

# 영상처리를 이용한 정동적 변위 계측과 속도, 가속도 추산방식 연구 Measurement of Static and Dynamic Displacement by Image Processing and Study for Prediction Method of Velocity and Acceleration

허석† · 곽문규\* · 이호범\*\*

Seok Heo, Moon Kyu Kwak and Bum Ho Lee

Key Words : Low-frequency Vibration Measurement(저주파수 진동계측), Image Processing(영상처리)

## ABSTRACT

This paper is concerned with the measurement of static and dynamic displacement by image processing(IP) and study for prediction method of velocity and acceleration. To measure the displacement visually, the measurement system consists of a telephoto zoom camera, ccd image device and a computer. The specific target on the white board is used to calculate the displacement of the structure. The captured image is then converted into a pixel-based data and then analyzed numerically. The limitation of the system depends on the image capturing speed and the pixel-size of image. In this paper, we developed for the displacement measurement using the image processing method. The proposed method enables us to measure the vibration measurement, velocity and acceleration directly without any contact. The current resolution of the displacement measurement is limited to 1/100 millimeter scale.

## 1. 서 론

구조물의 변위, 속도와 가속도를 계측하는 방법으로는 가속도계, 스트레인 게이지, 지진계 등과 같이 구조물에 감지기를 부착하여 물리량을 계측하는 접촉식 방법<sup>(1)</sup>과 레이저의 도플러 효과를 이용하는 비접촉식 방법 등이 있다. 특히, 저주파수로 진동하는 지진이나 대형 구조물 진동의 경우는 지진계나 가속도계를 사용하여 진동을 계측하게 되는데, 감지기의 설치 및 계측에 많은 시간이 소요된다. 레이저 진동계측 장비를 사용하면 매우 정밀한 계측을 수행할 수 있으나 고가이기 때문에 쉽게 사용할 수 있는 장비는 아니다.

본 연구에서는 댐, 다리, 송전탑, 고층 건물, 원전구조물과 같은 대형 구조물의 장시간에 걸친 정적 변위의 변동량 또는 큰 변위를 가지고 진동하는 경우에 대해 영상처리기법을 이용해 진동변위를 추출하는 방법을 개발하여 사용하고자 한다. 다리와 같은 대형 구조물의 큰 변위 진동 계측을 위해서는 GPS 신호를 이용하는 방법<sup>(2)</sup>이 제시되기도 했지만 GPS 신호 자체의 오차와 계측 주파

수의 제약으로 인해 실용화되지는 않고 있다.

머신비전(Machine Vision)과 영상처리(Image Processing, IP)는 산업체에서 검사나 계측을 위해 활용되고 있는 방법이다. 본 연구에서는 진동하는 물체를 영상 처리하여 진동 변위 응답을 측정하는 방법을 개발하고자 영상 카메라와 PC를 이용하여 변위 계측시스템을 구축하였다. 영상처리를 이용해 진동을 계측하는 방법에 대해서는 김<sup>(3)</sup>의 연구에서 처음 시도되었다. Wahbeh<sup>(4)</sup>도 영상 데이터에 기초한 진동 변위 측정 방법을 제안하였는데 LED를 표시물로 사용하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 김<sup>(3)</sup>의 연구에서 제시한 방법을 개선하여 보다 정밀한 고속의 계산 알고리즘을 제시하였다. 또한 GUI 환경을 구축하여 실시간으로 진동계측을 수행할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

영상 처리의 응용 분야는 영화의 특수 효과, 얼굴이나 지문 인식을 통한 보안, 공장 자동화 시스템, 의학, 로봇 등과 같은 분야이다. 영상처리에 일반적으로 사용되는 카메라와 Image Grabber는 NTSC 규약에 맞추어서 초당 30 또는 60 frame으로 이미지 데이터를 출력하거나 획득할 수 있다. 따라서 이런 범용 영상처리 장비의 표본추출율(sampling rate)은 일반적으로 30Hz라고 말할 수 있다. 이것은 구조물이 3 Hz 이하 정도의 저주파

