

Digital Image Correlation기법을 이용한

구조물의 다중 동적변위응답 측정

Multi-point Dynamic Displacement Measurements of Structures Using Digital Image Correlation Technique

김성완¹⁾ · 김남식²⁾

Kim, Sung-Wan · Kim, Nam-Sik

국문 요약 >> 최근 대형구조물의 유지관리에 대한 관심이 커지고 있으며 자연재해, 구조물의 노후 등으로 구조적 안전성의 검토가 요구되는 대형구조물의 수가 급증하고 있는 실정이다. 실제 사용하고 있는 구조물의 구조적 특성은 최초 설계 당시의 특성과 차이점을 보이는 것이 일반적이며 부재의 균열 및 구조물의 노후화 등으로 인한 강성저하에 의하여 구조물의 동특성에 변화가 나타날 수 있다. 구조물의 동특성의 변화를 관찰하면 손상의 위치를 파악할 수 있으며 정량적 평가 또한 가능하다. 교량, 건물 등 구조물 모니터링에 사용되는 대표적 측정장비가 동적계측기이다. 현재 구조물 동적계측기는 각 센서와 계측기를 1:1로 연결하는 방식을 취하고 있어 많은 케이블 작업을 필요로 하기 때문에 센서를 부착하지 않고 원거리에서 진동을 측정하는 방법이 필요하다. 구조물의 동적응답 계측을 위하여 적용 가능한 비접촉식 방법으로는 레이저의 도플러효과 및 GPS를 이용하는 방법 등이 있으나 비경제적이기 때문에 교량구조물에 적용하기에 보편적이지 못하다. 그러나 영상 이미지를 이용하는 방법은 경제적이며 접근이 어려운 구조물의 진동 및 동특성 추출에 적합하다. 기존에도 센서를 대신하여 카메라의 영상신호를 이용하는 연구가 수행되었으나 구조물에 부착된 target의 한 지점을 기록한 후 이미지 처리기법을 이용하여 변위응답을 측정하는 방법으로서 측정 대상이 비교적 국한적일 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안한 DIC(Digital Image Correlation)기법을 이용한 다중 변위응답 측정기법을 검증하기 위하여 실내모형실험을 수행하였다.

주요어 디지털 이미지 연관기법, 이미지 처리기법, 변위응답, 다중 측정

ABSTRACT >> Recently, concerns relating to the maintenance of large structures have been increased. In addition, the number of large structures that need to be evaluated for their structural safety due to natural disasters and structural deterioration has been rapidly increasing. It is common for the structural characteristics of an older large structure to differ from the characteristics in the initial design stage, and changes in dynamic characteristics may result from a reduction in stiffness due to cracks on the materials. The process of deterioration of such structures enables the detection of damaged locations, as well as a quantitative evaluation. One of the typical measuring instruments used for the monitoring of bridges and buildings is the dynamic measurement system. Conventional dynamic measurement systems require considerable cabling to facilitate a direct connection between sensor and DAQ logger. For this reason, a method of measuring structural responses from a remote distance without the mounted sensors is needed. In terms of non-contact methods that are applicable to dynamic response measurement, the methods using the doppler effect of a laser or a GPS are commonly used. However, such methods could not be generally applied to bridge structures because of their costs and inaccuracies. Alternatively, a method using a visual image can be economical as well as feasible for measuring vibration signals of inaccessible bridge structures and extracting their dynamic characteristics. Many studies have been conducted using camera visual signals instead of conventional mounted sensors. However, these studies have been focused on measuring displacement response by an image processing technique after recording a position of the target mounted on the structure, in which the number of measurement targets may be limited. Therefore, in this study, a model experiment was carried out to verify the measurement algorithm for measuring multi-point displacement responses by using a DIC (Digital Image Correlation) technique.

Key words Digital image correlation technique, Image processing method, Displacement response, Multi-point measurement

¹⁾ 부산대학교 사회환경시스템공학부, 석사과정

²⁾ 정회원·부산대학교 사회환경시스템공학부, 부교수, 공학박사
(교신저자: nskim@pusan.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 3. 12 / 수정일 : 2009. 4. 22 / 게재확정일 : 2009. 4. 22)

1. 서론

최근 대형구조물의 유지관리에 대한 관심이 커지고 있으며 자연재해, 구조물의 노후 등으로 구조적 안전성의 검토가 요구되는 대형구조물의 수가 급증하고 있는 실정이다. 성능이 저하된 구조물, 노후화된 구조물 등에서 안전성이 불확실하여 대형 참사를 유발할 가능성이 있다. 따라서 이를 미연에 방지하기 위한 대비책 및 보수보강 대책을 강구하여 인명과 경제적 손실을 방지하기 위해 대형구조물의 현재 상태를 효율적으로 추정하는 것은 매우 중요한 문제이다. 실제 사용하고 있는 구조물의 구조적 특성은 최초 설계 당시의 특성과 차이점을 보이는 것이 일반적이며, 부재의 균열 및 구조물의 노후화 등으로 인한 강성저하에 의하여 구조물의 동특성에 변화가 나타날 수 있다. 구조물의 동특성의 변화를 관찰하면 손상의 위치를 파악할 수 있으며 정량적 평가 또한 가능하다. 이러한 동특성은 구조물의 실제 거동상태에서 분석되어야 하며, 손상부위를 찾고 손상정도를 정확히 식별하는 것은 중요한 문제이다. 따라서 구조물의 동특성의 변화를 추정하려면 구조물의 실제 거동을 모니터링할 수 있는 시스템과 해석기법이 필요하다.

