

GPS 반송파를 이용한 구조물의 3차원 진동측정

서대완*, 0이영재*, 박훈철*, 윤광준*, 지규인**, 박찬국***

3 Dimensional Vibration Measurement of Structures Using GPS Carrier Phase

Dea-Wan Suh, Young Jea Lee, Hoon-Cheol Park, Kwang-Joon Yoon,
Gyu-In Jee, Chan Gook Park

ABSTRACT

GPS carrier phase is supposed to provide the tool for the most precise 3 dimensional positioning information. The FAST, an OTF technique, has been developed by the GPS System Laboratory of Konkuk University, and has been shown several millimeter level accuracy in root-mean-square sense. This OTF's high precision positioning capability provides an adequate tool of low frequency vibration monitoring of large structures. In this paper, the possibility of vibration measurement of a cantilever beam using FAST has been tested, which is supposed to be extended to more practical applications. The results of the experiment have been compared with those by a strain gage and laser sensor.

1. 서론

현재 구조물에 대한 설계와 시공기술 등의 발달로 재질로서는 고강도이면서 유연하고 경량화된 구조물의 건설이 가능하게 되었다. 그러나, 구조물의 대형화 및 고층화 등이 구조물에 과도한 처짐과 진동을 발생시켜, 구조물의 피로효과를 가중시키는 결과를 초래하여, 안전과 사용성에 많은 문제점들이 제기되어 유지관리의 중요성이 점차 강조되고 있다.

초기에는 구조물 유지관리를 위하여 충격계수

만을 가지고 평가하는 것이 고작이었으나, 최근에는 진동문제의 다양화와 구조물에 대한 사용성 요구의 증가로, 실무설계에서도 진동문제가 보다 신중하게 다루어지고 있다.

구조물의 진동특성은 사용성 및 안전성에 밀접한 관계가 있다. 때문에 구조물에서 발생하는 진동을 보다 효과적이고 과학적으로 분석하기 위한 많은 연구가 활발히 전개되고 있다. 구조물에서 진동에 의한 가장 대표적인 손상유형은 단면의 균열이며, 이로 인한 균열은 정·동적 거동을 변화시키는 중요한 인자들 중의 하나로, 국부적 부재강성의 감소는 곧 고유진동수의 감소와 연결이 되므로, 구조물 손상 전후의 고유진동수 차이는 구조물의 손상상태를 알 수 있는 단서가 될 수 있다. 이러한 구조물의 고유진동

* 건국대학교 항공우주공학과
** 건국대학교 전자공학과
*** 광운대학교 제어계측공학과

수 정보를 얻기 위한 방법으로 현재 사용되고 있는 센서들은 가속도계를 중심으로 다양하게 개발되어 있는 실정이다. 그러나, 대형구조물에서 5Hz미만의 저주파진동을 모니터링하기 위한 센서는 가격과 설치방법 그리고 부피와 질량 등의 제약조건으로 인하여 개선 및 개발의 여지가 있다.

본 논문에서는 이러한 저주파진동 측정분야의 개선책으로 저렴한 가격이면서도 정밀한 3차원 위치해를 제공하는 GPS를 이용한 응용을 고려하게 되었다. 현재 GPS는 새로운 응용분야의 도출로 그 사용 범위가 점점 넓어지고 있으며, 또한 알고리즘의 개선으로 인하여 보다 정밀한 위치해를 얻을 수 있게 되었다.