† 교신저자; 정희원, 건국대학교 기계설계학과

E-mail : heoseok@konkuk.ac.kr

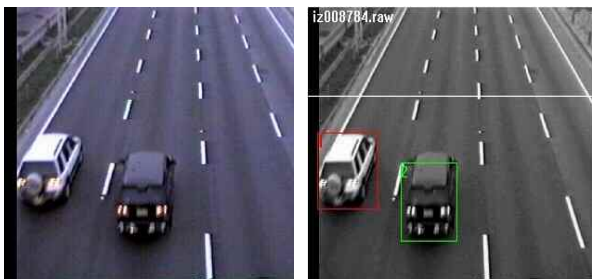
Tel : (02) 2260-8581,

\* 동국대학교 기계로봇에너지공학과 교수

\*\* ㈜쓰리텍 대표이사

수로 진동하는 경우에는 충분히 변위 계측이 가능함을 의미한다. 또한, 계측 변위의 정밀도는 화상의 pixel 수와 렌즈의 배율에 의해 결정된다.

최근에 진동물리량 계측을 위하여 GPS(Global Positioning System)을 이용하는 연구가 시도되었지만, 아직 현장에서 실용화되기에는 넘어야 할 문제점이 지적되고 있다. 본 연구를 위한 연구진들은 이미 영상으로부터 물체의 형태나 움직임을 포착하는 컴퓨터 비전(computer vision)을 기반으로 하여 도로의 자동차 대수 와 속도를 측정하는 연구 과제를 기 수행한 바 있으며(그림 1 참조) 이 연구를 통하여 CCD 카메라를 이용하여 도로를 주행하는 자동차의 수와 각 자동차의 속도를 추정할 수 있었다. 본 연구에서 개발하고자 하는 진동물리량 측정용 도로 자동차 화상 처리 시스템을 고정 표지판 측정에 활용된 예로 볼 수 있다. 국내 모 기업 연구소에서는 검증용으로 레이저 센서를 이용한 비접촉식 변위 변화 과정을 추적할 수 있는 시스템을 개발하였고, 최근에는 이를 영상처리 기반으로 한 방식으로 전환하려는 움직임이 있다.



Original Image                      Image processing

**Fig. 1** Image processing of car on the road

## 2. 연구의 필요성

본 연구의 최종 목적인 원전구조물은 원자력 에너지 공급 시스템을 포함하는 구조물로서 그 중요성이 매우 크므로 환경 변화 및 외부 교란에 대한 적극적인 대응책이 강구되어야 한다. 특히, 최근 점차 문제시 되고 있는 자연재해, 기후변화에 대한 구조적인 강성뿐만 아니라 운영 중 거동 안전성 확보가 필수적이다. 따라서 이러한 구조물은 구조안전성 평가를 위해 많은 계측 시스템(strain gage, 변위 transducer, accelerometer, 비파괴 검사기 등)을 적용하여 구조물의 변화를 오랜 시간에 걸쳐 관찰하여야 한다. 이러한 계측 작업은 작업의 특성상 현장에서 이루어져야 하나

