

레이저와 고속 CCD 카메라를 이용한 대형구조물의 진동계측

정회원 이창복*, 안세호**, 양성훈*, 염정원**, 강동욱**, 김기두**

Vibration Measurements of Large-Scale Structure Using Laser and High-Speed CCD Camera

Chang-Bok Lee*, Se-Ho Ahn**, Sung-Hoon Yang*, Jeong-Won Yum**, Dong-Wook Kang**,
Ki-Doo Kim** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 레이저와 고속 CCD 카메라를 이용하여 대형 구조물의 3차원 거동 계측을 위해 진동 주파수 계측 방식을 확립하였다. 구조물에 부착한 대상면에 변동(fluctuation)이 작은 다이오드 레이저를 투사하고 고속 CCD 카메라로 촬영한 영상에 고정도 상대측정 알고리즘을 적용하여 구조물의 변위를 측정하였다. 초당 120 프레임의 고속 카메라를 이용하고 변위에 FFT를 취해 진동주파수를 구한 경우, 0에서 40Hz 까지 ±0.5% 이내의 진동주파수의 정확도를 얻을 수 있다. 이를 이용하면 대형 구조물에 대해 보다 저렴하고 간단하게 고유진동수의 측정이 가능하다. 또한 GPS를 이용한 상대측위 기법과의 비교를 통해 레이저를 이용한 변위측정의 정확도를 입증함으로써, 제안한 진동주파수 측정 방법의 신뢰도와 경제성을 검증하였다.

Key Words: behavior measurement, vibration frequency measurement, laser, CCD, GPS

ABSTRACT

In this paper, we establish measurement methods of vibration frequency for three-dimensional behavior measurement of large-scale structure using laser and high-speed CCD camera. We project the diode laser having a smaller fluctuation on the object plane attached to the structure and measure the displacement of the structure using a precise relative measurement algorithm. When we use high-speed(120 frames/sec) CCD camera, we can measure the vibration frequency having the uncertainty within 0.5% by taking FFT on the displacement, from 0 Hz to 40 Hz. And we also confirm the reliability and economical saving of the suggested measurement method of vibration frequency of the structure by showing the accuracy of displacement measurement using laser is comparable to that of relative positioning methods using GPS.

I. 서론

시간이 경과함에 따라 대형 구조물은 노후하게 되며, 장시간 연속적으로 점검하는 일은 매우 중요하며 상시 안전감시 및 관리를 위한 모니터링 기술은 구조물의 위험도 예측은 물론 안전감시 및 관리를 위한 중요한 기술이다. 최근에는 급속히 발전하

는 계측 관련 기술에 힘입어 각종 계측기를 이용한 구조물의 손상검출이나 상태 변화 감시 시스템의 도입 및 활용이 활발히 이루어지고 있으며, 일부 교량의 경우 상시 계측시스템의 설치를 완료하여 운영하고 있다. 무엇보다도 대형구조물에 대한 안전 감시 및 진단 시스템의 구현을 위해서는 구조물의 변형에 대한 상시 계측 기술이 필수적인 요소이다^{1,2)}.

*한국표준과학연구원(cblee@kriss.re.kr) **국민대학교 전자정보통신공학부 (kdk@kookmin.ac.kr)
논문번호: 030317-0723 접수일자: 2004년 7월 15일

본 논문에서 제시한 레이저와 영상처리를 이용한 진동 계측 기술은 저렴하고 간단하게 구조물의 안전감시 시스템에 적용이 가능하며 실시간으로 구조물의 변형 등의 이상상태를 정확하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 기본 시스템은 흑백 CCD 카메라, 프레임 추출기(frame grabber), 다이오드 레이저로 구성된다. 레이저는 출력이 크고 포인팅 안정도가 좋은 것을 선택하여 200m 거리까지 적용이 가능하도록 하였다^{3,4,5)}. 또한 입력영상의 처리를 위하여 초당 120 프레임의 영상획득이 가능한 고속 CCD 카메라와 프레임 추출기를 이용하였고, 각 프레임에 대한 정보 분석은 블록 정합 탐색(block matchness detection) 방식^{6,7)} 및 고정도 상대 변위 측정 기술을 이용하여 고정밀도의 상대적 변위를 산출하였다. CCD 카메라로부터 얻은 영상을 제어 컴퓨터를 이용해서 대형 구조물의 변위량을 3차원적으로 측정 한 후 FFT 알고리즘을 이용하여 주파수 분석을 하고 구조물의 고유 진동 주파수와 비교하여 구조물의 이상 유무를 판단한다.

본 연구에서는 대형구조물에 대한 진동 주파수 측정을 보다 저렴하고 간단하며 실시간으로 처리하기 위해 기준점의 변위를 CCD 카메라를 이용한 영상처리 및 분석을 통해 측정하는 3차원 실시간 거동계측기술을 개발하였다. 또한 이를 이용한 정밀 변위 측정 시스템을 구성하였으며, GPS를 이용한 상대 측위 기법^{8,9)}과 연동하여 실험하고 측정결과를 비교하였다. 이 시스템을 대형구조물의 거동 및 변형을 통합 모니터링 하는 대형 시설물 안전도 평가 시스템으로 활용한다면 대형 구조물에 대한 상시 안전감시 및 관리를 위한 최첨단 모니터링기술이 확보될 것이다.