GPS를 이용한 구조물의 진동수결정에 GPS 코드정보를 이용할 경우 DGPS를 이용하더라도 수m의 정밀도 한계를 지니게 되므로, 더욱 정밀한 값을 요구하는 진동수 결정에서는 GPS 코드정보를 사용하는 것이 적합하지 않다. 따라서, 진동수결정분야의 응용에는 수mm의 분해능을 갖는 GPS 반송파를 이용하는 것이 불가피하다. 그러나, GPS 반송파를 이용할 경우 수신기에서 수신한 위성과 수신기의 위상차이값 맥놀이 위상(beat phase)을 알 수 있으나, 수신된 반송파가 전송되는 과정에서 위성과 수신기 사이에 몇 주기의 반송파가 존재하는지는 알 수가 없다. 여기서 위성과 수신기 사이에 존재하는 정수의 반송파 주기 값을 미지정수(integer ambiguity)라고 한다. 이러한 GPS 미지정수 결정은 해석해가 존재하지 않기 때문에 문제가 된다. 미지정수 결정의 문제를 해결하기 위하여 다양한 미지정수 결정기법이 개발되어 사용되고 있으며 아직도 실용화하기에는 완전하지 않은 실정이다. 구조물의 실시간 진동수 모니터링을 위해서는 보다 효율적이고 빠른 검색기법으로 미지정수의 해를 얻어야 하는 문제가 있는데, 이는 아직도 전세계적으로 연구, 개발 중에 있다. 이러한 실시간 검색기법을 위하여 효율적인 알고리즘이 필요한데, 본 논문에서는 미지정수 결정기법의 하나로써, 전국대학교 GPS 시스템 실험실에서 개발한 FAST (Fast Ambiguity Search Technique) 알고리즘을 이용하였다[1].

본 논문에서는 FAST 알고리즘을 이용한 정밀위치측정을 기반으로 한 구조물의 진동수결정 실험 및 분석을 정리하였다.

2. 구조물의 진동수 결정

구조물의 진동수 결정을 위해서는 GPS를 이용하여 구조물의 위치변동 값을 정밀 측정한 후에, 얻어진 시간영역의 데이터를 Fourier변환하여 진동수 영역의 데이터로 바꿔야 한다. 본 절에서는 우선 진동수 결정에 사용되는 기존의 진동 측정장치 들에 대하여 언급하고, 이론적인 실험 구조물의 진동수 해석과 본 실험의 데이터 처리에 사용된 FAST 기법을 설명하였다.

2.1 변환기(Transducers) 특성

진동측정에 변환기를 사용하기 위해서는 측정 대상에 대한 고려와 사용하고자 하는 변환기의 장단점을 고려해야 한다. 현재 구조물의 변위측정을 위해서는 다이얼 게이지식 변위계 혹은 광학식 변위계를 이용하는 방법, 경사계를 이용하여 경사를 측정한 후에 변위를 계산하는 방법, 가속도계를 이용하여 가속도를 측정하고 이것을 적분하여 변위를 구하는 방법 등이 있다. 그러나, 게이지식 변위계는 변위계를 지탱할 수 있는 고정점이 있어야 하나 하천 위를 건너는 교량의 경우와 같이 사용하기에 불가능한 경우가 많다. 광학식 변위계는 주위의 조도에 크게 영향을 받으므로 거리측정 범위가 200m 정도로 장대교량의 경우에는 역시 어려운 점이 많다. 장대교량에 많이 쓰이는 경사계는 경사로부터 변위를 계산하는 방법은 정확도에 문제가 있고, 동적변위의 측정에는 역시 어려움이 많다. 가속도로부터 변위를 계산하여 정확도에 문제가 있고, 종적변위의 측정에는 역시 어려움이 많다. 가속도로부터 변위를 계산하는 것은 이론적으로는 가능하나, 실제로 적분상수를 구하기가 어려워 정확한 변위 측정이 매우 어렵다. 또한, 기존의 가속도계는 고주파수를 측정하기에 적합하도록 만들어 졌기 때문에 저주파수를 측정할 경우 정밀도와 가격 등의 문제가 고려되어야 한다. 게다가 이러한 재래의 접근 방법으로는 시스템 설치 방향에 준하는 1차원 거동 측정만이 가능하며, 장대교의 안정성 판단에 중요한 데이터인 상판의 수평운동 측정은 매우 어렵다.

GPS 반송파를 이용한 정밀위치 측정은 저주파수 측정에서 상대적으로 낮은 가격과 3차원 위치가 정밀 측정되므로 재래의 시스템의 문제점을 해결할 수 있다.

