

# RTK-GPS와 가속도계 통합계산을 통한 구조물의 변위 해석

## Displacement Analysis of Structures using RTK-GPS/Accelerometer Integration Methods

황진상<sup>1)</sup> · 윤홍식<sup>2)</sup> · 이동하<sup>3)</sup> · 홍성남<sup>4)</sup> · 서용철<sup>5)</sup>

Hwang, Jin Sang · Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha · Hong, Sung Nam · Suh, Yong Cheol

### Abstract

Accurate observation results of dynamic displacements are essential to the protection of civil structures. In this study, we evaluated the optimal methods of the RTK/GPS Accelerometer integration through comparison and analysis of several experiments results. Two methods will be used to calculate the dynamic displacements from the results of the acceleration data as well as two integration methods for measuring the dynamic, static, and quasi-static displacements by incorporating the displacement results from the RTK-GPS and Accelerometer. By using a Cantilever Beam and LVDT measurement, we were able to ensure that the different displacement comparisons would be reliable and accurate. As a results from experiments, the accelerometer processing method applied by use of accelerometers data was filtering with the double integral using FIR band-pass filter which is most optimal for assessing the dynamic displacements. Also, the integrated method using extracting substitution displacements is suitable for measuring synthetically the dynamic static and quasi-static displacements of civil structures with RTK-GPS and accelerometer.

Keywords : RTK-GPS, Accelerometer, Integration Method, Structural Displacement

### 초 록

구조물에서 발생하는 동적변위를 정확하게 취득하는 것은 토목구조물의 안전성을 평가하기 위한 필수적인 사항이다. 본 연구에서는 구조물에 발생하는 변위를 가장 정확하게 측정할 수 있는 RTK-GPS/가속도계 통합방법에 대한 비교와 분석을 수행하였다. 이를 위하여 가속도 자료로부터 동적 변위를 계산할 때에 사용할 수 있는 주요한 2가지 방법을 비교하였고, RTK-GPS로 측정한 변위와 가속도계로 측정한 변위를 통합하여 동적 변위와 정적, 준정적 변위를 모두 측정할 때에 사용할 수 있는 통합계산 방법들을 비교하였다. 엄밀한 비교를 위하여 캔틸레버 보를 제작하고 다양한 종류의 변위를 발생시킨 후 비교 대상 방법별로 이에 대한 측정 정확도를 평가하되 평가의 기준으로 LVDT 측정값을 사용함으로써 정확한 평가가 이루어지도록 하였다. 연구의 결과, 가속도 자료를 FIR 대역 필터로 필터링 하고 이중적분하여 변위를 계산하는 방법이 가속도계를 이용한 동적변위 측정에 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한, 동적변위와 정적변위, 준정적 변위를 종합적으로 측정하기 위한 RTK-GPS/가속도계 통합계산 방법으로는 대역별 변위 추출에 의한 통합 방법이 적합한 것으로 나타났다.

핵심어 : RTK-GPS, 가속도계, 통합처리 방법, 구조물 변위

- 1) 정회원 · 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과 박사과정(E-mail : gpsboy@skku.edu)
- 2) 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수(E-mail : yoonhs@skku.edu)
- 3) 정회원 · 성균관대학교 공과대학 겸임교수(E-mail : dhlee.skku@gmail.com)
- 4) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사후과정(E-mail : snhong@skku.edu)
- 5) 교신저자 · 정회원 · 부경대학교 공간정보시스템공학과 교수 · 공학박사(E-mail : suh@pknu.ac.kr)

## 1. 서론

대부분의 토목구조물은 강풍, 지진, 쓰나미 등과 같이 극심한 자연환경 조건에 노출되어 있기 때문에 언제라도 이상극한하중(abnormal ultimate loading)을 받을 수 있다. 또한 이러한 이상극한하중로 인하여 구조물이 붕괴될 수 있다. 대표적인 사례로 1940년에 개통된 미국의 Tacoma Narrows Bridge는 당시 미국에서 3번째로 긴 현수교임에도 불구하고, 설계 시에 예상치 못하였던 강한 바람에 의한 동적변위로 인하여 붕괴되었다(Billah 등, 1991). 이에 따라 중요 사회기반 구조물의 구조적 건전성을 지속적으로 모니터링하고 평가하는 작업의 중요도가 높아지게 되었다. 구조물의 구조적 건전성을 평가할 수 있는 항목은 다양하지만, 현재 일반적으로 구조물의 동적변위를 측정하여 해석하는 방법을 주로 이용하고 있다. 구조물에 발생하는 단기적 및 장기적 변위는 구조물의 구조적 거동을 대표할 수 있는 지표로서 이러한 변위량을 활용하는 경우 구조적 건전성을 다양한 방법으로 평가할 수 있다. 따라서 구조물의 상태를 신뢰성 있게 평가하기 위해서는 변위에 대한 정밀한 측정이 우선적으로 요구되고 있다(Chan 등, 2006).