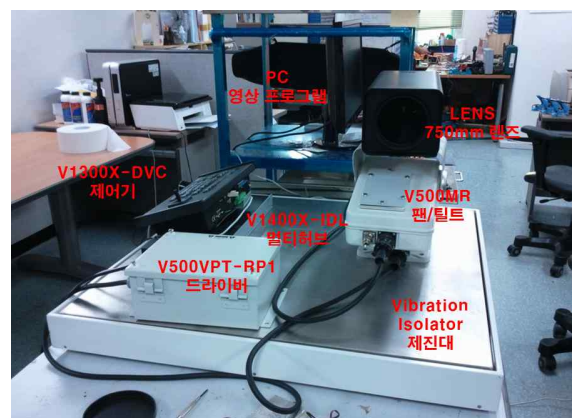
계측 시스템을 설치해야 하는 지역이 작업 접근이 어려운 지역을 주로 이용해야 하기 때문에 장시간에 걸친 정밀한 계측 작업이 쉽지 않다. 또한, 현장계측이 어려운 지점에서의 자료 도출은 그 자체로 한계성을 내재하고 있기도 하지만, 특별한 경우를 제외하고는 그 일부 지역에 대한 진단결과를 전체 구조물 거동에 적용하고 있는 것이 현실이다. 이는 결과적(기술적)으로 경우에 따라 큰 우를 범하게 되거나, 경제적으로 손실을 발생케 한다. 따라서 향후 원전구조물 건전성 평가의 신뢰성 확보와 이에 따른 경제성 회복을 목적으로 한 실용적 유지관리 선진화 기술 개발이 요구된다.

본 연구에서는 원전구조물 진동변위, 속도 및 가속도에 관한 폭 넓은 자료 취득(다 측정점의 동시 계측, 어떠한 지간에서든지 자유로운 계측점 선정)이 가능할 수 있도록 영상처리(Image Processing) 개념을 이용한 새로운 정밀 계측 시스템을 완성하여 실용화하려 한다. 본 개발 기술의 기본 logic 은 구조물의 상하, 좌우(필요 시) 방향의 변위를 Image Processing 시스템을 이용하여 실시간으로 측정하고, 그 변화를 컴퓨터 모니터에 그래프로 표현함으로써 최종적으로는 구조물의 변위, 속도, 가속도, 진동주파수를 파악할 수 있도록 하는 것이다.

## 3. 본 론

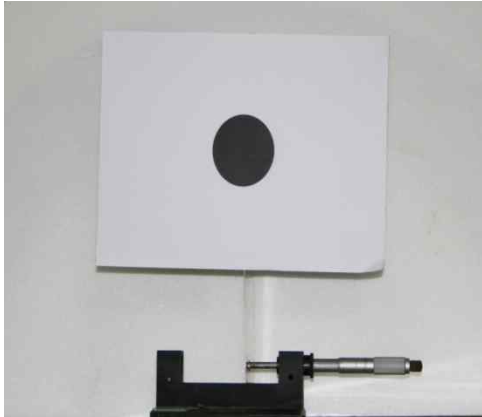
### 3.1 영상계측 시스템의 구성

영상 계측 시스템은 CCD, ZOOM-렌즈, 팬/틸트 시스템, 체진대, PC 로 구성된다. CCD 와 PC 는 IEEE 1394 로 연결되며, PC 의 GUI 프로그램은 National Instrument 의 LabView 로 작성되었다. 그림 2 는 구성된 계측 시스템을 보여준다.



**Fig. 2** Image Processing System

그림 2 는 실험에 이용한 타겟을 보여준다. 흰색 바탕의 보드에 검정색 원을 부착하여 사용하였다. 밑단에 마이크로 미터가 부착되어 있어 정적 인 움직임에 대한 변위계측 결과를 영상처리 결과와 비교할 수 있다.



**Fig. 3 Target**

그림 4 와 표 1 은 본 연구에서 사용된 CCD 의 사진 및 사양이다. 사양 중 영상 처리에 있어 가장 중요한 사항이 해상도와 샘플링 레이트이다. 해상도는 대상 구조물의 변위 정밀도에 직접적으로 영향을 미치며 샘플링 레이트는 대상 구조물이 진동하는 경우 계측할 수 있는 진동수 대역에 영향을 준다. 표 1 에서 보이는 바와 같이 CCD 장비가 초당 15 프레임을 획득할 수 있어 2Hz 미만의 진동은 충분히 계측할 수 있다. 변위 정밀도는 CCD 카메라의 해상도뿐만 아니라 줌렌즈의 배율에 의해서 결정된다.