2.2 실험 구조물의 진동 해석

실험에 사용된 구조물 한쪽이 고정된 파이프

와 끝단에 GPS 안테나가 올라가 있는 구성이므로 그림1과 같이 나타낼 수 있다. 구조물의 고정부위는 완전고정 되었다는 것과 외팔보 끝단의 GPS 안테나를 질점으로 가정하였다.

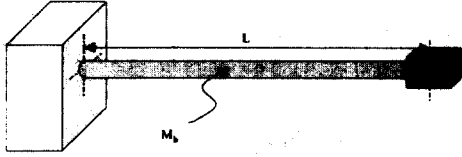


Fig. 1. Cantilever Beam

그림1과 같이 보의 끝단에 집중 질량이 달려 있는 균일보의 첫 번째 고유진동수 공식은 식(1)과 같다[6].

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{L^3(M + 0.24M_b)}} \quad (1)$$

Table 1. Structural Parameters

	정의	단위값
E	탄성계수	$190 \times 10^9 \text{ Gpa}$
I	관성모멘트	$5.44 \times 10^6 \text{ m}^4$
L	균일보의 길이	3.62m
M	집중질량	0.51kg
M_b	균일보의 질량	2.38kg

식(1)의 변수 정의와 입력값은 표1과 같고, 표1의 입력값을 식(1)에 대입하여 얻은 결과값은

$$f_1 = 1.23\text{Hz}$$

이다.

이와 더불어 실제 실험을 더욱 근사하게 모델링하기 위하여 유한요소법을 적용하였다. 사용된 프로그램은 NASTRAN이며, 균일보의 끝단에서 길이 1cm의 구간에 질량을 집중시켜 결과를 얻었다. NASTRAN의 결과는 첫 번째 고유진동수가 1.24Hz였으며, 두 번째 고유진동수는 8.72Hz를 얻었다. 그러나 실험에 사용된 GPS수신기(기종 : NovAtel 3151R)가 제공하는 샘플링레이트는 10Hz이므로 얻을 수 있는 구조물의 최대 주파수가 5Hz이기 때문에, 본 실험에서 GPS 수신기로부터 얻은 두 번째 고유진동수는 정확한 값으로 보기 어렵다. 따라서, 첫 번째 고유진동수의 결과를 비교하였다.

2.3 FAST 기법

구조물의 거동 측정을 위해서는 정밀한 기준 벡터값이 필요하다. FAST 기법은 GPS 반송파를 이용하여 거동 측정에 필요한 정밀한 기준 벡터값을 제공한다[1].

● 초기화 과정

일반적으로 미지정수 검색 과정에서 초기화 과정은 초기 위치와 초기 미지정수 계산이 필요하다. 초기위치 값을 얻기 위해서 선형화된 이중차분 코드식을 이용한다. 선형화된 이중차분 코드식으로부터 최소자승법을 사용하여 보정량 벡터를 결정한다.

결정되어진 보정량 벡터와 이중 차분된 반송파 선형식을 이용하여 실수영역의 초기 미지정수를 결정한다.

초기화 과정에서 초기 위치와 초기 미지정수 계산에 주로 쓰이는 방법은 최소자승법인데, FAST에서도 최소자승법을 쓰고 있다. 하지만, 동적 측량에 있어서 한번의 측정치로 최소자승법의 해를 사용한다는 것은 정확도면에서 떨어지게 되므로 검색 공간만을 늘리는 결과를 가져온다. 이에 FAST에서는 보다 정확한 초기 미지정수를 설정하기 위해서 LAMBDA (Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) 방법을 이용하였다.

● 1차 검색 과정

LAMBDA 방법은 상관되어 있는 공분산 행렬과 미지정수들을 비상관화하여 검색 공간을 획기적으로 줄임과 동시에 정확한 미지정수를 효과적으로 검색할 수 있다. LAMBDA 방법은 정확한 공분산 행렬을 만들고 실시간 측정을 원할 경우에는 다른 종류의 측정치, 즉 코드 정보가 필요하게 된다. 즉, 위치 보정량 벡터에 대한 공분산 행렬과 반송파 오차의 공분산 행렬의 조합으로 초기 실수영역의 미지정수 공분산 행렬을 구할 수 있다.

