

영상처리를 활용한 장대교량 케이블의 모니터링

Monitoring of Cable Members of Long-span Bridges using Image Processing



박종철*

* 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원

1. 개요

서해대교, 인천대교, 영종대교와 같은 장대교량(케이블교량)에 있어서 케이블 부재인 사장재(stay cable)나 행어(hanger)의 진동 및 장력은 유지관리 관점에서 매우 중요한 항목이다. 케이블은 바람이나 구조물의 진동과 같은 여러 원인에 의해 진동이 발생할 수 있으며, 전 세계적으로도 공용 중 케이블 진동현상 발생이 다수 목격되고 있다. 특히 비를 동반한 5~15m/s 정도의 바람에서 발생하는 풍우진동(rain-wind induced vibration)의 경우, 진폭이 수 미터에 달하는 진동현상이 여러 교량에서 관측되기도 하였다. 이러한 유해 진동에 대한 제어대책으로 댐퍼(damper), 연결재(cross-tie) 등이 설치되나 진동 메커니즘 자체가 명확히 규명되고 있지 않기 때문에 진동이 전혀 발생하지 않도록 하거나 진동을 완벽히 제어할 수 없는 것이 현실이다. 이러한 문제점에 대비하고 보완하기 위해 대부분의 케이블 교량에서는 주기적인 육안 및 비파괴 점검과 함께 케이블에 가속도계를 설치하여 케이블 진동을 감지하고 케이블 장력을 관리하는 방식을 채택하고 있다.

그러나 점검 과정에서 점검자의 주관이 개입되거나, 접근 가능한 점검부위가 제한되거나, 점검에 소요되는 시간이 매우 길거나, 24시간 내내 상시 점검할 수 없는 한계가

있다. 또한 가속도계의 경우에도 센서가 매우 고가이고 교량수명에 비해 센서 자체가 반영구적이지 못하기 때문에 장기적인 적용 및 유지관리 측면에서 문제점이 있다. 특히 교량상의 전체 케이블이 아닌 일부 케이블에만 설치(서해대교 : 144개 케이블 중 24개, Oresund교 : 160개 케이블 중 16개)되고 있기 때문에 가속도계가 설치되지 않은 케이블에 진동이나 장력 손실이 발생하는 경우에는 감지가 매우 어렵다. 또한 센서 고장, 교체, 노이즈 발생 등으로 이상신호의 발생빈도도 비교적 높은 편이다.

따라서 점검의 한계와 고가의 센서를 대체할 수 있는 방안에 대한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있으며, 본고에서는 유용한 대안의 하나로서 영상(image)을 활용한 케이블 모니터링 기법을 소개하고자 한다. 영상기법은 실시간 연속적으로 다수의 케이블을 한 화면에 담을 수 있고 줌과 회전이 가능하기 때문에 전체 케이블을 모니터링하기에 적합한 장점이 있다. 또한 케이블 진동발생시 진폭이 상대적으로 크기 때문에 기존 가속도계처럼 감도가 매우 높지 않아도 영상만으로도 충분히 감지할 수 있다.

2. 영상처리 기법

영상기반 케이블 모니터링 시스템은 기본적으로 디지털

영상을 취득할 수 있는 영상장비, 수집된 영상을 저장하는 하드웨어와 분석용 소프트웨어로 구성된다. 영상장비로는 일반적인 디지털 카메라나 디지털 캠코더로부터 고정밀·고감도의 카메라까지 다양하게 적용할 수 있으며, 하드웨어는 일반 노트북이나 컴퓨터를 사용할 수 있다.

케이블 모니터링을 위해서는 먼저 영상장비를 통해 수집되는 동영상을 각각의 영상으로 변환해야 한다. 영상은 2차원 함수 $f(x, y)$ 로 정의될 수 있으며, x 와 y 는 공간좌표를 의미한다. 좌표 (x, y) 에서의 f 의 진폭(amplitude)을 그 점에서의 밝기(intensity)라고 부른다. 그레이 레벨(grey level)은 흑백 영상의 밝기 의미로 사용된다. 칼라 영상은 개별적인 2-D 영상을 결합해서 형성되며, RGB 칼라 영상의 경우 적, 녹, 청 세 개의 개별적 성분의 영상들로 구성된다. 영상은 좌표와 진폭에서 연속적일 수 있는데, 이러한 영상을 디지털 형태로 변환한 것이 디지털 영상이며, 좌표값을 디지털화하는 것을 샘플링(sampling), 진폭값을 디지털화하는 것을 양자화(quantization)라고 부른다.