현재 구조물의 변위 측정에 널리 이용되는 계측기는 가속도계이다(Xu 등, 2004; Hong, 2007). 가속도계로부터 계측된 가속도 자료를 처리하여 획득된 변위는 구조물에 발생하는 변위 중 동적 변위에 대해 매우 정밀한 값을 나타낸다. 그러나 계측된 가속도 자료에 포함된 노이즈를 제거하는 과정에서 저주파대의 신호 또한 제거되어 정적, 준정적 변위에 대한 정밀한 값을 측정하기에는 어려움이 따르는 단점을 지니고 있다. 이에 반하여 Real-Time Kinematic-Global Positioning System (RTK-GPS)는 1cm 수준(순간 측정)과 1mm 수준(장기 측정)의 높은 정확도와 세계측지계 기준의 3차원 절대좌표 계산능력 등의 장점으로 인하여 정적 및 준정적 변위 측정에 효과적인 것으로 인정되고 있다(Hyzak 등, 1997). 하지만, RTK-GPS는 측정 빈도의 한계, GPS 위성 신호 수신환경에 정확도가 좌우된다는 점, 다중경로오차 등의 오차 요인에 취약하다는 점 등과 같은 이유로 제한적으로 사용되어 왔다. Tamura 등(2002)은 RTK-GPS로 변위를 측정할 수 있는 구조물이 고유진동수가 2Hz 이하이고 발생하는 변위량의 크기가 2cm 이상인 구조물로 제한된다고 보고하였으며, 이는 RTK-GPS로는 구조물에 발생하는 높은 주기의 동적 변위 측정이 어렵다는 것을 의미한다. 현재는 변위 측정에 대한 가

속도계와 RTK-GPS의 각각의 장점을 취하여 보다 정밀한 변위 측정을 시도하기 위한 연구가 다수 보고되고 있다(Chan 등, 2006; Li 등, 2005; Meng 등, 2004, Roberts 등, 2000). 하지만 가속도 자료뿐만 아니라 가속도 자료와 RTK-GPS 자료를 통합하여 처리하는 방법들이 다양함에도 불구하고, 각 처리 방법들에 대한 정확도 비교 검토가 이루어지지 않고 있고, 다양한 활용분야 및 목적에 따라 변위 모니터링 시스템이 독자적으로 구축되고 있다. 따라서 변위 측정을 위한 자료 처리 방법들에 대한 정확도 비교 검토 및 구조물의 건전성을 정확하게 평가하기 위한 최적의 변위 모니터링 방법에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구는 현재까지 발표된 RTK-GPS/가속도계 통합계산에 의한 구조물 변위 측정 방법들 중에서 가장 정확한 방법을 비교 검증하기 위해 수행되었다. RTK-GPS/가속도계 통합계산에 의한 변위 측정방법은 RTK-GPS에 의한 변위측정 방법과 가속도계에 의한 변위측정 방법을 복합한 것이다. 따라서 이 방법은 통합대상인 두 변위측정 방법 각각의 적합성에 영향을 받을 뿐만 아니라 통합계산에 사용하는 방법에도 영향을 받는다. RTK-GPS에 의한 변위측정은 자료 처리 방법의 차이로 인한 영향이 적은 반면에 가속도계는 자료 처리 방법에 많은 영향을 받는다.

이러한 가속도 자료의 처리 방법에 따른 영향을 비교하기 위하여 다음과 같은 2가지 방법, 1) 현재까지 주로 사용되던 방법인 FIR(finite impulse response) 방식을 이용한 디지털 필터로 노이즈가 포함된 대역의 노이즈를 소거한 후 이중적분에 의하여 계산하는 방법(Li 등, 2005), 2) EDM(empirical mode decomposition) 방법(Huang 등, 1999)으로 가속도 자료에 포함된 잡음을 소거한 후 이중적분에 의하여 계산하는 주요한 2가지 방법이 고려되었다. 또한, 가속도계 및 RTK-GPS로부터 획득된 변위를 통합하는 방법에 따른 영향을 비교하기 위하여 1) RTK-GPS 측정한 변위를 기준으로 가속도계로 측정한 변위를 적합화(fitting)시키는 방법, 2) 변위측정 시 가속도계로 동적변위 부분만을 추출하고, RTK-GPS 측정한 결과에서는 정적, 준정적 변위 부분을 추출하여 통합하는 방법을 각각 다루었다.

각 변위 측정 방법에 대한 엄밀한 비교와 정확도 평가를 위해 캔틸레버 보 형태의 실험체를 구성하여 다양한 종류의 변위(정적, 준정적, 동적)를 발생시키고, LVDT(Linear Variable Differential Transformer), 가속도계 및 RTK-GPS를 통해 동시에 관측을 수행하였다. 이 때 정확도 분석을 위한 기준변위로는 LVDT로부터 직접 계측된 변위를 이용하였으며, 이를 기준으로 각 가속도계 자료

처리 방법 및 RTK-GPS/가속도계 통합처리 방법별 성능을 비교·평가하였다.

## 2. 가속도계 자료 처리

측정 가속도로부터 변위량을 계산하는 방법은 대역필터(band filter)로 가속도 측정 자료에 포함된 노이즈를 필터링(filtering) 한 다음 이중적분하여 변위를 계산하는 방법과 별도의 필터링 없이 중심차분법과 정규화 기법을 적용하여 계산하는 방법으로 크게 구분할 수 있다. 본 연구에서는 FIR 및 EMD 방법을 적용한 대역필터를 이용하는 주요한 2가지 방법에 대해서만 분석을 수행하였다. 다음은 가속도계 자료 처리를 위한 각 방법들에 대한 처리과정을 간략하게 정리한 것이다.