II. 레이저와 고속 CCD 카메라를 이용한 진동계측

레이저와 영상처리를 이용한 진동계측 기술은 대형 구조물의 안전도 평가 및 주기적인 모니터링, 체계적인 상시 안전 감시를 위한 3차원 변위 측정 및 진동 주파수 측정에 있어서 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 그림 2.1은 실제 구조물인 댐에 적용한 경우의 개념도로서, GPS를 이용한 상대측위 기법을 통해 댐의 절대적인 좌표를 구하고, 레이저와 고속 CCD 카메라를 이용한 시스템을 통해 댐의 상대적인 변위와 진동 주파수를 측정하게 된다.

2.1 진동주파수 측정의 원리

구조물에서 진동이 가장 큰 곳을 기준으로 상판의 움직임의 알 수 있도록 대상판(object plane)을 설치한다. 대상판에는 4개의 기준 LED가 설치되어 있으며, 레이저 빔이 대상판에 투사되고 CCD 카메라는 대상판의 영상을 입력한다. CCD 카메라로 입력되는 영상 변화에 영상처리 기술을 이용, 추출하여 대상판의 3차원 상대 변위를 결정하고 이를 통해 FFT 알고리즘을 이용하여 진동 주파수를 측정한다. 이러한 레이저를 이용한 안전계측시스템은 저가이고 시스템이 복잡하지 않으며, 수 mm 이내로 변위 측정이 가능하므로 구조물의 진동 및 변형측정 등 대형구조물의 이상 유무를 모니터링 할 수 있다. 기존의 안전관리시스템은 시설물 내부에 각종 감지기를 매설하지만, 본 시스템의 경우 구조물이 완공된 후나 시공 중에도 적용이 가능하다.

대형 구조물의 피로누적을 판단하는 일반적인 방법은 고유진동수를 파악하는 것이다. 본 논문에서는 영상처리를 이용하여 대형구조물의 변위를 측정 한 후 진동 주파수를 측정하기 때문에 고속 카메라가 필요하며, 프레임 오차를 아는 것이 중요하다. 주파수 측정의 신뢰도는 카메라 프레임이 얼마나 정확한가에 따라 달라진다. 그림 2.2는 실험에 사용된 고속 CCD 카메라의 신뢰도를 측정하기 위한 시스템 구성도이다. 원자시계에 lock된 펄스 발생기를 이용하여 레이저를 광 변조(펄스파)하여 대상판에 투사하였고, CCD 카메라로 촬영하여 얻은 영상에 FFT 변환을 취하여 진동 주파수를 측정한다¹⁰⁾. 진동 주파수 측정 범위는 카메라 프레임에 제한을 받게 되는데, 사용된 고속 CCD 카메라는 초당 120 프레임으로 동작 가능하며, 광 변조된 레이저의 주파수는 0 ~ 60 Hz까지 변경하며 측정하였다.

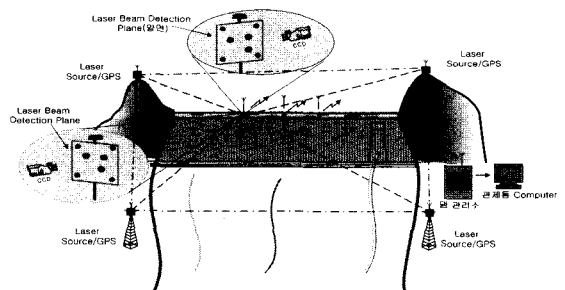


그림 2.1 댐에 적용한 시스템의 개념도

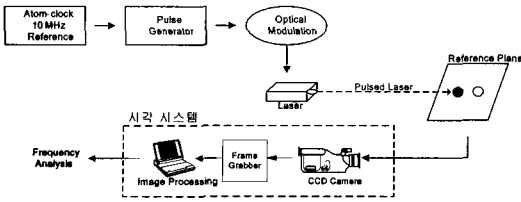


그림 2.2 진동 주파수 측정 시스템의 구성도

2.2 시각(Vision) 시스템의 구성 및 상대 변위 측정방법

2.2.1 시각 시스템의 구성과 동작

그림 2.2에 나타난 시각 시스템은 카메라를 이용하여 2차원의 위치 데이터를 입력받아서 변형을 모니터링 하는 시스템으로 인간의 육안점사를 능가하는 성능을 갖는다. 카메라를 통하여 입력된 2차원의 아날로그 데이터를 프레임 추출기와 PC를 이용하여 디지털 데이터로 변환하고 관측한 영역의 크기, 모양, 밝기 등을 저장하여 분석한다. 또한 이때 최적의 측정조건을 만들기 위해서는 카메라, 조명, 렌즈 등의 구성을 현장 상황에 맞추어 최적의 상태로 구성해야 한다. 이러한 하드웨어 구성뿐만 아니라 입력된 영상에서 측정부분의 정확한 영상 데이터를 추출하여 분석하기 위해서는 화면의 전처리, 후처리 등 영상처리를 위한 신뢰성 있는 소프트웨어가 필요하다.