이렇게 구해진 실수영역의 미지정수와 공분산 행렬은 LAMBDA 방법에 적용하여 정수영역의 초기 미지정수를 검색하게 된다. 이러한 검색을 통하여 정수영역의 초기 미지정수를 얻을 수 있다.

LAMBDA 방법은 다중시점(multi-epoch)을 위한 알고리즘이므로, 단일시점(single-epoch)에 응용할 경우 검색된 미지정수의 정확도가 떨어질 수 있다. 그러므로 LAMBDA 방법을 실시간

으로 이용할 때에는 미지정수 검사과정이 꼭 필요하게 된다. 이에 LSAST (Least Square Ambiguity Search Technique)와 ARCE (Ambiguity Resolution with Constraint Equation)방법을 고려하였다.

● 2차 검색 과정

1차 검색 과정에서 구한 정수영역의 초기 미지정수와 공분산 행렬을 이용하여 식(2)와 같이 검색공간을 설정하여 참 미지정수를 검색하게 된다.

$$\hat{n}_i - \delta n_i \leq \hat{n}_i \leq \hat{n}_i + \delta n_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m-1 \quad (2)$$

여기서,

\hat{n}_i : 정수영역의 미지정수

$\delta n_i = \beta \sqrt{Q_{ii}}$: 검색 공간 (β 는 신뢰도 계수)

Q_{ii} : 초기 실수영역의 미지정수 공분산 행렬

식(2)에서 나타나는 것과 같이 검색 공간은 미지정수의 공분산 행렬에 따라서 변하게 된다. 즉, 측정 오차를 고려하여 검색공간이 변하기 때문에 주변 상황에 알맞은 범위가 설정되므로 효율적인 검색이 가능하게 된다.

LSAST 방법은 미지정수 항 중에서 3개만이 독립임을 이용하여 나머지 종속 미지정수 항을 직접 구하므로 검색범위와 계산량을 줄일 수 있다. 또한 미지정수 검사를 위한 계산과정이 줄어들게 된다. 그러나 매 미지정수 후보에 대하여 위치를 구해야 되므로 계산량이 많아지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 ARCE 방법에서 고려되어진 것과 같이 영공간을 이용하여 위치항을 소거하였다. 또한 위성 고유 번호인 PRN번호를 사용하였다.

● 검사 과정

독립 위성군의 미지정수 후보에 대하여 종속 위성군의 미지정수를 구할 수 있다. 이렇게 구해진 종속위성군의 미지정수는 실수이기 때문에 가장 가까운 정수로 바꾸어 준다.

목적함수는 종속 위성군의 미지정수의 함수가 된다. 목적함수는 종속위성군의 실수영역 미지정수를 정수로 바꾸는 과정에서 발생하는 오차값을 이용하여 나타낼 수가 있다. 임계치는 목적함수로부터 가변형의 임계식을 사용하였다.

목적함수와 임계식은 미지정수 검색 공간 중에서 참 미지정수를 결정하기 위해 필요한 것이다. 그런데, 미지정수에 대한 목적함수치는 완만

하게 변하므로 미지정수 후보 중에 임계치를 만족하는 유일한 것을 찾기는 거의 드물다. 그래서 필요한 것이 비율검사다.

임계치를 만족하는 미지정수 후보가 2개 이상 있을 경우 목적함수치가 가장 큰 것과 그 다음 큰 것의 비율을 계산하여 비율이 큰 것을 최종적으로 결정하면 이것이 참 미지정수가 된다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험방법

외팔보 진동실험을 위해서 GPS 안테나를 외팔보위에 고정하여 데이터를 획득하였고, GPS를 이용한 데이터 결과를 비교하기 위하여 레이저 변위 측정기와 스트레인게이지를 이용하여 얻은 데이터를 진동수 분석에 이용하였다.

