

디지털 카메라를 이용한 구조물의 동특성 추출 Modal Parameter Extraction Using a Digital Camera

김 병 화†
Kim, Byeong Hwa

Key Words : Natural frequency(고유진동수), Damping ratio(감쇠비), Image processing(영상처리), Cable vibration(케이블 진동), Vision-based measurement system(영상기반 계측시스템), Structural dynamics(구조동역학)

ABSTRACT

A set of modal parameters of a stay-cable have been extracted from a moving picture captured by a digital camera supported by shaking hands. It is hard to identify the center of targets attached on the cable surface from the blurred cable motion image, because of the high speed motion of cable, low sampling frequency of camera, and the shaking effect of camera. This study proposes a multi-template matching algorithm to resolve such difficulties. In addition, a sensitivity-based system identification algorithm is introduced to extract the natural frequencies and damping ratios from the ambient cable vibration data. Three sets of vibration tests are conducted to examine the validity of the proposed algorithms. The results show that the proposed technique is pretty feasible for extracting modal parameters from the severely shaking motion pictures.

1. 서 론

최근, 교량의 장경간화 추세에 따라서 고강도 케이블을 이용한 장대교량의 건설이 급증하고 있다. 케이블교량의 케이블 안전성은 교량시스템 전체의 안전성과 직결되는 문제이기 때문에 케이블의 동적 특성을 이용한 케이블의 장력 등이 상시 모니터링되고 있다⁽¹⁾. 교통하중 및 풍하중 등에 의해서 상시 가진 되고 있는 케이블의 장력을 추정하기 위해서는 케이블의 동특성이 우선적으로 추출되어야 한다.

사장교 케이블 등의 동적 응답을 계측하기 위해서는 일반적으로 저주파 가속도계를 케이블 표면에 연직으로 부착하여 동적응답을 계측한다. 그러나 사장교의 케이블 길이는 수십에서 수 백 미터에 이르기 때문에 가속도계를 케

이블의 정착부 근처에 부착시키더라도 별도의 고소 작업용 대차를 사용하여야 하는 번거로움이 있다. 그 밖에 케이블의 동적응답 계측을 위하여 적용 가능한 비접촉식 방법으로서 레이저의 도플러효과를 이용하는 방법 과 영상 이미지를 이용하는 방법 등이 대표적이다. 레이저를 이용하는 방법⁽²⁾은 정확도가 상대적으로 높지만 비용이 고가이기 때문에 아직까지는 실용화되지 못하고 있다. 반면, 영상 이미지를 이용하는 방법⁽³⁾은 비용이 상대적으로 저가이기 때문에 접근성이 확보되지 못하는 구조물의 처짐 및 동특성추출에 적합하다.

교량의 내하력 평가시 교량의 최대 처짐은 일반적으로 주 경간 중앙에서 발생한다. 그러나 교량 구조물은 강, 바다, 또는 산악지역을 연결하기 때문에 경간 중앙부에서 접근성의 확보가 용이치 않다. 이러한 문제에 대하여 교량의 동적응답을 영상 이미지로 기록하고 분석하여 교량의 처짐곡선을 추출하거나 교량의 동특성을 추출하는 연구가 최근에 다수 수행되었다^(4,5,6,7). 영상 이미지를 이용한 케이블의 동특성

† 교신저자: 정희원, 경남대학교 토목공학과
E-mail : bhkim@kyungnam.ac.kr
Tel : 055-249-2667, Fax : 055-249-2664

추출시 몇 가지 고려해야 할 사항들은 다음과 같다.

첫째, 카메라의 흔들림 문제이다. 영상 이미지를 샘플링시 원거리에 위치한 표적의 미소 변위에 대한 시간이력데이터를 계측하기 위해서는 고배율 확대경을 통한 필요하다. 그러나 바람 등에 의한 카메라의 미소 진동은 획득된 영상에서 크게 확대되어 치명적인 문제점을 발생시킨다. 이러한 문제점 때문에 카메라를 진동이 없는 고요한 위치에 고정시키거나 방풍막을 설치하여 교량의 동적응답을 계측한다. 또는 교량의 지점과 같이 고정된 기준점과 경간 중앙점을 동시에 계측하여 상대적 변위응답을 계측한다⁽⁴⁾. 그러나 장대교량의 케이블 동특성을 영상 이미지를 이용하여 추출할 경우에는 교량의 경간장이 매우 길어서 고배율의 확대경을 통한 원거리 계측에 한계가 있다. 그러므로 케이블의 동적응답을 교량의 상판 위에서 계측을 해야만 한다. 그러나 교량의 상판은 상시 교통하중과 풍하중에 의해서 가진 되고 있기 때문에 카메라의 흔들림을 고려한 영상기반 동특성 추출기법의 개발이 필요하다.