교량, 건물 등 구조물 모니터링에 사용되는 대표적 계측장비가 동적계측기이다. 현재 구조용 동적 계측에 사용되는 대부분의 계측기가 기계분야를 그 주된 계측목적으로 개발된 장비이기 때문에 토목 및 건축 분야에 적용하기에는 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 이러한 기존의 동적계측기는 교량의 길이가 50m 이상일 경우 신뢰할 만한 데이터를 수집하기 어려우며 각 게이지와 계측기를 1:1로 연결하는 방식을 취하고 있어 많은 케이블 설치 작업을 필요로 한다. 또한 전기저항식 변형률센서(Foiled Strain Gauge)를 사용할 경우 전기적인 노이즈로 인한 제약조건이 많으며, 구조물에 설치 후 지점에서 지점으로 이동이 불가능하고, 재사용할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 센서를 부착하지 않고 원거리에서 진동을 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

구조물의 동적응답 계측을 위하여 적용 가능한 비접촉식 방법으로는 레이저의 도플러효과 및 GPS를 이용하는 방법 등이 대표적이다. 레이저를 이용하는 방법⁽¹⁾은 정확도가 상대적으로 높지만 비경제적이며 GPS를 이용하는 방법^{(2),(3)}은 신호 자체의 오차와 데이터 취득속도(Sampling Rate)의 제약으로 인하여 교량구조물에 적용하기에 보편적이지 못하다. 그러나 영상 이미지를 이용하는 방법은 경제적이며 접근이 어려운 구조물의 진동 및 동특성 추출에 적합하다. 기존에도 센서를 대신하여 카메라의 영상신호를 이용하는 연

구⁽⁴⁻⁶⁾가 수행되기도 하였다. 그러나 기존의 방법은 구조물에 부착된 target의 한 지점을 기록한 후 이미지 처리 기법을 이용하여 변위응답을 측정하는 방법으로서 측정 대상이 비교적 국한적일 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 DIC(Digital Image Correlation)기법^{(7),(8)}을 사용하여 다중 변위응답을 측정할 수 있는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 실내모형실험을 수행하였다.

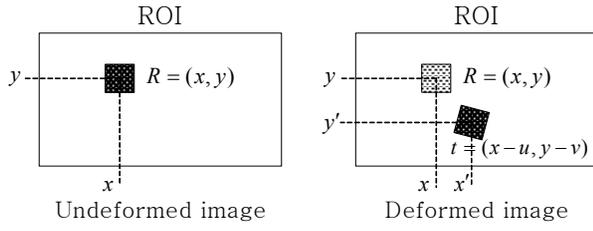
2. 이론적 배경

2.1 DIC(Digital Image Correlation)기법

물체가 빛에 의해 비춰지고 있는 상황에서 변형이 있다면 물체 표면의 디지털 이미지란 단지 불연속적인 빛의 강도에 대한 정보의 기록으로 볼 수 있다. 이 빛의 강도는 신호의 비트 수에 따라 결정되며 단위픽셀의 값으로 나타낸다. 일반적으로 사용되는 8비트 신호에 대한 빛의 강도는 0에서 255사이의 레벨로 구분되는 명암을 가지게 되며 픽셀이 차지하는 물체의 크기는 사용된 렌즈의 초점거리에 의해서 결정된다.

DIC기법은 최근 실험역학분야에서 물체 표면의 변위를 측정하기 위해 널리 사용되고 있으며 그 기본 원리는 변형 및 변형되지 않는 이미지 사이의 최대상관관계를 찾는 것이다. DIC기법에서 사용되는 상호상관(Cross Correlation)은 두 개의 다른 이미지를 검출하기 위하여 변형되지 않는 이미지와 비교하는 고전적인 방법이다. 상호상관은 유클리디안 거리(Euclidean Distance)를 이용하여 이미지와 등록된 target의 상관성을 구하며 입력된 패턴에 따라 노이즈 제거, 확대, 축소, 회전 등을 하여 패턴을 정규화한다. 그러나 이미지 강도 변화에 의한 매칭을 변화, 등록 패턴의 크기에 따라 결과 값이 변화하는 단점이 있다. 정규상호상관(Normalized Cross Correlation)은 빛과 조명의 변화에 둔감하며, 비율 및 회전의 변화에 대해 불변한 특성을 가지며 임계한계(Threshold Limit)를 설정할 수 있는 장점이 있으므로 본 연구에서는 정규상호상관을 적용하였다.

정규상호상관은 2차원 ROI(Region of Interest) 함수 R 과 target 함수 t 에 의해 나타난 요구된 패턴의 위치를 계산하기 위한 간단한 매칭 방법이다. Target은 그림 1에서와 같이 변형이 없는 이미지의 ROI 사이의 (x, y) 는 픽셀에 의해 이동되며 변형이 있는 이미지의 target이 $(x-u, y-v)$ 의 좌표변화를 하여 ROI에 최적으로 매칭 되는 곳의 정보를 제공하기 위하여 상관관계단계를 형성한다. 패턴 매칭 적용에서 변형이 없는 이미지에서 시간에 따라 변형이 있는 이



〈그림 1〉 변형 전 및 후의 이미지의 픽셀 좌표

미지는 픽셀단위로 비교된다.

최대 정규상호상관계수 γ_{\max} 의 값과 일치하는 픽셀의 위치 (u, v) 는 ROI $R(x, y)$ 에 target이 최적으로 매칭 되는 위치에 해당된다. 이 과정은 변형이 없는 이미지가 변형이 없는 이미지로 상관관계를 가질 때까지 모든 변형이 있는 이미지에서 포함된 ROI $R(x, y)$ 를 지나 계속된다. $R(x, y)$ 에서 픽셀 (x, y) 는 0에서 $M_x - 1$, $M_y - 1$ 사이의 명암의 레벨을 가지며 이미지 R 은 $M_x \times M_y$ 의 레벨로 구분되는 명암에 대한 정보이다. 유사하게 $t(x, y)$ 에서 (x, y) 는 0에서 $N_x - 1$, $N_y - 1$ 사이의 레벨의 명암을 가지며 이미지 t 는 $N_x \times N_y$ 의 레벨로 구분되는 명암에 대한 정보이다. 여기에서 $N_x \leq M_x$, $N_y \leq M_y$ 로 정의된다. 정규상호상관은 R 과 t 에 대한 모든 지점 (u, v) 에 대해 계산되며 정규상관관계계수는 상관관계행렬에 저장된다. 정규상관관계계수 $\gamma_{u,v}$ 는 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\gamma_{u,v} = \frac{\sum_{xy} (R(x,y) - \bar{R}_{u,v})(t(x-u, y-v) - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{xy} (R(x,y) - \bar{R}_{u,v})^2 \sum_{xy} (t(x-u, y-v) - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