그림 5 와 표 2 는 CCD 와 연결된 줌렌즈의 사진과 사양이다. 타겟과의 최소거리는 약 5m 이며 분해능에 따라 타겟과의 거리 조절 및 타겟의 크기를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 사용한 타겟의 크기는 원의 지름을 10mm 로 고정하였으며 실험결과 타겟과의 거리가 30m 일 때 분해능이 1/10mm 이내인 것을 확인하였다. 렌즈는 Fujinon 사의 장비로 군용으로 사용되고 있다.



**Fig. 4 Viewrun CCD**

**Table 1 Specification for CCD**

모델명	DFK 41BF02
해상도	1280x960 pixel
프레임	15 max
렌즈마운트	C/CS
통신	IEEE1394



**Fig. 5 Fujinon Telephoto-zoom Lens**

**Table 2 Specification for Lens**

모델명	D60x12.5BE-V41
초점거리	12.5~750 mm
Iris	F3.8~T3000
줌	Servo motor drive
포커스	Servo motor drive
Iris	Auto or Remote
무게	5.1 kg



**Fig. 6 PAN/TILT device**

**Table 3 Specification for PAN/TILT**

분해능 오차	0.1°
TILT	+ 30° ~ -90°
PAN	360° 연속회전
적재중량	50 kg

그림 6 과 표 3 은 렌즈를 상하좌우로 움직일 수 있는 PAN/TILT 시스템의 사진과 사양을 보여준다. 이 장비는 -20°C~60°C 온도영역에서도 사용 가능하며 IP66 인증을 받았다. 자체중량이 8.5kg

으로 다이캐스팅된 재질로 만들어졌다. AC Servo motor 를 이용하여 구동되며 모터 드라이버와 RS-422 통신을 사용한다. PAN/TILT 시스템은 전용 제어장치가 있는데 동작거리는 최대 8km 이며 제어장치에서 렌즈의 줌, 포커스, Iris 제어가 가능하다.

본 연구에서는 제진대를 사용하였는데 이유는 먼 거리에 있는 타겟을 줌렌즈를 이용하여 계측할 때 외부에서 발생한 진동의 영향을 제거하기 위한 것이다. 크기는 800x 800mm 이며 제진효율은 10Hz 이하 95%, 20Hz 이하 98%이다.

### 3.2 영상계측 시스템을 이용한 실험

초기에 개발한 영상 계측 시스템은 비주얼 베이직을 이용하여 프로그래밍되었으며 타겟은 삼각형을 이용하여 실험을 수행하였다. 그림 7~9 은 프로그램의 화면과 실제 실험장면을 보여준다.

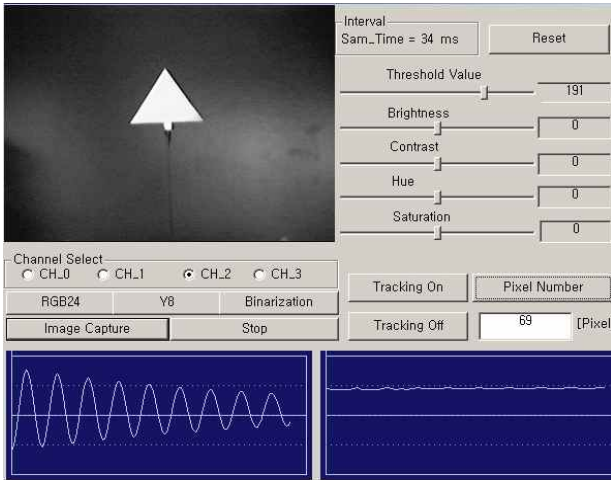


Fig. 7 Image processing by Visual basic program

실험 8에서는 H-beam 을 구조시험기를 이용하여 단위 하중별 변위계측을 수행하였다. 다이얼게이지와 LVDT 를 구조물의 중앙 아래에 장착하여 변위를 계측하였다. 또한, 영상처리 시스템은 중앙에 지름 32mm 원형과 한 변 32mm 정삼각형을 타겟으로 부착하여 변위를 계측하였다. 그림 10 은 하중에 대한 변위계측 결과를 보여준다. 이 때 사용한 CCD 의 해상도는 640x480 이며 pixel 당 8.5/100mm 의 분해능을 확보하였다. 렌즈는 일반 50mm 줌-렌즈를 이용하였다.