둘째, 영상 이미지에서 표적의 인식문제이다. 표적의 형태는 십자형⁽⁴⁾, 삼각형⁽⁸⁾, 원⁽⁵⁾, 십자 분포형 원⁽⁶⁾ 등 다양하게 사용되었으며 각각의 표적 중심부를 인식하기 위한 다양한 알고리즘들이 제안되었다. 그러나 제안된 여러 가지 알고리즘들 중에서도 정규화된 상호상관(normalized cross correlation)을 이용하는 템플릿 매칭(template matching)기법^(7,9)이 가장 효율적이라 판단된다. 왜냐하면 사용하는 표적의 형태에 따라서 알고리즘이 변화하지 않으며, 고속으로 2 차원 상호상관의 계산이 가능⁽¹⁰⁾하게 되었기 때문이다. 그러나 고속으로 움직이는 물체의 영상 이미지를 샘플링 할 경우에 카메라의 초점이 흐려지는 잔상문제는 피할 수 없다. 특히, 교량 케이블의 응답거동은 매우 빠르고 진폭이 커서 획득된 표적 이미지는 잔상으로 인하여 표적 중앙부의 결정이 용이치 않다. 이는 교량 케이블의 고유진동수가 길이와 장력의 함수로써 교량 거더의 진동수보다 매우 높기 때문이다. 이미지 분석분야에서는 초점이 흐린 이미지로부터 원래의 이미지를 복원(restoration)하는 기술에 대하여 지난 수 십년 동안 많은 연구가 수행되어 왔으며 다양한 기법들이 제안되었다, Whang등⁽¹¹⁾은 이러한 문제에서 기하학

적 모멘트를 이용한 해결법을 제안하였으나 계산량이 방대한 단점이 있다. 그러므로 표적의 잔상처리를 효율적으로 할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

셋째, 입력신호 계측 없이 시스템의 응답만을 이용하여 고유진동수와 감쇠비를 추정해야 하는 문제이다. 가진 신호의 계측 없이, 구조응답만을 이용하여 동특성을 추출할 수 있는 가장 널리 알려진 방법은 PP(peak-picking)기법⁽¹²⁾이다. 기존의 영상 이미지를 이용하여 구조물의 동특성을 추정하는 연구들^(6,8,9)은 모두 PP기법을 사용하였다. PP기법은 계측된 응답신호를 푸리에 변환시켜서 스펙트럼의 첨두 주파수를 고유진동수로 취하고, 상응하는 감쇠비를 구하는 기법이다. PP기법은 적용이 간단하지만 추정된 고유특성치의 정확도가 주파수영역의 해상도에 따라서 다소 달라지는 단점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 많은 연구가 진행되었으며, 대표적인 기법은 ITD기법⁽¹³⁾, ERADC기법⁽¹⁴⁾, TDD기법⁽¹⁵⁾ 등이 있다. 응답만을 이용하여 동특성을 추출하는 기존의 기법들은 각각 장단점이 있지만, 일반적으로 구조응답으로부터 자유진동함수를 추출하기 위해서 장시간의 데이터계측이 필요하다. 그러나 일반 카메라를 이용할 경우에 영상 이미지의 저장용량에는 한계가 있으므로 최소량의 데이터량 만을 가지고 동특성을 추출할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

본 연구는 일반 휴대용 디지털 카메라를 이용하여 사장교 케이블의 동특성을 추출할 수 있는 방법을 소개한다. 제안 기법은 카메라의 고정받침 없이 손으로 쥐고 케이블의 동적응답을 담은 동영상으로부터 케이블의 동특성을 추출할 수 있는 기법이다. 카메라의 흔들림과 케이블의 과대 진폭으로 인한 초점 흐림 현상을 해결하기 위하여 다중 템플릿을 이용한 표적 인식 알고리즘을 새롭게 제안한다. 또한, 추출된 두 절점의 변위 이력 데이터들 사이의 상호상관을 이용하여 고유진동수와 감쇠비를 추출할 수 있는 알고리즘을 소개한다.

2. 이론

2.1 다중 템플릿 매칭을 이용한 잔상 표적인식

케이블 동적 거동은 진동수가 높고 진폭이 커서 초당 30 프레임으로 샘플링 할 수 있는 일반 휴대

용 디지털 카메라를 이용하면, 획득된 표적의 영상 이미지는 그림 1과 같이 잔상효과가 나타난다. 잔상 효과는 카메라의 셔터가 빛에 노출되는 매우 짧은 시간 동안, 표적의 움직임 궤적이 하나의 영상 이미지에 모두 겹쳐서 보이는 것이다. 그림 1은 십자형 표적을 케이블 표면에 부착시키고 케이블을 가진 시켰을 때 일반 휴대용 디지털 카메라로 찍은 영상이다. 그림 1a는 정지화상이고, 그림 1b, 1c 및 1d는 잔상이 있는 화상이다. 카메라를 고정시키지 않고 손으로 쥐고 동영상 촬영을 기록 할 경우에는 카메라의 수평방향 흔들림에 의한 영향도 나타나는 것을 그림 1c에서 확인 할 수 있다. 이러한 잔상효과를 동반한 영상 이미지에 단일 템플릿 매칭 알고리즘^(7,9)을 적용하면 표적의 인식이 종종 실패하게 된다.

