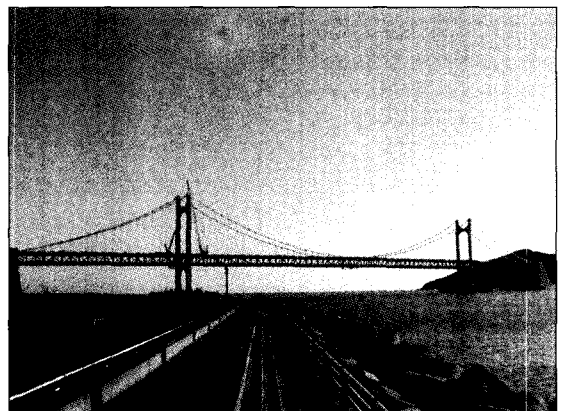


그림 2. 관측 대상

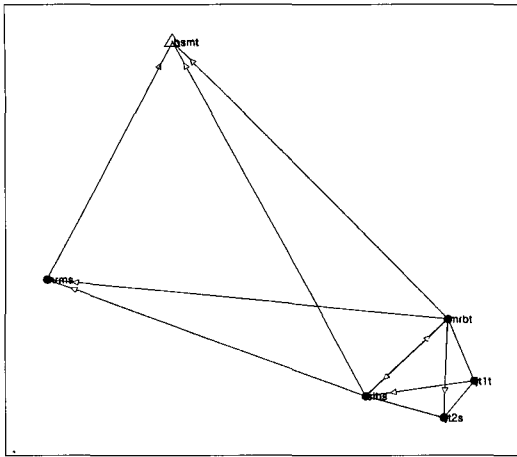


그림 3. GPS 기준점 관측망

표 1. 측점 좌표

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

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 3과 같이 두 개의 삼각점과 두개의 기지국 그리고 연구대상인 두 주탑으로 관측망을 구성하였다. 이들 관측망에 대한 조정된 각 측점의 평면직각좌표는 표 1과 같다.

#### 4.2 관측장비

본 연구에서 사용된 장비는 RTK GPS 2set, 풍향 및 풍속계, 관성항법장비인 IMU를 사용하였으며, RTK GPS는 Topcon사의 GPS 수신기와 라디오 송·수신기 통합형인 Legacy이고, 안테나는 외부형이며, 타입은 Microstrip인 LegAnt 제품을 이용하였다. 풍향 및 풍속계는 시공중 또는 시공후 구조물의 거동측정을 위하여 광안대로 주탑에 설

표 2. 관측기계의 특성

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

치되어 있는 Wind monitor를 이용하였으며, 이 장비는 풍향과 풍속을 동시에 관측하는 장비이다. 관측에 사용된 관성항법장비인 IMU는 IMU400CC-100으로서, 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 표 2에 나타내었다.