현재 개발하여 사용중인 영상 처리 시스템은 그림 16 과 같이 LabView 를 이용하여 프로그래밍하였다.

그림 2 의 시스템을 이용하여 그림 3 의 타겟을 부착한 마이크로 미터를 0.1mm 단위로 0~1mm

까지 이동시키고, 1mm 단위로 1~4mm 까지 이동시켜서 각각의 이동 위치마다 그림 11 의 영상 계측 프로그램을 이용하여 영상 계측 변위 결과를 저장하고 정적인 변위의 변화에 대한 계측결과를 비교하여 그림 12 에 도시하였다. 분해능은 pixel 당 0.0119mm 를 나타내었다.

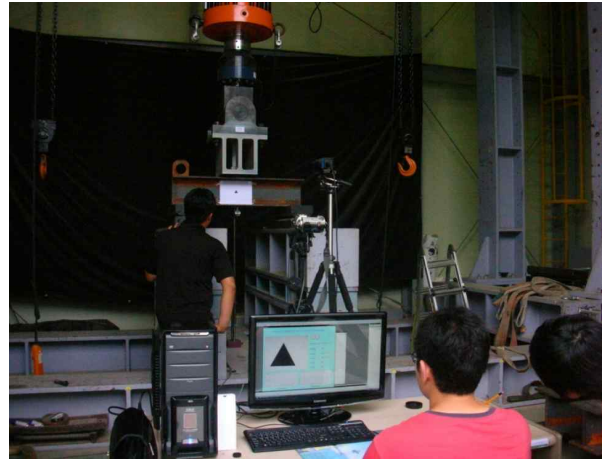


Fig. 8 Experimental setup

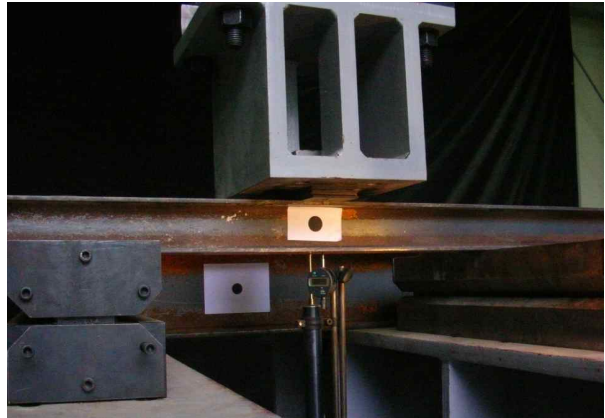


Fig. 9 Displacement measurement by IP, LVDT, and dial gauge, respectively

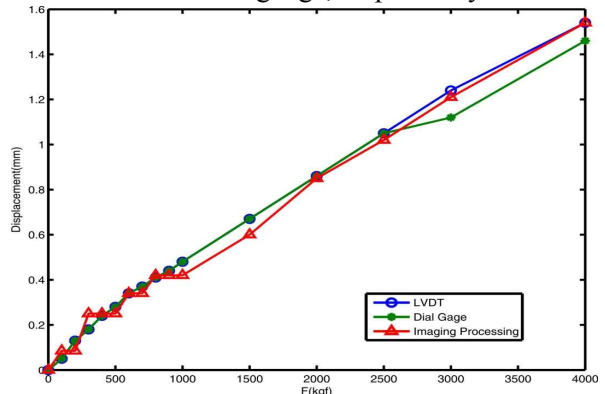
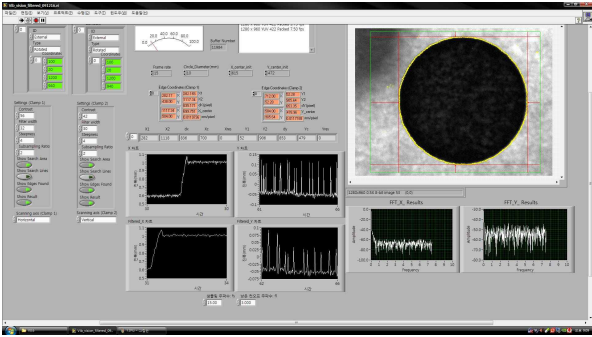
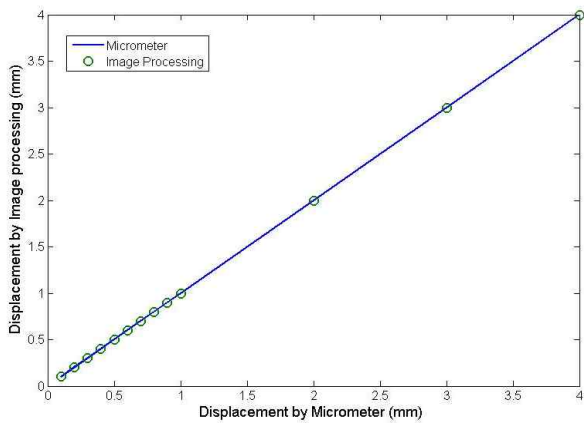


