

GPS와 가속도계를 이용한 구조물 거동모니터링의 타당성 연구

Feasibility Study of Structural Behavior Monitoring Using GPS and Accelerometer

한정헌¹⁾ 류성찬²⁾ 조두용^{3)*} 박선규⁴⁾
Han, Jung Hun Ryu, Sung Chan Cho, Doo yong Park, Sun Kyu

Abstract

In this study, problems of RTK (Real Time Kinematic)-GPS (Global Positioning System) and an accelerometer sensor when applied to structures were experimentally identified through a comparison between results of the displacement measurement using the RTK-GPS, the accelerometer, and LVDT (Linear variable differential transformer). Integrated displacement was calculated by the improved RTK-GPS and accelerometer on the frequency of observation and positioning accuracy. This integrated displacement was also compared with that of LVDT to check the validity of application and feasibility.

Keywords : GPS, Accelerometer, LVDT, Monitoring, Integrated displacement

1. 서론

본 연구는 구조물의 안정성 평가를 위한 정밀측정의 필요성에 대한 문제의식과 기존 센서들을 신뢰할 수 있는 타당성 분석의 필요성과 변위계측 센서들의 한계들을 보완하기 위하여 기존의 변위계측 센서들과 통합하는 방법에 대한 필요성을 배경으로 하여 수행되었다. 비교적 높은 빈도로 정밀한 계측을 수행할 수 있는 RTK(Real Time Kinematic)-GPS(Global Positioning System) 위치측정 기술을 선정하였으며, 측량 빈도와 정확도 향상을 위해 가속도계 센서의 측정 결과와 연계하는 방법을 중심으로 연구하였다.

이러한 배경 가운데 설정한 본 연구의 목적은 측지·측량 분야의 정밀한 3차원 절대측위 방법인 RTK-GPS 측위 결과, 가속도계를 이용한 변위계측 결과와 LVDT(Linear variable differential transformer)의 변위계측 결과를 비교하여 RTK-GPS와 가속도계 센서의 문제점들을 파악하고 RTK-GPS 측위법과 가속도계를 이용한 변위계측 결과를 통합계산 하여 관측빈도와 측위 정확도를 향상시키고 이를 구조물 변위 계측에 적용하여 보다 정확한

안정성 평가가 이루어지도록 하는 것이다. 이를 위하여 구조물 거동모니터링에 있어서 RTK-GPS와 가속도계 센서의 타당성을 연구하였다.

국내·외에서 GPS를 이용한 변위계측은 여러 계측센서와 결합하여 정밀한 변위계측이 가능한 기술이다. 현재 국내에서는 GPS와 계측센서를 통합한 구조물 계측은 초기단계로서 부분적으로 연구 및 적용되고 있다. 초고층 건물 안전평가를 위해 GPS 수신기 2대와 풍향계, 가속도계를 이용하여 건물의 수평변위 비틀림 변위 등을 모니터링 하였고(박효선 등, 2005), 구조물의 실측 가속도로부터 변위 예측을 하기위해 가속도계를 이용하여 실시간 모니터링 적용가능성을 검증하였다(홍운화, 2007).

주요 선진국에서는 GPS를 이용한 구조물의 정밀 변위 계측이 국내보다 일찍 연구되기 시작했다. 영국 Nottingham 대학에서는 교량의 거동을 모니터링 하기 위해 GPS와 가속도계를 이용해 분석 했으며(Roberts 등, 2004), 일본 Tokyo Polytechnic 대학에서는 지진과 풍하중에 대한 108m 철탑구조물의 모니터링을 GPS와 가속도계를 이용하여 분석했다(Xiaojing Li et al., 2006). 그리고 홍콩 Polytechnic 대학에서는 GPS와 가속도계의 통합데이터

1) 정회원, 성균관대학교 u-City공학과 석사, 울트라건설(주) 사원
2) 정회원, 성균관대학교 u-City공학과 석사과정
3) 정회원, 성균관대학교 건설환경시스템공학과 연구교수, 교신저자
4) 정회원, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 정교수

* Corresponding author : dooyongcho@skku.edu 010-9437-9238

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2012년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

를 EMD(Empirical mode decomposition) 알고리즘으로 분석하였다(Chan, W. S et al., 2006).

본 연구는 지속적인 계측을 통해 안정성을 유지·관리할 수 있는 효율적인 구조물 거동모니터링을 목적으로 RTK-GPS, 가속도계, 그리고 LVDT를 이용하여 구조물의 거동을 모니터링하고 각 센서별 비교를 통해 센서들의 장점과 단점을 알아내고, RTK-GPS 변위 데이터와 가속도계 변위 데이터를 통합하여 기준변위로 사용한 LVDT 데이터와 비교를 통해 생성된 Integration 변위의 정확도와 타당성을 확인하는 것이다.

2. GPS와 가속도계 데이터 통합계산

RTK-GPS와 가속도계로 측정한 각각의 변위 측정 데이터는 서로 다른 특성을 가지고 있다. RTK-GPS로 측정한 자료는 높은 절대정확도를 나타내는 반면에 관측 빈도가 1Hz의 낮은 수준이다. 가속도계로 측정한 자료는 높은 관측빈도를 나타내는 반면에 장기간에 걸쳐서 나타나는 변위 부분이 누적오차를 소거하기 위한 필터링 과정에서 오차와 함께 소거되는 단점을 나타낸다.

이러한 서로 다른 특성의 위치측정 자료를 결합함으로써 측정빈도와 정확도 측면 모두에서 향상된 변위측정 결과를 얻으려면, 적합한 통합계산의 과정을 거쳐야 한다.

2.1 단순 통합계산 방법

단순통합방법에 의하여 RTK-GPS 측위결과와 가속도계 자료에 의한 변위계산 결과를 통합하여 계산하였다. 전체적인 통합계산 절차를 정리하면 Fig. 1의 그림과 같다.

2.2 대역별 변위 추출에 의한 통합계산 방법

대역별 변위추출 방법을 이용하여 RTK-GPS 측위자료와 가속도계에 의한 변위 계산 결과를 통합하였다. 통합계산의 과정을 정리하면 Fig. 2와 같다.

단순통합방법과 다른 점이 있다면, 두 자료가 서로 독립적으로 처리된다는 점이다. 각각의 자료를 EMD (Empirical Mode Decomposition) 방법으로 처리하여 주기별로 분해한 다음 RTK-GPS 측위 자료에서는 장주기 요소를 추출하고 가속도계에 의한 변위계산 결과에서는 단주기 요소를 추출하여 합산한다. Chan et al.의 연구결과를 볼

때 GPS 측위 데이터의 신호분해에 EMD 방법이 적합한 것으로 나타났으므로 본 연구에서도 신호 분해 방법으로 EMD 방법을 적용하였다(Chan, W. S et al., 2006).