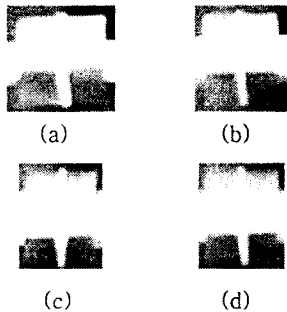


Fig.1 Blurred cross target images

잔상으로 인한 표적인식의 실패에 대한 해결책으로, 다수의 템플릿들을 이용한 기법⁽¹⁶⁾을 고려할 수 있다. 다중 템플릿을 이용하는 방법은 그림 1과 같은 다수의 잔상 이미지(blurred images)를 템플릿으로 등록하고 각각의 템플릿과 가장 유사한 원영상의 영역을 추출하는 기법이다. 그러나 다중 템플릿을 이용하는 방법은 표적인식의 실패를 해결 할 수 있지만, 계산량이 증가하는 단점이 수반된다.

다중 템플릿 매칭 문제는 크기가 $m \times n$ 인 흑백 원영상 $f(x, y)$ 에서 이미 정의한 $p \times q$ 흑백 부영상(sub-image) 템플릿 $w(x, y)$ 이 가장 잘 일치하는 원영상의 영역의 위치를 찾는 문제이다. 탐색방법에 따라서 뒤틀림(distortion)이나 상관관계(correlation) 등을 이용될 수 있다. 상관관계를 이용하는 방법들 중에서는 가장 널리 사용되는 방법은 정규상호상관을 이용하는 것이다. 원영상의 (u, v) 에서 i 번째 템플릿에 대한 정규상호상관 $\gamma_i(u, v)$ 은 다음 식(1)의 이용하여 계산할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\gamma_i(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [w_i(x-u, y-v) - \bar{w}_i]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2} \sqrt{\sum_{x,y} [w_i(x-u, y-v) - \bar{w}_i]^2}} \quad (1)$$

여기서, $w_i(x, y)$ 는 T 개의 부영상 중에서 i 번째 부영상을 나타내고, \bar{w}_i 는 i 번째 부영상의 평균이다. 또한 $\bar{f}_{u,v}$ 는 원영상 $f(x, y)$ 의 평균을 나타낸다. 그림 2은 다중 템플릿 매칭의 개념도를 보여준다. 원영상 전체에 대하여 원영상 특정영역과 부영상의 정규상호상관을 계산하고, 다음 식(2)와 같이 정규상호상관이 최대인 위치를 찾는다.

$$\gamma(u, v) = \max[\gamma_i], \quad i=1, \dots, T \quad (2)$$

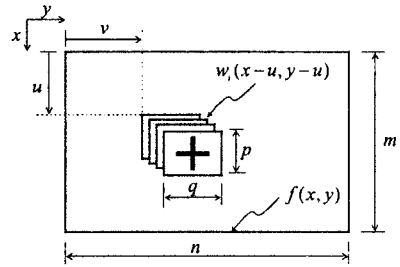


Fig. 2 Multiple template matching process

케이블의 변위시간이력 데이터를 추출하기 위해서는 다중 템플릿 탐색을 통하여 획득된 원영상의 블록 영역에서 표적의 중심점을 설정하여야 한다. 그림 2b, 2c, 및 2d와 같이 잔상이 수직으로 길게 퍼진 경우에는 밝기가 최대인 위치를 표적의 중심 좌표로 취한다. 왜냐하면, 카메라의 셔터가 닫히는 동안 표적이 가장 오래 머무르는 순간의 밝기가 가장 크기 때문이다. 최대 밝기 픽셀(pixel)이 표적의 정확한 중앙점은 아니더라도 잔상을 대표하는 좌표가 될 수 있다. 미지의 정확한 중앙점과의 오차는 변위 시간이력에서 계측 잡음(noise)로 간주 될 수 있다.

