

# 사장교 케이블의 장력 추정을 위한 영상변위 측정법의 효율적 적용에 대한 연구

이형진  
창원대학교 토목환경화학융합공학부

## Study on the Efficient Application of Vision-Based Displacement Measurements for the Cable Tension Estimation of Cable-Stayed Bridges

Hyeong-Jin Lee

School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University

**요약** 본 논문에서는 사장교 케이블의 장력 추정을 위한 영상변위 측정법의 간편성과 효율성을 보이고 효과적인 적용에 필요한 요구조건에 대해 연구하였다. 간편성과 효율성을 보이기 위해 상용 캠코드를 이용한 최소한의 장비만으로도 필요한 영상변위 측정이 가능함을 증명하였다. 이 경우 최소 장비 구성과 고속촬영에 따른 해상도 저하에 의한 크기오차가 발생할 수 있으나 진동법에 필요한 고유진동수 추정의 정확도 확보는 충분히 가능함을 알 수 있었다. 또한 진동법을 이용한 장력 추정에서 정확한 고유진동수의 검출을 위해서는 적절한 주파수 범위의 확보가 가장 중요함을 확인하였다. 이 결과를 바탕으로, 상용캠 사용 조건하에서 촬영프레임속도에 따른 장력 추정의 정확도 변동에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 모형 사장교의 케이블에 대한 장력 추정 실험을 수행하였다. 모형실험을 통해 다양한 고유진동수를 가지는 케이블에 대해 촬영 프레임 속도에 따라 검출 가능한 장력을 정리하였다. 그 결과 에일리어싱 효과와 가진력의 저주파수 왜곡효과를 고려하여 추정될 고유진동수가 적절한 주파수 범위(대략 이론적 범위의 10~75%) 내에 위치하도록 프레임 속도를 결정되어야 함을 보였다.

**Abstract** In this study, the convenience and efficiency of vision-based displacement measurement (VBDM) to estimate the cable tension of cable-stayed bridges and the requirements for its effective application were examined. To demonstrate its convenience and efficiency, it was confirmed that VBDM can be accomplished with a minimum amount of equipment using a commercial camcorder. In this case, it was found that the accuracy of estimation of the natural frequencies is sufficient, even though magnitude errors can occur when conducting high-speed recording at the low resolution afforded by the minimal equipment employed. It was also confirmed that the most important factor in detecting the precise natural frequencies is the use of the appropriate frequency range in the tension estimation using vibration. Based on these results, a study was carried out on the accuracy variation of the estimated tension according to the frame rate of a commercial camcorder. For this purpose, an experiment was performed to estimate the cable tension in a cable-stayed bridge model. Through this experiment, the detectable tensions of cables with various natural frequencies as a function of the frame rate were summarized. As a result, it was shown that the frame rate should be determined based on the natural frequency which is estimated to be located within the appropriate frequency range (approximately 10~75% of theoretical range) considering the aliasing and low-frequency distortion due to excitations.

**Keywords** : Aliasing, Cable-Stayed Bridge, Cable Tension, Frame Rate, Vision-based Displacement

이 논문은 2015 ~ 2016년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임

\*Corresponding Author : Hyeong-Jin Lee(Changwon National Univ.)

Tel: +82-55-213-3774 email: leehjn@changwon.ac.kr

Received August 24, 2016

Revised September 8, 2016

Accepted September 9, 2016

Published September 30, 2016

## 1. 서론

교량은 사회기간시설물의 한 종류로 유지관리와 안정성 확보가 매우 중요하다. 특히, 현수교나 사장교 등의 케이블지지 교량은 장대교량에서 많이 채택되고 있는 방식으로 그 규모면에서도 중요성이 크다 할 수 있다[1-2]. 케이블지지 교량에서는 거의 대부분의 하중을 케이블이 지지하므로 시공 초기의 안정성에서나 유지관리에서 케이블의 장력관리는 무엇보다 중요한 핵심사항이다.

케이블 장력 추정 기법으로 사용되는 방법은 보통 직접법과 간접법으로 구분할 수 있다[3-7]. 직접법은 통상 교량에 장착된 로드셀이나 광섬유 센서 등을 이용하여 케이블에 가해지는 장력을 직접적으로 확인하는 방법을 말한다[4]. 통상 장력을 직접 측정하는 계측기들은 시공시 미리 설치해야 하므로 초기 비용이 들고 유지관리의 문제가 있을 수 있다. 간접법에 해당되는 방법으로는 교량의 케이블에서 진동을 계측하여 역으로 장력을 추정하는 진동법이 있다[4-7]. 진동 계측 센서는 교량 사용 중에 설치하여 활용할 수 있다는 장점이 있으나 장착 작업의 어려움은 여전하여 효율적이고 편리한 방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 그 외에 시공시 장력센서가 설치되지 못한 기설 교량에서 초음파나 자기센서 등의 특수한 센서로 장력을 직접 추정하는 방법에 대한 연구도 있다[8-10].