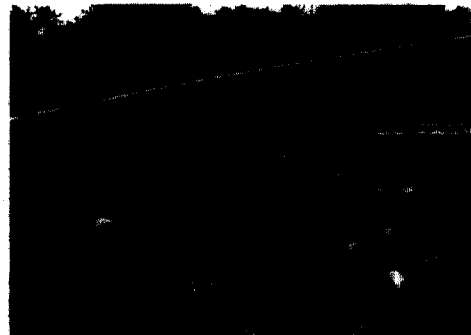


Fig. 2. Overview of Experimental System

실험에 사용된 구조물은 그림2와 같다. 우선, 외팔보의 진동실험을 위하여 그림2와 같은 외팔보 고정대(길이 4m, 지름 20mm, steel pipe)를 건국대학교 공대C동 옥상에 설치하였다. 외팔보의 고정부위는 목재를 이용하여 구성하였으며, 이로 인하여 수치적인 오차가 발생할 수 있다. 또한 실험 중 외팔보의 처짐이 발생하였으며, 바람으로 인한 외력이 작용하였다.

목재로 된 보의 고정부위는 앵글과 결합되어 있고 앵글은 사방에 무게를 실어서 외팔보의 진동시에 고정대가 흔들리지 않도록 하였다. 고정대의 하단에 보이는 컴퓨터는 진동 실험시 그림3과 그림4의 레이저 변위 측정기와 스트레인게이지에서 받은 데이터를 저장하기 위한 컴퓨터이다.

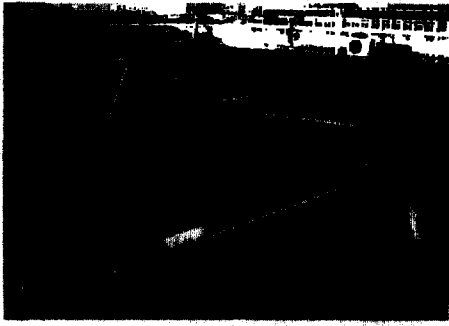


Fig. 3. Laser Displacement Sensor



Fig. 4. Strain Gage

그림5는 보의 끝단에 장착된 GPS 안테나이다. 외팔보의 진동시 GPS 안테나 케이블의 처리를 위하여 보의 안쪽으로 케이블을 통과시키고 정부위 쪽으로 뽑아내었다.

레이저 변위 측정기는 최대 측정 범위인 $\pm 15\text{mm}$ 를 벗어나지 않도록 변위가 작은 보의 고정부 부근에 설치하였고, 스트레인게이지 역시 진동 실험시에 스트레인의 변화량이 큰 보의 고정부위에 설치하였다. GPS 안테나는 변위가 가장 큰 보의 끝단쪽에 설치하였다.



Fig. 5. GPS antenna

차분반송파기법에 필요한 데이터를 얻기 위하여 기준국으로 사용된 GPS 안테나는 그림2의 좌측 8m 부근에 위치하는 건국대학교 항공우주 공학과의 기준국1를 이용하였다. 기준국 1의 모

습은 그림6과 같다.

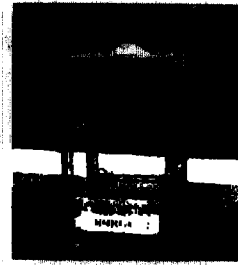


Fig. 6. Reference Station Number 1 at Konkuk unvi.

본 논문의 실험에서는 GPS 데이터를 실시간으로 받아서 후처리(post-processing) 방법으로 처리하였다. 진동수를 구하는 것은 레이저 변위 측정기, 스트레인게이지, GPS 각각의 세 데이터 모두 Matlab의 FFT함수를 이용하였다. 실험에서 보의 진동은 그림2의 보 끝단 밑에 있는 정해진 위치까지 가도록 보에 힘을 가한 후 놓는 방법을 사용하였다. 레이저 변위 측정기 데이터와 스트레인게이지 그리고 GPS 데이터는 동시에 받아서 기록하였다. 실험 구성은 표 2와 같다.