여기서 u, v 는 0에서 $M_x - N_x$, $M_y - N_y$ 사이의 명암의 레벨을 가지며, $\bar{R}_{u,v}$ 는 (u, v) 단계에 의해 이동된 target t 의 구역 내에서 $R(x, y)$ 의 명암에 대한 평균값으로 나타내어지며, 다음 식 (2)와 같이 정의 된다.

$$\bar{R}_{u,v} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=u}^{u+N_x-1} \sum_{y=v}^{v+N_y-1} R(x, y) \quad (2)$$

$\bar{t}_{u,v}$ 는 (u, v) 단계에 의해 이동된 target t 의 구역 내에서 $t(x-u, y-v)$ 의 명암에 대한 평균값으로 식 (3) 처럼 정의 된다.

$$\bar{t}_{u,v} = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{x=u}^{u+N_x-1} \sum_{y=v}^{v+N_y-1} t(x-u, y-v) \quad (3)$$

정규상호상관계수 값은 -1에서 +1사이의 값을 가지며, +1일 경우는 완전히 일치함을 뜻하고, -1일 경우는 모양은

동일하나 위상이 역전된 경우를 나타내며, 0인 경우는 완전히 상관관계가 없음을 나타낸다.

식 (1)에서 정규상호상관을 계산하기 위해 필요한 계산량의 감소를 위하여 Lewis⁽⁹⁾가 제시한 두 개의 sum-table을 사용하였다. Sum-table은 주어진 식에서 수치를 구하기 위해 필요한 덧셈 또는 곱셈의 연산수의 감소 및 참조 표처럼 실행되는 사전에 계산된 데이터 구조이며, 전체 이미지의 이산화된 형태이다.

마이너스가 아닌 x, y 와 적분할 수 있는 2차원 함수를 $R(x, y)$ 라고 하면, R 의 전체 이미지는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$I(u, v) = \int_{x=0}^u \int_{y=0}^v R(x, y) dy dx \quad (4)$$

여기서 u 와 v 는 R 의 범위로 정의되며, $I(u, v)$ 는 u, v 범위에서 $R(x, y)$ 의 적분 변환이다. 식 (4)는 외연적분을 계산하기 위하여 사용된다.

$$\int_{x=x_a}^{x_b} \int_{y=y_a}^{y_b} R(x, y) dy dx = I(x_b, y_b) + I(x_a, y_a) - I(x_a, y_b) - I(x_b, y_a) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 이산화된 형태로 정의하면

$$I(x, y) = \sum_{x'=0}^x \sum_{y'=0}^y R(x', y') \quad (6)$$

$$\sum_{x=x_a}^{x_b} \sum_{y=y_a}^{y_b} R(x, y) = I(x_b, y_b) + I(x_a - 1, y_a - 1) - I(x_a - 1, y_b) - I(x_b, y_a - 1) \quad (7)$$

여기서, 식 (6)은 식 (4)에 대한 해석적 적분의 수치 근사 값과 일치한다. 디지털 이미지에서 $R(x, y)$ 는 (x, y) 픽셀에서의 명암에 대한 정보이며, 식 (6)은 명암이 가지는 레벨의 크기로 나타난다. 식 (6)에서 정의된 것처럼 sum-table 기호를 $s(x, y) = I(x, y)$ 사용하면, 식 (1)에서의 분모의 $\sum_{xy} R(x, y)$ 및 $\sum_{xy} R^2(x, y)$ 계산에 보다 효과적이다.

$$\sum_{x=u}^{u+N_x-1} \sum_{y=v}^{v+N_y-1} R(x, y) = s(u+N_x-1, v+N_y-1) + s(u-1, v-1) - s(u-1, v+N_y-1) - s(u+N_x-1, v-1) \quad (8)$$

$$\sum_{x=u}^{u+N_x-1} \sum_{y=v}^{v+N_y-1} R^2(x, y) = s^2(u+N_x-1, v+N_y-1) + s^2(u-1, v-1) - s^2(u-1, v+N_y-1) - s^2(u+N_x-1, v-1) \quad (9)$$

$$s(u, v) = R(u, v) + s(u-1, v) + s(u, v-1) - s(u-1, v-1) \tag{10}$$

$$s^2(u, v) = R^2(u, v) + s^2(u-1, v) + s^2(u, v-1) - s^2(u-1, v-1) \tag{11}$$

여기서, 식 (10)은 이미지에 대한 전체범위에 대한 sum-table의 빠른 계산이 가능한 반복적인 관계에 의한 조건이며 식 (11)과 유사하다. 일단 sum-table $s(u, v)$ 및 $s^2(u, v)$ 전체 이미지에 대해 계산되면 sum-table은 식 (8) 및 식 (9)에 대하여 사전에 계산된 참조표로서 수행된다. 따라서 각 픽셀의 이동에 대한 정규상호상관을 계산하기 위한 계산량이 감소한다.