Fig. 3은 대역별 변위 추출방법으로 RTK-GPS 측정값과 가속도계로 계산한 변위량을 통합하는 개념을 정리한 것이다. RTK-GPS로 관측한 값에서 장주기에 해당하는 변위를 추출하고 가속도계로 계산한 변위량에서 단주기에 해당하는 변위를 추출하여 결합함으로써 관측빈도

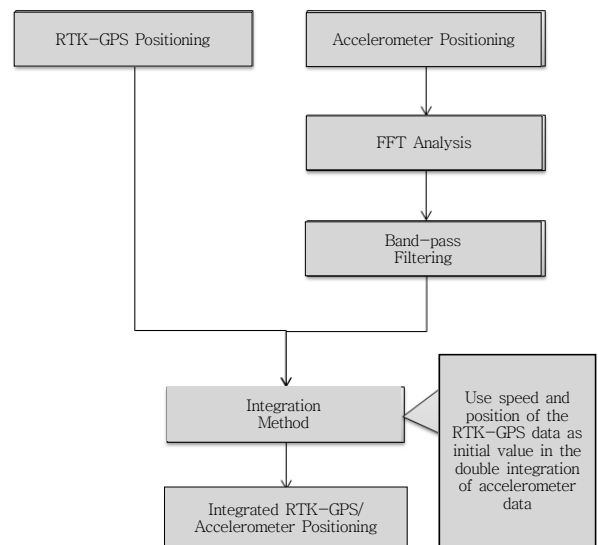


Fig. 1 Process in integrating calculation by simple integrating method

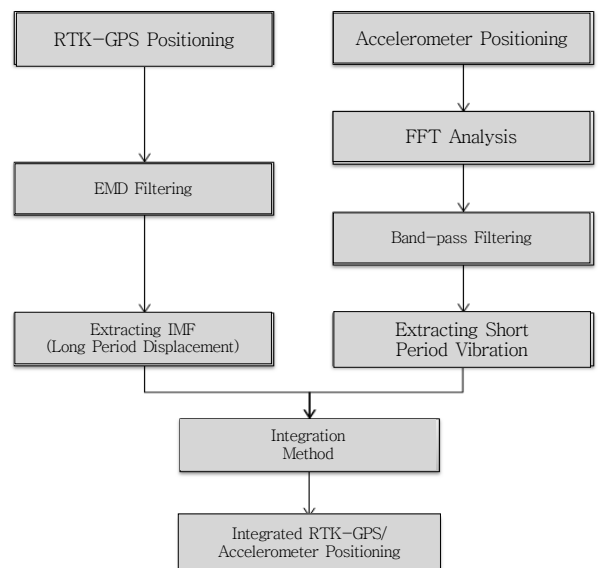


Fig. 2 Process in integrating calculation by Empirical Mode Decomposition

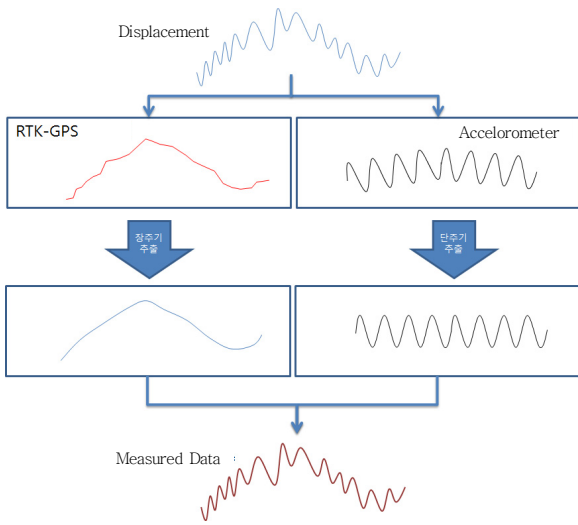


Fig. 3 Concept of integrating calculation by Empirical Mode Decomposition

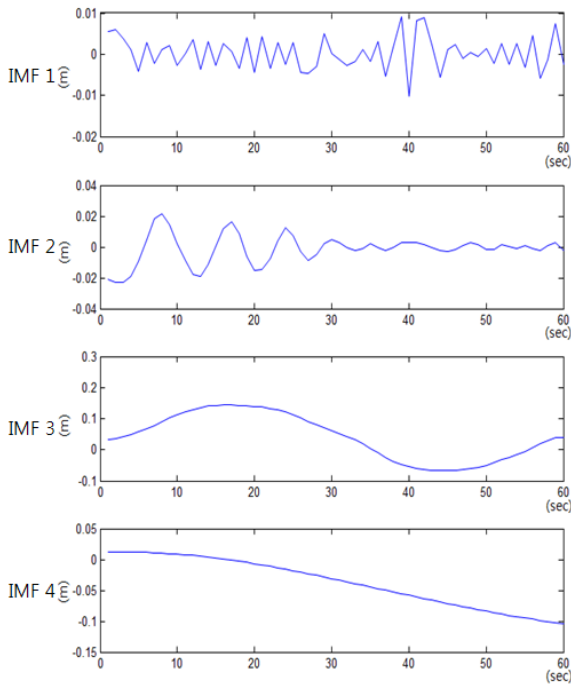


Fig. 4 Decomposition of RTK-GPS displacement results by Empirical Mode Decomposition

와 관측정확도가 향상된 수치를 계산할 수 있다.

Fig. 4는 EMD에 의한 모드 분해 기법으로 RTK-GPS 측위결과를 주기별로 분해한 것이다. 계산된 IMF (Intrinsic Mode Function) 들 중에서 장주기에 해당하는 IMF3과 IMF4에 해당하는 요소만을 선택하여 가속도계로 계산한 변위와 통합하였다. IMF3과 IMF4를 합산한 장주기를 보면 본 연구에서의 실험 전 실행한 모의 변위 실험에

서 발생시킨 실제 장주기 변위와 매우 유사한 결과가 계산되었음을 확인할 수 있었다.

또한 가속도 측위결과는 EMD로 신호를 분해하여 생성한 IMF 신호들 중에서 연구에 사용한 가속도계로 측정된 자료는 노이즈가 포함되는 대역인 0.4Hz 이하의 빈도를 나타내는 IMF들을 소거하는 방법을 사용하였다.

대역별로 변위를 추출하여 결합하는 방법을 사용하는 경우 다음과 같은 효과들이 발생할 것을 기대할 수 있다.

- (1) RTK-GPS 관측정확도의 향상 : RTK-GPS 관측값에서 단주기 요소를 소거하면 구조물의 장기적이고 점차적인 거동에 대한 추정 결과가 계산되는데, 많은 관측 자료들로부터 거동을 추정하는 과정에서 통계적인 효과가 발생하므로 RTK-GPS 관측값에 포함된 과대오차를 소거할 수 있고, 일반적으로 알려진 정확도 보다 향상된 위치 계산값을 얻을 수 있다. 단순 통합계산에 의한 방법에서는 통합계산 결과가 RTK-GPS 측량의 정확도에 지배되기 때문에 이러한 효과를 얻을 수 없었다.
- (2) 관측빈도와 측정가능 범위의 향상 : 가속도계로 관측한 상대적인 변위들과 RTK-GPS로 측량한 장기적이고 점차적인 위치 변화량을 결합하게 되면 관측빈도가 50Hz 이상인 측정값들을 얻을 수 있으며, RTK-GPS 측량으로 검출할 수 없었던 미세한 진동량들도 계산할 수 있다. RTK-GPS 측량의 연직오차가 20~50mm 수준이므로 최소한 50mm 이상의 크기로 발생한 변위에 대해서만 모니터링이 가능하였는데, 가속도계 관측값과 결합하게 되면 20mm 이하의 변위량도 측정할 수 있다.