Fig. 10 Curves for displacement and loaded weight using IP, LVDT and Dial gauge

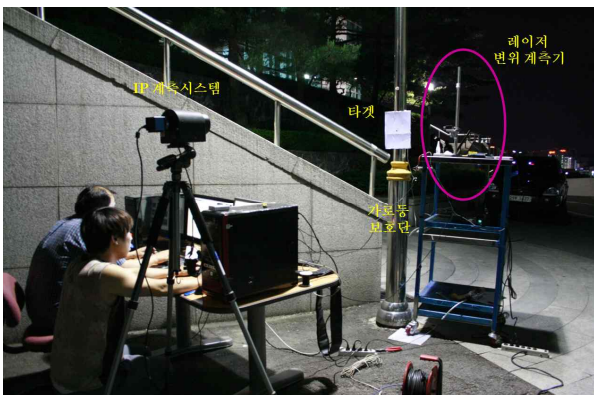


**Fig. 11** Measurement Program by LabView

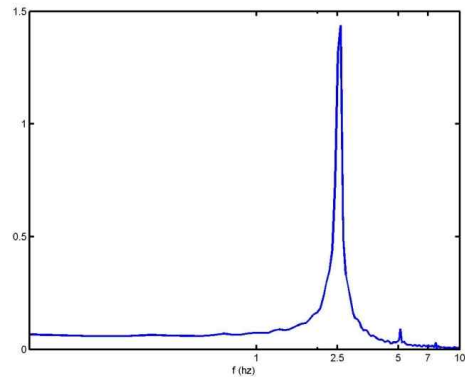


**Fig. 12** Displacement by IP and Micrometer

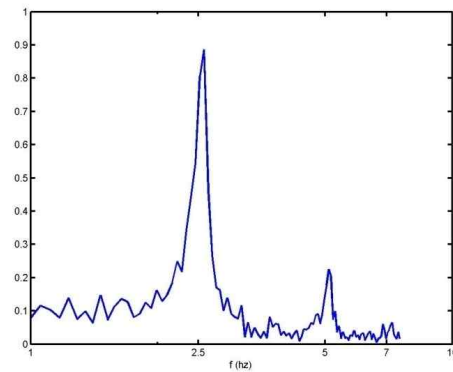
그림 13에서는 야간에 가로등을 이용하여 타겟을 부착하고 레이저 변위 장비와 가속도계를 타겟의 원형위치에 위치시켜서 그 신호를 dSPACE DS1104를 이용하여 10kHz 샘플링주파수로 데이터를 획득하였다. 얻어진 데이터는 Power spectrum density(PSD)를 통하여 주파수를 추출하였다. 또한 15 프레임의 CCD를 이용한 영상계측 시스템을 이용하여 PSD를 확인한 결과와 비교되었다. 그 결과는 그림 14에 나타내었다. 가로등은 2.5Hz와 5Hz의 주파수 성분을 나타내었으며 두 시스템의 계측결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.