Table 2. Setup

GPS 수신기	샘플링 레이트 0.1초 데이터 획득 시간 70초 NovAtel사의 501 안테나 2개 NovAtel사의 3151R 수신기 2대 데이터 저장용 컴퓨터 2대
정밀위치 측정 알고리즘	FAST알고리즘
스트레인 게이지	샘플링 레이트 50Hz 데이터 획득 시간 70초 스트레인게이지 1개 (CAS사 AE-11-S50N-120-FL)
레이저 변위 측정기	샘플링 레이트 50Hz 데이터 획득 시간 70초 레이저 변위 측정기 1대 (KEYENCE사 LB-081) 측정 범위 $\pm 15\text{mm}$ 정밀도 0.008mm

3.2 실험결과

3.2.1 스트레인게이지를 이용한 고유 진동수 측정

GPS 데이터에서 얻은 진동수를 비교하기 위한 센서로 스트레인게이지를 이용한 결과 값이다. A/D 변환기를 통하여 얻은 데이터는 Matlab의 FFT함수를 이용하여 주파수를 구했다. 그림6은 스트레인게이지의 데이터로부터 얻은 진동부재의 FFT결과이다. 첫 번째 모드는 1.23 Hz이다. 그림6에서 첫 번째 모드의 다음에 나타나는 두 개의 피크는 비선형 진동에 의한 첫 번째 주파수의 조화성분값을 나타낸다[7].

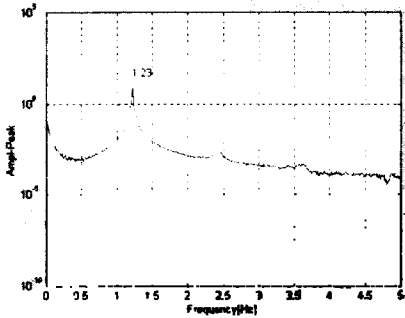


Fig. 6. FFT of Strain Gage Measurement

3.2.2 레이저 변위 측정기를 이용한 고유 진동수 측정

GPS 데이터에서 얻은 진동수를 비교하기 위하여 레이저 변위 측정기를 이용하여 데이터를 획득하였다.

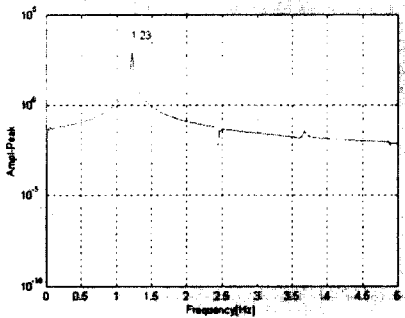


Fig. 7. FFT of Laser Displacement Sensor Measurement

그림7은 레이저 변위 측정기의 측정값으로부터 얻은 외팔보의 FFT결과이다. 첫 번째 모드는 1.23Hz이다. 두 번째 값과 세 번째 값은 진폭이 커짐에 따라 비선형 진동현상에 의해 발생하는 조화성분값을 나타낸다[7].

3.2.3 GPS 차분 반송파를 이용한 고유진동수 측정

그림8, 9는 가시위성의 개수와 DOP를 나타낸다. 그림8에서 가시위성의 개수는 7로써 정밀 위치를 측정할 수 있는 차분 반송파 알고리즘인 FAST의 필요조건인 5개 이상의 조건에 만족한다. 그림9의 DOP는 PDOP, HDOP, VDOP 모두 2이하의 값으로 진동 실험시 위성의 배열이 적절함을 나타낸다.