### 2.1 FIR 필터를 이용한 방법

대역필터를 이용한 필터링은 입력 신호(input signal)에서 노이즈를 제거하거나 감소시키는데 주로 사용되며, 신호로부터 특정 정보를 분리하기 위한 방안으로도 사용할 수 있다. 또한 특정 신호가 다른 주파수 대역의 여러 개의 신호로 이루어져 있을 때, 이를 근사적으로 분리해 내기 위한 방법을 제시한다. 구조물의 신호를 획득하였을 때 구조물의 자체 신호는 저주파 대역이 주를 이루는 반면, 노이즈는 고주파 대역이 주를 이루므로 필터링을 통하여 노이즈를 제거해 낼 수 있다. 따라서 대역필터로 가속도 자료에 포함된 노이즈를 제거한 후 이를 이중적분하면 변위량을 계산할 수 있지만, 초기위치와 초기속도와 같은 초기값을 결정하기 어렵다는 문제를 해결하여야 한다.

$$s(t) = s_0 + v_0 \times t + \int_0^t \left( \int_0^t a(t) dt \right) dt \quad (1)$$

여기서,  $s(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 변위량,  $a(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 가속도,  $s_0$ 와  $v_0$ 는 각각 초기 위치와 속도이다.

식 (1)에 나타난 초기 위치( $s_0$ )와 초기 속도( $v_0$ ) 값들은 가속도계로 측정할 수 없는 값들이기 때문에 별도의 처리 방법을 적용하여 계산해야 한다. 두 가지 조건을 적용하여 이러한 초기값 문제를 해결할 수 있는데, 첫 번째 조건은 가속도계로 측정할 수 있는 변위의 종류가 동적 변위로 제한된다는 것이다. 이 조건에 의하면 정적 혹은 준정적 변위는 RTK-GPS와 같은 기타 방법으로 측정할 수 있는 값이므로 가속도계 자료를 처리할 때에 임의의 값을 초기 위치값으로 사용할 수 있다. 임의의 값을 기준으로

하여 상대적인 변위량을 계산한 다음에 기타 방법으로 측정된 정적 혹은 준정적 변위 값을 기준으로 하여 조정함으로써 초기 위치 문제를 해결할 수 있다. 두 번째 조건은 부정확한 초기속도는 계산된 변위에 선형적인 위치오차를 발생시킨다는 것이다. 따라서 임의로 설정한 초기속도로 변위를 계산한 다음 계산된 변위값의 선형적인 경향성을 추정 후 이를 제거하는 방법으로 초기속도값의 문제를 해결할 수 있다. 이러한 조건들을 적용하여 가속도로부터 변위를 계산하는 과정을 정리하면 그림 1과 같다.

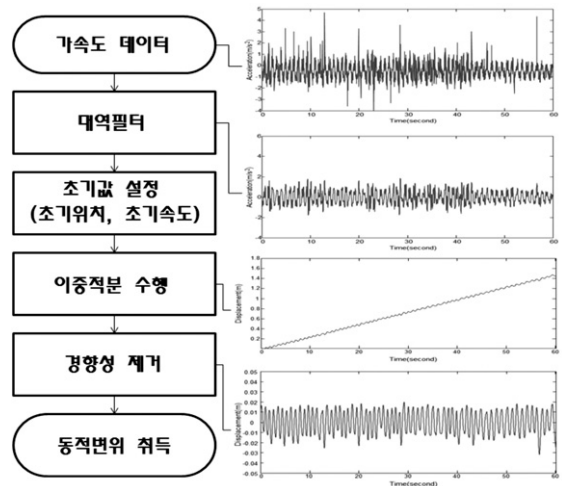


그림 1. 가속도 자료를 이용하여 동적 변위를 계산하는 방법

노이즈 필터링 목적의 대역필터로 사용하는 디지털 필터는 크게 FIR 필터와 IIR(infinite impulse response) 필터로 구분할 수 있다. 여기에서는 그림 1에 나타난 대역필터를 선정함에 있어서 간단한 구조를 가지고 있으며 안정성이 보장되는 DFT(discrete fourier transform) 기반의 FIR 필터를 사용하였다(Meng 등, 2004).

### 2.2 EMD 필터를 이용한 방법

EMD 기법은 시간-주파수 분석의 새로운 방법으로 적용적이며 효율적으로 신호를 분해할 수 있는 방법으로 Huang 등(1998)에 의하여 소개되었다. EMD 기법은 신호를 분해함에 있어서 신호 자체에 의해 정의된 IMF(Intrinsic mode functions)로 명명되는 함수의 집합으로 분해하는 방법이며, 각 IMF는 각 주파수대의 기저함수로 사용된다. EMD가 DFT 등을 기반으로 하는 FIR 신호분해 방법과 구분되는 점은 신호를 분해함에 있어 sine 함수와 같이 미리

정해진 형태의 함수가 아니라 주파수 특성은 갖되 원 신호의 고유한 속성을 보존하고 있는 불규칙한 형태의 IMF로 분해한다는 것이다. 가속도 자료에 EMD 필터를 적용하여 노이즈를 제거하는 과정을 나타내면 그림 2와 같다.

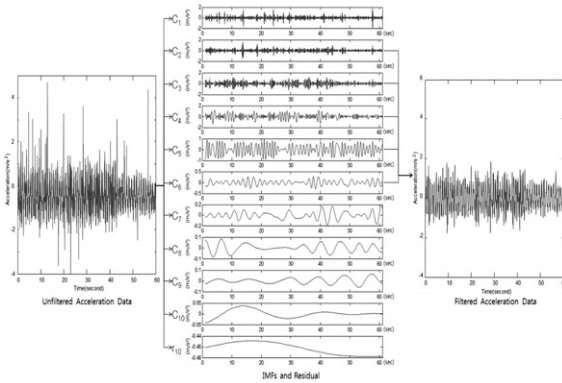


그림 2. EMD 기법에 의한 가속도 자료의 필터링 방법

원래의 신호를 라고 할 때 EMD로 분해한 결과는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 원래의 신호가 N개의 IMF와 잔여 신호로 분리되는데 저차의 IMF는 고주파 신호를 나타내고, 고차의 IMF는 저주파 신호를 나타내며 잔여 신호인 상수이거나 단조 경사 함수 또는 하나의 극대점(또는 극소점)만을 갖는 함수이다.

$$a(t) = \sum_{n=1}^N C_n(t) + r_n(t) \quad (2)$$

여기서,  $a(t)$ 는 원래의 신호,  $C_n(t)$ 는 n차 IMF,  $r_n(t)$ 는 잔여 신호이다.