**Fig. 13** Experimental setup for Street light



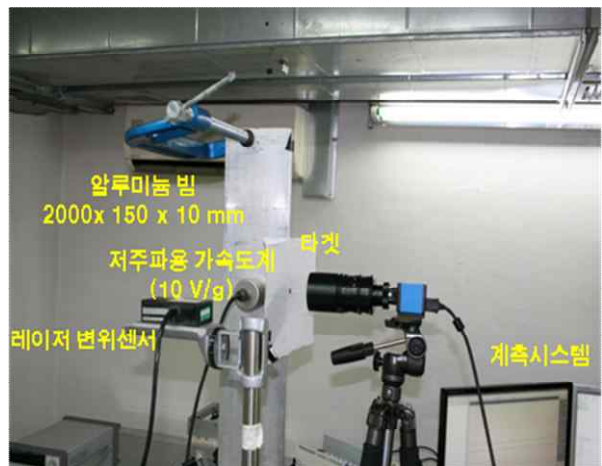
**(a) PSD by DS1104(dSPACE)**



**(a) PSD by IP**

**Fig. 14** Comparison of PSD by Image processing system and Vibration measurement system

그림 15는 실험실내에서 2m 길이의 외팔보에 10mm 지름의 타겟을 부착하여 영상계측을 수행하였다. 또한, 저주파용 가속도계(10V/g)와 레이저 변위 계측 장비를 이용하여 계측된 변위와 가속도를 영상계측 결과와 비교하였다.



