자유 진동 실험을 통한 VRS-RTK 기법을 이용한 골조 구조물의 모니터링 적용성 검토

Verification on the Application of Monitoring for Frame Structures Using the VRS-RTK Method through the Free Vibration Test

최 세 운¹⁾ 박 효 선²⁾ 김 범 렬³⁾ 이 흥 민⁴⁾ 김 유 석^{5)*}
Se-Woon Choi Hyo-Seon Park Bub-Ryur Kim Hong-Min Lee You-Sok Kim

Abstract

To monitor the wind-induced responses of buildings, conventional real-time kinematic (RTK) methods based on two global positioning system (GPS) receivers (e.g., a reference and a rover) are widely applied. However, these methods can encounter problems such as difficulty in securing and maintaining a space for a reference station. With the recently developed virtual reference station (VRS)-RTK approach, the position of a structure can be measured using only a rover receiver. In this study, to evaluate the applicability of VRS-RTK methods in monitoring the lateral structural responses of frame structures, we performed free vibration tests on a one-story frame model (the first natural frequency of 1 Hz) and a three-story frame model (the first natural frequency of 0.85 Hz). To assess the reliability of the displacement and acceleration responses measured by the GPS, we performed a concurrent measurement using laser displacement sensors and an accelerometer. The accelerometer results were consistent with the GPS measurements in terms of the time history and frequency content. Furthermore, to derive an appropriate sampling rate for the continuous monitoring of buildings, the errors in the displacement responses were evaluated at different GPS sampling rates (5, 10, 20 Hz). The results indicate that as the sampling rate increased, the errors in the displacement responses decreased. In addition, in the three-story model, all modal components (first, second, and third modes) could be recorded at a sampling rate of 20 Hz.

Keywords : GPS, VRS-RTK, Higher mode, Frame structure, Wind load

1. 서 론

건물의 사용성 모니터링을 위한 기존의 연구 및 현장 적용에 사용되는 센서에는 대표적으로 가속도계가 있으며, 근래에는 촬영기기의 개발 및 image processing 기법의 발달로 인해 vision-based method (레이저 스캐너, 카메라)가 structural health monitoring (SHM) 분야에도 널리 적용되고 있다 (Park et al., 2007; Choi et al., 2013). 가속도계는 각종 하중에 대한 구조물의 가속도응답을 직접 계측할 뿐 아니라 가속도의 이중적분을 통해 구조물의 변위를 평가할 수 있다. 그러나, 이와 같은 변위 데이터는 상대 위치의 정보를 제공할 수 있

지만, 구조물의 절대 위치에 대한 예측은 할 수 없다는 단점이 있다. 구조물의 절대 변위는 부등침하, 기울어짐 등을 평가하기 위한 기본 정보를 제공하기 때문에 절대 위치의 계측은 중요하다고 할 수 있다 (Kijewski-Correa, 2005). 또한, 고층건물의 풍진동 응답은 정적 성분 (static component)과 동적 성분 (dynamic fluctuating component)으로 이루어지는데, 가속도계로 정적 성분을 계측하는 것은 어려움이 있다 (Tamura et al., 2002).

레이저 스캐너, charge coupled device (CCD) 카메라 등과 같은 vision-based methods (Park et al., 2007; Kijewski-Correa, 2005; Lee et al., 2007; Park et al., 2010)은 상대적

1) 정회원, 연세대학교 건축구조헬스케어연구단 박사후연구원

2) 정회원, 연세대학교 건축공학과 교수

3) 정회원, Lehigh University 박사과정

4) 정회원, 삼성엔지니어링 책임

5) 정회원, 연세대학교 건축구조헬스케어연구단 연구교수, 교신저자

* Corresponding author : yskim1220@yonsei.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2014년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

으로 높은 정확도를 가지고 구조물의 변위를 계측할 수 있는 반면, 시야가 확보되어야 하는 제한 때문에 날씨 및 주변 환경 조건에 따른 적용 한계를 가지며, 이를 고정시킬 공간의 확보가 필요하다. 또한 이들은 구조물의 장기 변형 및 반응을 모니터링 하기 위한 지속적인 계측에는 부적절하다고 할 수 있다.