### 5. 개발된 모니터링 시스템과 변위 분석

#### 5.1 개발된 RTK GPS 모니터링 시스템

RTK GPS 시스템에서 획득되는 자료를 컴퓨터에 실시간으로 입력하기 위해서는 먼저 획득된 자료를 컴퓨터에

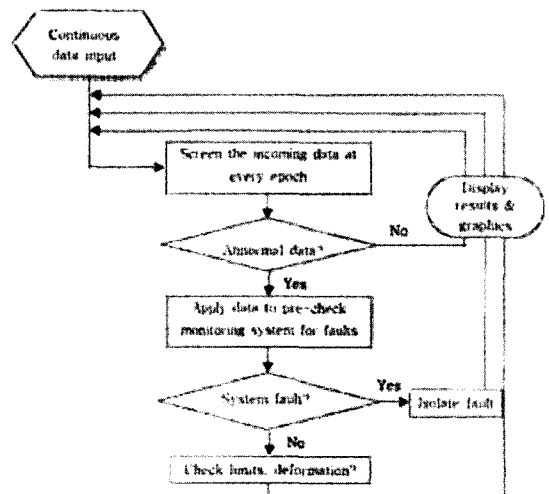


그림 4. 개발된 시스템의 흐름도

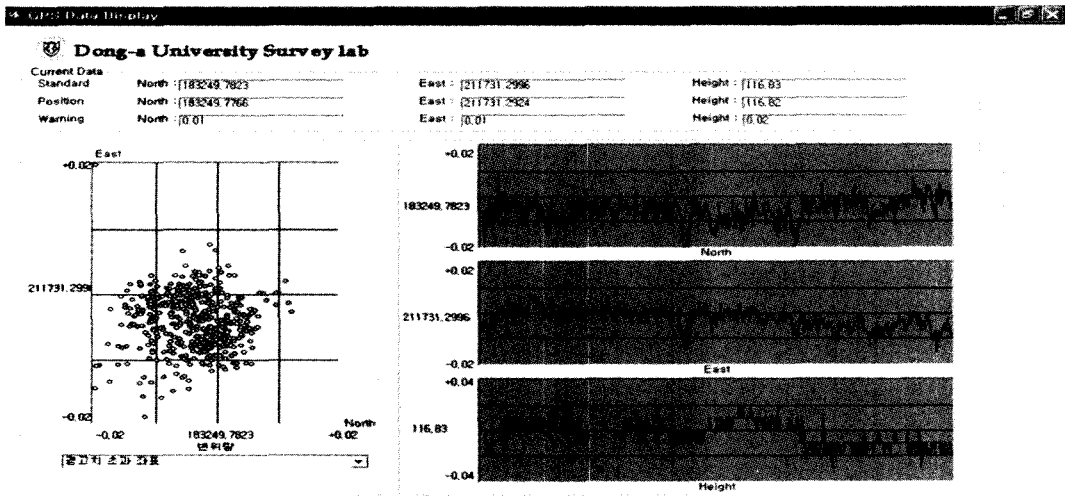


그림 5. 평면직각좌표에서의 경보시스템과 좌표변화

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 4에서 보여지는 것과 같다. 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 RTK GPS로 측정된 N축의 모니터링 값과 회귀곡선은 그림 6과 같고, IMU의 가속도계로 측정된 N축의 모니터링 값과 회귀곡선은 그림 7에 나타내었다. 회귀곡선은 한 변수로부터 다른 변수의 값을 예측함으로써 관련변수들 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 분석하