2.2 고유진동수 및 감쇠비 추출

다중 템플릿 매칭 알고리즘을 이용하여 획득된 케이블의 변위시간이력 데이터는 카메라의 흔들림과 케이블의 고속 거동으로 인한 잔상잡음이 포함되어 있다. 또한, 가진 신호의 계측이 없이 응답신호만을 이용하여 고유진동수와 감쇠비를 추출하기 위해서는 우선적으로 구조응답으로부터 자유진동함수를 추출하여야 한다. 구조응답으로부터 자유진동함수를 추출하기 위해서는 RD(random decrement)함수⁽¹³⁾를 추출하거나 두 절점들 사이의 상호상관을 이용하는 방법⁽¹⁷⁾이 있다. RD함수를 추출하기 위해서는 장기간의 계측이 필요한 반면

두 점 사이의 상호상관(cross correlation)을 이용하는 방법은 상대적으로 적은 데이터를 요구하기 때문에 본 연구에서는 상호상관을 이용하여 자유진동함수를 추출한다. 두 점 사이의 상호상관을 영상 이미지로부터 추출하기 위해서는 우선, 케이블에 일정 간격으로 두 개의 표적을 설치하고 하나의 화면에 두 표적을 동시에 잡는다. 그리고 케이블을 가진 시켜서 동영상을 샘플링한 후에 각각의 표적에 대하여 상기 다중 템플릿 매칭 탐색 알고리즘을 적용하여 각각의 변위 시간이력을 추출한다.

계측된 변위응답이력들은 다자유도 신호이기 때문에 스펙트럼을 관찰하면 s 개의 첨두가 나타난다. 각 모드별 고유진동수와 감쇠비를 추출하기 위하여 우선적으로 s 개의 밴드패스필터(band pass filter)를 설계하여 통과시킴으로써 s 개의 단자유도 신호로 만들 수 있다⁽¹⁵⁾. 두 점에서 추출된 변위응답 시간 샘플에 대하여 i 번째 모드만 고립시킨 단자유도 응답신호를 $y_1(t)$ 와 $y_2(t)$ 라 하자. 그러면 i 번째 모드에 대한 두 신호의 상호상관신호는 다음 식(3)을 이용하여 산정 된다.

$$c(k) = \sum_{n=0}^{N-k-1} y_1(n+k)y_2(n), \quad k > 0 \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 추출된 모드별 대표 단자유도 변위 상호상관신호는 자유진동함수와 동일한 형태이다. 다음은 추출된 상호상관신호로부터 고유진동수와 감쇠비를 추출하기 위하여 민감도기반 시스템인식(system identification) 기법⁽¹⁸⁾을 적용한다. 민감도 기반 시스템인식기법은 역해석의 일종으로서 계측치와 시뮬레이션치가 같도록 하는 시뮬레이션 시스템의 변수들을 최적화하는 방법이다. 지난 수 십년간 수치모델의 개선 및 구조물의 손상도 추정분야에 적용되어 검증된 최적화 알고리즘이다. 본 연구에서 고려한 시뮬레이션 시스템은 식(3)에서 추출된 각 모드별 단자유도 진동시스템의 임의시간 t 에서 자유진동함수 $c(t)$ 를 다음과 같이 고려한다.

$$c(t) = Ae^{-\xi\omega t} \cos(\omega_d t - \theta) \quad (4)$$

여기서, A , ω , ξ , $\omega_d = \omega\sqrt{1-\xi^2}$ 및 θ 는 각각 진폭, 고유진동수, 감쇠비, 감쇠고유진동수, 그리고 이동각을 나타낸다. 인식해야 할 독립변수들은 고유진동수, 감쇠비, 진폭 및 위상차이다. 그러면, 인식하고자 하는 변수들의 집합인 인식벡터 \mathbf{U} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = [\omega \quad \xi \quad A \quad \theta]^T \quad (5)$$

그러면, 인식변수벡터에 대한 상호상관함수의 선형 민감도 방정식으로 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\mathbf{Z} = \mathbf{F}\mathbf{a} \quad (6)$$

여기서, 벡터 \mathbf{Z} 는 상호상관의 변화율을 나타내며, 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{Z} = \left[\frac{\delta c(1)}{c(1)} \quad \dots \quad \frac{\delta c(N)}{c(N)} \right]^T \quad (7)$$

여기서 오퍼레이터 δ 은 변분을 나타내고, $c(k)$ 는 임의의 시간 $t = k\Delta t$ 에서 상호상관을 나타낸다. 또한, 벡터 \mathbf{a} 는 인식 변수들의 변화율을 나타내며, 다음과 같이 정의 된다.

$$\mathbf{a} = \left[\frac{dU_1}{U_1} \quad \frac{dU_2}{U_2} \quad \frac{dU_3}{U_3} \quad \frac{dU_4}{U_4} \right]^T \quad (8)$$