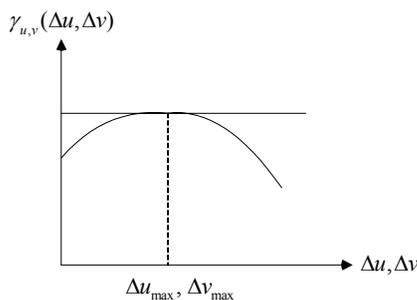
2.2 단위픽셀이하 계산(Sub-pixel Estimation)

구조물의 변위나 변형에 의해 발생하는 기하학적인 오차를 보정하기 위하여 변형이 없는 이미지와 변형이 있는 이미지의 기준점에 대한 좌표변화를 하여 두 이미지 사이의 변환 함수(Transform Function)를 구하게 된다. 이 변환 함수를 사용하여 변형 및 변위가 발생한 이미지를 발생하지 않는 이미지 기준으로 픽셀의 위치를 변환하게 된다.

변위를 구하기 위해서는 변형이 없는 이미지와 변형이 있는 이미지 사이의 변환 함수를 구해야 한다. 변환 함수로 사용되는 함수로는 선형적인 움직임만을 나타낼 수 있는 유사 함수(Affine Function), 작은 변형에 적합한 투영 함수(Projection Function), 비선형적인 변형과 움직임에 적용할 수 있는 다항 함수(Polynomial Function)가 있다. 본 연구에서는 변형과 같은 비선형적인 거동에 적합하도록 다음 식 (12)와 같은 2차 다항식을 사용하여 픽셀이하를 계산 하였다.

$$\gamma_{u,v} = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 \tag{12}$$

그림 2와 같이 픽셀이하 이동 벡터는 $(\Delta u_{\max}, \Delta v_{\max})^T$



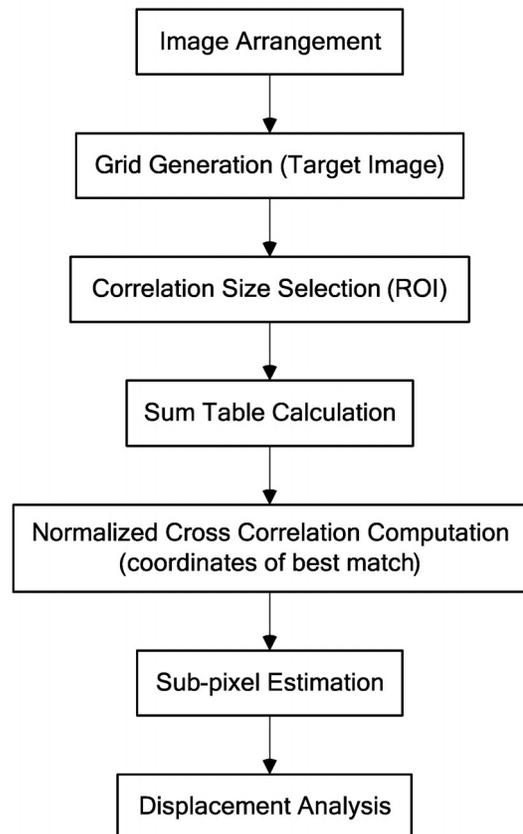
<그림 2> 단위픽셀이하 계산

는 다항식의 미분으로부터 다항 함수의 최대 위치로 계산되며 다음 식 (13)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{d\gamma_{u,v}}{dx} \\ \frac{d\gamma_{u,v}}{dy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} a_2 \\ a_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 2 \cdot a_5 & a_4 \\ a_4 & 2 \cdot a_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \Delta u_{\max} \\ \Delta v_{\max} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{13}$$

2.3 DIC기법을 이용한 다중 변위응답측정 알고리즘

그림 3은 DIC기법을 이용한 변위응답측정 알고리즘이며 총 7단계로 분류된다. 획득된 이미지를 시간순서대로 배열한 후, 변형이 없는 이미지에서 target 이미지의 변위를 알고 싶은 지점, 즉 기준점을 지정한다. 상관관계 크기를 결정하기 위하여 ROI를 설정한 후, 정규상호상관의 계산량의 감소를 위해 sum-table을 계산한다. Target 이미지가 ROI에 최적으로 매칭 되는 곳에서 정규상호상관을 계산하며, 단위픽셀이하에는 2차 다항식 함수를 사용하여 1/10000픽셀 단위로 계산된다. 본 연구에서는 위에 설명된 변위측정 알고리즘을 MATLAB7.0을 이용하여 자동화된 프로그램을 작성하여 사용하였다.



<그림 3> DIC기법을 이용한 변위응답측정 알고리즘

3. 모형실험을 통한 검증

본 연구에서는 각 target의 변위응답을 측정하고, 측정된 변위응답의 타당성을 검증하기 위하여 주요 모드가 3개(1차 모드: 0.47Hz, 2차 모드: 4.53Hz, 3차 모드: 10.30Hz)⁽¹⁰⁾인 실험모형을 그림 4와 같이 제작하였다. 표 1은 실험모형의 제원이다.

센서의 설치위치는 그림 5와 같이 구조물의 동특성을 알아보기 위해 질량(Mass1, Mass2, Mass3)에 가속도센서와 target을 설치하였고, DIC기법을 이용한 변위응답을 검증하기 위하여 카메라 화상 중심에서 왜곡영상이 큰 target의 위치에 레이저 변위계를 설치하였다.

실험은 일반 휴대용 디지털 캠코더(Samsung VM-HMX 10A)를 사용하여 720×480의 픽셀크기의 영상을 초당 60 프레임(Frame per Second)으로 촬영하였으며 가속도센서(PCB 393BO4) 및 레이저 변위계(LTMB265)는 데이터 취득속도 100Hz로 동시에 계측하였다. 실험을 수행하기에 앞서 target의 길이에 대응하는 픽셀의 값을 계측하였다. 그 결과 target의 크기는 85mm이고 이에 상응하는 픽셀은 32

개이므로 한 픽셀의 해상도는 2.65625mm가 된다.