시각 시스템은 측정할 대상체의 크기, 모양, 변위 등 특성분석을 컴퓨터를 이용하여 하기 때문에 안전감시 및 관리 측면에서 경제적이고 신뢰성을 갖는다. 최적의 시스템 구성을 위해서는 카메라의 선택, 프레임 추출기와 카메라의 인터페이스 관계, 영상의 선명도 및 처리 속도도 고려되어야 한다. 본 논문에서는 CCD 카메라를 이용하여 명암도값(gray scale)의 영상을 얻고, 프레임 추출기를 거쳐 256색 비트맵 포맷으로 저장한다. RGB는 픽셀 당 red, green, blue 값이 각각 틀리며 삼원색의 혼합으로 표현되는 반면 명암도값은 밝기 차이만 있을 뿐 항상 검정 색에서 흰색의 사이 값을 갖게 된다. 이 원리를 이용하여 기준영상과 부영상과의 명암도 값을 비교하여 영상처리를 하게 된다¹¹⁾.

구조물의 변위 측정을 위해 카메라로부터 얻은 동영상은 프레임 추출기를 거쳐서 프레임 단위로 출력된다. 각 프레임은 영상 데이터 포맷 중의 하나인 비트맵 파일로 변환한다. 물론 다른 데이터 포맷

인 JPEG으로도 변환이 가능하지만 본 논문에서는 구조물의 진동계측을 위한 영상처리 프로그램에 비트맵 파일을 이용한다. 전체적인 변위 측정 프로그램과 각 프레임은 비트맵으로 변환하는 것은 Visual C++ 6.0으로 구현하였다.

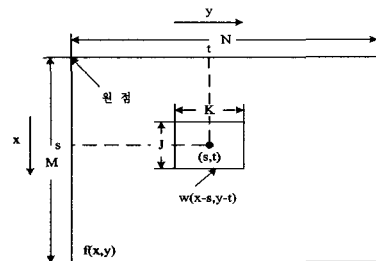
2.2.2 LED를 이용한 상대변위 측정방법

본 논문에서는 블록 정합 방법 원리를 이용하며, 미지의 영상과 이미 알고 있는 영상의 각 픽셀 집합간에 가장 잘 일치하는 것을 찾아낸다. 한가지 접근 방법은 미지의 영상과 알고 있는 영상간의 상관성을 계산하는 것이다. 가장 잘 일치하는 것을 찾으려면 가장 큰 상관성 함수 값을 갖는 영상을 택하면 된다. 결과로서 생기는 상관성은 2차원 함수이기 때문에, 찾는 과정에는 각각의 함수에서 가장 큰 진폭을 찾아내는 작업도 포함된다^{6,7)}.

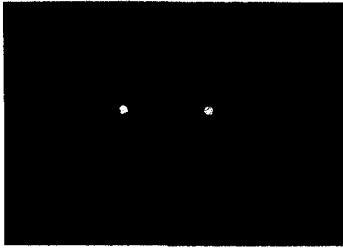
크기 $M \times N$ 의 영상 $f(x, y)$ 내에 있는 크기 $J \times K$ 의 부영상 $w(x, y)$ 의 정합들을 찾으며, 이때 $J \leq M, K \leq N$ 이라 가정한다. 이 상관성 방법은 벡터 형태로도 공식화할 수 있지만, 영상 혹은 부영상 형태로 하는 것이 보다 직관적이다. 가장 간단한 형태로, $f(x, y)$ 와 $w(x, y)$ 사이의 상관은 식 (2.1)로 표현될 수 있다.

$$c(s, t) = \sum_x \sum_y f(x, y)w(x-s, y-t) \quad (2.1)$$

여기서, $s = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $t = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 이고 합 연산은 w 와 f 가 겹치는 영상 영역에서 이루어진다. 그림 2.3(a)는 이 과정의 원리를 나타낸 것이고, 그림 2.3(b)는 실제 영상을 나타낸 것으로서 레이저의 spot을 픽셀 단위로 잘라 부영상으로 이용한다. 여기서 $c(s, t)$ 의 최대값으로부터 $w(x, y)$ 가 $f(x, y)$ 에 가장 잘 일치되는 위치를 찾을 수 있다.



(a)



(b)
그림 2.3 원영상과 부영상의 상관관계 원리

그림 2.4에서의 LED는 변위를 산출하는 상대 변위 측정을 위한 기준점이며, LED간의 거리를 기준으로 정수 단위의 픽셀간 거리를 측정할 수 있다. 이러한 기준점을 이용하여 레이저 spot의 상대위치를 측정하는 방법은 원리가 매우 간단하고 정확한 3차원 변위 측정이 가능하다. 더욱이 보간법을 적용한 상대위치 측정을 통해 측정의 정밀도를 높일 수 있다.