샘플링과 양자화의 결과는 실수의 매트릭스이다. 영상 $f(x, y)$ 를 샘플링한 결과, 영상이 M 개의 행과 N 개의 열을 갖는다고 하면, 이 영상의 크기(해상도)는 $M \times N$ 이라고 할 수 있다. $M \times N$ 크기의 디지털 영상은 다음과 같이 표현된다.

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,N-1) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f(M-1,0) & f(M-1,1) & \dots & f(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

영상 $f(x, y)$ 배열의 각 요소를 영상 요소(image element), 화소(picture element), 픽셀(pixel), 또는 pel이라고 부른다. 각 화소의 진폭은 밝기를 의미하는데, 이는 계측센서에서 측정되는 데이터와 같이 수치값을 가진다. 즉, 영상기반 모니터링 기법에서는 하나의 화소가 하나의 센서가 될 수 있다는 것이다. 그러므로 하나의 화소에 얼마만큼의 정보가 담겨있어야 하고, 몇 개의 화소(해상도)가 필요한지를 결정하는 것이 케이블을 모니터링하는데 있어 중요한 변수가

된다.

교량의 동특성을 분석하기 위해서는 가속도계의 샘플링 주파수를 결정하는 것이 중요하듯이 영상처리를 이용하여 케이블을 동적으로 모니터링하기 위해서는 프레임의 수를 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 케이블 교량에 사용되는 케이블의 기본 진동수(1차 모드)는 0.5~2.0Hz 범위이므로 신호처리상 최소 4fps(frames per second) 이상이 필요한데, 상용 디지털 카메라가 30fps 이상을 지원하고 있으므로 모니터링에 큰 제약은 없다고 할 수 있다.

한 개 영상 $f(x, y)$ 의 크기($M \times N$)가 커지는 것은 영상처리 시 매트릭스의 크기가 커지는 것을 의미하므로 다수의 영상을 동시에 연산해야 하는 분석과정에 많은 시간이 소요된다. 따라서 영상을 변환하거나 압축하여 매트릭스 크기를 적절히 줄여주는 기술이 필요하다. 예를 들면, 데이터 클래스는 8-비트 영상, 데이터 유형은 밝기 영상과 이진 영상 선정 같은 것이다.

케이블 진동을 효과적으로 모니터링하기 위해서는 영상처리 과정이 중요하다. 즉, 영상 속에서 주변 환경과 구별되는 케이블만을 분리해내거나 관심영역(ROI, region of interest)을 지정하고, 원하는 정보만을 증폭시키거나 추출해야 만이 다음 단계에서 높은 정도의 패턴인식을 수행할 수 있다. 이를 위해 밝기변환, 공간 필터링, 영상복원, 영상 압축, 형태학적 영상처리, 영상분할 등의 과정을 거친다(그림 1).

기본적인 패턴인식 개념은 각 화소의 밝기를 시계열적으로 배열하여 변화를 추적하는 것이다. 이 때 케이블의 영역을 벗어난 화소를 선택할 경우 주변 환경 변화에 의해 밝기가 변할 수 있기 때문에 케이블을 모니터링할 수 없게 된다. 따라서 선택한 영상 내에서 케이블 객체가 최소한 한 개 화소 이상에 포함되도록 해당 열벡터 또는 행벡터에 대한 평균 밝기 변화를 대상으로 한다. 시계열적으로 배열한 평균 밝기의 변화는 계측센서로 측정된 데이터와 동일한 의미를 가진다. 즉, 계측센서의 종류에 따라 변위, 속도, 가