한편, global positioning system (GPS)은 인공위성을 사용하여 지구상의 위치를 파악한다. GPS는 위성에서 송신한 신호가 지상에 설치된 수신기까지 도달하는 소요시간 또는 전파의 위상을 관측함으로써 관측지점의 위치를 계산한다. 이는 정적 및 동적 변위를 직접 계측할 수 있으며, 이를 통해 구조물의 상대 및 절대 위치와 가속도를 구할 수 있다. GPS는 지구상 어디에서나 24시간 이용할 수 있으며, 실시간으로 자동 계측이 가능하기 때문에 장기간 동안 지속적인 모니터링이 필요한 고층건물 및 사회기반시설물에 활발히 적용되고 있다 (Park et al., 2008; Tamura et al., 2002; Kijewski-Correa et al., 2006; Çelebi and Sanli, 2002; Hayes, 2006; Yi et al., 2013; Ogaja, et al., 2007; Nakamura, 2000; Breuer et al., 2008; Ni et al., 2009).

한 개의 GPS 수신기로는 오직 한 지점의 위치를 계측할 수 있으며, 이것의 정확도는 일반적으로 미터 수준이다. 이와 같은 정확도를 향상시키기 위해서, 최소 두 개 이상의 GPS 수신기가 요구되며, 이를 상대 측위로 한다. 상대 측위는 정적 상대 측위와 동적 상대 측위로 구분할 수 있는데, 일반적으로 구조물의 횡 변위 계측에는 동적 상대 측위 방법이 사용된다. 동적 상대 측위는 하나의 기준국 (위치를 알고 있고 고정된 관측지점에 위치한 GPS 수신기를 의미하며 base 혹은 reference라 함)과 하나의 이동국 (위치를 모르는 움직이는 지점에 위치한 GPS 수신기를 의미하며 rover 라 함)으로 구성된다. 두 개의 수신기는 동시에 각각 위치 데이터를 계측한다. 만약, 두 대의 수신기가 무선 통신으로 연결되어 있고, 실시간으로 위치 데이터를 송수신한다면, 그러한 방법을 real-time kinematic (RTK) 기법이라 한다. RTK 기법은 실시간으로 구조물의 움직임을 계측할 수 있기 때문에, 고층건물 및 타워의 GPS 기반 모니터링에 널리 사용되고 있다. 그러나 종래의 RTK 기법은 기준국의 별도 설치를 요구하기 때문에 적용 한계를 가질 수 있다. 이는 고층건물 등이 주로 위치하는 도심지역에서는 기준국을 위한 설치 공간의 확보가 어려울 뿐만 아니라, 실제로 적절한 설치 위치를 발견하더라도 공간에 대한 허가를 받아야 하며 이를 관리해야 하는 어려움이 있을 수 있다.

최근에는 기준국용 GPS를 별도로 사용하지 않고, 이동국용 GPS 1대만으로도 RTK 측량이 가능한 virtual reference station RTK (VRS-RTK)이 개발되었다. 이는 기선거리가 증가함에 따라 오차가 증가하는 종래의 RTK 기법의 문제점을 보완하기 위해서 개발된 측위 기법으로서, 기존에 설치되어 있는 여러 곳의 GPS 상시 관측소의 관측 데이터를 이용하여 이동국 근처에 가상 기준국 및 가상 관측 데이터를 생성한 후, 가상 관측 데이터와 보정을 위한 정보를 이동국에 전송한다 (Landau et al., 2002). 따라서, 이는 기준국용 GPS를 구입 및 관리해야 하는 경제적 부담과 이를 위한 공간 확보에 대한 문제를 동시에 해결할 수 있는 특징이 있다. VRS-RTK를 이용한 계측 사례는 Landau et al. (2002), Hu et al. (2003), Häkli et al. (2007), Pesci et al. (2008) 등이 있지만, 아직까지 건물의 풍진동 모니터링을 위한 연구 및 사례는 거의 보고되지 않고 있다.