**Fig. 15** Experimental setup

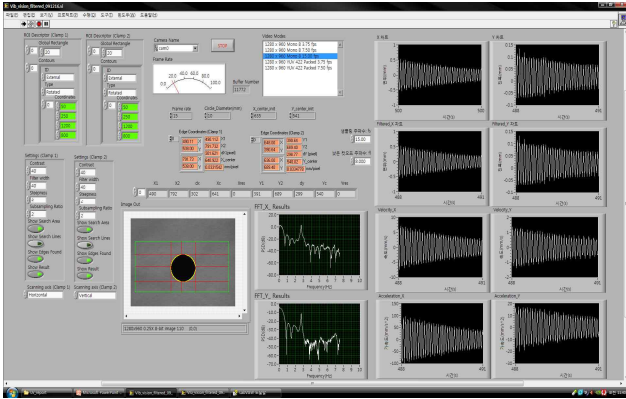


Fig. 16 Measurement Program by LabView

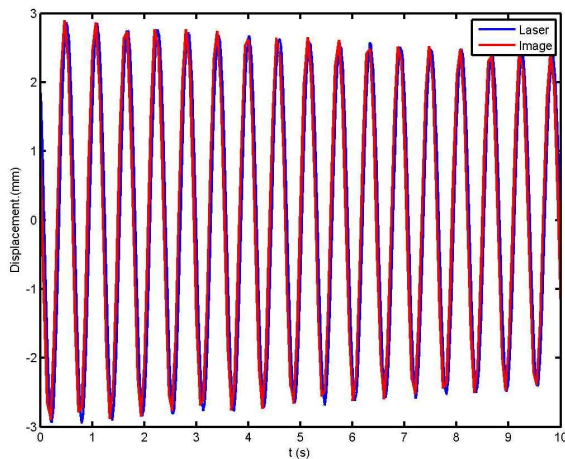


Fig. 17 Displacement curves for Laser vs. IP

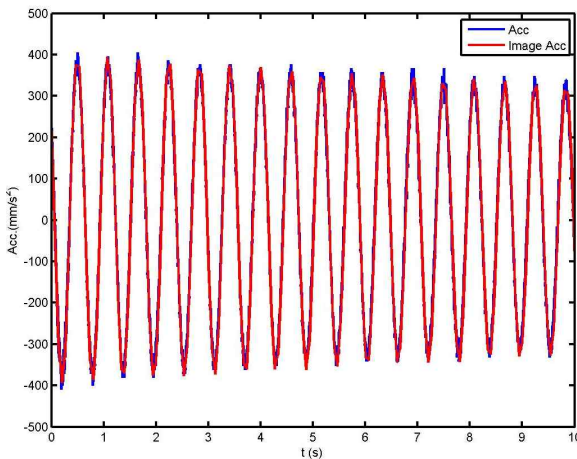


Fig. 18 Acceleration curves for Accelerometer vs. IP

그림 16은 계측된 영상처리 프로그램을 보여준다. 화면의 오른쪽 위의 2개 창은 X, Y 변위 그래프이며, 제일 아래로부터 위로 2개의 창은 속도와 가속도 그래프를 보여준다. 또한 중앙의 2개 그래프는 PSD 결과를 보여준다. 그림 17은 레이저 변위 계측기와 IP에 의해 계측된 변위 계측

결과를 보여준다. 그림 18은 가속도계와 IP에 의한 가속도 계측결과를 보여준다. 변위 및 가속도 계측은 CCD의 해상도 및 프레임을 고려한 범위 내에서 충분히 실용적임을 보여주고 있다.

#### 4. 결론

현재 원전구조물의 진동물리량 계측은 제한적이고 수동적으로 평가되며, 사용되는 계측 시스템 또한 여러 가지 기술적인 단점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 단점을 보완한 새로운 현장 적용이 가능한 변위 계측 시스템이 요구된다. 원전 구조물의 안전성 판단을 위해 보다 현실적인 상시 또는 주기적인 원전구조물 계측이 요구된다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위하여 본 연구에서 제안한 영상 처리 계측 시스템은 원형의 타겟을 CCD를 이용하여 pixel 계산을 수행하고 이 결과를 분해능으로 환산하여 변위를 추출하였다. 계측된 변위 데이터를 기반으로 속도, 가속도, PSD에 대한 계산을 통하여 사용자가 한 화면에서 그래프로 확인할 수 있도록 프로그래밍 하였다. 여러 검증 실험을 통하여 상당히 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 원전구조물과 댐에 다수의 타겟을 설치하여 하나의 영상 처리 시스템으로 구조물의 변위를 계측하는 실험을 수행할 예정이다.

#### 후 기

본 연구는 “원전구조물 건전성 감시 시스템 개발”의 지원에 의하여 이루어졌으며 관계자 분들께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Holman, J.P., 1994, Experimental Methods for Engineers, 6th ed., Mc-Graw Hill Book Co.
- (2) 서대완, 이영재, 박훈철, 윤광준, 지규인, 박찬국, 2000, “GPS 반송파를 이용한 구조물의 3차원 진동 측정”, 소음진동 학술대회 논문집 p. 1303~1310,
- (3) 김기영, 곽문규, 2005, “영상 처리 방법을 이용한 구조물의 큰 변위 저주파 진동 계측”, 한국소음진동공학회 논문집, 제 15 권 제 3 호, pp. 329-333.
- (4) Wahbeh, A.M., Caffrey, J.P., and Masri, S.F., 2003, "A Vision-based Approach for the Direct Measurement of Displacements in Vibrating Systems," Smart Structures and Materials, Vol. 12, pp. 785-794.