EMD 기법으로 대역필터를 구성한 EMD 필터는 식 (3)과 같으며, 이 방법에서는 그림 1에 표시되어 있는 자료 처리 과정 중 대역필터 적용 단계에서 EMD 필터를 사용하였다.

$$a_b(t) = \sum_{n=q}^r C_n(t) \quad (3)$$

여기서,  $1 < q < r < n$ 이다.

### 3. RTK-GPS와 가속도계 통합 방법

구조물의 동적변위 측정에 적합한 가속도계 변위측정 방법과 정적, 준정적 변위 측정에 적합한 RTK-GPS 측위 방법을 통합하여 종합적인 변위를 계측하는 방법은 RTK-

GPS 기준의 단순 통합계산 방법과 대역별 변위추출에 의한 통합계산 등으로 구분될 수 있다.

#### 3.1 RTK-GPS 기준의 단순 통합계산

단순 통합계산 방법은 RTK-GPS 및 가속도계로 측정된 각각의 결과를 정밀하게 시각동기화 하고, RTK-GPS로 측정된 결과를 기준으로 가속도계로 측정된 변위를 적합화하는 방법이다(Garg 등, 1978). 그림 3은 RTK-GPS 측정결과를 기준으로 하는 단순통합방법의 개념을 나타낸 것이다.

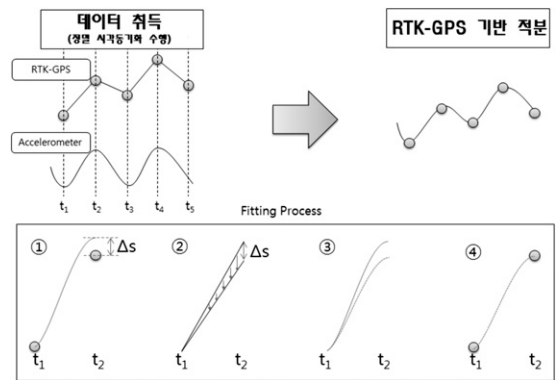


그림 3. RTK-GPS 기준의 단순 통합계산 프로세스

이 방법의 통합 과정을 간략하게 설명하면 다음과 같다. 그림 3의 ①에서와 같이 시간  $t_1$ 에서 가속도계로부터 측정된  $t_1$ 과  $t_2$ 사이의 전체 변위량을 RTK-GPS 측정값 기준으로 이동시킨다. 하지만 이 때  $t_2$ 에서 RTK-GPS 측정값과 가속도계 측정값 사이의 편차  $\Delta s$ 가 발생할 수 있다. 이러한 편차는 ②에 나타낸 것과 같이 시간 기준의 선형적인 편차를 계산한 후 이를 ③과 같이 가속도 측정값에 적용하여 보정함으로써 ④와 같은 통합계산 결과를 얻을 수 있다. 이러한 통합 과정을 전체 측정자료에 적용하여 통합계산을 실시할 수 있고, 통합계산 결과는 동적 변위와 정적 변위 및 준정적 변위를 모두 포함하게 된다. 하지만 이 방법은 통합 과정이 간단한 반면에 측정위치자료의 정확도가 RTK-GPS 측정결과의 정확도에 종속되고 매우 정밀한 시각동기화 프로세스와 장치를 필요로 한다는 단점을 가지고 있다(Ding 등, 2008).

#### 3.2 대역별 변위추출에 의한 통합계산

대역별 변위 추출 방법에 의한 통합계산 방법은 Li 등 (2005) 및 Chan 등(2006)의 연구에서 제시된 방법으로 가속

도계 측정 결과에서 높은 주파수 대역의 변위를 추출하고 RTK-GPS 측정 결과에서 낮은 주파수 대역의 변위를 추출하여 통합하여 계산하는 방법이다. 다음의 그림 4는 대역별 변위추출 방법에 의한 통합계산의 개념을 나타낸 것이다.