본 연구에서는 기존에 제시된 VRS-RTK 기법의 골조 구조물에 대한 횡방향 구조응답 모니터링을 위한 적용 가능성 평가를 위해서, 1층 골조 모형 (1 Hz)과 3층 골조 모형 (0.85 Hz)의 자유진동 실험을 수행하였다. 실험을 통해 얻은 GPS 변위 및 가속도값을 기존의 계측기기인 레이저 변위계와 가속도계를 통해 얻은 계측값과 비교하여 이들 계측 데이터의 신뢰성에 대한 평가를 수행하였다. 또한, 구조물의 건전도 모니터링에서 구조물의 손상 여부는 일반적으로 고유진동수나 모드형상과 같은 동적 특성의 변화 여부를 통해 평가되는 점을 고려하여 (Kim et al., 2003), GPS를 통해 얻은 고유진동수와 가속도계를 통해 얻은 고유진동수와의 대응관계에 대한 검토를 수행하였다.

마지막으로, 건물의 모니터링의 경우, 지속적으로 구조물의 반응을 계측하여 구조물의 건전도 변화를 평가할 필요가 있다. 그러나, 계측 샘플링 수를 높이면 관리해야 하는 계측 데이터의 수가 많아지기 때문에 데이터 관리에 대한 부담이 발생한다. 한편, 계측 샘플링 수를 작게 하면 구조물의 동적 특성을 부정확하게 평가할 수 있다. 따라서 건물의 지속적인 모니터링을 위해서는 적절한 계측주기 설정이 요구되며, 이를 위해 본 연구에서는 GPS 계측 샘플링 (5, 10, 20 Hz)에 따른 계측 정밀도에 대한 평가를 수행하였다.

2. VRS-RTK

종래의 RTK 기법은 정밀한 위치 정보를 가지고 있는 기준국의 반송파 위상에 대한 보정데이터를 이용하여 이동국

Fig. 1 VRS-RTK concept

의 위치를 실시간으로 얻는다. 위성으로부터 두 수신기로 전송된 신호는 위치 정보를 계산하기 위해 동시에 사용된다. 기준국에서는 알고 있는 위치 정보와 위성 신호로부터 계산된 위치 정보 사이의 오차를 계산한다. 이는 두 수신 기간 동안에 전리층과 대류권에서 발생하는 신호 지연 등의 결과이다. 계산된 오차는 실시간으로 이동국에 전송되고, 이를 이용하여 이동국의 위치 정보가 보정된다. 이러한 보정 과정을 통해 측측 정확도가 향상된다. RTK 기법의 정확도는 기준국과 이동국 간의 기선 거리에 의존한다. 즉, RTK 기법의 정확도를 향상시키기 위해서는 기준국과 이동국 사이의 거리를 줄이는 것이 효과적이거나, 기준국은 고정되어 있기 때문에 이동국과의 거리를 줄이기 위해 기준국을 이동시키는 것이 불가능하다. 그래서 실질적인 대안으로 이동국을 조밀하게 설치하는 방법이 있으나 경제적인 이유 등의 여러 가지 상황들로 인해 용이하지 않다 (Seoul Network RTK System).

반면, virtual reference station RTK (VRS-RTK) 기법은 종래의 RTK method이 거리에 따라 오차가 증대되는 문제를 보완하기 위해 개발되었다. 이는 실제 기준국을 사용하는 대신 가상의 기준국을 사용한다. 상시 관측소의 측측 데이터에 기반하여 생성되는 가상 기준국의 보정 데이터는 기존의 기준국과 동일하게 이동국에 데이터를 송신하는 기능을 수행한다.

이것의 원리는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 중앙통제실에 실시간으로 연결된 GPS 상시 관측 네트워크에 기초한다. 중앙통제실에 위치한 컴퓨터는 3개 이상의 실제 상시 관측소에서 측측된 GPS 데이터를 실시간으로 수집하고, 이를 바탕으로 하여 바이어스 오차, 전리층과 대류권에 의한 신호 지연 등이 포함되어 있는 오차를 분리해낸다. 오차들을 제거한 후 가상 기준국의 가상 관측치를 생성하게 되며, 분리된 오

차들은 가상 기준국에서의 보정치를 산출하는데 이용된다. 이동국에서는 중앙통제실에서 계산된 기준국의 관측데이터와 보정데이터를 수신하고, 이를 통해 정밀한 이동국의 위치를 결정하게 된다 (Landau et al., 2002; Seoul Network RTK System).