여기서, U_i 는 인식벡터 \mathbf{U} 의 i 번째 요소를 나타낸다. 마지막으로 벡터 \mathbf{F} 는 민감도 행렬(sensitivity matrix)으로써 인식 변수들에 대한 상호상관의 변화율을 나타내며, 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial c(1)}{\partial U_1} \frac{U_1}{c(1)} & \dots & \frac{\partial c(1)}{\partial U_4} \frac{U_4}{c(1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial c(N)}{\partial U_1} \frac{U_1}{c(N)} & \dots & \frac{\partial c(N)}{\partial U_4} \frac{U_4}{c(N)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

반복법을 이용하여서, 민감도 방정식 식(6)의 해를 구하는 순서는 다음과 같다. 우선, j 번째 반복 단계에서 인식 변수들을 다음과 같이 임의로 가정하자.

$$\mathbf{U}^j = [\omega^j \quad \xi^j \quad A^j \quad \theta^j]^T \quad (10)$$

여기서, 인식 변수들의 위 첨자 j 는 반복 단계 횟수를 의미한다. 가정된 인식 변수벡터에 대해서, 식(4)의 시뮬레이션을 수행하여 상호상관함수를 얻는다. 다음은, 구해진 시뮬레이션 모델에 대하여 식(9)의 민감도 행렬 \mathbf{F} 를 구한다. 여기서, 민감도 행렬은 각 인식변수의 단위 변화에 따른 상호상관의 변화를 계산하여서 근사적으로 산정할 수 있다. 다음은 상호상관의 변화율벡터 \mathbf{Z} 를 다음 식(10)로부터 구한다.

$$\mathbf{Z} = \left[\frac{c^{j+1}(1) - c^j(1)}{c^j(1)} \quad \dots \quad \frac{c^{j+1}(N) - c^j(N)}{c^j(N)} \right]^T \quad (11)$$

여기서, $c^{j+1}(k)$ 는 $t = k\Delta t$ 에서 식(3)로부터 추출된 제 $j+1$ 차 상호상관이고, $c^j(k)$ 는 j 번째 반복단계에서 인식 변수 벡터들에 대한

상호상관으로써 식(4)를 통하여 시뮬레이션된 값이다. 다음은 식(6)을 이용하여서 인식 변수 벡터들의 변화율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \mathbf{F}'^{-1} \mathbf{Z} \quad (12)$$

여기서, \mathbf{F}' 는 민감도행렬 \mathbf{F} 의 의사역행렬 (pseudo inverse matrix)이다. 따라서 인식 변수 벡터는 $j+1$ 번째 반복단계에서 다음과 같이 갱신된다.

$$U_i^{j+1} = (1 + \alpha_i) U_i^j \quad (13)$$

여기서, U_i^j 는 j 번째 반복단계에서 인식 변수 벡터 \mathbf{U}' 의 i 번째 항이다. 그리고, α_i 는 인식변수의 변화율벡터 α 의 i 번째 항이다. 그러면 새롭게 갱신된 인식변수벡터에 대해서 식(10)부터 식(13)까지를 각각의 인식변수 변화율 α_i 이 영으로 수렴할 때까지 반복한다.

3. 실험

3.1 실험 개요

제안 기법의 검증을 위하여 그림 3과 같은 사각교의 경사 케이블을 모사한 축소 모형이 제작되었다. 케이블의 지점부는 힌지를 모사하기 위하여 도르래를 설치하였다. 케이블의 장력은 그림 3과 같이 재하용 추를 조합하여 277.23N이 도입되었다. 도르래 중심 사이의 케이블 길이는 6.65m (수평 $d=6.41$ m, 수직 $h=1.78$ m)이고, 만호제강 일반연 로프 6×24+7FC (G중)를 사용되었다. 사용된 케이블의 단위중량은 0.212kg/m이다.

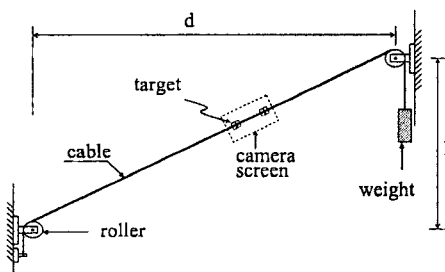


Fig. 3 Test setup

세 가지 종류의 진동실험이 수행되었다. 첫 번째 실험은 일반 휴대용 디지털 카메라(Canon A630)를 손에 쥐고 케이블의 동적 응답을 동영상으로 기록하였다. 그림4와 같이 두 개의 십자모양 표적들을 0.2m 간격으로 케이블에 부착시켜 놓고 케이블을