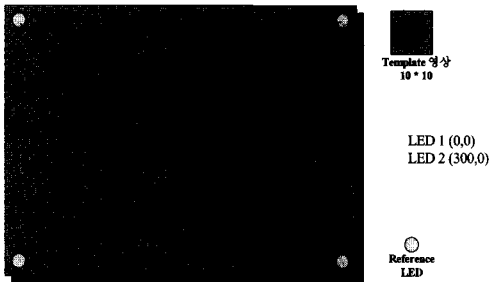


그림 2.4 LED를 이용한 상대 위치 결정

블록 매칭과 시각 시스템을 이용하여 영상정보를 처리하고 기준점 상대위치 알고리즘을 적용하였을 때 레이저빔 spot 영상의 위치로 얻을 수 있는 변위는 정수의 픽셀 단위이다. 대형 구조물의 변위 측정에서 요구하는 정확도는 수 mm 이내이어야 하므로^[12], 영상처리에 의한 정확도를 더 높이기 위해 보간법을 이용한 상대위치 측정 방법을 제안한다. 이 방법을 사용하여 측정 프로그램을 구현하면 정수 값의 픽셀 정보만 얻을 수 있었던 기존의 영상 처리 프로그램에 비해 좀 더 정확한 변위량을 구할 수 있다. 부영상과 원영상 사이의 정합 차이 E_r 에 대한 정의는 식(2.2)로 나타낼 수 있다.

$$E_r = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [T_{ij} - I_{ij}]^2 \quad (2.2)$$

여기서 T_{ij} 는 부영상의 i 번째와 j 번째 픽셀 값, I_{ij} 는 원영상의 i 번째와 j 번째 픽셀 값을 나타낸다. 입력 영상의 크기 $M \times N$ 까지 E_r 값을 구한 다음 가장 작은 오차를 가지는 경우를 정합 정도가 최고로 우수하다고 판단한다. 보간법을 적용한 측정 원리는 그림 2.5와 같이 여러 점들을 임의의 함수로 근사화 시킨 다음 최소값 지점을 구하는 것이다.

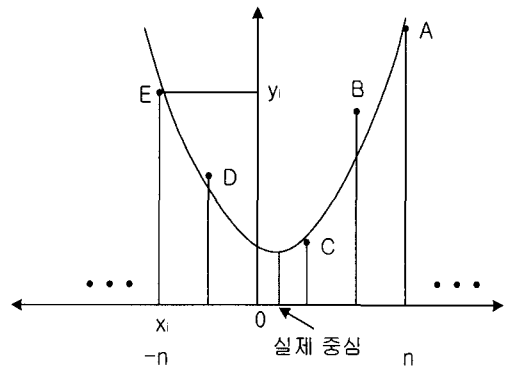


그림 2.5 보간법을 적용한 함수 fitting의 예

그림 2.5에서 n 은 정수이고, 포물선에 대한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (2.3)$$

점 A, B, C, D, E는 각각 E_r 값에 상응하는 기호이며, 이 점들로부터 fitting한 함수 $f(x)$ 를 구할 수 있다. 따라서 가장 작은 E_r 을 갖는 정수형 픽셀 값은 점 C가 되는데, 실제 변위 값은 포물선의 꼭지점이 되며, 점 C와 최소 꼭지점은 어느 정도 오차를 갖는다. 최소 꼭지점을 찾는 과정을 설명하면 다음과 같다. 먼저 식(2.4)를 정의하며, 미지수 a, b, c 의 함수를 만든다.

$$\sum_{i=-n}^n [y_i - f(x_i)]^2 = E(a, b, c) \quad (2.4)$$

최소값을 찾기 위해서는 식 (2.5)를 만족해야한다.

$$\frac{\partial E}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial b} = 0, \quad \frac{\partial E}{\partial c} = 0 \quad (2.5)$$

식 (2.5)를 계산하여 행렬로 표현하면 식 (2.6)과 같다.

$$[X] \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i x_i & \sum_{i=1}^n y_i \end{pmatrix}^T \quad (2.6)$$

여기서 [X]는 $x_i = i$ 일 때 식 (2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{15} n(n+1)(2n+1)(3n^2+3n-1) & 0 & \frac{1}{3} n(n+1)(2n+1) \\ 0 & \frac{1}{3} n(n+1)(2n+1) & 0 \\ \frac{1}{3} n(n+1)(2n+1) & 0 & 2n+1 \end{pmatrix}$$

결과적으로 식(2.6)의 우변은 아는 값이고 좌변의 [X]도 식(2.7)로 구할 수 있는 값이다. 식(2.6)을 풀면 미지수 a, b, c를 구할 수 있다. 그리고 포물선 방정식의 최소 값 즉, 꼭지점의 x 좌표를 구하기 위해서는 미지수 a, b만 알면 된다.

CCD 카메라의 영상을 받아서 레이저 빔의 위치를 확인한 다음, 부영상과 가장 잘 정합이 되고 상관관계가 가장 큰 픽셀을 추출한다. 그 다음 보간법을 적용하여 실제 정확한 위치를 계산하고 구조물의 변위를 측정하게 된다.

III. 실험 결과

2.1절에서 언급한 바와 같이 진동 주파수를 측정하기 위해서는 정확한 변위 측정이 전제되어야 한다. 레이저를 이용한 변위측정과 GPS를 이용한 상대측위 기법을 비교하여 레이저를 이용한 변위 측정의 신뢰성을 판단하고자 한다.