3. 자유 진동 실험을 이용한 오차 평가

본 연구에서는 VRS-RTK 기법을 이용한 골조 구조물의 횡방향 구조응답 모니터링에 대한 적용 가능성을 평가하기 위해 1층 및 3층 프레임 모형의 자유진동 실험을 수행하였다. 이들 자유 진동 실험을 통해서, GPS 측측 변위 및 가속도 응답을 기존의 측측기기인 레이저 변위계와 가속도계로부터 측측된 결과와 비교함으로써 본 측측 시스템의 측측 신뢰성을 검토하였다. 또한, 1층 모형과 3층 모형의 측측 결과 비교를 통해서, 건물의 거동에 영향을 주는 고차모드 성분의 유무에 따른 측측오차에 대한 검토를 수행하였으며, GPS의 수신주기에 따른 측측결과의 정확도에 대한 검토를 수행하였다.

3.1 실험 개요

본 연구에서 사용된 1층 모형과 3층 모형을 각각 Figs. 2와 3에 나타내었다. 1층 모형은 2.50 m × 1.30 m 크기의 나무판과 이를 지탱하는 6개의 철근으로 구성된다. 그리고 실험체가 X 방향으로 자유 진동할 때, Y 방향에 대한 진동을 억제시키기 위해 Y 방향으로서는 가새가 보강되었다.

3층 실험체의 X 및 Y 방향의 경간 길이는 모두 400 mm이며, 1층, 2층, 3층의 층 높이는 각각 750, 650, 550 mm이다. 모든 기둥의 단면 크기는 4 mm × 4 mm이다. 1층 모형과 동일하게, 실험체가 X 방향으로 자유 진동할 때, Y 방향에 대한 진동을 억제시키기 위해 Y 방향으로서는 가새가 보강되었다.

GPS (Leica GX 1230)는 각 실험체의 최상위 면에 설치되었으며, 레이저 변위계 (Keyence LB-1000)와 가속도계 (Dytran 3192A)가 기준 측측기로서 함께 설치되었다. 각 측측기의 설치 위치는 Figs. 2와 3에 나타내었다.

1층 모형과 3층 모형은 각각 40 mm와 60 mm의 초기 변위를 가한 후 자유 진동하도록 하였다. 모형의 변위 및 가속도 응답을 측측하기 위해, GPS, 레이저 변위계, 가속도계의 샘플링 수는 각각 20 Hz, 100 Hz, 100 Hz로 설정하였다.

(a) Dimension

(b) Picture

Fig. 2 One-story specimen and instrumentation

3.2 변위 및 가속도 응답

Fig. 4(a)는 1층 모형을 초기 변위 40 mm로 자유 진동시켰을 때 GPS와 레이저 변위계로부터 측정된 변위 이력을 비교하여 나타내고 있다. 이를 통해서 GPS의 변위 이력은 진폭 및 위상에 있어서 레이저 변위계와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(b)는 3층 모형을 초기 변위 60 mm로 자유 진동시켰을 때 GPS와 레이저 변위계로부터 측정된 변위 이력을 비교하고 있다. 1층 모형 실험 결과와 비교하여 피크 때의 두 측정 결과에 약간의 차이가 보이지만, 진폭 및 위상에 있어서 전반적으로 좋은 대응 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

GPS를 이용한 가속도 응답 평가를 위해, 본 연구에서는 GPS를 통해 측정된 변위이력을 식 (1)에 적용하여 가속도

(a) Dimension

(b) Picture

Fig. 3 Three-story specimen and instrumentation

값을 산출하였다.

$$\ddot{u}(t_i) = \frac{-u(t_{i-2}) + 16u(t_{i-1}) - 30u(t_i) + 16u(t_{i+1}) - u(t_{i+2}))}{12(\Delta t)^2} \quad (1)$$