가진 하였다. 동영상 촬영은 초당 30 프레임씩 640×420의 해상도로 1분씩 10회 반복되었다. 이때, 카메라와 표적과의 거리는 줌기능 없이 0.9m로 설정되었다. 각각의 표적 중앙점에 대한 수직변위 시간이력을 추출하기 위하여 제안된 다중 템플릿 알고리즘이 적용되었다. 우선, 획득된 동영상파일로부터 모든 영상 이미지들을 추출한다. 그리고 각각의 영상이미지를 육안으로 검사하여 표적의 잔상 등급을 몇 가지 단계로 나누고 그림 1과 같이 각 단계별 템플릿을 설정한다. 다음은 각각의 영상 이미지에 대해서 이미 설정한 템플릿들과 가장 상호상관이 큰 원영상의 영역을 탐색한다. 마지막으로 탐색된 원영상의 영역에서 표적의 중심을 픽셀의 밝기가 가장 밝은 곳으로 가정한다. 그림 4의 좌측 표적에 대하여 추출된 전형적인 수직변위 시간이력이 그림 5a에 보인다. 추출된 두 표적의 변위이력들 사이의 상호스펙트럼이 그림 5b에 보인다. 총 5개의 모드가 가진 되었음을 알 수 있다.

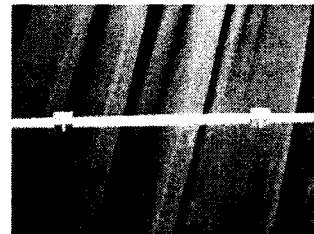


Fig.4 Targets

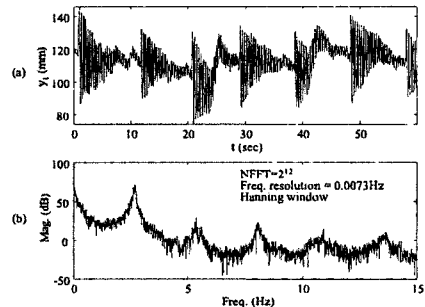


Fig. 5 dynamic responses of Test No.1: (a) displacement; (b) cross spectrum

두 번째 실험은 카메라를 삼각대에 고정시킨 후에 케이블의 동적 응답을 촬영하였다. 첫 번째 실험과 유일한 차이점은 카메라를 손 대신 삼각대로 고정시킨 것이다. 그 밖의 모든 실험조건은 첫 번째 실험과 동일하다. 그림 6a는 삼각대로 고정된 카메라를 이용하여 촬영된 동영상으로부터 다중 템플릿

매칭 기법을 적용하여 추출된 케이블의 수직 변위 이력을 나타낸다. 그림 5와 그림 6를 비교하면, 손으로 쥐고 촬영할 경우에는 카메라의 흔들림 영향이 시간영역에서 매우 심하지만, 주파수 영역에서는 저주파 영역에만 영향이 미치는 것을 알 수 있다.

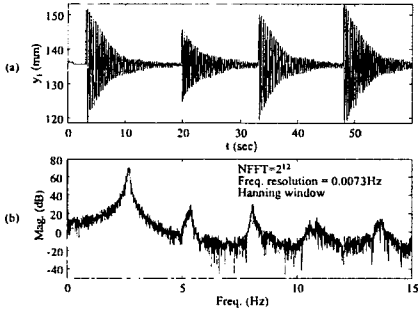


Fig. 6 dynamic responses of Test No.2: (a) displacement; (b) cross spectrum

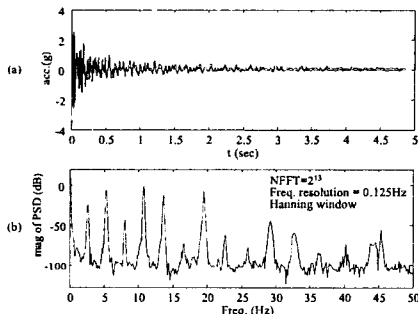


Fig. 7 dynamic responses of Test No.3: (a) acceleration (b) cross spectrum

세 번째 실험은 두 개의 PCB 모델 352B10 가속도계를 케이블에 부착시키고 가진하여 가속도 시간 이력을 수집하였다. 데이터 수집은 NI 4472 보드를 삼성컴퓨터 GP12에 장착하고 자체 코딩한 Labview 소프트웨어를 이용하여 샘플링 빈도 1024Hz로 1회에 29.30s동안 총10회의 가속도 시간 이력을 획득하였다. 그림 6은 전형적인 케이블 표면에 수직한 가속도의 시간 이력과 두 개의 계측지점 사이의 상호스펙트럼을 보여준다. 50Hz 이내에 총 14개의 모드가 가진 되었다.