3.1 GPS를 이용한 상대측위 기법

한 대의 GPS 수신기를 이용하여 위치측정을 수행할 경우, 위치측정 정밀도는 수신기의 능력에 의해 좌우된다. GPS 신호의 부호체계 중 C/A 코드를 이용하여 수신자의 위치를 측정하는 저가의 상용 수신기는 그 정밀도가 수십 미터에서 수백 미터에 이르며, P코드를 사용하는 수신기의 경우에도 1 m 이하의 정밀도를 갖기가 어렵다. 측지 및 측량, 지각변동, 구조물 변이 등과 같이 수 cm 이하의 고정

밀 위치결정이 요구되는 분야에서는 단독 측위에 따른 GPS의 위치결정 한계를 극복하기 위하여 후처리 상대 측위 기법을 사용한다^[8].

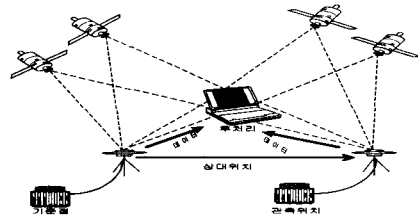


그림 3.1 GPS를 이용한 상대측위 기법

그림 3.1은 상대 측위 개념을 나타낸 것으로, 단독 측위와는 달리 정확한 위치를 알고 있는 지점과 위치측정이 요구되는 지점에서 동시에 GPS 관측을 수행하고, 두 수신기에 수신된 고주파 확산 스펙트럼 형식인 반송파를 이용한 자료처리로 기선거리를 결정한 후 위치를 측정하는 방법으로 정밀도를 현저하게 증가시킨다.

두 지점에서 동시에 관측된 GPS 위성의 반송파 자료는 관측종료 후 반송파를 이용한 상대측위 측정 능력을 갖는 프로그램에 의해 계산되어야 하며, 이때 기준점의 위치오차가 측정하고자 하는 지점의 위치에 영향을 미치게 된다. 따라서 IGS (International GPS Service for Geodynamics) 관측소와 같은 매우 정밀한 기준점이 요구된다. 또한 정밀한 위치측정을 위해서는 GPS 위성의 정확한 궤도정보도 필수적이므로, IGS에서 제공하는 고정밀 궤도력도 요구된다. 반송파를 이용한 후처리 상대측위 기법은 정밀도를 향상시키기 위하여 자료처리와 관련하여 발생할 수 있는 여러 오차원인을 제거할 수 있는 능력을 갖추어야 하며, 이 때 필요한 각종 환경변수들의 적절한 모델을 갖고 있는 고정밀 자료처리 프로그램이 필요하다.

GPS 수신기를 이용한 상대측위 기법과 레이저를 이용한 변위 측정법을 비교하기 위하여 그림 3.2과 같이 GPS 수신기와 안테나가 장착된 시뮬레이터를 일정한 간격으로 이동시키면서 측정한 결과와 레이저를 이용해서 측정한 결과의 값을 비교하는 실험을 실시하였다. 시뮬레이터는 600 mm 간격 내에서 이동 가능하므로 일정한 간격으로 이동시키면서 기준 GPS와의 상대위치를 측정하게 된다.

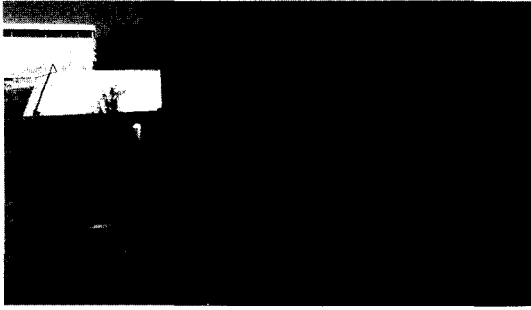


그림 3.2 GPS 안테나를 장착한 시물레이터

3.2 레이저를 이용한 변위측정과 GPS를 이용한 상대측위 기법의 비교

기준이 되는 지점에 GPS 안테나를 설치하고 이동 시물레이터에 또 하나의 GPS안테나를 설치하였다. 기준 점의 안테나는 움직이지 않고 다른 하나의 안테나 즉, 시물레이터의 위치를 100 mm 씩 움직여 가면서 레이저 변위 측정과 GPS 관측을 동시에 실행하였다. 처음 정지된 상태에서 측정을 시작하여 100 mm, 200 mm, 300 mm 이동을 측정하였다.

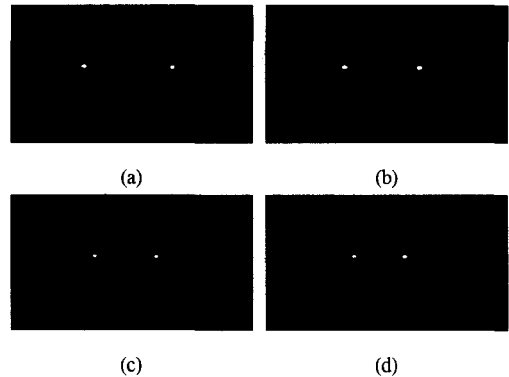
기준점 좌표 결정과 움직이는 수신기간의 기선거리 결정에 사용된 프로그램은 GPSurvey 이다. 이는 수신기 제조사에서 제공하는 상용 GPS 자료처리 프로그램으로 일반적인 기준점 측량이나 GPS를 이용한 다양한 응용분야에 사용된다. GPSurvey를 이용하여 자료 처리한 결과의 정밀도는 1~2 ppm으로 100 km 당 약 10~20 mm 정도 오차를 포함하고 있다. 표 3.1은 안테나의 위치를 100 mm씩 변동시키면서 측정한 위치와 기선거리이다. 처음의 기선거리는 16.603 m 이었고, 100 mm, 200 mm, 300 mm 가까운 쪽으로 이동하여 각각 16.502 m, 16.401 m, 16.302 m로 나타났다. 이동한 결과는 기준점에서 각각 99 mm, 198 mm, 299 mm이므로 1~2 mm의 오차가 존재한다.