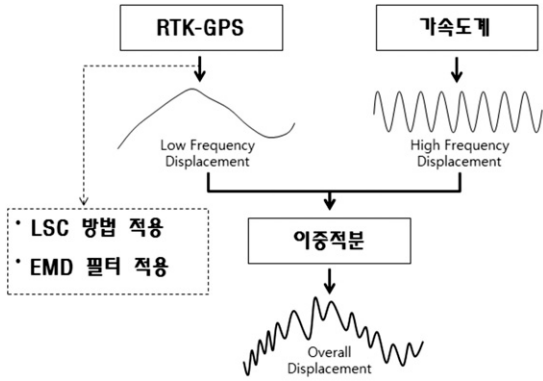


그림 4. 대역별 변위추출 방법에 의한 통합계산의 개념

이 통합계산 방법의 핵심적인 부분은 RTK-GPS 측정결과에서 저주파 대역의 변위를 추출하는 방법이다. Li 등(2005)의 경우 저주파 대역의 변위를 추출하기 위하여 최소제곱 적합화(least-square fitting) 방법을 사용하였다. Chan 등(2006)은 EMD 기법과 적응필터(adaptive filter)를 함께 적용하여 변위를 추출하는 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 먼저 EMD로 RTK-GPS 측정 변위를 분해하여 다수의 IMF와 잔여변위를 추출한다. 다음으로는 잔여 변위 이외의 IMF를 합산한 값에 적응필터를 적용하게 되는데, 이 때 가속도로 측정된 변위를 참조값으로 사용하여 높은 주파수 대역의 변위를 소거하게 된다. 마지막으로 이렇게 계산한 값에 잔여변위를 합산하여 정적변위와 준정적변위 및 낮은 주파수 대역의 동적변위를 포함하는 값을 최종적으로 계산한다. 결국 대역별 변위 추출 방법은 구조물에 발생한 전체적인 변위를 구하기 위해 RTK-GPS 자료를 통해 계산된 저주파수 대역의 변위(정적 및 준정적)에 가속도 자료를 이용하여 측정된 고주파수 대역의 동적변위를 합산하는 방법을 의미한다.

본 연구에서는 Chan 등(2006)의 연구 결과를 사용하여 대역별 변위추출 방법에 의한 통합계산을 수행하였으며, 이를 RTK-GPS 기준의 단순통합방법과 비교하였다. Li 등(2005)의 방법을 적용하지 않은 이유는 비교적 변화가 급격한 준정적 변위가 발생하였을 경우 이 방법으로는

RTK-GPS 측정결과에서 저주파수 대역의 변위량을 정확하게 추출하기가 어렵기 때문이다(Hong, 2007).

#### 4. 변위 모니터링 실험 및 정확도 평가

가속도 자료를 처리하여 변위를 계산하는 방법들에 대한 비교와 RTK-GPS/가속도계 통합 방법들에 대한 유효성과 정확성을 평가하기 위하여, 그림 5와 같은 캔틸레버 보를 구성하고 이를 통한 휨 실험을 수행하였다.

본 연구에 적용된 캔틸레버 보 실험체는 구조물 변위 측정을 위한 다양한 자료 처리 방법들에 대한 정확도를 효율적으로 비교를 하기 위하여 콘크리트 블록과 강관 보로 구성하였다. 그 후 캔틸레버 보에 LVDT, RTK-GPS, 3축 가속도계를 보에 동일 위치에 설치하고, 변위를 발생시켜 이를 동시에 측정하였다. 실험 시 각 계측기별 측정 자료가 시간 동기화되어 자동으로 PC에 저장되도록 하였다. 시간동기를 위하여 RTK-GPS로 측정된 시각으로 PC의 시간을 지속적으로 갱신하여 가속도계 자료와 LVDT 자료의 저장 시 갱신된 PC의 시각정보와 연계함으로써 RTK-GPS 시각과 동기화를 구현하였다. 또한 캔틸레버 보에 설치된 GPS 수신기와 기준국용 GPS 수신기 사이의 거리는 15m 이내가 되도록 하여 정확한 RTK-GPS 측정이 이루어지도록 하였다.

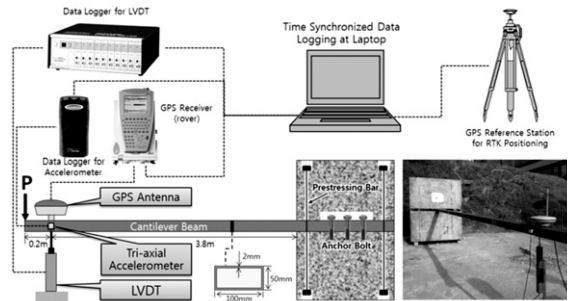


그림 5. 캔틸레버 보 및 계측장비를 이용한 실험체의 구성

각 측정결과를 기반으로 가속도 자료 처리 방법과 RTK-GPS/가속도계 통합계산 방법의 정확도를 비교·평가하기 위하여 캔틸레버 보에 다음과 같은 3가지 종류의 변위(그림 6)를 주고 LVDT를 통해 기준변위를 취득하였으며, 그 후 3종류의 기준변위를 가속도계 혹은 RTK-GPS/가속도계 통합계산 방법으로 정확하게 계산할 수 있는지의 여부를 평가하였다.

그림 6의 (a)에 표시한 변위는 동적변위만을 포함하고 있으며, 캔틸레버 보에 발생시킨 자유진동으로 인하여 생성된 것이다. 이 변위는 가속도 자료 처리 방법들의 정확도 평가와 비교에 사용하였다. (b)에 표시한 변위는 준정적변위만을 포함하고 있으며, RTK-GPS의 위치측정 정확도 분석에 사용하였다. (c)에 표시한 변위는 동적변위와 준정적변위 모두를 포함하고 있으며, RTK-GPS/가속도계 통합계산 방법들의 정확도 평가와 비교에 사용하였다. 앞서 언급한대로 각 방법별 정확도 평가의 기준값으로는 LVDT로 측정된 기준변위를 사용하였는데, 이는 LVDT 변위측정의 정확도가 0.01mm 이내로 매우 정확한 값을 얻을 수 있기 때문이다.