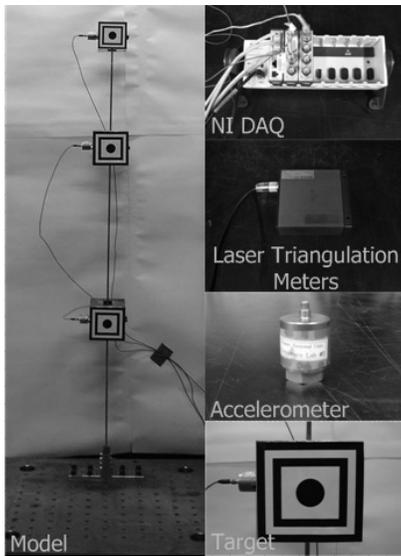
각각의 target의 기준점에 대한 변위 시간이력을 추출하기 위하여 그림 3에서 제시한 알고리즘이 적용되었으며, 알고리즘의 정확도와 정밀도를 확인하기 위하여 식 (14)의 percent error와 식 (15)의 RMS(Root Mean Square) error 및 식 (16)의 system error를 사용하여 오차분석을 수행하였다.

$$Percent\ error = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_m - \delta_c)^2}{\sum_{i=1}^n (\delta_m)^2} \quad (14)$$

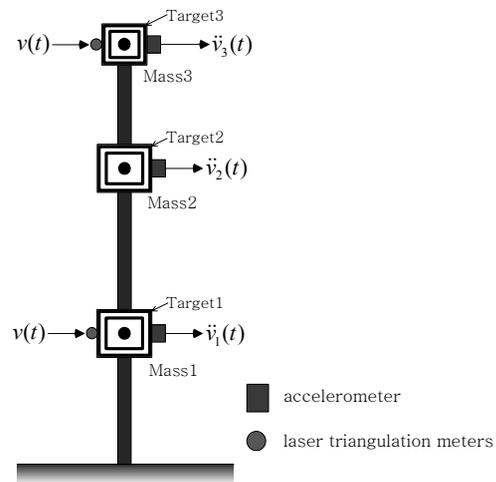
$$RMS\ error = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_c - \delta_m)^2}{n}} \quad (15)$$

$$SYSTEM\ error = S\ error / Max.\ Displacement \quad (16)$$

여기서 n 은 계측 데이터 수, δ_m 는 레이저 변위계에 의해 계측된 변위응답이며, δ_c 는 DIC기법에 의해 추출된 변위응답이다.



〈그림 4〉 센서 및 target이 설치된 실험모형



〈그림 5〉 센서 및 target의 부착 위치

〈표 1〉 실험 모형 제원

Quantity		Unit	Value
Young's Modulus		(N/mm ²)	2.1×10 ⁵
Density		(ton/m ³)	7.85
Length		(mm)	1260
Thickness		(mm)	5
Lumped Mass	Mass1	(kg)	10
	Mass2	(kg)	10
	Mass3	(kg)	5

3.1 DIC기법 알고리즘 검증

DIC기법 알고리즘을 검증하기 위하여 카메라 화상 중심을 Mass3에 고정시키고 3회의 실험을 수행하였다. Mass3에 초기변위 약 10, 8, 6mm로 자유진동실험을 수행하여 레이저 변위계의 응답과 DIC기법 알고리즘을 적용하여 얻은 변위응답과 비교하였다.

그림 6은 DIC기법 알고리즘과 레이저 변위계에 의해 측정된 변위응답을 비교한 것이다. 표 2에서 보면 변위응답에 대한 percent error에 대한 오차율이 0.5% 이내이나 RMS error는 초기 변위에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 system error의 값이 거의 일정하므로 오차가 매우 적은 것으로 판단되며 DIC기법 알고리즘에 의한 변위응답이 비교적 양호한 것으로 나타났다.

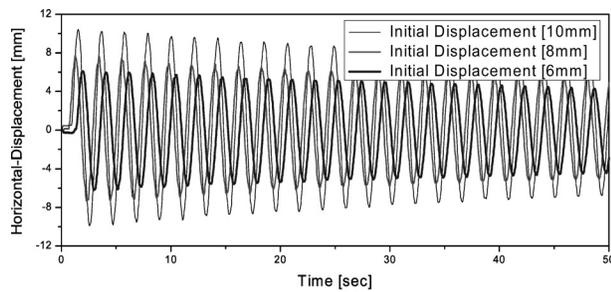
3.2 카메라의 화상왜곡 영향

카메라를 통하여 입력되는 영상은 카메라의 외부와 내부의 영향에 의해서 왜곡이 발생하여 실제 이미지와는 다른 형태의 영상으로 나타날 수 있다. 외부요소는 카메라 프레

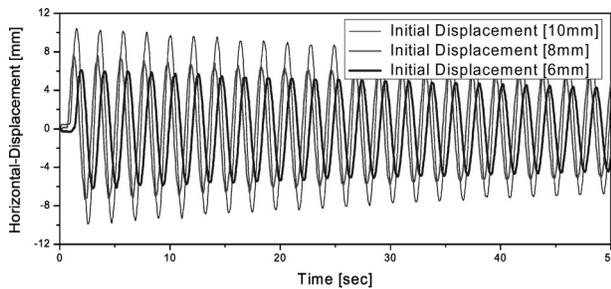
임과 실제 이미지 사이의 위치와 방위를 포함한 관계를 나타내며 이것은 강체(Rigid Body)변환에 대한 것이다. 강체 변환이란 물체의 회전과 이동에 대한 변환을 말하며 이것은 물체의 크기나 모양과는 관계가 없다. 내부요소는 카메라의 특성을 나타내는 카메라 그 자체에 대한 것이다. 이것은 렌즈 초점거리, 픽셀크기, 영상 중심의 위치, 크기요소 및 렌즈 왜곡 계수를 포함한다. 화상왜곡이 발생한 경우 주어진 영상의 점은 이상적인 위치로부터 그 점의 안쪽 또는 바깥쪽으로 왜곡된 변위를 발생시킨다. 이런 종류의 왜곡은 주로 렌즈의 구면 수차에 의해 발생한다. 영상의 점들은 음의 방사 변위는 바깥쪽 점들을 펼치며 크기는 증가시킨다. 이러한 종류의 왜곡은 렌즈의 광학축에 대하여 정확히 대칭적이다.