(a) 원래 영상

(b) 히스토그램 영상

(c) 회전 영상

그림 1 영상처리 예

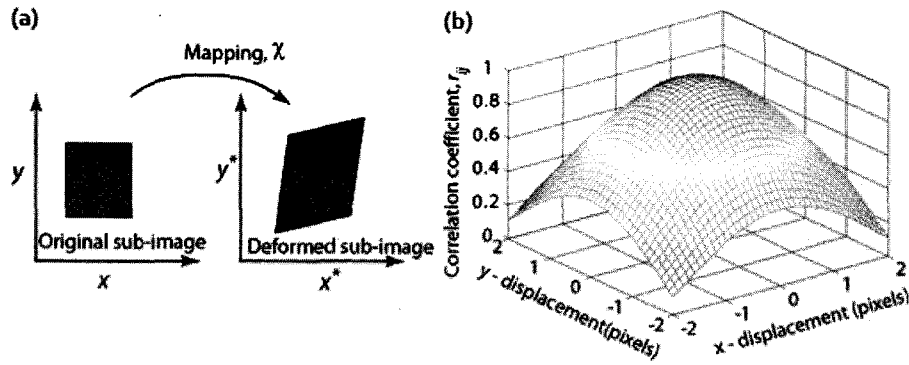


그림 2 디지털 영상 상관(DIC) 개념

속도가 측정되는 것처럼 영상의 밝기 변화도 적절한 변환을 통해 이들과 같은 결과를 얻을 수 있는 것이다. 이러한 접근방식은 정확한 변위 산정은 어렵지만 매트릭스 연산처리가 비교적 간단하기 때문에 케이블 진동현상을 실시간 감지하고 장력을 추출하는데 효과적인 장점이 있다.

또 하나의 접근방식으로는 영상간의 상관성(correlation)을 이용하는 것이다. 디지털 영상 상관(DIC, digital image correlation) 기법에서 변형이 없는 상태의 영상과 변형이 있는 상태의 영상을 매칭할 경우 단위 픽셀을 사용하지 않고 구조물의 움직임을 예상한 ROI 영상인 픽셀 집합을 이용한다. 이는 구조물의 변형을 구할 때 단위 픽셀을 사용할 경우에는 변형 후의 영상에서 같은 명암의 레벨을 가지는 수많은 단위 픽셀들이 존재할 가능성이 높아 동일 픽셀에 근거한 해석이 용이하지 못하기 때문이다(김성완 등, 2010). 변형이 없는 영상에서 임의의 명암 패턴을 가지는 ROI 영상의 사각형 픽셀 집합을 만들고 변형이 발생한 영상에서 그와 가장 유사한 패턴을 가지는 픽셀 집합을 상관성으로부터 찾아서 기준점의 변화를 결정하는 것이다. 이 방식은 변위 산정이 가능한 반면, 모든 시간에 따라 변화하는 영상에서 $N_x N_y (M_x - N_x)(M_y - N_y)$ 의 차수를 포함한 정규상호상관의 계산을 하거나 두 개의 합계표(Lewis, 1995)를 사용하여 필요한 계산 양을 감소시킬 수 있지만, 평균벡터를 이용하는 방법보다는 연산처리가 느리다.

3. 케이블 동특성을 이용한 장력추정 기법

케이블의 동특성을 이용한 장력의 추정에는 진동현 이론을 적용한다. 케이블의 고유진동수로부터 장력을 산정하는 경우, 일반적으로 케이블의 휨강성 및 새그(sag)의 영향을 무시하고 식 (2)에 표시한 1차 또는 2차의 진동현 이론식에 의하여 장력을 산정하게 된다.

$$T = \frac{4wl^2}{n^2g} \cdot (f_n)^2 \quad (n=1,2,\dots) \quad (2)$$

휨강성을 무시하지 않고 케이블의 양 정착단을 한지로 가정한 경우에는 케이블 장력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{g}{4wl^2} T + \frac{Elgm^2}{4wl^4} n^2 = b + a \cdot n^2 \quad (3)$$