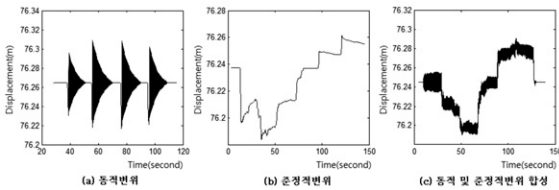


그림 6. 변위측정 실험에서 발생시킨 변위의 종류

### 4.1 RTK-GPS의 변위측정 정확도 평가

RTK-GPS/가속도계 통합계산에 앞서 RTK-GPS의 변위 예측 정확도를 비교하였다. 그 이유는 구조물에 발생하는 변위 중 정적, 준정적 변위는 RTK-GPS로 측정 가능하고, 또한 RTK-GPS 측정방법의 정확도가 통합계산 결과의 정확도에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 이를 위해 그림 6(b)와 같은 준정적 변위를 캔틸레버 보에 끝단에 발생시키고, 이를 RTK-GPS로 측정한 후 측정결과를 LVDT 측정값과 비교하여 정확도를 평가하였다. 총 2번의 준정적 변위 측정실험을 수행하였으며, 각 실험별 정확도 평가 결과는 다음의 표 1에 나타내었다. 표 1을 살펴보면 RTK-GPS 측정 시 2번의 실험 모두에 걸쳐 평균 5 ~ 6mm 수준의 편차가 발생하였고, 최대오차는 약 20 ~ 30mm 수준인 것을 알 수 있다.

표 1. RTK-GPS에 의한 수직변위 측정 정확도 분석 결과

구분	실험1	실험2
최대편차(m)	0.0282	0.0224
평균편차(m)	0.0061	0.0053
표준편차(m)	0.0085	0.0066
2cm 미만 편차의 비율(%)	95.2	97.8

이러한 오차 수준은 RTK-GPS 측정에 의한 연직방향 변위측정의 일반적인 정확도와 유사한 것이다. 상용 RTK-GPS 시스템의 수직위치 측정오차는 수평위치 측정오차의 수준인 10mm + 1ppm(Novatel, 2006)의 두 배 수준으로 보고되고 있으며, 실험 결과는 RTK-GPS를 사용하면 이러한 오차 범위의 변위 측정이 가능하다는 사실을 나타내고 있다.

### 4.2 가속도계 자료 처리 방법별 정확도 평가

구조물의 동적변위를 예측하기 위해 이용된 가속도 자료 처리방법은 FIR 필터 및 EDM 필터를 이용하는 2가지 방법이다. 2가지 가속도 자료 처리방법들의 성능을 평가하기 위하여 캔틸레버 보에 끝단에 그림 6(a)에 나타난 형태의 동적변위를 발생시켰으며, 이 변위를 LVDT로 측정된 결과를 기준으로 각 처리방법의 성능을 평가하였다.

그림 7은 FIR 및 EDM 필터를 이용한 처리방법을 통해 계산된 각 동적변위와 LVDT 측정 결과를 중첩하여 비교한 것이다. 그림 7에서 실제 변위와 가장 유사한 계산 결과를 나타낸 것은 FIR 필터를 이용한 처리방법인 것으로 나타났다. EDM 필터를 이용한 처리방법은 동적변위 계산 시 충분한 필터링이 이루어져 않아 과도한 변위가 발생하거나 일부 구간의 변위가 누락된 것으로 판단되며, 이것은 비선형 신호의 분해에 적합한 EDM 방법으로 구성된 필터가 가속도 측정 자료에 포함된 노이즈의 제거에는 적합하지 않다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 또한, 2가지 가속도 자료 처리방법 모두에서 변위를 발생시킨 순간, 즉 힘이 가해진 순간에는 비교적 큰 크기의 편차가 발생한 것으로 나타났으며, 이후에는 실제 변위와 매우 유사한 변위가 계산되는 것으로 나타났다.

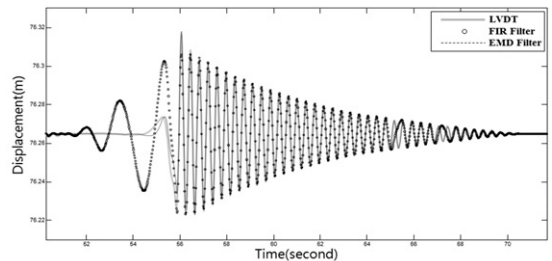


그림 7. 처리방법별 가속도계 측정 변위의 비교

각 가속도 자료 처리방법의 정확도를 통계적으로 비교한 결과를 표 2에 나타내었다. 표 2를 살펴보면 FIR 필터를

이용한 방법의 경우 1mm 수준의 평균적인 편차가 발생하여 가장 정확한 방법인 것으로 나타났다. 반면에 EMD 필터를 이용한 경우에는 2mm 수준의 편차가 발생하여 상대적으로 다소 낮은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 또한 각 방법별 최대편차를 살펴보면 FIR 필터를 이용한 경우 최대 11.9mm, EMD 필터를 이용한 경우 최대 42.3mm로 각각 나타났다. 이러한 최대오차는 앞서 언급한 것과 같이 대부분 변위를 발생시킨 시점에서만 대부분 나타났으며, 전체 측정값에서 최대오차의 크기와 유사한 과대편차가 포함된 비율은 극히 적은 것으로 나타났다.