(a) One-story specimen

(b) Three-story specimen

Fig. 4 Displacement history measured from GPS and laser displacement sensor

(a) One-story specimen

(b) Three-story specimen

Fig. 5 Acceleration history obtained from GPS and accelerometer

여기서, $u(t_i)$ 와 $\ddot{u}(t_i)$ 는 시간 t_i 에서의 변위와 가속도 응답이며, Δt 은 시간 증분이다. GPS와 가속도계의 가속도 이력의 결과를 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. Fig. 5에 나타난 것처럼, GPS의 변위이력을 이용하여 산출한 가속도 값이 가속도계로부터 계측된 가속도 값을 약간 상회하는 결과를 보이고 있으나, 위상 및 진폭의 감소 경향에 있어서 매우 유사한 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 변위응답의 경우와 마찬가지로 3층의 경우가 1층보다 오차가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 1층 모형의 변위 응답의 경우, GPS와 변위계의 계측 기록이 거의 일치하는 결과를 나타내었으나, 가속도의 경우는 1층 모형에서도 변위응답에 비해서는 오차가 크게 발생하였다. 이는, GPS를 통한 계측변위를 미분하는 과정에서 발생하는 수치미분의 오차로, 가속도계에 비해서 낮은 GPS의 민감도와 샘플링 수 (20Hz)가 주요 원인이라고 판단된다.

3.3 고유진동수

각 모형의 고유진동수 산출을 위해 가속도 데이터에 대하여 Fourier transform을 실시하였다. Fig. 6은 GPS 변위계측 결과 (샘플링 수 : 20Hz)를 통해서 산출한 가속도와 가속도계로부터 얻어진 가속도 기록에 대한 Fourier spectrum을 나타내고 있다. 1층 모형의 경우, Fig. 6(a)에 나타낸 것처럼, GPS에 의해 얻은 고유진동수 (1.01 Hz)는 가속도계를 통해 얻은 고유진동수 (1.00 Hz)와 거의 일치함을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 6(b)에 나타낸 3층 모형의 경우에는 세 개의 고유진동수가 검출 되었으며, GPS에 의해 얻은 고유진동수 (1차 0.85 Hz, 2차 2.98 Hz, 3차 5.11 Hz)와 가속도계를 통해 얻은 고유진동수 (1차 0.86 Hz, 2차 3.00 Hz, 3차 5.14 Hz) 역시 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 각 차수 별 진폭의 차이에 있어서는, 3차 진동수에 대한 진폭의 차가 가장 크게 나타났다.

(a) One-story specimen

(b) Three-story specimen

Fig. 6 Natural frequency comparison between the GPS data and the accelerometer data

(a) First mode

(b) Second mode

(c) Third mode

Fig. 7 Acceleration response of each modal component

Fig. 7은 Fig. 5(b)에 포함된 각 모드성분을 비교하기 위하여, Fourier transform을 통해서 산출된 고유진동수 성분 별로 각 모드성분을 추출한 결과를 나타내고 있다. 모드 성분의 추출을 위하여 각각의 고유진동수에 해당하는 대역에 대한 band-pass filter를 사용하였다. 그림을 통해서 알 수 있듯이 1, 2차 성분에 있어서는 GPS와 가속도계에서의 가속도 기록이 유사한 결과를 나타내고 있는 반면, 3차 진동수 성분의 경우는, 진폭에 있어서 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 GPS의 낮은 샘플링 수로 인해서, 고차모드 성분의 계측에 한계가 있음을 나타내는 결과라고 볼 수 있다. 이상의 결과는 샘플링 수가 20Hz인 GPS 계측데이터를 이용한 결과로서, GPS의 샘플링 수가 5Hz와 10Hz인 경우에는 2차와 3차 모드 성분을 검출할 수 없었다.

3.4 GPS 샘플링 수에 따른 계측 오차

GPS의 샘플링 수에 따른 레이저 변위계의 계측결과와의

오차 평가를 위해서 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz의 계측주기를 대상으로 검토를 수행하였다. GPS 데이터의 경우, 동일한 조건에서의 평가를 위해 20Hz로 계측된 값을 대상으로 하였으며, 5 Hz 및 10 Hz의 계측 값은 20 Hz의 계측 값을 resampling 한 결과를 사용하였다. 1층 모형에 대한 각 계측주기에 따른 GPS의 계측 오차는 Table 1과 같다. 여기서 오차는 레이저 변위계와 GPS를 통해 얻은 각 peak의 absolute difference를 의미하며, 샘플링 수가 증가할수록 평균 오차가 감소하는 것으로 나타났다.