3. 실험 연구

3.1 실험 계획

3.1.1 실험체 제작

실험체는 현장실험의 설치 조건을 고려하여 steel보의 길이와 크기 및 형강종류를 결정하였다. 실험에서 사용한 부재는 공장 판매가 되고 있는 SS400의 형강으로 B=100mm, h=50mm, T=2.0mm의, 각관 형강을 사용하였다. GPS의 계측범위가 낮기에 진동에 대한 변위가 클수록 명확한 값을 얻을 수 있어 반응이 비교적 큰 각관을 실험체로 결정하였다. 실험계측에 있어서 필요한 최소한의 변위가

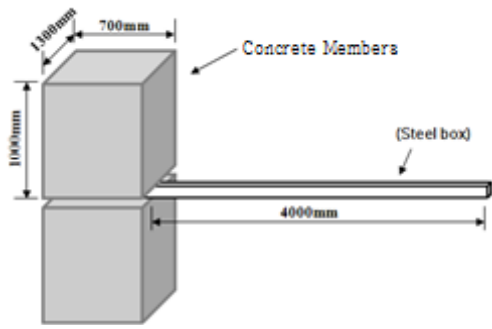


Fig. 5 Specimen for an experiment

RTK-GPS의 계측범위로 인해 30mm 이상의 변위가 필요하여 실험체를 콘크리트 부재에 고정된 캔틸레버보 형태로 실험하였고 실험체는 Fig. 5와 같이 설치하였다.

3.1.2 실험시스템의 구성

실험을 위해 RTK-GPS, 가속도계, LVDT와 실험체를 다음과 같이 설치하였다. RTK-GPS, 가속도계, LVDT는 수직에 대한 동적변위 측정이 용이하도록 보의 상단에 RTK-GPS를 설치하고, 측면에 가속도계를 부착하며, 하단에 LVDT를 설치하였고 보의 끝단에서부터 200mm, 1000mm, 2000mm 위치로 센서들을 이동하면서 실험을 하였다.

전체 시스템은 RTK-GPS 측위 시스템을 구성하는 GPS 기준국과 이동국 및 보정신호 송·수신용 무선 모뎀, 그리고 가속도계와 A/D 컨버터, 자료처리 시스템 등으로 구성하였다. GPS 기준국은 실시간으로 산출한 보정신호를 라디오 모뎀을 통해 GPS 이동국으로 전송한다. 이동국은 이 보정값과 동일 시간대에 수신한 GPS 위성 자료를 이용하여 1Hz 빈도로 안테나 위상 중심의 위치를 측정한다. 이러한 RTK-GPS 측위를 실시하는 동안에 가속도계로는 50Hz로 가속도를 측정하였고, 또한 LVDT도 샘플링을 50Hz로 하여 자료처리 시스템의 시간을 GPS 시간을 기준으로 보정함으로써 RTK-GPS 측위 결과와 가속도계 측위 결과가 시각적으로 동기화 되도록 하였다.

RTK-GPS는 Leica GPS1200+를 사용하였고, 가속도계는 세 개의 ADXL 05 가속도 센싱 IC(통합회로)로 구성된 것이다. LVDT 데이터를 GPS·가속도계 통합데이터의 정확도를 확인하기 위한 최대 100mm 계측가능한 Tokyo Sokki사의 CDP-100을 -50mm,+50mm 형태로 사용하여 기준데이터로 활용하였으며, Data logger (UCAM-500)를 통해 데이터를 수집하였다.

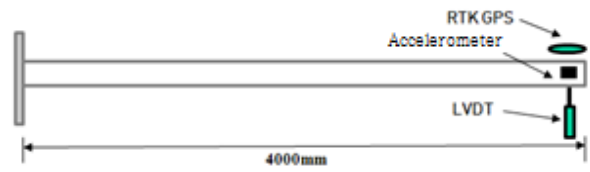


Fig. 6 position of Installed Sensors



Photo 1 Specimen and installed equipments



Photo 2 installed sensors for an experiment

3.1.3 실험 방법

실험은 캔틸레버 보의 3군데의 위치에서 실시하였고, 각 위치에서 3개의 시나리오로 진행을 하였으며 총 2회씩 실험을 하였다.

첫 번째 실험시나리오는 변위를 먼저 주고 자유진동을 준 후에 자유진동이 끝날 때까지 계측하였다.

두 번째 실험시나리오는 자유진동이 끝나기 전에 거동이 지속 될 수 있도록 진동을 인위적으로 지속적으로 넣어주었다.

세 번째 실험시나리오는 진동에 대한 영향을 주지 않고 일정시간마다 보의 수직변위에 대한 변위를 계단식으로 제어하여 실험하였다.

네 번째 실험시나리오는 일정시간마다 보의 수직변위에 대한 제어를 계단식으로 주고, 동시에 일정하게 동적 변위를 주며 실험하였다.

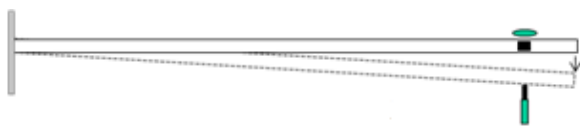


Fig. 7 The 1st experiment scenario

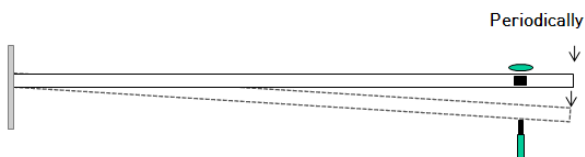


Fig. 8 The 2nd experiment scenario

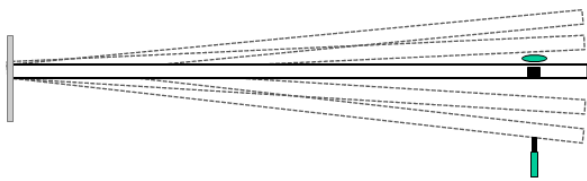


Fig. 9 The 3rd experiment scenario

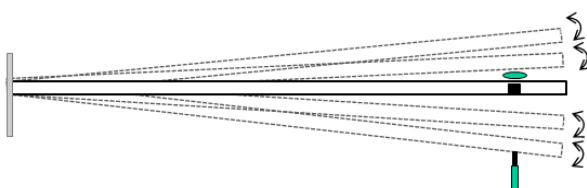


Fig. 10 The 4th experiment scenario

Fig. 11은 각 위치별 실험시나리오 및 실험방법이다. Case1~3처럼 RTK-GPS, 가속도계, LVDT의 부착 지점을 달리하여 실험을 하고, 각 Case마다 앞에서 설명한 4가지의 시나리오를 실행한다. Case1지점의 첫 번째 시나리오는 Case1-1로 지정하고 나머지 실험시나리오도 같은 방식으로 Case번호를 지정하였다.

3.2 실험 결과

3.2.1 GPS, 가속도계와 LVDT 실험데이터 비교

LVDT, 가속도계, RTK-GPS 모두를 Overlay 시켜 가속도계와 RTK-GPS의 장점과 단점이 무엇이 있는지 분석했다.

Fig. 12~14는 각 Case별 첫 번째 시나리오(Case1-1, 2-1, 3-1)의 GPS, LVDT, 가속도계의 실험데이터를 보여주고 있다. Case1-1, 2-1, 3-1의 그래프는 변위를 먼저 주고 자유진동을 하게한 한 후 자유진동이 끝날 때까지 계측한 실험의 데이터를 나타내고 있다.