계측의 효율성과 편이성은 사용되는 센서의 종류에 많이 좌우된다. 보통 센서의 종류는 크게 변형률계(Strain gauge), 로드셀, 변위계(LVDT 등), 가속도계 등 접촉식 센서와 레이저 변위계나 영상변위 등의 비접촉 센서로 나눌 수 있다. 그 외에 전기선이나 데이터선의 유무에 따라 유선, 무선 방식으로 나눌 수도 있다[11].

이 방법들이 조합되어 사용되거나 대표적인 방식은 시공과정에 설치된 로드셀 종류로 장력을 직접 계측하는 방법과 교량 사용 중에 가속도계를 설치하여 케이블의 고유진동수를 추정하여 장력으로 환산하는 방법이다. 전자는 직접법으로 초기 건설 비용 문제나 센서의 지속성 유지 문제가 있고, 후자는 센서의 설치에 따른 작업의 어려움이나 부가질량체로 인한 고유진동수 변동의 문제 등이 있었다. 따라서 케이블 장력 추정의 분야에서는 계측 및 추정의 정확도 향상 방안의 연구와 더불어 케이블 장력 추정 과정의 효율성 및 편이성 증대를 위한 연구도 많이 진행되어 왔다.

본 논문에서는 후자 쪽에 초점을 맞추어 상용캠코드를

를 사용한 영상변위측정(Vision-based displacement measurement)법을 사장교 케이블의 장력 추정에 적용하여 편이성을 도모하고 이 과정에서 정확도의 저하를 줄이는 방안에 대하여 연구하였다.

영상변위측정법은 산업설비 등에서 설비관리에 사용되다 최근 다양한 분야에서 활용되며 많이 주목되고 있는 계측법이다[12-13]. 비접촉 방식이므로 측정 장비설치가 용이하다는 것이 가장 큰 장점이다. 반면에 원거리 촬영이나 광량에 따른 해상도 저하 문제, 촬영각도에 따른 크기 오차의 보정 문제, 고속샘플링이 필요한 경우 고속캠이나 부가장비가 필요할 수 있다는 문제 등이 있다.

진동법을 이용한 케이블 장력 추정에서는 고유진동수 추정이 핵심이므로 영상변위측정법의 주된 문제 중의 하나인 측정변위의 크기오차에 따른 영향이 크지 않다. 따라서 영상변위측정법을 진동법을 이용한 케이블 장력 추정에 적용한다면 그 장점을 집중적으로 활용하는 효율적인 방안이 될 수 있다. 이것은 주파수 값의 정확도를 위한 적절한 시간 계측의 정확도를 확보할 수 있다면 어느 정도의 크기오차는 무시할 수 있다는 의미이다. 이는 고가의 영상장비 나 부가적 장비 없이 상용 캠코드를 사용한 계측도 가능할 수 있음을 말한다.

이러한 개념에 기초하여 본 논문에서는 일반 상용 캠코드를 사용하여 사장교 케이블의 장력 추정을 수행하는 체계를 구축하고 효율적인 장력 추정에 필요한 조건을 연구하였다.

## 2. 본론

### 2.1 교량 케이블의 장력 추정법

#### 2.1.1 진동법을 이용한 케이블 장력 추정 일반

장력 추정 설비가 미리 설치되지 못한 기설 교량의 케이블 장력 추정으로 가장 많이 쓰이는 방법이 진동법을 이용한 장력추정이다. 이 방법은 실제 교량의 케이블에서 상시진동(Ambient vibration)이나 가진기(Exciter)에 의한 진동을 계측하고[4-7], 적절한 신호처리(Signal processing)를 통해 케이블의 고유진동수들을 추정한 후 이를 이론적으로 유도된 장력과 고유진동수의 상관 관계식을 이용하여 장력으로 환산하는 방법이다. Fig. 1은 이 방법 중 가장 일반적인 가속도계를 이용한 진동법의 흐름을 보인 것이다.