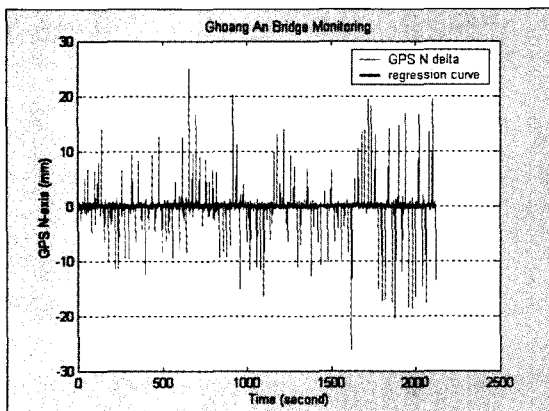


그림 6. RTK GPS의 N축 거동

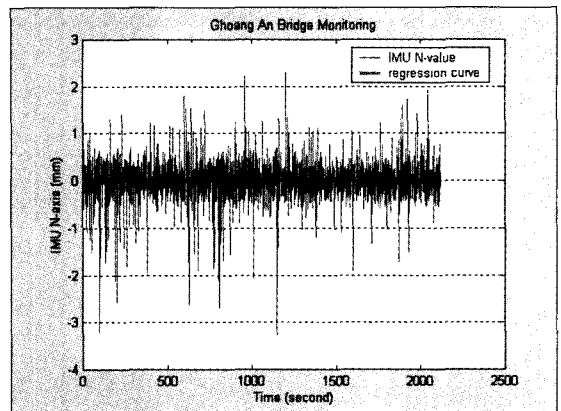


그림 7. IMU의 N축 거동

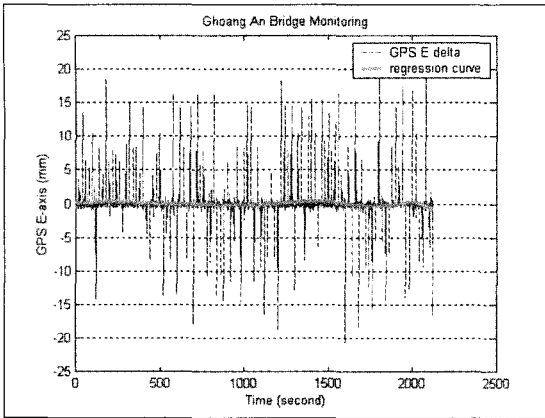


그림 8. RTK GPS의 E축 거동

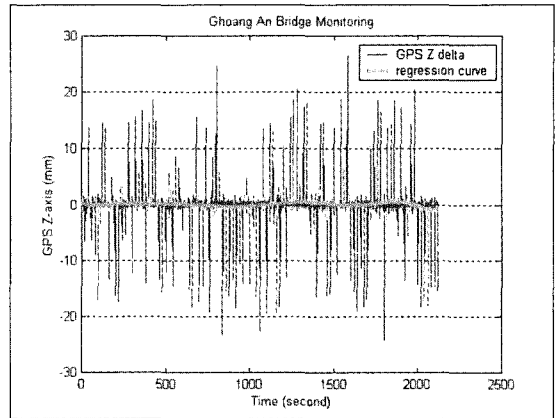


그림 10. RTK GPS의 Z축 거동

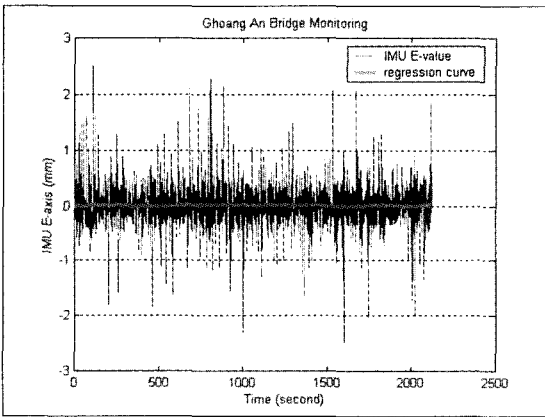


그림 9. IMU의 E축 거동

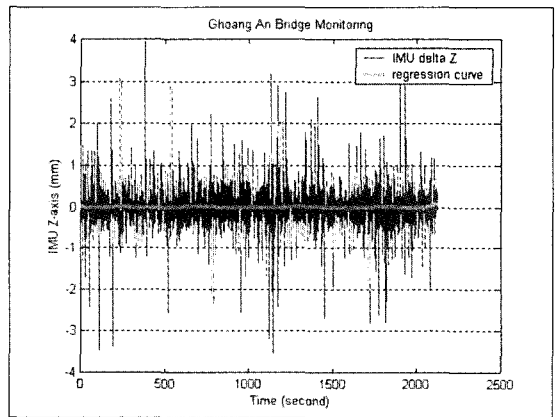


그림 11. IMU의 Z축 거동

었다.

그림 6은 RTK GPS로 관측된 실험대상에 대한 N축 모니터링값으로서 오차를 소거하지 않고 관측값의 편차를 나타내었으며, 그림 7은 IMU로 관측된 N축 모니터링값으로서, 자체적으로 오차를 소거한 관측값의 편차를 나타내었으며, 최대 모니터링 값은 +2.5mm~-3.2mm을 나타내고 있다.

그림 8과 그림 9는 RTK GPS와 IMU로 관측된 E축 모니터링값이고, 그림 10과 11은 RTK GPS와 IMU로 관측된 Z축 모니터링값으로서 전자에 대한 모니터링 값은 최대 ±25mm이며, 후자는 자체적으로 오차를 소거한 최대 모니터링 값이 ±3.5mm을 나타내고 있다.