표 3.1 GPS를 이용한 안테나의 위치 측정

| 거리 변위 | Latitude | Longitude | Height (meters) | baseline (meters) |
|----------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| 0 | 37°23' 18.215564 N | 127°22' 10.858721 E | 132.234 | 16.603 |
| 100mm | 37°23' 18.215328 N | 127°22' 18.854704 E | 132.232 | 16.502 |
| 200mm | 37°23' 18.215066 N | 127°22' 18.850663 E | 132.232 | 16.401 |
| 300mm | 37°23' 18.214842 N | 127°22' 18.846681 E | 132.232 | 16.302 |

그림 3.3의 (a)~(d)는 시물레이터의 이동에 따른

각각의 영상을 나타낸다. (a)는 처음 시작 위치의 영상이고, (b), (c), (d)는 각각 100mm, 200mm, 300mm 이동했을 때의 영상을 나타낸다. 영상을 보면 대상판을 부착한 시물레이터를 뒤로 이동시킴에 따라 레이저 spot간의 거리가 점점 가까워짐을 알 수 있다. 여기서의 변위 계산은 대상판을 뒤로 이동시킨 것에 대한 것이므로 이동전과 후의 영상에 나타난 두 개의 레이저 spot을 연결하여 직선으로 생각하면 이동전과 후의 영상에서 두 개의 레이저 spot의 직선길이는 분명히 차이가 있다. 따라서 두 개의 직선길이의 변화 값으로 변위를 계산하였고, 기준 LED에 대한 레이저 spot의 상대적인 변위를 응용하여 3차원적인 변위 계산도 가능하다.



- (a) 기준 spot 사이의 직선거리: 26.104mm
- (b) 100mm 이동한 위치에서 두 spot 사이의 직선거리: 22.876mm
- (c) 200mm 이동한 위치에서 두 spot 사이의 직선거리: 20.076mm
- (d) 300mm 이동한 위치에서 두 spot 사이의 직선거리: 17.280mm

그림 3.3 시물레이터의 이동에 따른 영상

100, 200, 300 mm 이동한 시물레이터에 대하여 레이저를 이용한 변위 측정 결과는 각각 100.816, 200.018, 300.013 mm 였다. 실외에서 측정한 값이므로 레이저의 특성상 기상 상태에 따른 영향으로 인해 실내에서 측정한 것보다 오차가 더 발생한 것으로 판단된다. 표 3.2는 GPS를 이용한 상대 측위 결과와 레이저를 이용한 변위 측정 결과를 비교한 표이다. 측정한 결과의 비교 이외에도 본 실험을 통해 GPS를 이용한 정밀한 상대적 변위 측정과 레이저와 영상처리를 통한 변위측정의 상호 보완적인 시스템 구성이 가능하다.

표 3.2 GPS와 레이저를 이용한 측정 실험 결과 비교(단위: mm)

| 측정방법 \ 이동거리 | 100 | 200 | 300 |
|-------------|---------|---------|---------|
| GPS | 99 | 198 | 299 |
| 레이저 | 100.816 | 200.018 | 300.013 |

3.3 진동 주파수 측정 시스템의 정확도 평가

그림 3.4는 그림 3.1의 구성도를 기반으로 한 실험 결과이다. 펄스 생성기에서 나온 40 Hz의 주파수 스펙트럼을 측정한 실험으로서 측정 결과는 기본 주파수가 39.97 Hz에 존재함을 알 수 있었다. 실험은 영상처리 후 800개의 변위 데이터를 획득한 후, 샘플수를 2의 거듭제곱 수로 만들기 위해 224개의 0을 채워 샘플수를 1024개로 하였으며 해밍 윈도우와 함께 FFT 연산을 취하여 주파수를 측정하였다.

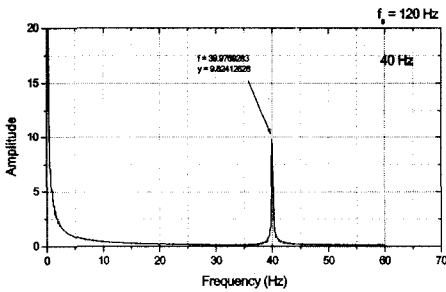
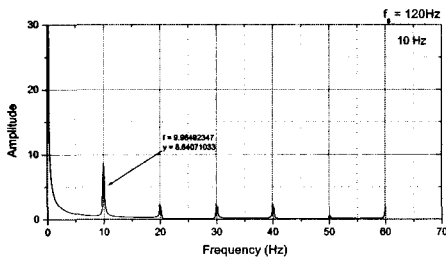
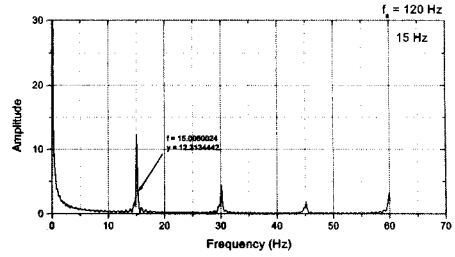