가속도계 센서는 LVDT와 거의 유사하게 그래프가 도

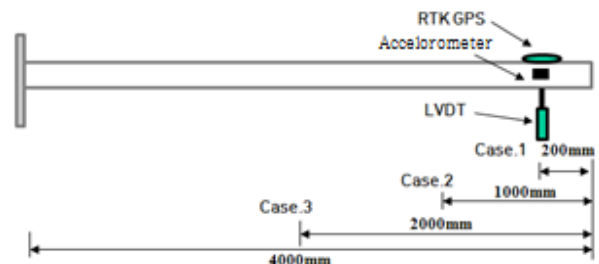


Fig. 11 Position of sensors in each of cases

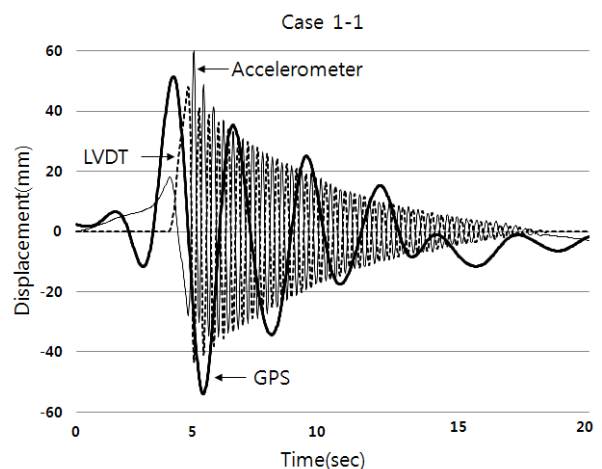


Fig. 12 Displacement-Time graph in Case1-1

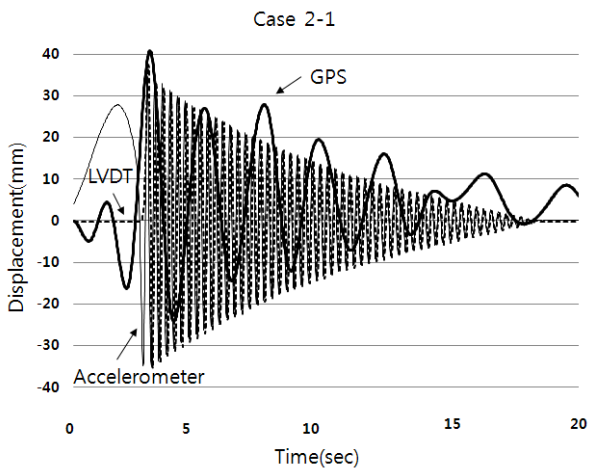


Fig. 13 Displacement-Time graph in Case2-1

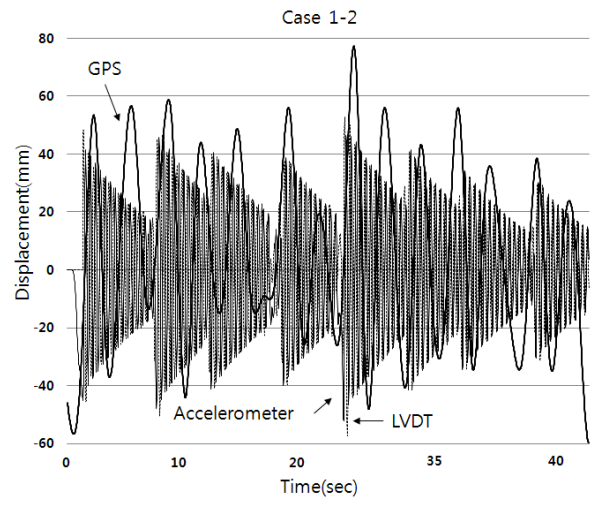


Fig. 15 Displacement-Time graph in Case1-2

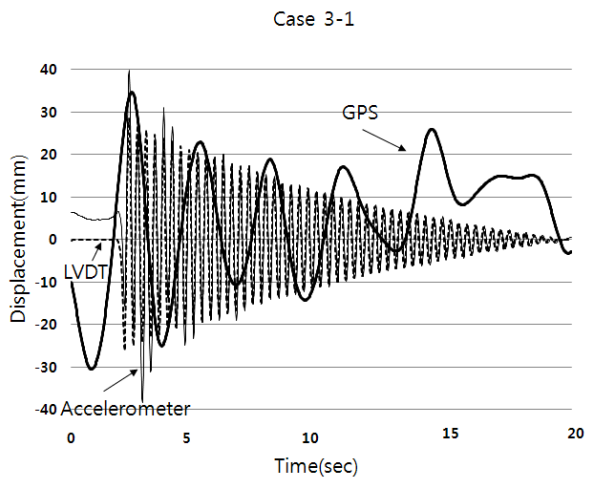


Fig. 14 Displacement-Time graph in Case3-1

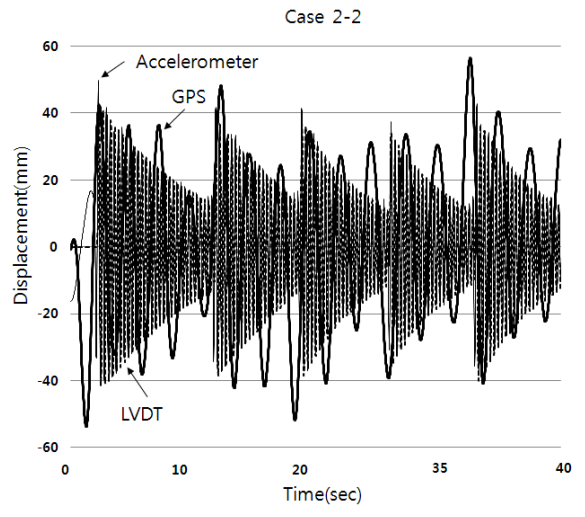


Fig. 16 Displacement-Time graph in Case2-2

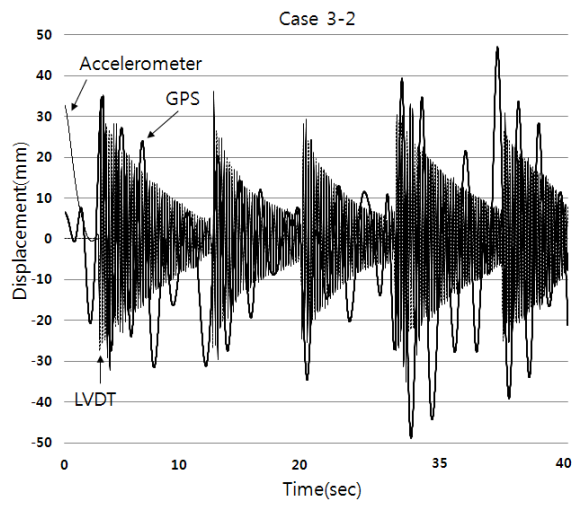


Fig. 17 Displacement-Time graph in Case3-2

출됨으로서 mm단위의 변위 값에서도 상당히 정밀한 계측을 하는 센서임을 확인할 수 있었다. 대신에 RTK-GPS의 경우에는 오차가 크게는 10~20mm가 나오는 것으로 나왔다. 물론 기본적으로 RTK-GPS의 대한 오차가 10~20mm가 있기에 감안한다면 우수한 편이지만, 센서의 정확도가 필요한 정밀한 계측에 사용되기에는 어려움이 따를 것으로 판단된다.

Fig. 15~17은 첫 번째 시나리오(Case1-2, 2-2, 3-2)의 RTK-GPS, LVDT, 가속도계 실험데이터를 보여주고 있다. Case1-2, 2-2, 3-2는 자유진동이 끝나기 전에 진동이 연결 될 수 있도록 인위적으로 진동을 지속적으로 넣어주었다.