DIC기법을 이용하여 target의 변위를 측정할 경우 카메라의 중앙지점이 아니면 오차가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 다중 변위응답을 측정을 할 경우 왜곡영상을 확인하기 위해 3회의 실험을 수행하였다. 표 3과 같이 카메라 화상 중심과 레이저 변위계의 위치를 변화시키며 화상왜곡에 대한 영향을 확인하였다.

그림 7은 카메라 화상 중심별 DIC기법 알고리즘과 레이저 변위계에 의해 측정된 변위응답을 비교한 것이다. 표 4에



(a) DIC기법에 의한 변위응답



(b) 레이저 변위계에 의한 변위응답

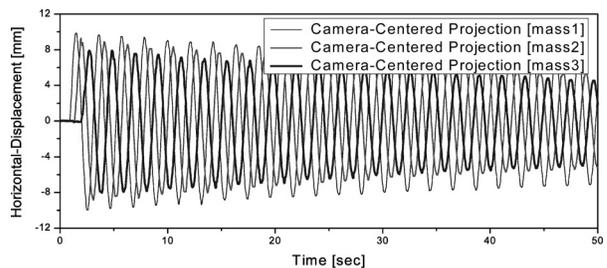
〈그림 6〉 초기변위에 대한 변위응답 비교

〈표 2〉 초기변위에 대한 오차분석

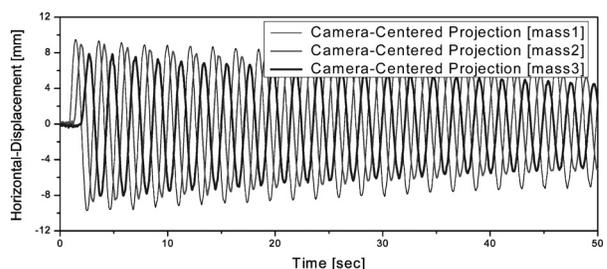
Initial Displacement (mm)	Percent Error(%)	RMS Error(mm)	SYSTEM Error(%)
10	0.493	0.405	3.878
8	0.369	0.256	3.304
6	0.405	0.225	3.711

〈표 3〉 카메라 화상 중심의 위치에 대한 레이저 변위계의 위치

Camera-Centered Projection	Laser Triangulation Meters Position
Mass1	Mass3
Mass2	Mass1
Mass3	Mass1



(a) DIC기법에 의한 변위응답



(b) 레이저 변위계에 의한 변위응답

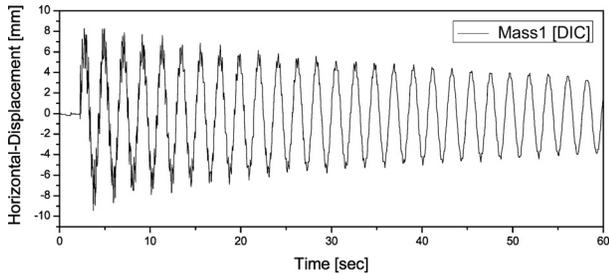
〈그림 7〉 카메라 화상 위치에 따른 변위응답 비교

<표 4> 카메라 화상 중심에 대한 오차분석

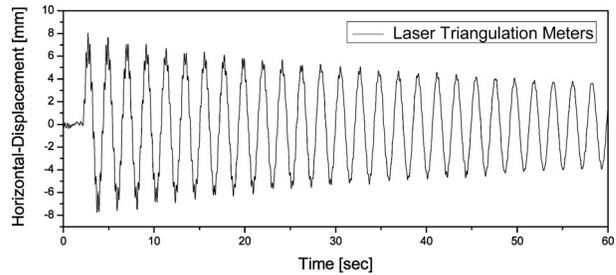
Camera-Centered Projection	Percent Error(%)	RMS Error(mm)	SYSTEM Error(%)
Mass1	0.375	0.340	3.619
Mass2	0.314	0.260	2.803
Mass3	0.301	0.229	2.898

<표 5> 카메라 화상 중심의 위치에 대한 레이저 변위계의 위치

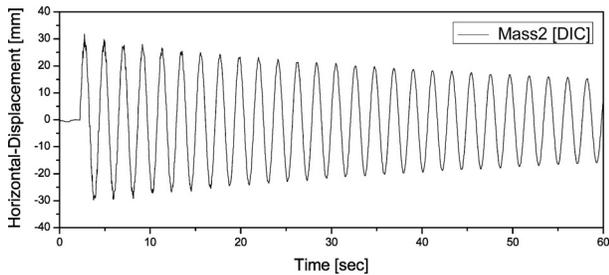
Camera-Centered Projection	Laser Triangulation Meters Position
Mass2	Mass1
Mass3	Mass1