3.2 동특성 추출

그림 5a에 보이는 첫 번째 실험에서 획득된 케이블의 변위 시간 이력을 고려해 보자. 그림 5b에 보이는 상호스펙트럼을 통하여 고유진동수들이 존재하

는 주파수 구간들은 대략 2~3Hz, 5~6Hz, 7.5~8.5Hz, 10~12Hz, 및 13~14.5Hz임을 알 수 있다. 각각의 주파수 구간에 대하여 2차 버터워스 (Butterworth) 밴드패스필터들을 설계하고 변위 시간 이력을 필터링하면 각각의 주파수 구간만 고립시킨 단자유도 신호들을 얻는다. 추출된 단자유도 신호들을 식 (3)에 대입하여 각 모드별 상호상관을 추출한다. 그림 8의 점선은 추출된 단자유도 상호상관의 예를 보여준다. 각 모드별로 10회의 계측이 수행되었기 때문에 10개의 상호상관들을 추출 할 수 있다. 10개 상호상관들을 시간 축에 대하여 합산하는데 이는 상호상관에 녹아있는 계측 노이즈를 상쇄시켜서 각 모드의 대표 상호상관을 추출하기 위함이다. 다음은 각 모드별로 추출된 대표 상호상관으로부터 고유진동수와 감쇠비를 추출하기 위하여 민감도 기반 SI 알고리즘을 적용한다. 인식변수의 초기치들은 각 모드별 상호스펙트럼과 상호상관을 육안으로 관찰하여 설정한다. 예를 들어, 고유진동수의 초기치는 그림 5b의 상호스펙트럼의 첨두들을 선택하고, 감쇠비의 초기치는 그림 8에 점선으로 보이는 상호상관에 로그법을 적용하여 선택한다. 그밖에 진폭 및 이동각의 초기치는 그림 8의 상호상관(점선)으로부터 선택한다. 그림 8의 실선은 첫 번째 실험에서 최종 인식된 1차 모드의 인식변수들을 이용하여 식 (4)로 시뮬레이션한 상호상관을 보여준다. 계측 상호상관과 시뮬레이션 상호상관이 매우 잘 일치 하는 것을 알 수 있다. 그림 9는 각각의 반복 단계에서 인식변수들의 변화율을 나타내는 것으로써 적용된 SI 알고리즘의 수렴성을 보여준다. 인식변수들이 식(10)부터 식(13)의 200회 이내의 반복 계산을 통하여 모두 영으로 수렴하였다.

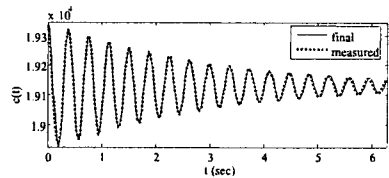


Fig. 8 Comparison of cross correlations

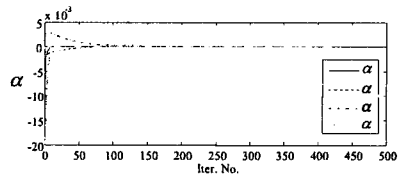


Fig. 9 Convergence diagram of the SI algorithm

Table1 Estimated modal parameters

Mode No.	Test No.1		Test No.2		Test No.3	
	Freq. (Hz)	Damp. (%)	Freq. (Hz)	Damp. (%)	Freq. (Hz)	Damp. (%)
1	2.69	2.00	2.68	2.00	2.70	2.05
2	5.37	0.78	5.35	1.11	5.29	0.91
3	8.04	0.55	8.05	0.56	7.98	0.45
4	10.85	0.95	10.92	1.26	10.72	0.83
5	13.65	0.75	13.64	0.84	13.60	0.63

두 번째 및 세 번째 실험에서 획득된 응답 시간 데이터 들에 대해서도 동일한 민감도 기반 SI 알고리즘이 적용되었다. 표 1은 추정된 고유진동수와 감쇠비를 나타낸다. 각 실험별 추정 고유진동수는 거의 차이가 없는 반면 추정 감쇠비는 다소의 편차가 있다. 이는 케이블의 가진 신호 없이 응답신호만을 이용하여 감쇠비를 추출하는 알고리즘들이 갖는 단점으로써 보다 장기간의 계측데이터를 이용함으로써 감쇠비 추정오차를 줄일 수 있다.