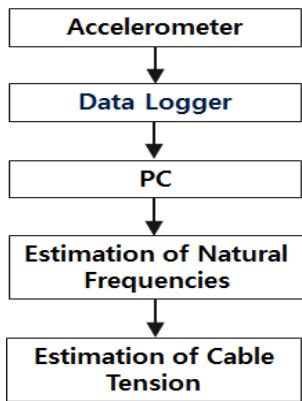


Fig. 1. Flow of Typical Procedure for Tension Estimation

2.1.2 진동법을 이용한 장력 추정 이론식

진동법을 이용한 장력 추정의 핵심은 고유진동수들과 장력사이의 관계식이라 할 수 있다. 크게 케이블 구조를 현(String)으로 고려하여 고유진동수 산정하는 방법, 인장력을 받는 보 구조물로 취급하는 방법이 있다. 그 외에도 사용모드 수에 따른 이론식, 실제 케이블의 상태에 따라 유효길이의 보정이나 새그(sag) 효과의 고려에 따른 다양한 방식의 장력환산식이 존재한다.

1) 현의 진동이론[4-7]

연속계의 진동에서 가장 간단한 모델로, 케이블의 길이가 길고 큰 장력이 작용되는 경우에 휨 강성의 영향과 새그(sag) 효과를 무시할 경우 케이블의 진동을 양단이 고정된 현의 모델로 고려할 수 있다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T \cdot g}{4wl^2} \tag{1}$$

여기서,  $T = \frac{4wl^2}{n^2g} f_n^2$  이며,  $l$  은 케이블의 길이,  $f_n$  은  $n$ 차 고유진동수,  $w$ 는 케이블의 단위중량,  $g$ 는 중력가속도이다.  $n$ 은 통상 1을 많이 사용한다.

케이블이 순수한 현의 거동을 한다면  $f_n = n f_1$  이 되고 모든 진동모드에 대해 동일한 크기의 장력이 얻어진다. 그러나 실제 케이블은 휨 강성과 sag 효과에 대한 영향이 포함되어 있기 때문에 모든 진동모드에 대해 선형 관계를 갖지는 않는다.

2) 보의 진동이론-다중모드[4-7]

케이블의 휨강성을 고려하는 일반적인 경우 양단이 고정된 단순보로 보고 운동방정식을 구성한다. 이를 케이블의 여러 조건의 영향을 고려하여 풀면 다양한 장력식이 유도된다. 대표적으로 Zui et al 의 장력식[6]과 Shimada의 장력식[5]이 있다. 여기서는 Shimada의 장력식을 보였다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T \cdot g}{4wl^2} + \frac{EI_{eq}\pi^2g}{4wl^4} \cdot n^2 = b + a \cdot n^2 \tag{2}$$

추정된 고유진동수들을 식(2)에 따라 1차 선형회귀분석을 하여  $a$ 와  $b$ 를 구하면 아래의 식으로 장력과 휨강도를 구할 수 있다.

$$T = \frac{4wl^2}{g} \cdot b \tag{3}$$

$$(EI)_{eq} = \frac{4wl^4}{\pi^2g} \cdot a \tag{4}$$

2.1.3 영상변위계를 이용한 진동측정

영상변위 측정법을 이용한 진동법은 Fig. 2와 같이 캠코드를 이용하여 동영상상을 촬영하고 이미지처리(Image processin)기법을 이용 변위로 환산하는 방법이다. 이 방법에서는 계측량이 가속도에서 변위로 바뀌게 되면 저주파부분의 추정이 용이해지므로 보통 사용되는 1차 고유진동수 추정의 정확도가 올라가는 장점도 있다.

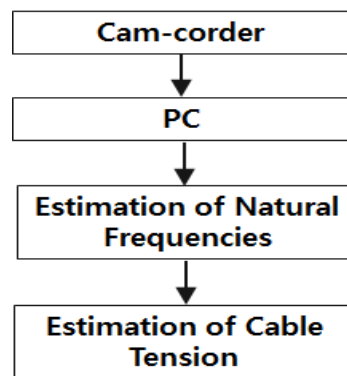


Fig. 2. Procedure of Tension Estimation Using Vision-Based Displacement Measurement

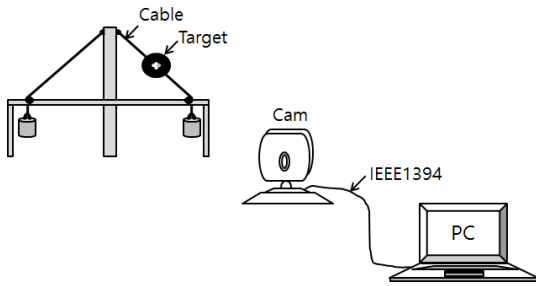


Fig. 3. Setup of Vision-Based Displacement Measurements for Tension Estimation of Cable-Stayed Bridge

영상변위측정법을 이용한 사장교 케이블 장력 추정을 위한 구성의 개요는 Fig. 3에 보였다. 크게 구조물에 부착하는 타겟(Target)과 타겟을 촬영하는 캠코더, 영상신호 데이터를 변위로 변환할 컴퓨터로 구성되어있다.