여기서, f_n 은 케이블의 n 번째 고유진동수, g 는 중력가속도, w 는 케이블의 단위길이당 중량, l 은 케이블의 유효길이이고 El 은 케이블의 휨강성이다. 식 (2) 또는 식 (3)에서 고유진동수를 제외하면 다른 변수들은 교량의 설계나 시공 자료로부터 쉽게 얻어지는 상수값이다. 즉, 측정된 데이터로부터 주파수분석을 통해 고유진동수를 찾게 되면, 해당 케이블의 장력은 쉽게 추정되는 것이다. 영상의 밝기 변화를 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용해 주파수분석하게 되면 파워스펙트럼 상에서 피크값을 얻게 되고, 이 피크값이 케이블의 고유진동수가 되며, 이로부터 케이블의 장력을 추정하는 것이다.

4. 케이블 진동실험을 통한 검증

도로교통연구원에 설치된 100m 길이의 케이블 진동실험대에서 인력가진으로 케이블에 진동을 발생시키고 이를 상용 디지털 카메라로 촬영하였다. 영상의 크기는 480×640픽셀이며, 프레임수는 30fps를 선택하였다. 그림 3은 1차 모드로 가진시 촬영된 동영상 캡처한 화면을 대표적으로 나타낸 것이다. 그림 4는 영상처리 및 패턴인식을 위해 동영상을 각각의 영상으로 분리하여 시계열적으로 배열한 것을 일부 나타낸 것이다.

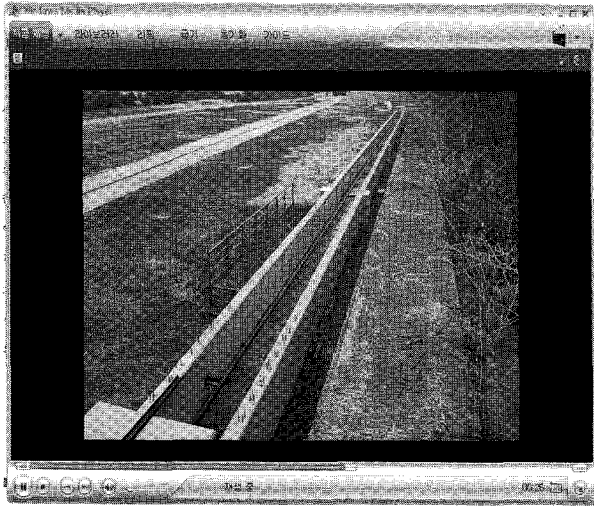


그림 3 케이블 진동실험 동영상

그림 5는 영상압축을 통해 컬러 영상을 그레이 레벨로 변환한 뒤, 영상분할을 통해 분석하고자 하는 케이블 영역 $f(225, 230)$ 를 추출한 것이다. 이렇게 추출된 영역을 대상으로 별도의 영상처리 과정을 거친 후, 패턴인식 단계로 넘어간다. 그림 6과 그림 7은 패턴인식에 사용되는 밝기 변화에 대한 열벡터와 행벡터 시계열을 중첩하여 나타낸 것이다. 그림에서 시계열의 기간은 약 18.3초(550프레임)이다. 이것은 시간이력 측정수를 512개 이상 확보하기 위한 것이며, 주파수 분해능을 높이면 시계열 기간(프레임수)을 간단히 늘려 주기만 하면 된다.

밝기 변화 시계열에 적용되는 샘플링 주파수는 30Hz, 시간이력 측정수는 $2^9=512$, 주파수 분해능은 0.0586Hz, 창함수는 Hanning Window를 사용하였으며, Butterworth 필터를