Case1-2, 2-2, 3-2에서 Case1-1, 2-1, 3-1의 연속적인 실험을 한 이유는 실험한 RTK-GPS의 샘플링이

LVDT와 가속도계처럼 샘플링 50Hz가 아닌 1Hz이었기 때문에 단순한 자유진동 한번으로는 RTK-GPS 측정을 통해 데이터를 비교하기에는 부족하다.

RTK-GPS의 측정한 데이터는 높은 절대 정확도를 나타내지만 관측 빈도가 1Hz가 최대이다. Case1-2, 2-2, 3-2의 데이터는 Case1-1, 2-1, 3-1와 마찬가지로 가속도계 센서는 LVDT와 거의 유사하게 그래프가 도출됨으로서 상당히 정밀한 계측을 하는 센서임을 알 수가 있었다. RTK-GPS의 대한 오차도 Case1-1, 2-1, 3-1 실험과 비슷하게 나왔고, 역시 센서의 정확도가 필요한 정밀한 계측에서는 가속도계에 비해 계측 능력이 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 18~20은 세 번째 시나리오(Case1-3, 2-3, 3-3)의 RTK-GPS, LVDT, 가속도계 실험데이터를 보여주고 있다. Case1-3, 2-3, 3-3에서의 실험은 진동에 대한 영향을 주지 않고 일정시간마다 변위에 대한 변화를 주어 실험하였다.

Case1-3, 2-3, 3-3 실험은 보의 동적 거동 없이, 오직 보의 변위만 변화를 시켰기에 가속도계의 문제점을 발견할 수 있는 실험이었다. 가속도계 센서는 보의 변위에 변화를 준 지점에서만 반응을 했다. 하지만 RTK-GPS와 LVDT처럼 절대 변위를 계측하는데 문제가 있음을 알 수 있다. 즉, 가속도계에 의한 변위추정은 정적 성분보다는 동적 성분을 잘 표현하기 때문에 변위만 변화하는 절대 변위의 계측에는 적합하지 않다.

Fig. 21~23은 Case1-4, 2-4, 3-4의 RTK-GPS, LVDT, 가속도계 실험데이터를 비교하여 보여주고 있다.

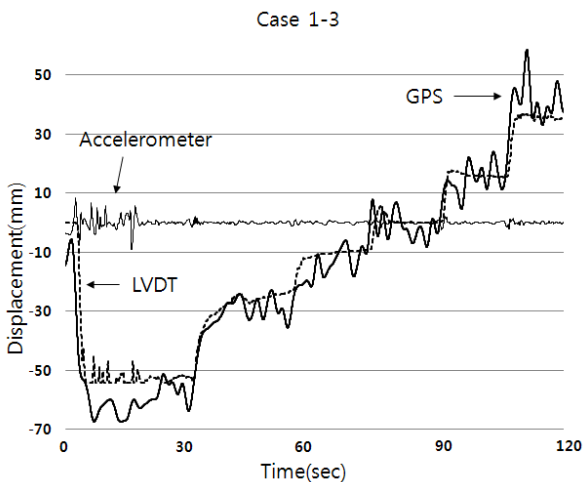


Fig. 18 Displacement-Time graph in Case1-3

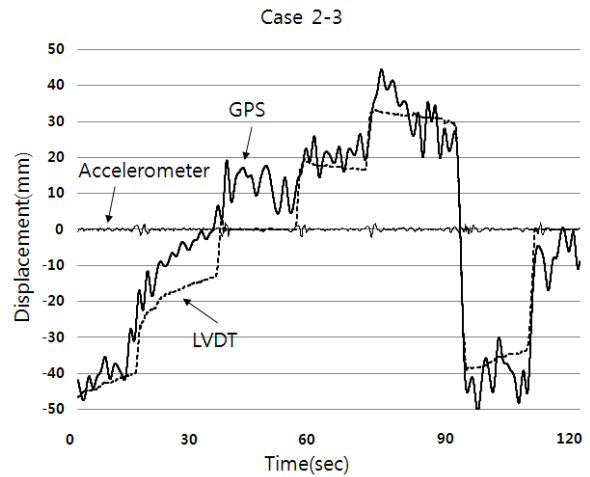


Fig. 19 Displacement-Time graph in Case2-3

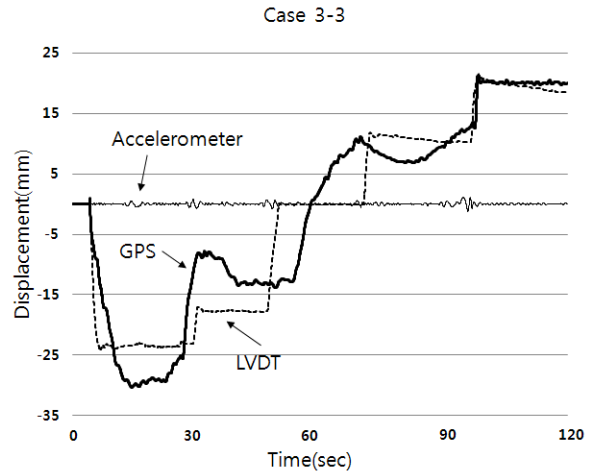


Fig. 20 Displacement-Time graph in Case3-3

이 실험은 Case1-3, 2-3, 3-3 실험에서 보의 거동을 추가한 실험이다. 지속적인 보의 거동과 일정한 시간 동안마다 변위를 제어하여 실험하였다.

이를 통해 가속도계는 측정한 데이터가 높은 관측 빈도와 정확도가 높게 나타나고, RTK-GPS는 높은 절대정확도를 나타내는 것으로 판단된다.

3.3 실험결과 분석

가속도계 센서는 Case1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2 실험에서 보면 LVDT 정도의 상당히 정밀한 계측을 하는 센서임을 확인하였고, 높은 관측 빈도를 가지고 있다. 반면에 Case1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-3, 3-4의 그래프를 분석해보면 가속도계 센서는 보에서 변위 제어한