영상변위측정법은 비접촉식 방법이 가지는 장점이 있으나 고유의 단점도 존재한다. 보통 광학식 센서들은 날씨나 광량에 따른 해상도 저하, 측정거리 제약 등의 문제가 있을 수 있고, 촬영각도에 따른 크기오차로 인해 다측점 계측을 통한 보정이 필요할 수 있다. 더불어 고해상도 및 고속촬영을 수행하며 실시간(Real-time) 변위 변환을 수행할 경우 고성능의 캠코더 및 부가장치(프레임 그라브(Frame grabber) 등)가 필요하여 비용의 효율성이 저하될 수도 있다. 특히, 본 논문에서와 같이 특수목적의 고속 캠코더가 아닌 상용 캠코더를 이용하는 경우, 촬영 프레임속도(Frame Rate)가 커질수록 촬영 해상도는 급격히 저하되어 최종적으로 크기오차가 많이 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 문헌[12]의 이미지 처리 알고리즘을 사용하되 동영상 처리속도 문제를 해결하기 위해 실시간 데이터 처리를 포기하고, 촬영 후 동영상을 변환하는 방법을 채택하여 사용하였다. 또한, 케이블 장력 추정 경우에는 주파수 값의 정확한 추정이 가장 중요하므로 해상도 저하에 따른 크기오차 발생 문제는 일정 부분 무시하고 상용캠코더 사용에서도 주파수 추정의 정확도를 확보하는 문제에 집중하였다.

주파수 추정의 정확도 확보 문제는 결국 정확하고 적절한 샘플링타임(Sampling time)의 설정이 중요하리라 생각되었다. 이는 Fig. 4와 같이 고주파수의 신호를 큰 간격의 샘플링타임으로 추정할 경우 저주파 신호로 잘못 판정하는 주파수 왜곡 문제인 Aliasing의 발생이 예측되기 때문이다[14].

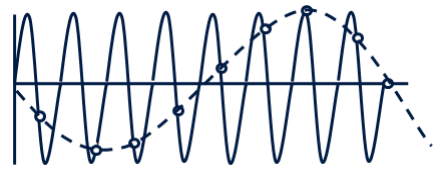


Fig. 4. Aliasing Effect

영상변위측정법에서는 촬영 프레임속도가 샘플링 주파수에 해당된다. 통상 Nyquist 이론[14]에 따라 샘플링 타임의 역수인 샘플링 주파수( $f_s = 1/\Delta t$ )의 반까지의 주파수 범위( $0 \sim f_s/2$  Hz)가 고유진동수를 검출할 수 있는 범위이다. 본 논문에서는 실험을 통해 촬영프레임 속도에 대한 실제 유효 주파수 범위를 조사하였다.

## 2.2 예제해석

### 2.2.1 모형실험 및 진동수 추정

채택된 영상변위 측정법의 성능과 사용성 및 주된 사용조건의 영향을 살펴보기 위하여 사장교 케이블의 진동 시험을 수행하였다. 모형교량은 Fig. 5와 같이 한 개의 주탑과 양쪽으로 각각 3개씩의 케이블을 가진 모형을 제작하였다. 케이블은 직경 1mm의 강재 wire를 사용하였다.



Fig. 5. Model of Cable-Stayed Bridge



Fig. 6. View of Applied Load as Cable Tension

길이는 각각 1.24, 1.54, 1.92m이며, 케이블 장력은 각각 3, 5, 17 kgf이 가해졌다(Fig. 6). 각 항목에 대해 3개의 속도로 촬영되어 총 27개의 경우(Case)로 구성되었고 각 경우에 3회씩 반복 실험을 수행하였다. 실험의 제원 및 계산된 고유진동수는 아래 Table 1과 같다.