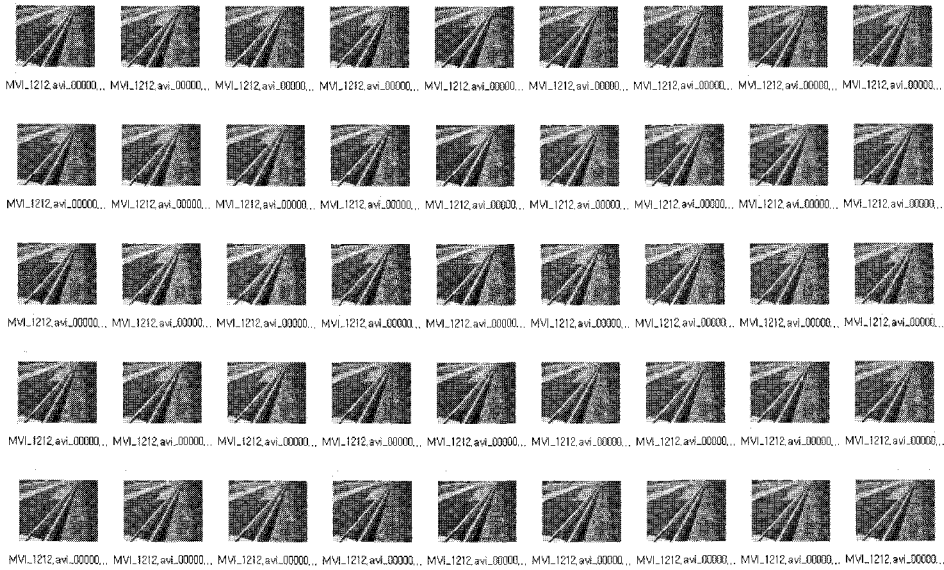


그림 4 케이블 진동실험 동영상으로 분리된 개별 영상들

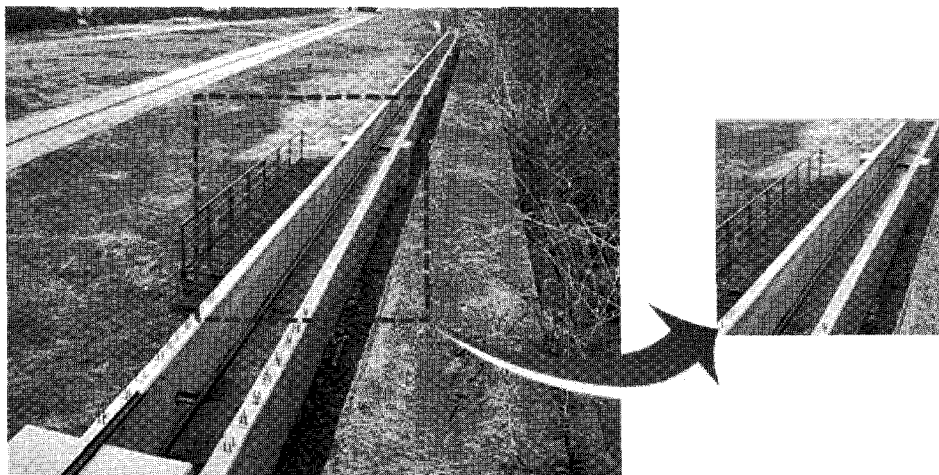


그림 5 영상압축 및 영상분할 과정

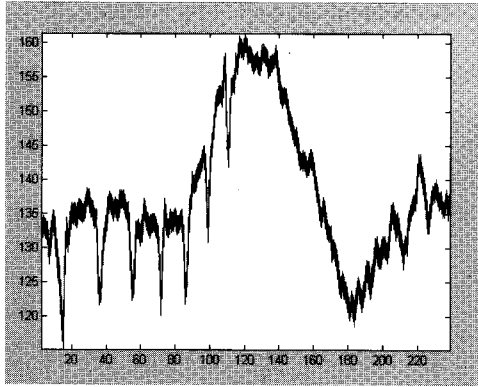


그림 6 밝기 변화 시계열(열벡터)