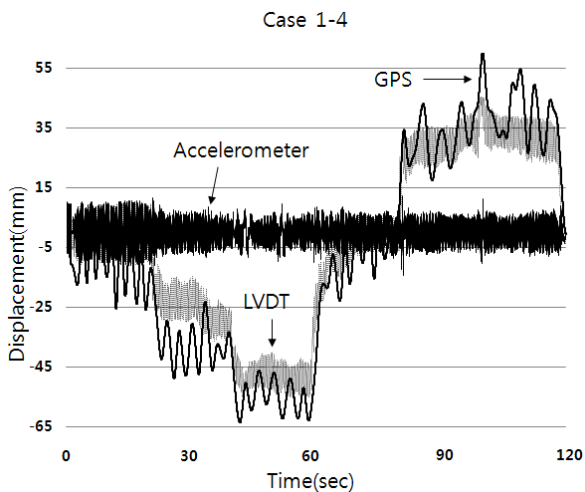


Fig. 21 Displacement-Time graph in Case1-4

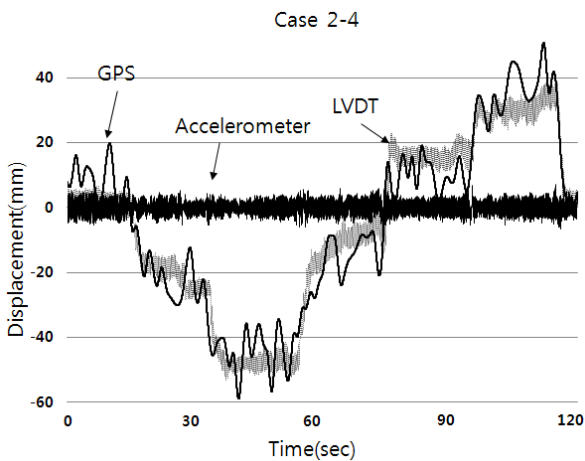


Fig. 22 Displacement-Time graph in Case2-4

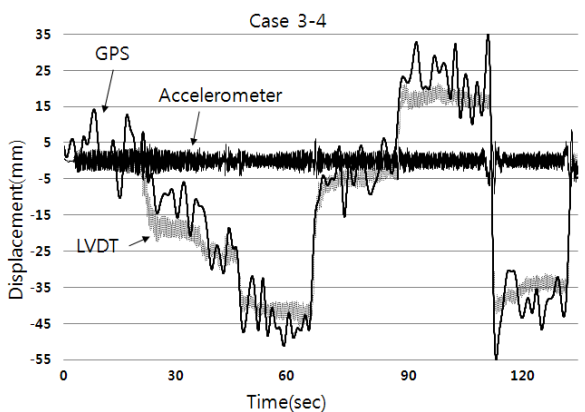


Fig. 23 Displacement-Time graph in Case3-4

지점에만 반응을 했고, RTK-GPS와 LVDT처럼 절대 변위를 계측하는데 어려움이 있음을 알 수 있다.

RTK-GPS 측위법을 이용한 측정 결과는 교량의 장기 처짐과 같이 장기간에 걸쳐서 점차적으로 발생하는 변위에 대한 측정을 위해 사용되는 것이다. RTK-GPS 측위법을 이용한 연직방향 좌표 측정 정확도가 일반적으로 10~20mm 수준을 감안한다면, 10~20mm 수준의 오차를 갖고 있는 좌표 측정값이라도 이러한 데이터를 장기간 취득하여 분석한다면, 장기적으로 발생하는 변위의 경향성과 크기를 측정할 수 있다. 실험에서 오차가 10~20mm가 나오는 것을 보면 일반적인 GPS에 비해 우수한 편이다. 하지만 정밀한 계측에 사용되기에는 센서의 정확도가 부족한 것으로 판단된다. 또한 RTK-GPS의 측정된 데이터는 높은 절대 정확도를 나타내지만 관측 빈도가 1Hz가 최대임을 알 수 있었다.

본 실험을 종합적으로 분석해보면 RTK-GPS 실험데이터는 장주기 변위의 전체적인 거동의 경향성을 잘 나타내고 있지만 1Hz라는 측정빈도의 한계로 인하여 단주기 변위의 일부분만 표출되고 있다. 반면에 가속도계 실험데이터는 노이즈 제거 과정에서 장주기 요소가 소거되어 장주기의 변위에 대하여서는 나타내지 못하고 단주기 요소에 대하여서만 정밀하게 나타내고 있다.

따라서 RTK-GPS로 관측한 값에서 장주기에 해당하는 변위를 추출하고 가속도계로 계산한 변위에서 단주기에 해당하는 변위를 추출하고 결합한다면 관측빈도와 정밀도 및 관측정확도가 향상되어 구조물 거동을 계측하는데 실용가능하다.

4. GPS와 가속도계 통합계산의 타당성 분석

4.1 GPS와 가속도계 통합계산 결과

GPS와 가속도계 통합데이터의 타당성을 확인 하기위해 LVDT데이터와 비교를 할 수 있도록 그래프에 Overlay하였다. 그리고 Case1-1, 1-2, 2-1, 2-2, 3-1, 3-2의 경우에는 GPS의 장주기에 가속도계를 통합하였을 때 LVDT와의 비교가 용이하지 않으므로 Case1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-3, 3-4에서만 GPS와 가속도계 통합데이터를 계산하였고, LVDT와 비교를 하였다.

Fig. 24에 나타나 있는 그래프를 분석해보면 GPS와 가속도계 통합데이터가 LVDT의 절대변위를 계측함에 있어서 비슷한 경향으로 계측이 되고, 가속도계의 상대변위 계측 또한 상당히 잘되는 것으로 분석된다.

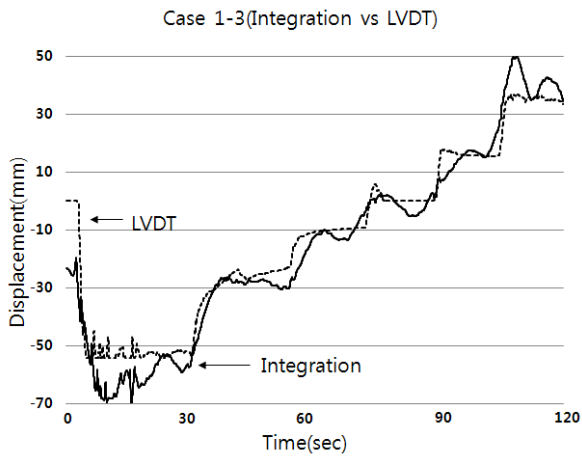


Fig. 24 Displacement-Time graph of integrated data in Case1-3

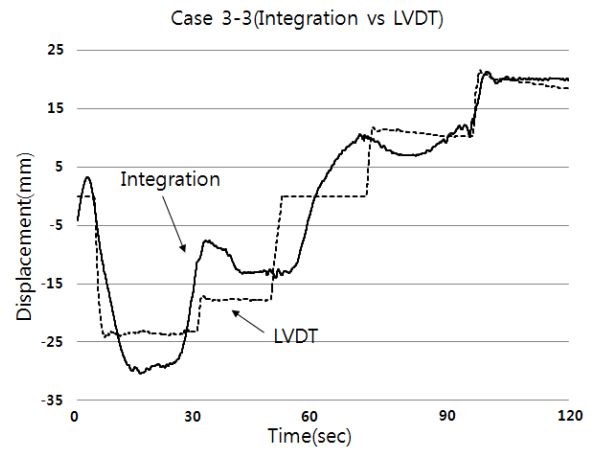


Fig. 26 Displacement-Time graph of integrated data in Case3-3

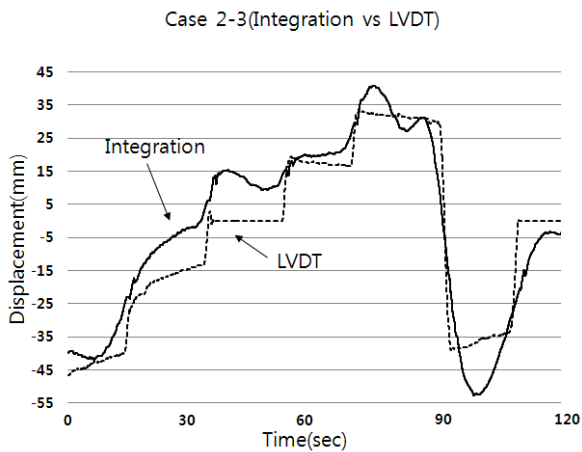


Fig. 25 Displacement-Time graph of integrated data in Case2-3

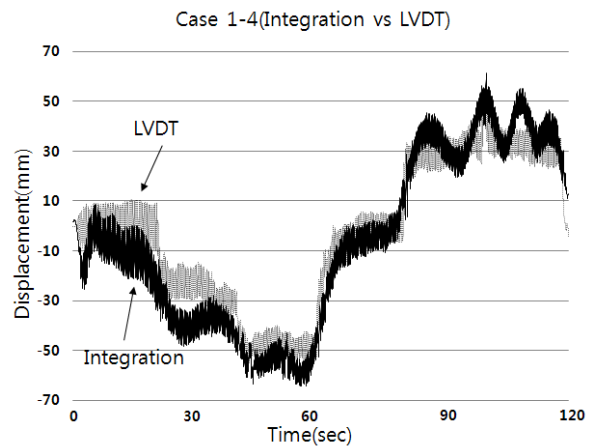


Fig. 27 Displacement-Time graph of integrated data in Case1-4

Fig. 24~26의 그래프에서는 Case1-3, 2-3, 3-3의 실험에서 거동에 대한 영향이 거의 없었고 일정시간마다 변위에 대한 변화가 일어났음을 보여주고 있다. GPS와 가속도계 통합데이터도 Case1-3, 2-3, 3-3의 실험을 잘 반영하고 있다.