표 2. 가속도 자료 처리방법별 정확도 비교 결과

구 분	FIR 필터	EMD 필터
최대편차(m)	0.0119	0.0423
평균편차(m)	0.0011	0.0041
표준편차(m)	0.0023	0.0085
5mm 이하 편차의 비율(%)	94.4	81.9

### 4.3 RTK-GPS/Accelerometer 통합계산 방법별 정확도 비교

RTK-GPS 측정 결과와 가속도계로 측정된 변위의 통합계산을 위해 3장에서 설명된 1)RTK-GPS 기준의 단순 통합계산 및 2) 대역별 변위추출에 의한 통합계산의 2가지 방법을 적용하였다. 적용된 2가지 방법별 정확도를 비교 평가하기 위하여 그림 6의 (c)에 나타난 것과 같이 준정적 변위와 동적변위를 동시에 캔틸레버 보에 발생시켰으며, LVDT로 측정된 값과 비교함으로써 그 정확도를 평가하였다.

RTK-GPS 기준으로 단순 통합계산된 결과를 LVDT 측정 결과 및 RTK-GPS 측정결과를 중첩하여 표시하면 그림 8(a)와 같으며, 대역별 변위추출에 의해 통합계산된 결과를 LVDT 측정결과와 RTK-GPS 측정결과와 함께 표시한 결과는 그림 8(b)와 같다.

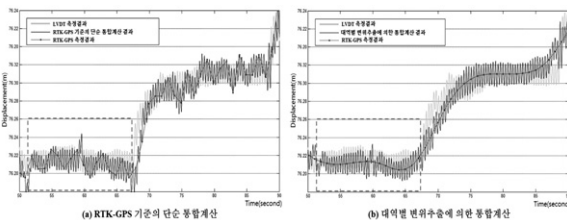


그림 8. RTK-GPS/가속도계 통합계산 결과

그림 8(a)를 살펴보면 RTK-GPS 측정결과가 실험에서 발생시킨 준정적 변위를 비교적 정확하게 측정하고 있으나, 측정 빈도의 한계로 인하여 3Hz 수준으로 발생시킨 동적변위는 제대로 측정하지 못한 것을 알 수 있다. 또한 계산된 변위 중 동적변위의 폭과 빈도 부분은 LVDT 측정결과와 매우 유사하나, 전체적으로는 1~2cm 수준의 편차를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 특히 그림 8(a)의 점선 부분 내의 결과를 보면 LVDT 측정결과와는 비교적 완만한 준정적 변위를 나타내고 있으나, RTK-GPS 기준의 단순 통합계산 결과는 다소 불규칙하게 변동하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 본 방법에 의한 통합계산 결과가 RTK-GPS 측위결과에 종속되는 특성 및 RTK-GPS 측위 정확도의 한계에 기인한 것으로 판단된다. 이러한 결과들을 종합하여 볼 때에 RTK-GPS 기준의 단순 통합계산에 의하여 RTK-GPS/가속도계 통합을 수행한 결과는 구조물에 발생하는 동적변위와 준정적변위 모두를 비교적 정확하게 측정할 수 있으나, 1~2cm 수준의 편차가 발생하고 RTK-GPS 측위 결과에 종속된다는 것을 알 수 있다.

그림 8(b)의 대역별 변위추출에 의한 통합계산에서는 RTK-GPS 측정결과에서 저역대의 변위를 추출하고, 이를 가속도계로 측정된 고역대의 변위와 통합하는 방식으로 최종적인 결과를 계산하였다. RTK-GPS 측정결과에서 저역대의 변위를 추출하기 위하여 먼저 EMD 방법으로 RTK-GPS 측정결과를 주기별로 분해한 후 잔차(residual)에 해당하는 변위를 소거하였으며, 다음으로 EMD 필터를 사용하여 가속도계로 계산한 변위를 기준으로 잔차가 소거된 변위에서 저역대의 변위량을 추출하였다. 마지막으로 추출된 저역대의 변위와 잔차를 통합하여 최종적인 변위량을 계산하였다. 이 방법의 경우에도 동적변위와 준정적변위 모두 정확하게 측정된 것을 확인할 수 있었으며, 단순 통합계산 방법과는 다소 다르게 준정적변위가 완만하게 발생한 구간에서 보다 정확한 측정결과를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 단순통합계산 방법보다는 정확한 측정결과를 나타내는 것으로 판단되었으며, 준정적변위가 급격하게 발생한 경우에는 다소 부정확한 측정 결과가 계산된 것을 확인할 수 있다.

다음의 표 3은 RTK-GPS 기준의 단순 통합계산 방법과 대역별 변위추출에 의한 통합계산 방법의 정확도를 각각 비교하여 나타난 것이다. 두 방법 모두 평균적인 편차와 표준편차가 5mm 미만으로 매우 적고 서로 유사하였으나, 최대편차와 5mm 미만 편차의 비율 부분에서 대역별 변위추출에 의한 방법이 보다 양호한 수치를 나타내었다. 또

한 각 방법 모두 5mm 미만의 작은 크기를 보이는 편차의 비율이 매우 높게 나타난 것을 확인할 수 있으며, 특히 대역별 변위추출에 의한 통합계산 방법이 RTK-GPS 기준의 단순 통합계산 방법에 비하여 편차의 분포가 양호한 것으로 나타났다.