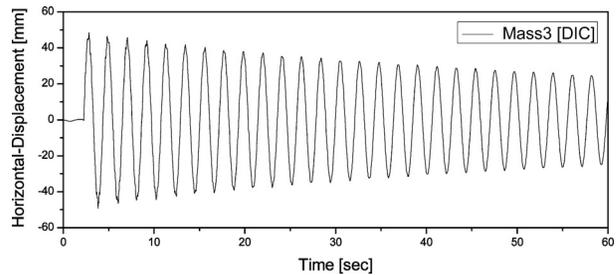
(a) DIC기법에 의한 Mass1에서의 변위응답



(b) 레이저 변위계에 의한 Mass1에서의 변위응답

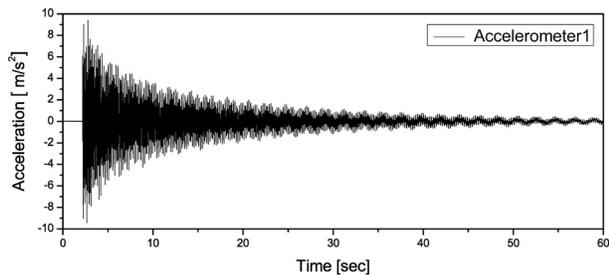


(c) DIC기법에 의한 Mass2에서의 변위응답

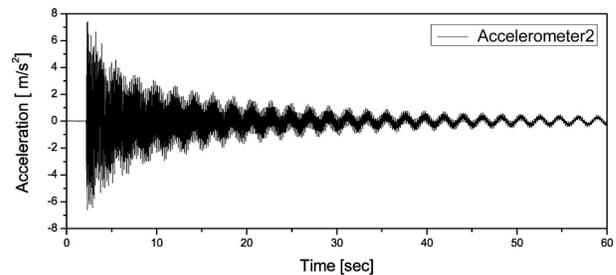


(d) DIC기법에 의한 Mass3에서의 변위응답

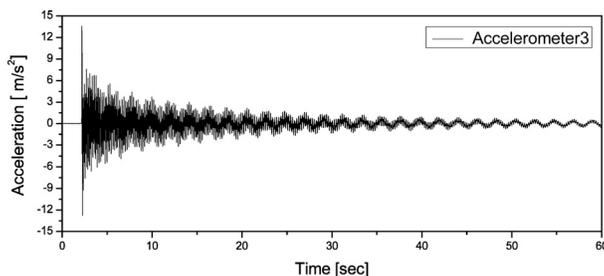
<그림 8> DIC기법 알고리즘과 레이저 변위계에 의해 계측된 변위응답 비교