Case1-4, 2-4, 3-4의 GPS의 실험은 지속적인 보의 거동과 일정한 시간 동안마다 변위 제어한 실험이다. Fig. 18에서 Fig. 20을 보면 RTK-GPS에서 추출한 저주파 대역의 변위측정값에 20~30mm 수준의 오차가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. Fig. 27에서 Fig. 29도 발생한 저주파 대역의 오차 역시 이러한 RTK-GPS측정값의 오차로 인한 것이다. 결과를 보면 Case1-4, 2-4, 3-4의 GPS와 가속도계 통합데이터 결과에서도 LVDT와 비교를 해본 결과 상대적인 변위 계측이 LVDT만큼 정확성이 있음을 보여주고 있고, 절대변위 계측에 있어서도 GPS의

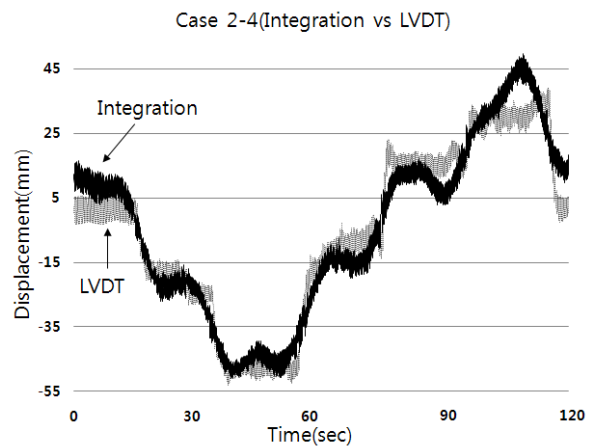


Fig. 28 Displacement-Time graph of integrated data in Case2-4

자체오차 때문에 아주 정확하지 않지만, GPS의 오차를 고려했을 경우에는 상당한 계측 정확도를 확인하였다.

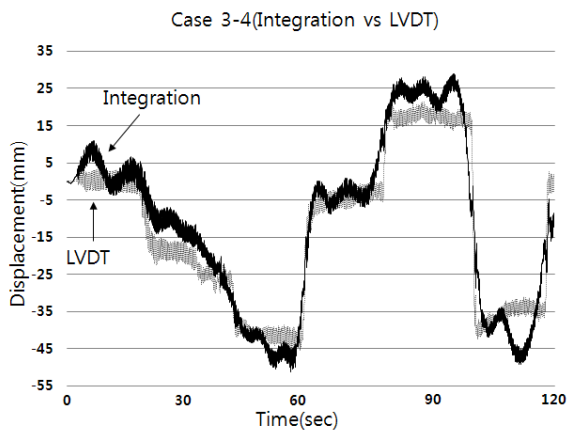


Fig. 29 Displacement–Time graph of integrated data in Case3–4

4.2 GPS와 가속도계 통합계산의 타당성 분석

앞서 GPS와 가속도계 통합데이터와 LVDT 데이터를 그래프로 비교하였는데 GPS와 가속도계 통합데이터가 LVDT의 데이터를 기준으로 보았을 경우에 LVDT 정확도에 상당히 가깝게 나왔다. 그래서 본 연구에서는 과연 GPS와 가속도계 통합데이터가 LVDT 데이터를 기준으로 비교하였을 경우에는 어느 정도의 정확성을 가지고 있는지를 알아보기 위하여 각 Case별로 데이터들을 절대화하고, LVDT 데이터를 파라메타로 GPS·가속도계 통합데이터와의 차를 구하였으며, 그중에 LVDT 데이터에 대한 GPS·가속도계 통합데이터의 최대오차, 최소오차 그리고 평균오차를 계산하였다. 이 값들은 GPS와 가속도계 통합데이터가 거동 모니터링에 사용함에 있어서 타당한지를 판단하는 기준으로 활용하였다.

Case1-3, 2-3, 3-3의 실험에서 GPS와 가속도계 통합과 LVDT 데이터는 최소오차는 거의 0mm였고, 최대오차는 13.47mm~33.57mm까지였으며 평균 최대오차는 22.07mm였다. 전체적인 정확도를 판가름할 평균오차는 4.37mm~5.47mm였고 Case에 대한 평균치는 5mm였다. 일부 오차가 큰 부분도 있었지만 Case에 대한 평균치들을 분석해본 결과 평균 오차율이 7.73%로 상당히 낮은 수치를 보이고 있다. 이는 GPS와 가속도계 통합데이터가 현장 적용이 어려운 LVDT를 대신하여 구조물 거동을 충분히 모니터링 할 수 있음을 나타낸다. Table 2에서 Case 3-3의 경우 통합데이터의 오차가 GPS보다 오히려 증가하는데 이는 변위제어점에서 일부 데이터값이 증폭되어 나타났다.

각 Case별로 사용된 Accelerometer, GPS 그리고

Table 1 Errors of Integrated data and LVDT(Case1-3, 2-3, 3-3)

	Case 1-3	Case 2-3	Case 3-3	Average
Maximum error (mm)	33.57	19.18	13.47	22.07
Minimum error (mm)	0.001	0.006	0.0002	0.0024
Average error (mm)	5.18	5.47	4.37	5.00
Error rate (%)	13.3	6.9	3	7.73

Table 2 Measuring efficiency of Integrated data and LVDT (Case 1, 2, 3-3)

Case	Error	Accelerometer	GPS	Integrated data
1-3		3 %	13.9 %	13.3 %
2-3		0.01 %	7.4 %	6.9 %
3-3		0.01 %	2.4 %	3 %

Accelerometer와 GPS 통합데이터를 LVDT와 비교하여 이 센서들의 정확도를 오차율로 평가를 해보았다. Case1-3 경우에는 오차율이 다른 Case에 비해 높게 나왔다. GPS 측정변위의 정확도는 GPS 신호 수신 환경 및 수신 시간대에 따라서 가변적이다. 본 실험의 Case별 실험 시간이 다르므로 실험 결과의 오차율 차이는, 이러한 GPS 측정변위 정확도의 가변성으로 발생한 실험적 오차일 것으로 추정된다.

Accelerometer는 LVDT만큼 상당한 정확도를 보이고 있는 반면에 GPS의 경우 오차율의 기복이 크게 나왔다. Accelerometer와 GPS 통합데이터의 경우 GPS의 장주기의 영향으로 오차율의 기복이 심하게 나왔지만 평균 오차율이 7.73%라는 것을 감안하면 신뢰성이 있는 데이터라고 판단된다.