1층 모형 실험의 결과 분석에서 사용한 것과 동일한 방법을 사용하여 3층 모형에 대해서도 계측주기에 따른 오차 평가를 수행하였으며, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz에서의 평균 오차는 각각 4.25 mm (7.97%), 2.53 mm (4.80%), 2.20 mm (4.17%)으로 나타났으며, 1층 모형 실험 결과와 마찬가지로 샘플링 수가 증가할수록 평균 오차가 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 1층 모형과 3층 모형 모두에 있어서, 계측 주기가 5 Hz에서 10 Hz로 증가함에

Table 1 Absolute difference between the GPS-recorded displacement and the laser displacement sensor-recorded displacement for different GPS sampling rates: One-story test model (unit: mm)

GPS sampling rate	Positive peak				Negative peak				Mean
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	
5 Hz	1.90 (6.63%)	1.22 (5.49%)	1.06 (5.96%)	0.76 (5.34%)	2.03 (7.78%)	1.61 (8.05%)	1.24 (7.98%)	0.92 (7.63%)	1.34 (6.86%)
10 Hz	0.51 (1.79%)	0.28 (1.24%)	0.21 (1.17%)	0.13 (0.91%)	0.62 (2.39%)	0.45 (2.22%)	0.33 (2.11%)	0.21 (1.78%)	0.34 (1.70%)
20 Hz	0.05 (0.19%)	0.02 (0.07%)	0.06 (0.33%)	0.09 (0.60%)	0.09 (0.35%)	0.00 (0.00%)	0.12 (0.75%)	0.17 (1.40%)	0.07 (0.46%)

Table 2 Absolute difference between the GPS-recorded displacement and the laser displacement sensor-recorded displacement for different GPS sampling rates: Three-story test model (unit: mm)

GPS sampling rate	Positive peak				Negative peak				Mean
	1st	2nd	3rd	4th	1st	2nd	3rd	4th	
5 Hz	2.32 (4.01%)	6.65 (11.68%)	5.04 (10.02%)	9.80 (20.29%)	5.84 (9.22%)	0.04 (0.08%)	2.10 (4.04%)	2.21 (4.42%)	4.25 (7.97%)
10 Hz	0.35 (0.60%)	3.28 (5.76%)	3.56 (7.08%)	7.35 (15.22%)	2.49 (3.93%)	2.07 (3.62%)	0.95 (1.84%)	0.19 (0.38%)	2.53 (4.80%)
20 Hz	0.45 (0.78%)	2.43 (4.26%)	2.41 (4.80%)	5.90 (12.22%)	1.59 (2.51%)	3.02 (5.28%)	1.25 (2.42%)	0.56 (1.12%)	2.20 (4.17%)

따라 오차값이 급격히 감소하는 반면, 10 Hz에서 20 Hz로의 증가에 따른 오차 값의 변화는 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 제시된 VRS-RTK 기법의 골조 구조물에 대한 횡방향 구조응답 모니터링을 위한 적용 가능성 평가를 위해서, 1층 골조 모형 (1 Hz)과 3층 골조 모형 (0.85 Hz)의 자유진동 실험을 수행하였다. 20 Hz의 샘플링 수로 계측된 GPS 변위이력 데이터의 이중미분을 통해 가속도이력데이터를 산출하였으며, 이들 결과를 변위 및 가속도 응답 계측에 널리 사용되는 레이저 변위계와 가속도계로부터 얻은 계측값과 비교하였다. 1층 모형실험의 경우, 변위와 가속도 응답의 평균오차는 각각 0.07 mm (0.46%), 0.0091 g (13.57%)으로 나타났다. 반면, 3층 모형실험의 경우, 변위와 가속도 응답의 평균오차는 각각 2.20 mm (4.17%), 0.0322 g (13.63%)으로 나타났다. 단일 모드의 특성만 고려된 1층 모형 실험결과보다는 고차모드 성분의 영향을 무시할 수 없는 3층 모형실험결과에서 더 큰 오차가 나타났다.