### 5.3 풍속과 변위의 관계분석

풍속과 각각의 변위와의 관계를 파악하기 위해서, 각각

의 축 방향별로 풍속과의 관계를 분석함에 있어, 그림 12는 N축 방향의 풍속에 대한 RTK GPS와 IMU의 거동을 나타내었다. 여기서, 관측값들은 관측순서가 아니고 큰 값부터 순차적으로 정렬하여 나타내었고, 이때 최대 풍속  $7.26\text{m/s}^2$ 일때 RTK GPS는 2.03mm, IMU는 2.16mm의 값을 나타내고 있다. 또한 모든 관측값들은 정(+), 부(-)의 부호에 관계없이 절대값으로 처리하여 나타내었다. 그리고 모든 관측값을 나타낼 수 없기 때문에 제일 큰 풍속에서부터  $6.0\text{m/s}^2$ 이상의 풍속에 대해서만 나타내었다.

그림 13은 E축 방향의 풍속에 대한 RTK GPS와 IMU의 거동을 나타내었다. 여기서, 관측값들은 큰 값부터 순차적으로 정렬하여 나타내었고, 이때 최대 풍속  $7.53\text{m/s}^2$ 일때 RTK GPS는 2.35mm, IMU는 2.22mm의 값을 나타내고 있다. 또한 모든 관측값들은 정(+), 부(-)의 부호에 관계없이 절대값으로 처리하여 나타내었고, 제일 큰 풍속에서부

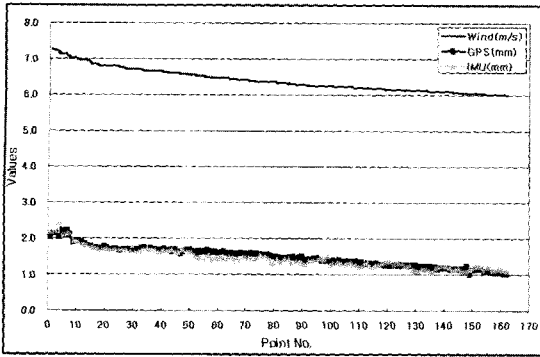


그림 12. 최대 풍속과 GPS, IMU 변위(N축)

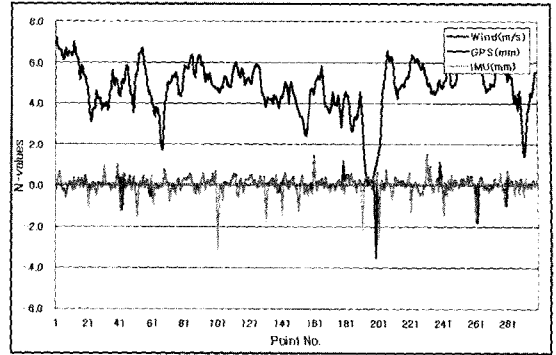


그림 14. 풍속과 변위의 관계(N축)

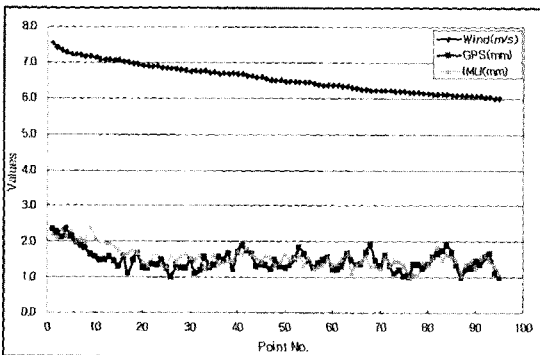


그림 13. 최대 풍속과 GPS, IMU 변위(E축)

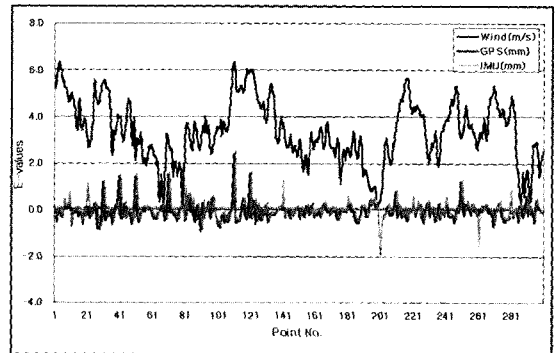


그림 15. 풍속과 변위의 관계(E축)

터  $6.0\text{m/s}^2$  이상의 풍속에 대해서만 나타내었다.