그림 3.4 40 Hz의 진동 주파수 측정 결과

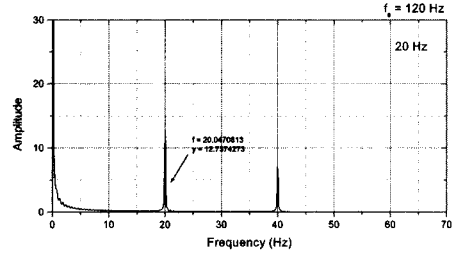
그림 3.5의 (a)~(d)는 펄스 생성기에서 나온 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 30 Hz에 대한 진동 주파수 측정 결과를 나타낸다.



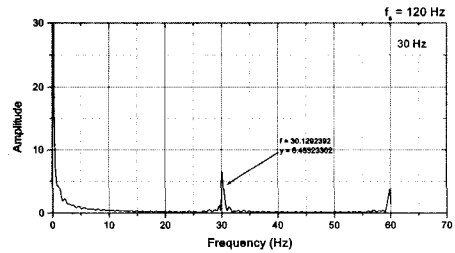
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3.5 주파수별 진동주파수 측정 결과

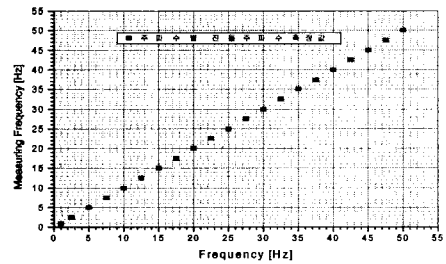


그림 3.6 주파수별로 측정된 진동 주파수

그림 3.6은 1 Hz부터 50 Hz의 사이의 주파수를 2.5 Hz 간격으로 증가시키면서 각각 측정된 진동

주파수를 나타낸다. 측정된 주파수의 불확실도가 $\pm 0.5\%$ 이내에 들어움을 실험 측정 결과를 통해 확인할 수 있다.

고속 카메라에서 약 30초 동안 영상을 획득하면 각각의 프레임은 영상 처리를 위해서 비트맵 파일로 저장되는데, 한 프레임의 크기는 약 77 kbyte이며, 30 초 동안의 전체 영상의 크기는 약 277 Mbyte가 된다. 그러나 실험을 통해 확인한 결과 진동 주파수를 처리하는데 있어서 약 8 초간 획득한 영상 데이터만으로도 정확한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서의 모든 진동 주파수는 7~8 초간 획득한 영상 데이터를 통해서 실험하였다. 결국 실험에 사용된 다이오드 레이저, 고속 카메라의 프레임 오차, 주파수 분석 프로그램 등은 신뢰할 수 있으며 주파수 측정 실험이나 변위 측정 실험의 정확성을 확신할 수 있었다.

3.4 시뮬레이터를 이용한 실제 진동 주파수 측정

이동 시뮬레이터의 진동 폭은 600 mm로 조정할 수 있고, y축의 진동 속도를 1~50 mm/sec로 설정할 수 있다. 실제 진동 주파수를 측정하기 위하여 이동 시뮬레이터의 진동 폭을 20mm로 하고, y축의 진동 속도를 40 mm/sec로하여 실험했다. 그림 3.7은 시뮬레이터의 y축 진동(대상판의 상하왕복)에 대해 측정된 결과이다.