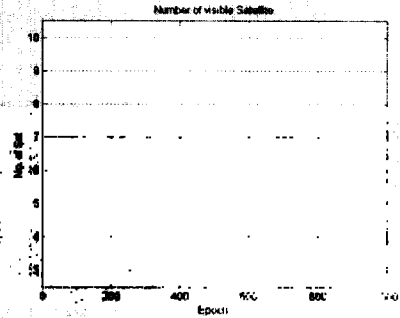


Fig. 8. Number of Visible Satellite

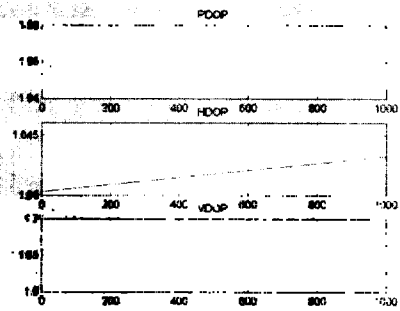


Fig. 9. DOP

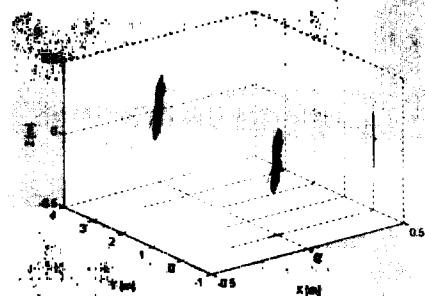


Fig. 10. 3-Dimensional trajectory at end of cantilever beam 1

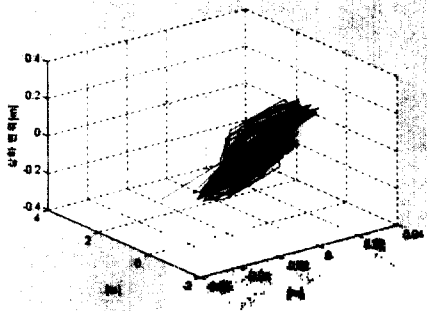


Fig. 11. 3-Dimensional trajectory at end of cantilever beam 2

그림10과 그림11은 GPS로 측정된 외팔보 끝단의 3차원 변위를 나타낸다. 그림10에서 각 평면에 대한 투영 궤적을 볼 수 있다. X축은 동서방향, Y축은 남북방향, Z축은 고도방향을 의미한다. 그림12는 GPS로 측정된 외팔보 끝단의 고도방향(Z)의 변위 정보이며, 이를 이용하여 주파수를 계산한 결과는 그림 13과 같다.

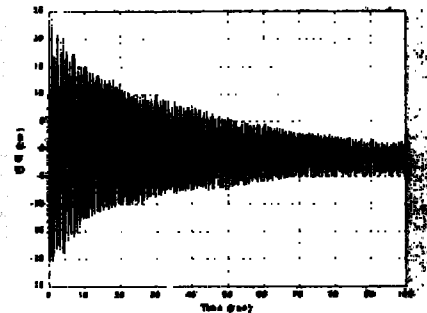


Fig. 12. Vertical Measurement of GPS

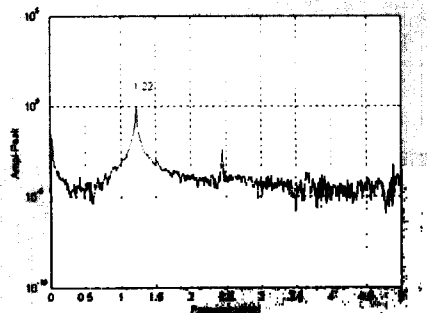


Fig. 13. FFT of Vertical Measurement of GPS

그림13에서 첫 번째 모드의 진동수는 1.22Hz

이다. 주파수 측정값이 레이저 변위 측정기와 스트레인게이지의 경우에 비하여 깨끗하지 못한 이유는 실험 중 데이터를 받는 시간에 레이저 변위 측정기와 스트레인게이지의 경우 50Hz주기로 3500개의 데이터를 받지만, GPS 차분 반송파를 이용한 데이터는 10Hz주기로 700개의 데이터만을 받았기 때문이다. 이러한, GPS를 이용한 1차 모드의 진동수 결과값인 1.22Hz는 이론치, 레이저 변위 측정기, 스트레인게이지를 이용한 결과인 1.23Hz와 유한요소방법의 결과인 1.24Hz를 비교해볼 때 좋은 결과라고 볼 수 있다.