또한 Case1-4, 2-4, 3-4 실험에서도 GPS와 가속도계 통합과 LVDT 데이터의 최소오차는 거의 0mm였고, 최대오차는 19.81mm~33.36mm까지였고 평균 최대오차는 25.98mm였다. 일반적으로 RTK-GPS의 기계적인 오차가 2~5cm가 있는 것을 감안한다면 상당히 낮은 수치로 보인다. 평균오차는 5.04mm~8.24mm로 평균 6.27mm로 나왔다. Case1-3, 2-3, 3-3의 GPS와 가속도계 통합데이터 보다는 평균오차가 조금 높게 나왔지만 전역적인 거동과 국부적인 정밀한 진동을 예측하기에는 충분한 값이라고 판단된다.

Case1-4, 2-4, 3-4에서도 각 Case별로 사용된

Table 3 Errors of Integrated data and LVDT(Case1-4, 2-4, 3-4)

	Case 1-4	Case 2-4	Case 3-4	Average
Maximum error (mm)	33.36	19.81	24.67	25.98
Minimum error (mm)	0.003	0.002	0.0002	0.0017
Average error (mm)	8.24	5.55	5.04	6.27
Error rate (%)	26	6.1	3.7	11.93

Table 4 Measuring efficiency of Integrated data and LVDT (Case 1, 2, 3-4)

Case	Error	Accelerometer	GPS	Integrated data
1-4		0.8 %	26.5 %	26 %
2-4		0.1 %	5.8 %	6.1 %
3-4		0.08 %	6.9 %	3.7 %

Accelerometer, GPS 그리고 Accelerometer와 GPS 통합데이터를 LVDT와 비교하여 이 센서들의 정확도를 오차율로 평가를 해보았다. Case1-4 경우에서도 오차율이 다른 Case에 비해 높게 나왔다. Case별 실험 시간이 다르므로 실험 결과의 오차율 차이는, 이러한 GPS 측정변위 정확도의 시간대 가변성으로 발생한 실험적 오차일 것으로 추정된다. 역시 Case1-4, 2-4, 3-4에서도 Accelerometer는 LVDT만큼 상당한 정확도를 보이고 있는 반면에 GPS의 경우 Case1-4에서 문제가 있는 것으로 보이고 Case2-4, 3-4에서는 오차율 7% 미만으로 나타났다. Accelerometer와 GPS 통합데이터의 경우에는 문제가 있었던 Case1-4의 영향으로 평균 오차율이 11.93%로 나왔지만, Case2-4, 3-4에서는 오차율이 7% 미만으로 Accelerometer와 GPS 통합방법은 상당히 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

Accelerometer와 GPS 통합방법은 GPS의 기계적인 오차에 의해 정확도에 영향이 있지만 가속도계의 통합으로 오히려 오차율이 적어지는 부분도 있고 오차율이 문제가 있던 Case를 제외하고는 7% 미만으로 나온 점에 비춰보면 상당히 신뢰성이 있으며 구조물의 거동을 실시간으로 장기간 모니터링을 하는데 다른 모니터링 기술에 비해 실용적인 모니터링 기술이 될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 RTK-GPS와 가속도계 센서를 통합하여 구조물의 거동을 모니터링에 적용하기에 타당한지를 분석하고 검토하기 위한 실험을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험에서 RTK-GPS 실험데이터는 장주기 변위의 전체적인 거동의 경향성을 잘 나타내고 있지만 1Hz라는 측정빈도의 한계로 인하여 단주기 변위의 일부만만 표출되고 있다. 반면에 가속도계 실험데이터는 노이즈 제거 과정에서 장주기 요소가 소거되어 장주기의 변위에 대하여는 나타내지 못하고 단주기 요소에 대하여서만 정밀하게 나타내고 있음을 알 수 있었다.
- (2) RTK-GPS로 관측한 값에서 장주기에 해당하는 변위를 추출하고 가속도계로 계산한 변위에서 단주기에 해당하는 변위를 추출하고 결합한다면 관측빈도와 정밀도 및 관측정확도가 향상될 것으로 예상하였고, GPS와 가속도계 통합데이터를 통합해야 하는 필요성을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.
- (3) 본 연구에서는 GPS와 가속도계 통합데이터를 LVDT의 데이터와의 비교에서 정확성이 어느 정도인지를 알아보기 위해 각 Case별로 데이터들을 절대화하고 최대오차, 최소오차 그리고 평균오차를 계산했다. 이를 GPS와 가속도계 통합데이터가 거동 모니터링의 타당성을 판단하는 기준으로 활용하였고, GPS와 가속도계 통합데이터에서 일부분의 오차가 약간 크게 나왔지만 평균오차가 상당히 낮아서 GPS와 가속도계 통합방식은 현장적용이 어려운 LVDT를 대신하여 구조물 거동을 충분히 예측할 수 있고, 구조물의 전역적인 거동과 국부적인 동적 계측을 실시간으로 장기적인 모니터링이 가능함을 알 수 있다.
- (4) 장기적인 모니터링을 위해서는 GPS와 가속도계 통합방식을 위한 알고리즘 개발과 실제 모니터링을 할 수 있는 단말기 제작이 필요할 것으로 보이며, 이를 검증할 수 있는 후속 연구가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 u-City 석·박사과정 지원사업에 의해 수행되었으며 전폭적인 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박효선, 손홍규, 김일수, 박재환, "GPS를 이용한 고층 건물의 풍응답 모니터링", 대한건축학회, vol. 21, No. 4, 2005, pp.11-19.
2. 홍윤화, "구조물 실측 가속도로부터 변위를 예측하기 위한 역해석 문제에서의 정규화 기법", 서울대학교, 학위논문(석사), 2007.
3. Chan, W. S., Xu, Y. L., Ding, X. L., Dai, W. J., "An integrated GPS-accelerometer data processing technique for structural deformation monitoring", JOURNAL OF GEODESY, vol. 80, No. 12, 2006, pp.705-719.
4. G. W. Roberts, X. Meng, A. H. Dodson,, "Integrating a Global Positioning System and Accelerometers to Monitor the Deflection of Bridges", Journal of surveying engineering, vol. 130, No. 2, 2004, pp.65-72.
5. Li, X, Ge, L, Ambikairajah, E, Rizos, C, Tamura, Y, Yoshida, A., "Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system", GPS SOLUTIONS, vol. 10, No. 4, 2006, pp.233-247.

(접수일자 : 2011년 8월 30일)

(1차 수정일자 : 2011년 12월 12일)

(2차 수정일자 : 2012년 2월 27일)

(심사완료일자 : 2012년 3월 8일)

요 지

본 연구는 RTK-GPS (Real Time Kinematic-Global Positioning System) 측위법을 이용한 변위 계측 결과, 가속도계를 이용한 변위계측 결과, 그리고 LVDT(Linear variable differential transformer)의 변위계측 결과를 비교하여 RTK-GPS와 가속도계 센서를 구조물에 적용할 때의 문제점들을 파악하였다. 또한, 관측빈도와 측위 정확도를 향상시킨 RTK-GPS와 가속도계를 이용한 변위계측 결과를 통합 계산하여 절대변위인 LVDT와 비교를 통해 생성된 통합 변위의 정확도와 타당성을 확인하였다.

핵심 용어 : GPS, 가속도계, LVDT, 계측, 결합 변위