GPS를 이용한 구조물의 동특성 평가의 적용성을 확인하기 위해, GPS를 통해 얻은 고유진동수를 가속도계를 통해 얻은 고유진동수와 비교하였다. 1층과 3층 모형실험의 모든

경우에서 GPS를 이용해 얻은 고유진동수는 가속도계를 통해 얻은 고유진동수의 값과 유사한 것으로 나타났다. 특히, 3층 실험체의 경우, GPS는 3차 고유진동수까지 고유진동수를 얻을 수 있었으며, 이는 가속도계의 값과 유사한 결과를 나타내었다.

또한, 건물의 지속적인 모니터링을 위한 적절한 계측 주기를 판별하기 위해 GPS 계측 샘플링 수 (5, 10, 20 Hz)에 따른 오차를 평가한 결과, 샘플링 수가 증가할수록 오차가 감소하는 것으로 나타났다. 특히, 계측 주기가 10 Hz에서 5 Hz로 감소함에 따라 오차 값이 급격히 증가하는 반면, 20 Hz에서 10 Hz로의 감소에 따른 오차 값의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 3층 시험체의 경우는 5Hz와 10Hz의 계측주기로는 2차모드 이상의 진동수 성분을 검출 할 수 없었다.

건물 중 유지관리 비용 및 현장 조건 등에 따라 기준국용 GPS를 설치하기 어려움을 겪게 되는 경우가 발생할 수 있다. 비록 GPS의 정확도, 샘플링 수 등의 한계로 인해 오차가 발생하지만, 모니터링 대상 건물의 고유주기를 고려한 GPS의 적절한 계측주기를 선정한다면, VRS-RTK 기법은 기준국용 GPS를 설치하는데 어려움을 겪게 되는 건물의 횡방향 구조 반응 모니터링에 효과적인 대안이 될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0018360).

References

1. Breuer, P., Chmielewski, T., Górski, P., Konopka, E., and Tarczyński, L. (2008), The Stuttgart TV Tower - displacement of the top caused by the effects of sun and wind, *Engineering Structures*, 30(10), 2771-2781.
2. Choi, S. W., Kim, B. R., Lee, H. M., Kim, Y., and Park, H. S. (2013), A deformed shape monitoring model for building structures based on a 2D laser scanner, *Sensors*, 13, 6746-6758.
3. Dytran. 3192A Accelerometer. Available at : <http://www.dytran.com/products/3192A.pdf>.
4. Häkli, P. (2007), The virtual reference station concept in Finland - A case Study, *Survey Review*, 39(304), 145-155.
5. Hayes, D. M., Sparks, I. R., and Cranenbroeck J. V. (2006), Core wall survey control system for high rise buildings, Shaping the Change, *XXIII FIG Congress*, Munich, Germany.
6. Hu, G. R., Khoo, H. S., Goh, P. C., and Law, C. L. (2003), Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning, *Journal of Geodesy*, 77(5-6), 292-302.
7. Keyence, LB-1000 series instruction manual, Available at : http://www.keyence.com.sg/downloads/laser_displacement07.php.
8. Kijewski-Correa, T. (2005), GPS: A new tool for structural displacement measurements, *APT Bulletin Journal of Preservation Technology*, 36(1), 13-18.
9. Kijewski-Correa, T., Kareem, A., and Kochly, M. (2006), Experimental verification and full-scale deployment of global positioning systems to monitor the dynamic response of tall buildings, *Journal of Structural Engineering*, 132(8), 1242-1253.
10. Kim, J. T., Ryu, Y. S., Cho, H. M., and Stubbs, N. (2003), Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method, *Engineering Structures*, 25(1), 57-67.
11. Landau, H., Vollath, U., and Chen, X. (2002), Virtual reference station systems, *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2), 137-143.
12. Lee, J. J., Fukuda, Y., Shinozuka, M., Cho, S., and Yun, C. B. (2007), Development and application of a vision-based displacement measurement system for structural health monitoring of civil structures, *Smart Structures and Systems*, 3(3), 373-384.
13. Leica, GX 1230, Available at : http://www.leica-geosystemssolutionscenters.com/Site/Instrument%20PDF's/GPS%20Systems/SmartRover%20&%20GPS1200/GPS1200_TechnicalData_en.pdf
14. Nakamura, S. I. (2000), GPS measurement of wind-induced suspension bridge girder displacements, *Journal of Structural Engineering*, 126(12), 1413-1419.
15. Ni, Y. Q., Xia, Y., Liao, W. Y., and Ko, J. M. (2009), Technology innovation in developing the structural health monitoring system for Guangzhou New TV Tower, *Structural Control and Health Monitoring*, 16(1), 73-98.
16. Ogaja, C., Li, X., and Rizos, C. (2007), Advances in structural monitoring with global positioning system technology: 1997-2006, *Journal of Applied Geodesy*, 1(3), 171-179.
17. Park, H. S., Lee, H. M., and Adeli, H. (2007), A new approach for health monitoring of structures: Terrestrial laser scanning, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 19-30.
18. Park, H. S., Sohn, H. G., Kim, I. S., and Park, J. H. (2008), Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 117-132.
19. Park, J. W., Lee, J. J., Jung, H. J., and Myung, H. (2010), Vision-based displacement measurement method for high-rise building structures using partitioning approach, *NDT&E International*, 43(7), 642-647.
20. Pesci, A., Loddò, F., Cenni, N., Teza, G., and Casula, G. (2008), Analyzing virtual reference station for GPS surveying: experiments and applications in a test site of the northern Apennines (Italy), *Annals of Geophysics*, 50(4), 619-631.
21. Seoul Network RTK System, Available at : http://gnss.seoul.go.kr/intro/intro4_1.php
22. Tamura, Y., Matsui, M., Pagnini, L. C., Ishibashi, R., and Yoshida, A. (2002), Measurement of wind-induced response of buildings using RTK-GPS, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(12-15), 1783-1793.
23. Yi, T. H., Li, H. N., and Gu, M. (2013), Recent research and application of GPS-based monitoring technology for high-rise structures, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(5), 649-670.
24. Çelebi, M., and Sanli, A. (2002), GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures, *Earthquake Spectra*, 18(1), 47-61.