4. 결 론

상기 실험결과로부터 적어도 다음과 같은 네 가지 결론에 이른다. 첫째, 카메라를 고정하지 않고 촬영된 구조응답 영상으로부터도 정확한 구조물의 동특성 추출이 가능하다. 구조물의 처짐 계측을 위해서는 카메라의 고정이 반드시 확보되어야 하지만, 동특성 추출만을 위해서는 두 점 사이의 상호상관을 이용하면 카메라의 흔들림을 허용 할 수 있다. 둘째, 촬영 샘플링 빈도가 30Hz인 일반 휴대용 카메라를 이용하여도 고속으로 진동하는 케이블의 동특성을 추출 할 수 있다. 가속도계를 이용한 계측 상호스펙트럼을 보면 케이블은 50Hz까지 가진 된 것을 확인할 수 있다. 그러나 카메라를 이용한 변위력에는 15Hz까지만 담을 수 있기 때문에 샘플링이론(sampling theorem)에 따르면 앨리어싱(aliasing) 효과가 발생한다. 그러나 변위응답을 출력으로 하는 구조 시스템의 경우에 구조시스템이 일종의 아날로그 저역통과필터(low pass filter)의 역할을 하기 때문에 계측된 변위신호에 고차 주파수들의 앨리어싱 효과가 상대적으로 매우 작게 나타난다. 셋째, 제안된 다중 템플릿 매칭 알고리즘은 고속으로 진동하는 구조체의 동적 응답을 상대적으로 낮은 샘플링으로 촬영할 경우에 매우 효과적이다. 넷째, 소개된 민감도 기반 SI 알고리즘은 가진 신호계측 없이

구조시스템의 고유진동수와 감쇠비를 추출하는 데 매우 효과적이다. 그러나 정확한 감쇠비 추정을 위해서는 장기간의 계측데이터 획득이 필요하다.

후 기

이 연구결과물은 2008년도 경남대학교 신진교수 연구비지원에 의한 것임.

참 고 문 헌

- (1) Kim, B.H. Park, T., 2007. "Estimation of Cable Tension Force Using System Identification Technique", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 304, pp.660~676.
- (2) Nassif, H.H., Gindy, M., Davis J., 2005. "Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration", *NDT&E International*, Vol. 38, pp.213~218.
- (3) Wahbeh A.M., Caffrey, J.P., Masri, S.F., 2003. "A vision-based approach for the direct measurement of displacements in vibrating systems", *Smart Mater Struct.*, Vol. 12, pp.785~794.
- (4) Olaszek, P., 1999. "Investigation of dynamic characteristic of bridge structures using a computer vision method", *Measurement*, Vol. 25, pp.227~236.
- (5) Jauregui, D.V., White, K.R., Woodward, C.B., Leitch, K.R., 2003. "Noncontact Photogrammetric Measurement of Vertical Bridge Deflection", *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp.212~222.
- (6) Lee J.J., Shinozuka, M., 2006. "Real-Time Displacement of a Flexural Bridge Using Digital Image Processing Technique", *Experimental Mechanics*, Vol. 46, pp.105~114.
- (7) Yoneyama, S., Kitagawa, A., Iwata, S., Tani, K., Kikuta, H., 2007. "Bridge deflection measurement using digital image correlation", *Experimental Techniques*, Vol. 31, No. 1, pp.34~40.
- (8) Kim, K.-Y., Kwak, M.K., 2005. "Measurement of Large-amplitude and Low-frequency Vibrations of Structures Using the

Image Processing Method”, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No.3, pp.329~333.

(9) Lee, C.-B., Ahn, S.-H., Yang, S.-H., Yum, J.-W., Kang, D.-W., Kim, K.-D., 2004. “Vibration Measurements of Large-Scale Structure Using Laser and High-Speed CCD Camera”, Journal of Korean Information and Communication Society, Vol. 29, No. 8C, pp.1104~1112.

(10) Lewis, J.P. 2003. “Fast Normalized Cross-Correlation”, Available from: www.idiom.com/~zilla/index.html#Publications.

(11) Wang, S., Guan, B., Wang, G., Li, Q., 2007. “Measurement of sinusoidal vibration from motion blurred images”, Pattern Recognition Letters, Vol. 28, pp. 1029~1040.

(12) Bendat, J.S., Piersol, A.G., 1980. Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis, Wiley, New York, pp. 181~186.

(13) Ibrahim, S.R., Mikulick, E.C., 1977. “A Method for the Identification of Vibration Parameters from the Free Responses”, Shock and Vibration Bulletin, Vol. 47, No. 4, pp.183~198.

(14) Juang, J.-N., 1994. Applied System Identification, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

(15) Kim, B.H., Park, T., Stubbs, N., 2005. “A New Method to Extract Modal Parameters Using Output-Only Responses”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 282, pp. 215~230.

(16) Rao, K.R., Ben-Arie, J., 1994. “Multiple template matching using the expansion filter”, IEEE transactions on circuits and systems for video technology, Vol. 4, No. 5, pp.490~503.

(17) Farrar, C.R., James III, G.H., 1997. “System Identification from Ambient Vibration Measurements on Bridge”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 205, pp.1~18.

(18) Stubbs, N., Kim, J.T. 1996. “Damage localization in structures without baseline modal parameters”, AIAA Journal, Vol. 34, pp. 1644-1649.