그림 14는 RTK GPS와 IMU에서 관측된 N축 자료에 대해 오차 요소를 소거한 후 풍속과의 관계를 보기 위해서 나타내었으며, RTK GPS와 IMU의 관측값의 거의 비슷한 결과를 보이고 있고, 최대 거동량의 절대값은 2~3mm로 나타났다. 그림 15는 RTK GPS와 IMU에 대한 E축 방향의 모니터링 값을 보여주는 것으로서 모니터링 값은 대략  $\pm 2.0\text{mm}$ 에 있으며, 그림 16은 RTK GPS와 IMU에서 관측된 Z축 자료에 대해 분석한 것으로, RTK GPS의 값이 최대 5mm정도 나타나는데 이는 RTK GPS의 Z축 오차를 소거할지라도 Z축 정밀도 높지 않기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 특히, 관측 당시에 공사차량이 주행함으로써 약간의 움직임이 나타난 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 RTK GPS 방법과 관성항법장치인 IMU를 이용하여 현수교 주탑의 거동을 측량하였다. 먼저 RTK

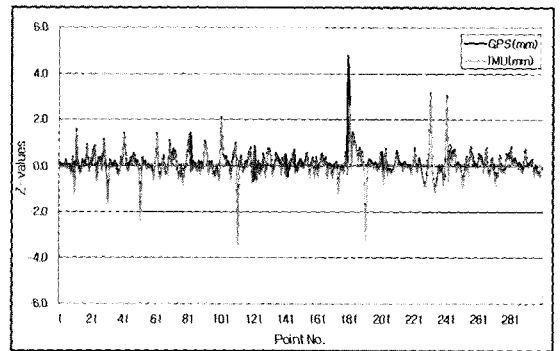


그림 16. Z축 변위

GPS 방법의 모니터링 정확도를 분석하였고, 이를 바탕으로 RTK GPS를 이용한 모니터링 시스템을 개발하고 IMU를 이용한 모니터링 결과와 비교하였다. 본 논문의 연구 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. RTK GPS기법을 적용하여 동일 안테나에 연결된 이동국에서 좌표값을 연속적으로 관측 결과에 대해 수신기 잡음과 다중경로 오차를 제거하여 IMU 가속도값과 비교



## 참고문헌

한 결과, 각 축방향 변위차가 1mm 정도로서 RTK GPS 기법을 이용한 구조물 모니터링 측량이 가능함을 알 수 있었다.

2. RTK GPS의 정확한 모니터링 결과를 산출하기 위해서 수신기 잡음과 다중경로 오차에 대해 분석한 결과, 수신기 잡음은 미소하였으나 다중경로 오차는 높게 발생함으로, 모니터링 관측에서 다중경로 차단 수신기 사용이 바람직하다고 판단된다.

3. 풍향 및 풍속에 대해 RTK GPS, IMU 관측값을 분석한 결과, 최대 풍속인 7.35m/sec에서 N축 방향에서는 2.0mm 정도의 변위를 나타내었고, E축 방향에서는 2.2mm 정도의 변위를 나타내지만, 변위의 방향은 정확하게 일치하지 않음을 알 수 있었다.

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.

- 김진수 (2000), GPS와 TS에 의한 흙댐의 변형 모니터링에 관한 연구, 동아대학교 대학원 박사학위논문, pp. 1-19.
- 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.

---

(접수일 2003. 11. 19, 심사일 2003. 12. 13, 심사완료일 2004. 3. 25)