GPS를 이용한 진동 실험에서 외팔보 끝단의 3차원 위치 값을 얻을 수 있기 때문에 그림10, 11과 같은 3차원 궤적을 얻을 수 있다. 이와 같은 3차원 위치 결과 값은 하나의 센서를 이용하여 3축의 정보를 얻을 수 있는 GPS만의 장점이 있다. 이와 같이 GPS 위치 정보를 이용하여 구조물의 효율적인 실시간 모니터링이 가능하다.

이번 실험은 GPS를 이용한 진동수 측정의 가능성을 보기 위한 기초 실험이다. 실험의 결과는 GPS 차분 반송파기법인 FAST 알고리즘을 이용한 진동수 측정의 가능성을 보여주고 있다. 세 가지 센서의 결과 값을 비교하면 다음의 표3과 같다.

Table 3. Comparison of frequency results

첫 번째 모드	주파수 획득값 (Hz)
이론값	1.23
NASTRAN	1.24
레이저 변위 측정기	1.23
스트레인게이지	1.23
GPS 차분 반송파	1.22

4. 결론

본 논문에서는 시설물관리 및 대형 우주구조물에 응용될 수 있는 구조물의 고유진동수 측정을 GPS정보를 이용하여 획득하였다. 시설물의 고유진동수 측정에 있어서 GPS를 이용한다는 것은 저렴한 비용의 장점이 있으며, 전통적으로 사용되고 있는 여러 가지 센서의 문제를 해결할 수 있다. 또한, 데이터를 얻어서 기준국 데이터를 이용하여 후처리가 가능하기 때문에 현장에서의 측정시간을 최소화 할 수 있고, 필요에 따라 실시간으로 구조물의 진동 모니터링이 가능하다.

현재의 구조물 진동을 측정하기 위한 가속도계는 일반적으로 5Hz이상의 고주파진동에는 낮은 가격과 장비의 부피가 작고 질량이 가벼운 센서들이 사용되고 있지만, 5Hz미만의 저주파진동에는 높은 가격과 장비의 부피가 크고 무거운 특성에 의하여 개선의 여지를 가지고 있었다. 본 실험의 결과로부터, GPS를 이용하여 저주파진동 특성을 가지는 구조물의 진동을 모니터링한다면 저렴한 가격과 작은 부피로 설치가 용이한 장점과 더불어 동시에 3차원 진동정보를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이상 전국대학교 GPS 시스템 연구실에서 개발한 실시간 GPS 반송파 이용 알고리즘인 FAST를 이용하여 5Hz 이하의 저주파 구조물 진동 측정이 가능함을 보여주었다.

후 기

본 연구는 1999년도 전국대학교 학술연구비 지원에 의한 것임을 밝히며, 지원에 감사드립니다. 더불어, NASTRAN 해석에 도움을 준 전국대학교 항공우주공학과 구조재료실험실의 김주식, 백성훈 군에게 고마움을 표합니다.

참고문헌

- [1] 원유두, GPS반송파 위상의 미지정수 실시간 검색기법, 전국대학교 석사학위논문, 1999.
- [2] Singiresu S. RAO, *Mechanical Vibrations*, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., 1990.
- [3] Charles H. Dowding, *Blast Vibration Monitoring and Control*, Northwestern University, 1992.
- [4] Daniel J. Inman, *Engineering Vibration*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1994.
- [5] 하명호, 강관형 교량의 실측 재하시험을 통한 상부구조의 감쇠진동 특성에 대한 연구, 전국대학교 석사학위논문, 1999.
- [6] Walter D. Pilkey, *Stress Strain and Structural Matrices*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.
- [7] 윤광준, 이영재, "복합재료 외팔보의 비선형 진동 추정", 한국항공우주학회지, 제 23권, 제2호, 1995, pp 71-78.