표 3. RTK-GPS/가속도계 통합계산 방법별 정확도 비교 결과

구분	RTK-GPS기준의 단순 통합계산	대역별 변위추출에 의한 통합계산
최대편차(m)	0.0273	0.0153
평균편차(m)	0.0037	0.0037
표준편차(m)	0.0053	0.0050
5mm 미만 편차의 비율(%)	89.2	91.2

## 6. 결론

본 연구에서는 구조물의 변위측정을 위한 최적 RTK-GPS/가속도계 통합계산 방법을 제시하기 위하여 각각 2가지의 가속도 자료처리 방법과 통합계산 방법들의 정확도를 평가하고 이를 상호 비교하였다. 각 처리방법들의 정확성 및 효용성을 평가하기 위하여 캔틸레버 보 실험체를 구성하여 변위발생 실험을 수행하였고, LVDT로 계측된 실험결과를 기준으로 각 처리방법들에서 계산된 결과를 직접 비교·평가하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 가속도계 자료처리를 위하여 FIR 필터 및 EDM 필터를 이용하는 2가지 방법의 정확도를 평가한 결과, FIR 필터를 이용하는 방법이 가장 높은 정확도를 나타내어 가속도계를 이용한 동적변위 측정에 직접 활용할 수 있는 것으로 판단되었다. EMD 필터를 이용하는 방법도 실제 적용에는 큰 문제가 없을 것으로 판단되지만, FIR 방법에 비하여 다소 낮은 정확도를 나타내었다.

2. RTK-GPS 방법만을 이용하여 구조물에 발생하는 준정적변위를 측정하는 경우에도 30mm 미만의 최대 오차범위 내에서 평균 5mm 수준의 편차로 변위량을 측정할 수 있는 것으로 판단되었다.

3. RTK-GPS/가속도계 통합계산을 위해 RTK-GPS 기준의 단순 통합계산 방법과 대역별 변위추출에 의한 통합계

산 방법을 각각 적용하여 동적변위와 준정적변위를 계산한 결과, 대역별 변위추출에 의한 통합계산 방법이 보다 정확한 것으로 나타났다. 따라서 RTK-GPS와 가속도계를 동시에 이용하여 구조물의 변위를 측정하는 경우 대역별 변위추출 방법에 의해 통합계산을 수행하면 약 20mm 미만의 최대 오차범위 내에서 평균 4mm 미만의 편차로 변위를 측정할 수 있을 것으로 판단되었다.

하지만, 본 연구에서 제시한 정확도 관련 수치들은 모두 이상적인 환경 하에서 실험을 수행하여 얻어진 값으로써, GPS 신호 수신환경에 많은 영향을 받는 RTK-GPS 측정방법의 특성을 고려하면 제시된 수치들을 절대적인 정확도로 간주하기는 어렵다. RTK-GPS 및 가속도계를 이용한 구조물 변위측정에 대한 보다 일반적이고, 엄밀한 정확도 기준이 제시되기 위해서는 다양한 관측환경, 구조물 종류 및 기타의 자료처리 방법 등을 고려한 추가적인 연구와 실험이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3111)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

Billah, K. and Scanlan, R., 1991, Resonance, Tacoma Narrows Bridge Failure, and Undergraduate Physics Textbooks, American Journal of Physics, 59(2), pp. 118-124.

Chan, W. S., Xu, Y. L., Ding, X. L., Dai, W. J., 2006, An integrated GPS-accelerometer data processing technique for structural deformation monitoring, J. Geodesy 80, pp. 705-719.

Ding, W., Wang, J., Li, Y., Mumford, P. and Rizos. C., 2008, Time synchronization error and calibration in integrated GPS/INS systems. ETRI Journal 30(1), pp. 59-67.

Garg, S. C., Morrow, L. D. and Mamen, R., 1978, "Strapdown Navigation Technology: A Literature Survey", Journal of Guidance and Control 1(3), 1978, pp. 161-172.

Hyzak, M., et al., 1997, Practical Application of GPS to Bridge Deformation Monitoring, the 64th FIG Permanent Committee Meeting and Symposium.

Hong, Y., 2007, A Regularization Scheme for Displacement Reconstruction Using Acceleration Data Measured from



- Structures, Master Thesis, Seoul National University, Seoul, Korea, pp. 12-23.
- Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shih, H. H., Zheng, Q., Yen, N. C., Tung, C. C. and Liu, H. H., 1998, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for non-linear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc Lond A* 454, pp. 903-995.
- Huang, N. E., Zheng, S. and Steven, R. L., 1999, A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum, *Annu. Rev. FluidMech.* 31, pp. 417-457.
- Li, X., C. Rizos, L. Ge, Y. Tamura and A. Yoshida, 2005, The Complementary Characteristics of GPS and Accelerometer in Monitoring Structural Deformation, U.S. Institute of Navigation National Tech. Meeting, San Diego, California, 24-26 January, pp. 911-920.
- Maguire, J. R. and Wyatt, T. A., 1999, *Dynamics: An Introduction for Civil and Structural Engineers*, London, UK: Thomas Telford, Ltd., p. 80.
- Meng, X., Roberts, G. W., Dodson, A. H., Cosser, E., Barnes, J. and Rizos, C., 2004, Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural deformation monitoring: analytical and empirical studies, *J. Geodesy* 77, pp. 809-822.
- NovAtel, 2006. OEMV family installation and operation user manual, OM-20000093, NovAtel, Calgary, Alberta, Canada, pp. 91-92.
- Roberts, G. W., Meng, X., Dodson, A. H., 2000, Structural dynamic and deflection monitoring using integrated GPS and tri-axial accelerometers. In: *Proc 13th Int Tech Meeting Satellite Division US Inst Navigation*, Salt Lake City, UT, 19.22 September, pp. 59-68.
- 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, pp. 1783-1793.
- Tikhonov, A. N., 1963, Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method, *Soviet Math Dokl* 40, pp. 1035-1038.
- Xu, N., Rangwala, S., Chintalapudi, K., Ganesan, D., Broad, A., Govindan, R., Estrin, D., 2004, A wireless sensor network for structural monitoring, *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, November 03-05, Baltimore, MD, USA, pp. 13-24.