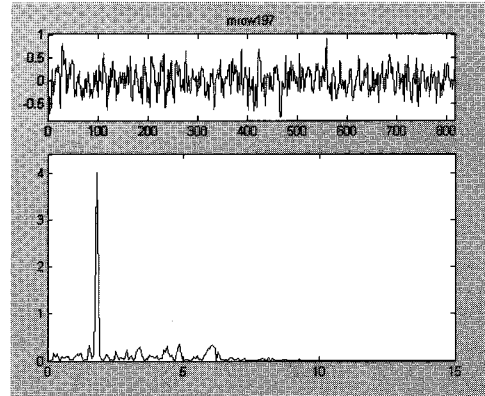


그림 9 2차 모드 가진시 197행 시간이력 및 FFT 결과

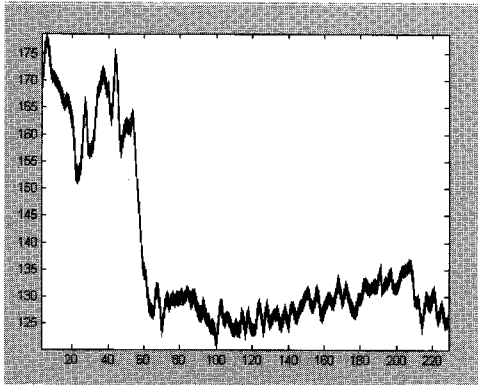


그림 7 밝기 변화 시계열(행벡터)

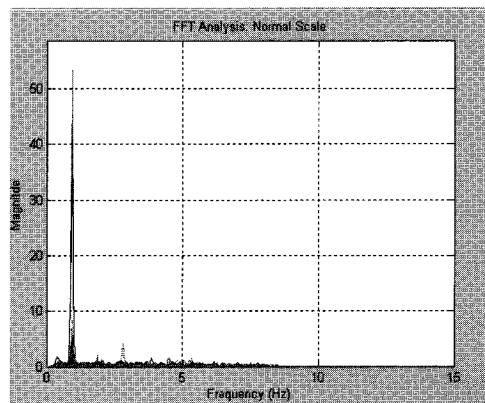


그림 10 1차 모드 가진시 전체 열벡터 FFT 결과

사용하여 필터링 대역을 선정하였다. 한 예로 그림 8과 그림 9는 한 개 화소 열과 화소 행에 대한 밝기 변화의 시간 이력과 FFT 분석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 1차 모드는 0.9375Hz, 2차 모드는 1.8165Hz에서 탁월주파수가 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 10과 그림 11은 전체 열벡터와 행벡터에 대한 FFT 분석결과를 중첩하여 나타낸 것인데, 마찬가지로 0.9375Hz, 1.8165Hz에서 탁월주파수가 나타나는 것을 알 수 있다.

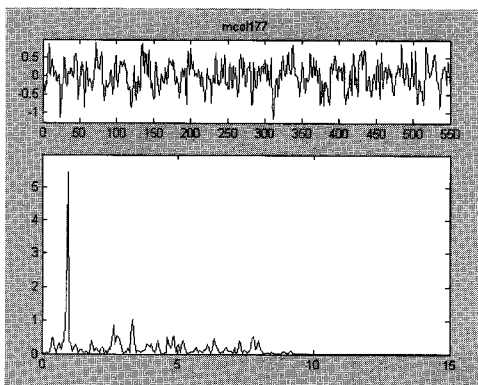


그림 8 1차 모드 가진시 177열 시간이력 및 FFT 결과

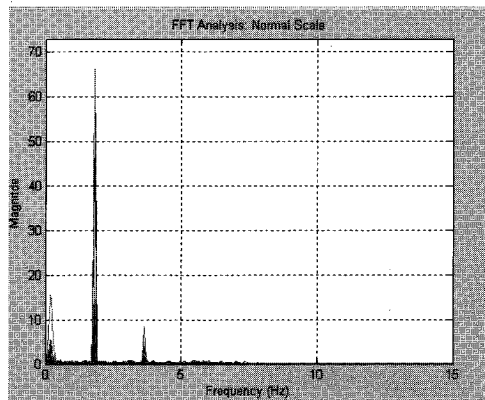


그림 11 2차 모드 가진시 전체 행벡터 FFT 결과

그림 12는 디지털 영상 상관을 적용하여 임의의 ROI 영상에서 변위 시간이력과 FFT 분석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 1차 모드는 0.9375Hz에서 탁월주파수가 나타났으며, 앞서의 밝기 변화의 시간이력과 FFT 분석결과(그림 8 참고)와 동일한 것을 알 수 있다.