(a) Mass1에서의 가속도 응답

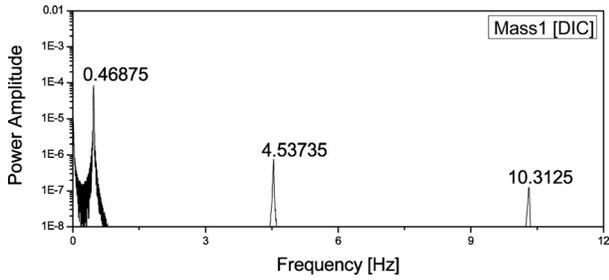


(b) Mass2에서의 가속도 응답

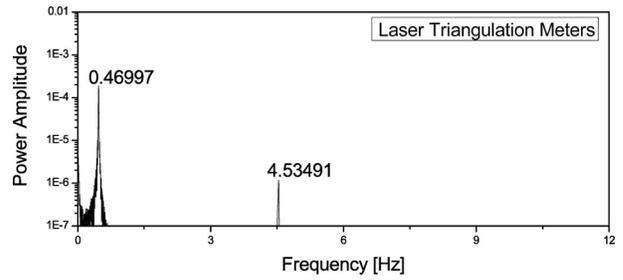


(c) Mass3에서의 가속도 응답

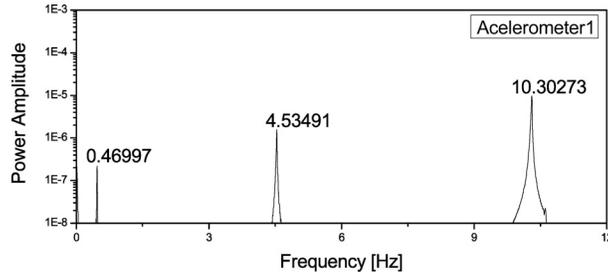
<그림 9> 각 질량에서 얻어진 가속도 응답



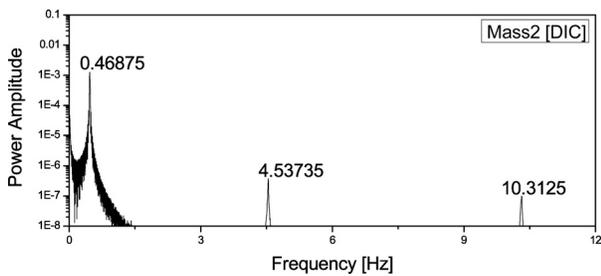
(a) Mass1에서 DIC기법에 의한 변위응답의 PSD함수



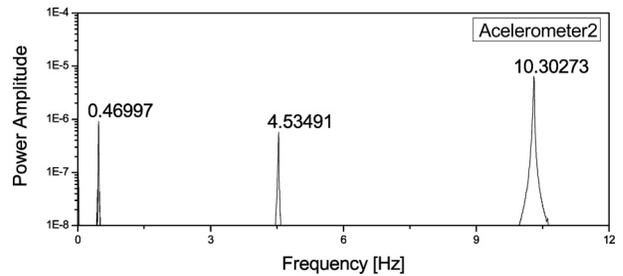
(b) Mass1에서 레이저 변위계에 의한 변위응답의 PSD함수



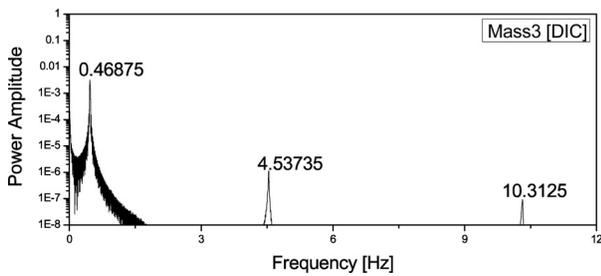
(c) Mass1의 가속도응답에 대한 PSD함수



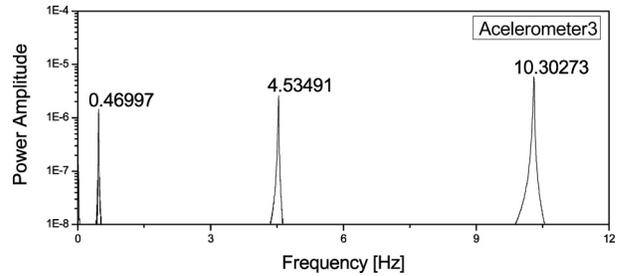
(d) Mass2에서 DIC기법에 의한 변위응답의 PSD함수



(e) Mass2의 가속도응답에 대한 PSD함수



(f) Mass3에서 DIC기법에 의한 변위응답의 PSD함수



(g) Mass3의 가속도응답에 대한 PSD함수

〈그림 10〉 각 질량중심에서 얻어진 응답의 PSD함수

서와 같이 변위응답에 대한 percent error의 오차율이 평균 0.5% 이내이고 RMS error도 0.5mm 이내로 그 오차가 매우 작은 것으로 판단된다. 또한 카메라 화상중심 각도의 변화에 대해서 system error의 값이 일정하다고 판단되므로 카메라 화상왜곡의 영향을 고려하지 않아도 되는 것으로 판단된다.

3.3 실험모형 동특성 검증

실험모형의 동특성을 확인하기 위하여 1, 2, 3차 모드가 발생하도록 가진하였으며, 표 5와 같이 카메라 화상 중심과 레

이저 변위계의 위치를 변화시키며 2회의 실험을 수행하였다.

그림 8은 카메라 화상 중심이 Mass3에 설치되어 있는 실험 경우에 대한 DIC기법 알고리즘과 레이저 변위계에 의해 계측된 변위응답을 비교한 것이며 레이저 변위계의 노이즈 대역이 $\pm 0.8\text{mm}$ 이고 DIC 기법을 이용한 변위응답의 노이즈 대역이 $\pm 0.2\text{mm}$ 이어서 전체 형상은 일치하나 고주파수 성분이 다른 형상으로 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 9는 카메라 화상 중심이 Mass3에 설치되어 있는 실험 경우에 대한 각 질량에서의 가속도 응답이다. 그림 10은 카메라 화상 중심이 Mass3에 설치되어 있는 실험 경우에 대한 응

〈표 6〉 카메라 화상 중심에 대한 오차분석

Camera-Centered Projection	Percent Error(%)	RMS Error(mm)
Mass2	1.471	0.473
Mass3	1.101	0.376

답으로부터 PSD(Power Spectral Density)함수를 구한 것으로서, 각 모드별 고유진동수(1차 모드: 0.47Hz, 2차 모드: 4.53 Hz, 3차 모드: 10.30Hz)가 $\pm 0.3\%$ 이내의 정확도를 확인할 수 있었다. 표 6에서 변위응답에 대한 percent error의 오차율이 1.5% 이내이고 RMS error도 약 0.5mm 이내로 그 오차가 매우 적은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용한 DIC기법 알고리즘에 의해 추출한 다중 변위응답 결과의 신뢰성이 양호한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 구조물의 지점 및 다중변위응답을 계측하는 경우에 적합한 방법으로 상업용 디지털 캠코더를 기반으로 하는 영상처리 분석을 통한 비접촉식 변위 계측방법을 제안하였다.

영상 처리 데이터를 분석해 얻어진 각 모드별 고유진동수 값은 가속도 센서를 이용해 얻어진 고유진동수 값과 $\pm 0.3\%$ 이내의 정확도를 가짐으로서 영상처리 데이터의 타당함을 확인할 수 있었다. 따라서 다중 변위응답의 계측이 필요한 구조물에 대하여 본 연구에서 제안하고 있는 영상처리기법을 이용한 진동계측방법이 보다 타당 할 수 있으며 이를 이용하면 대형 구조물에 대해 보다 저렴하고 간단하게 변위 측정이 가능하다고 판단된다.

보다 진보된 장비로 시스템을 구축하여 카메라의 초당프레임수와 해상도를 확보할 경우 고주파수 성분을 가지는 변위의 정밀측정이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한

국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(KRF-2008-331-D00592)

참고 문헌

1. Nassif, H.H. Gindy, M., and Davis, J., "Comparison of laser doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration," *NDT & E International*, Vol. 38, No. 3, 213-218, 2005.
2. 강용균, 이문진, "두 대의 GPS 수신기를 이용한 DGPS 정밀 측위", 한국지형공간정보학회논문집, 제3권 제2호, 15-28, 1995.
3. 서대완, 이영재, 박훈철, 윤광준, 지규인, 박찬국, "GPS 반송파를 이용한 구조물의 3차원 진동 측정", 한국소음 진동공학회, 추계학술대회 논문집, 1303-1310, 2000.
4. 김기영, 곽문규, "영상 처리 방법을 이용한 구조물의 큰 변위 저주파 진동 계측", 한국소음진동공학회논문집, 제15권 제3호, 329-333, 2005.
5. Lee J.J., Shinozuka, M., "Real-time displacement of a flexural bridge using digital image processing technique," *Experimental Mechanics*, Vol. 46, 105-114, 2006.
6. Ji, Y.F. and Chang, C.C. "Nontarget image-based technique for small cable vibration measurement," *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 13, No. 1, 34-42, 2008.
7. Bruck, H.A., McNeil, S.R., Sutton, M.A., and Peter, W.H., "Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correlation," *Experimental Mechanics*, Vol. 29, No. 3, 261-268, 1986.
8. Vendroux, G. and Knauss, W.G. "Submicron deformation field measurements: part2. improved digital image correlation" *Experimental Mechanics*, Vol. 38, No. 2, 86-92, 1998.
9. Lewis, J.P. "Fast normalized cross-correlation," *Vision Interface*, 120-123, 1995.
10. 장성진, 김남식 "모드분해기법을 이용한 동적변형률신호로부터 변위응답추장", 한국토목학회논문집, 제28권, 4A호, 507-515, 2008.