Received : 10/29/2013

Revised : 12/06/2013

Accepted : 12/10/2013

요 지

건물의 풍진동을 모니터링 하기 위해, 두 개 (이동국과 기준국)의 global positioning system (GPS)에 기반한 종래의 real-time kinematic (RTK) 기법이 널리 적용되고 있다. 그러나 이는 기준국을 위한 공간을 확보하거나 유지 관리하는데 어려움을 겪을 수 있다. 한편, 최근에 하나의 이동국 만을 이용하여 구조물의 움직임을 계측할 수 있는 새로운 virtual reference station (VRS)-RTK 기법이 개발되었으며, 측량 분야에서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 골조 구조물의 횡방향 구조 응답을 모니터링하기 위한 VRS-RTK 기법의 적용성을 평가하기 위해 단층 골조 모형 (1차 고유진동수 : 1 Hz)과 3층 골조 모형 (1차 고유진동수 : 0.85 Hz)의 자유진동 실험을 수행하였다. GPS에 의해 계측된 변위 및 가속도 응답의 신뢰성을 평가하기 위해, 레이저 변위계와 가속도계가 설치되었으며, 이들로부터 얻은 계측값을 GPS의 계측값과 비교하였다. 또한, 건물의 지속적인 모니터링을 위한 적절한 계측 샘플링 수를 파악하기 위해, 변위 응답에서의 오차가 각기 다른 GPS 샘플링 수 (5, 10, 20 Hz)에서 평가되었다. 실험 결과, GPS으로부터 얻은 변위 및 가속도 응답은 레이저 변위계와 가속계로부터 얻은 응답과 좋은 유사 관계를 가지는 것을 확인하였다. 그리고, GPS 샘플링 수가 증가할수록 변위 오차는 감소하였으며, 3층 실험체에 대해서는 20 Hz의 GPS 샘플링 수로 구조물의 전 모드 성분 (1, 2, 3차 모드)을 검출할 수 있었다.

핵심 용어 : GPS, VRS-RTK, 고차모드, 골조 구조물, 풍하중