그림 13은 케이블 진동실험대에 케이블을 가설할 당시, 가속도계를 설치하여 측정된 가속도를 FFT한 결과이다. 표 1

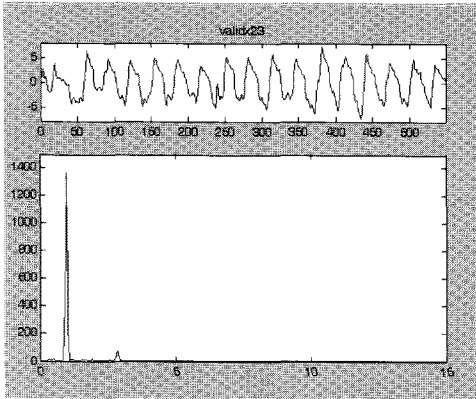


그림 12 1차 모드 가진시 DIC를 이용한 변위 시간이력 및 FFT 결과

은 가속도계와 영상의 결과를 비교한 것이다. 여기서 추정장력은 식 (2)와 식 (3)을 사용하였다. 표에서 고유진동수의 오차는 0.8%, 추정장력의 오차는 1.1%로 매우 낮아 만족할 만한 수준의 결과를 얻었다. 즉, 가속도계 대신 영상장비를 사용해서도 케이블의 동특성을 충분히 추출할 수 있다는 것을 의미한다.

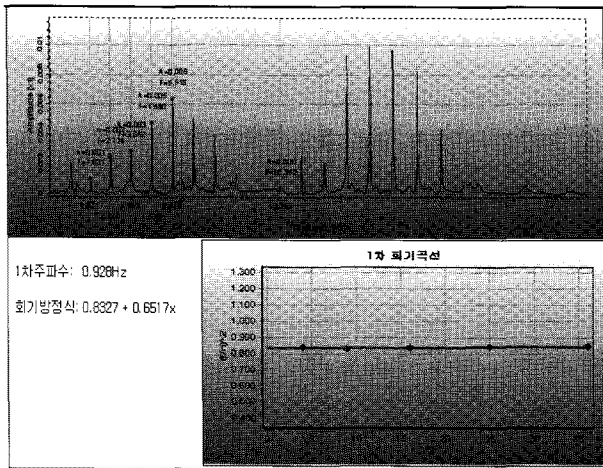


그림 13 가속도계에 의한 FFT 결과

표 1 가속도계와 영상의 결과 비교

구 분	가속도계	영상기반	오차
측정시기	2008.5	2009.2	
1차 진동수(Hz)	-	0.9375	-
2차 진동수(Hz)	1.831	1.8165	0.8%
진동수 평균(Hz)	0.928	0.923	0.6%
추정장력(ton)	175.88	173.94	1.1%

5. 맺음말

본고에서는 디지털 카메라와 같은 영상장비로 촬영한 영상을 활용하여 장경간 케이블교량에 사용되는 케이블 부재를 모니터링하는 기법을 소개하였다. 또한 100m 길이의 케이블 진동실험을 통해 개발된 기법을 적용하여 타당성을 검증하였다. 이러한 영상처리를 활용한 모니터링 기법은 다양한 활용연구를 통해 기존의 교량 유지관리시 문제시됐던 점검의 한계와 고가의 센서를 대체할 수 있는 대안이 될 수 있으리라 기대한다.

참 고 문 헌

1. 김성완, 김남식(2010) 영상처리기법을 이용한 다중 변위응답 측정 알고리즘의 검증. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제30권, 제3A호, pp. 297-307.
2. Gonzalez, R.C., Woods, R.E., and Eddins, S.L. (2004) Digital Image Processing Using MATLAB, Prentice Hall.
3. Lewis, J.P. (1995) Fast normalized cross-correlation. Vision Interface, pp. 120-123.
4. Park, J.C., Gil, H.B., Park, C.M., and Jo, B.W. (2009) Vibration Monitoring of Stay Cables Using Image Making and Pattern Recognition. 33rd IABSE Symposium, Bangkok.
5. [http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation.](http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation)

[담당 : 강형택, 편집위원]