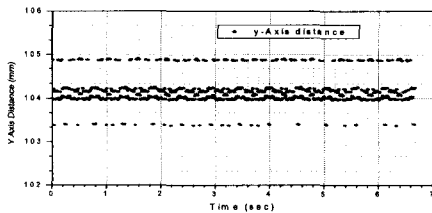


그림 3.7 y축 진동의 연속 측정

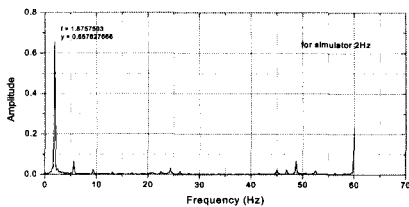


그림 3.8 시뮬레이터에 의한 진동 주파수 측정

여기서 고려할 사항은 자체 제작한 이동 시뮬레이터의 기계적 진동이 일정하지 않기 때문에 일정한 폭을 넘긴 경우가 발생할 수 있으며, 중간에 데이터를 잃는 경우도 발생할 수 있다. 결과적으로 기본 주파수는 조금씩 오차가 생길 수 있다. 그림 3.8에서 시뮬레이터의 진동주파수는 2 Hz로 예상했으나 이동 시뮬레이터의 기계적 진동주기가 일정하지 않기 때문에 진동 주파수가 변동하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 기계적인 원인으로 발생하는 진동 주파수의 측정은 여러 대역의 진동 신호 주파수가 있으며 이중 가장 큰 크기를 갖는 것이 기본 진동 주파수가 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 레이저와 고속 CCD 카메라를 기반으로 하는 영상처리 분석을 통해 고정밀도 진동 주파수를 측정하였다. 대형 구조물의 변위 측정을 모의실험하기 위해서 시뮬레이터를 제작하였고, 초당 120 프레임의 고속 카메라를 이용한 진동수 측정의 정확도 평가 실험에서는 1~50 Hz 사이의 주파수를 2.5Hz 간격으로 증가시키면서 측정된 진동 주파수가 $\pm 0.5\%$ 이내의 정확도를 가짐을 확인할 수 있었다. 이를 이용하면 대형 구조물에 대해 보다 저렴하고 간단하게 고유 진동수의 측정이 가능하다. 레이저에 의한 변위 측정 기술은 실내에서는 오차 범위 0.5 mm의 변위 측정 정밀도를 얻을 수 있으나 실외측정에서는 대기 등의 기후 영향에 의한 레이저의 굴절로 수 mm의 오차가 발생할 수 있다. 차후 디지털 필터 등을 적용하면 오차를 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한 GUI 소프트웨어를 개발하여 진동 주파수의 측정과 고정밀 3차원 변위 계측이 동시에 가능하도록 프로그램 하였다.

본 연구에서는 레이저를 이용한 변위 계측 데이터와 GPS 위성을 이용한 상대거리 계측 데이터를 비교한 결과 두 가지 측정 결과 오차가 수 mm 이내임을 확인하였다. 레이저를 이용한 거동측정기술은 연속적인 측정이 가능하며 구조물의 거동 및 변형의 종합적인 모니터링이 가능하므로 대형 구조물에 대한 상시 안전감시 및 관리를 위한 저가의 구조물 상시 첨단 모니터링 시스템으로 이용될 수 있다.

참고 문헌

[1] 윤성원, 주영규, “고층건물의 상시진동계측을 통한 고유진동수,” 한국강구조학회 논문집, 제15권, 2호, 2003년 4월.

[2] 허광희, “건설 구조물의 거동특성 평가를 위한 CCD-변위 계측법,” 산학기술협력연구논문집, 제4권, 건양대학교, 2001년.

[3] 김병태, 레이저 공학, 상학당, 1999.

[4] A. Yariv, *Optical Electronics*, Holt Rinehart and Winston Inc., 1985.

[5] 장수, 조재홍, 광학, 대응출판사, 1998.

[6] H. Gharavi and M. Mills, “Block matching motion estimation algorithm-new results,” *IEEE Trans. on Circuit and System*, May 1990, 37(5):649-651.

[7] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, Addison Wesley, 1992.

[8] 강용균, 이문진, “두 대의 GPS 수신기를 이용한 DGPS 정밀측위,” 한국지형공간정보학회논문집, 제3권, 제2호, 1995년 12월.

[9] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins, *Global Positioning System Theory and Practice*, Springer, 1992.

[10] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice Hall, 1989.

[11] 이승석, 김영길, 최재우, *Vision System*, 한국표준과학연구원, 1998.

[12] 문한규, “시설안전계측기술 99사업결과발표,” 한국표준과학연구원, 2000.

이창복(Chang-Bok Lee) 정회원



1980년 2월: 서강대학교 전자공학과 졸업

1982년 2월: 서강대학교 전자공학과 석사

1994년 2월: 서강대학교 전자공학과 박사

1982년 ~ 현재: 한국표준과학연구원 정보통신 표준센터

<관심분야> 위성이용 시각동기, 고정밀 위치측정, 위성통신, 차세대 동기망

안세호(Se-Ho Ahn) 정회원

2001년 2월 수원대학교 전자공학과 졸업

2003년 2월 국민대학교 전자공학과 석사

2003년 3월 ~ 현재: (주)엑세스텔 코리아 연구원

<관심분야> 디지털 신호처리, CDMA, 이동통신

양성훈(Sung-Hoon Yang) 정회원



1984년 2월: 광운대학교 전자공학과 졸업

1997년 2월: 충남대학교 전자공학과 석사

1984년 3월 현재: 한국표준과학연구원

<관심분야> 위성이용 시각비교, 고정밀 위치측정, 시간주파수 정밀측정, 차세대 동기망

염정원(Jeong-Won Yum) 정회원

1997년 2월: 국민대학교 전자공학과 졸업

1999년 2월: 국민대학교 전자공학과 석사

2001년 3월 현재: 국민대학교 전자공학과 박사 과정

<관심분야> 디지털 신호처리, 디지털 통신

강동욱(Dong-Wook Kang) 정회원

1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 졸업

1988년 2월: 서울대학교 전자공학과 석사

1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 박사

2000년 ~ 2001년: Lucent Technology, USA, MTS

1995년~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 부교수

<관심분야> 영상통신, 디지털방송

김기두(Ki-Doo Kim) 정회원

1980년 2월: 서강대학교 전자공학과 졸업

1988년 8월: The Pennsylvania State University, MS (Electrical Eng.)

1990년 12월: The Pennsylvania State University, Ph.D. (Electrical Eng.)

1980년 3월~1985년 12월: 국방과학연구소 연구원

1998년 2월~1999년 2월: USCD, USA 연구교수

1991년 2월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수

<관심분야> 디지털 신호처리, 디지털 통신