Table 1. Specifications of Cables and Cases

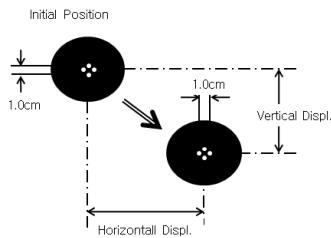
Case no.	L(m)	Actual Tension (kgf)	Calculated Nat. Frq. (Hz)	Order of Nat. Frq.
1-3	1.24	3	13.07	3
4-6		5	16.88	6
7-9		17	31.12	9
10-12	1.54	3	10.53	2
13-15		5	13.59	5
16-18		17	25.06	8
19-21	1.92	3	8.44	1
22-24		5	10.90	4
25-27		17	20.10	7

타겟은 Fig. 7과 같이 설치하여 동영상 촬영하고 고유진동수를 추정하였다.

장력 환산을 위해서는 3회의 충격하중에 의해 추정된 고유진동수의 평균값을 사용하였다. 이때, 가진 방식이나 초기변형의 정도에 따라 저주파 대역의 왜곡이 심할 수 있어, 충격하중의 영향이 남아있는 응답의 초기부분을 잘라내고, 나머지 부분만 사용하였다.



(a) Recording motion of Target Image



(b) Displacements According to Movements

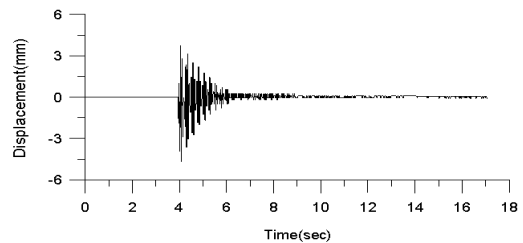
Fig. 7. Image Recording and Processing

동영상 촬영은 상용 캠코더 중에서 비교적 고속촬영이 가능한 제품(삼성 HMX-F90 캠코더, 최고 촬영 프레임 속도 60 FPS)을 사용하였다. 촬영된 동영상은 촬영 완료 후 변위로 변환하는 비실시간 방식이므로 고속촬영에 따른 부가장치(프레임 그레버)는 장착하지 않았다.

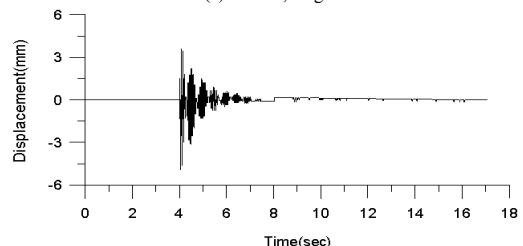
각 실험마다 각각 30(해상도 1280x720), 60(해상도 720x480) FPS(Frames Per Second)의 프레임 속도로 촬영되었고, 구형 캠코더 장비에 대한 적용성도 검토하기 위하여, 60 FPS로 추가 실험하여 동영상 리샘플링(Re-sampling)을 통해 20 FPS의 영상을 만들어 이에 대한 변위 변환도 수행하였다.

변위는 수평, 수직의 2개 성분이 구해졌으며 사장교 케이블의 경사각에 따라 성분의 크기가 작은 경우, 변환이 원활하게 이루어지지 않음을 볼 수 있었다. 이는 사용된 동영상의 해상도가 뛰어나지 못한 경우, 상대적으로 작은 크기의 변위는 검출되기 어렵기 때문으로 파악되었다. 본 논문에서 사용된 케이블은 경사각이 완만한 경우가 많아 모두 수직 성분의 사용으로 통일하였다. 또한 사장교에서는 현수교 행어 등과 달리 케이블의 형상과 경계의 변동이 적어 새그(Sag)나 경계조건에 따른 유효길이의 변동 등의 영향도 적다고 판단되었다. 따라서 장력식 환산에는 식(1)의 방법을 적용하였다.

변환된 변위의 시간이력의 일부는 Fig. 8-9에 보였다. 고유진동수가 큰 케이블일수록 강성이 커져 변위가 작고 변위검출에 오차가 많거나 의미없는 결과를 보임(Fig. 8 (c) 경우)을 확인할 수 있었다.



(a) 124cm, 3kg



(b) 124cm, 5kg

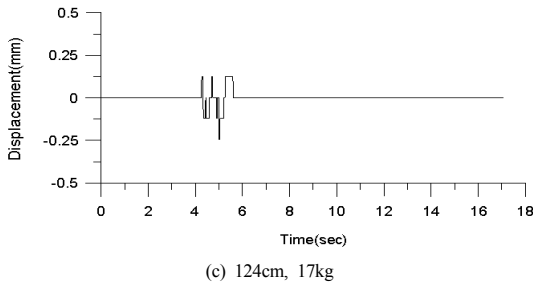


Fig. 8. Measured Time Histories (124cm, 60FPS)

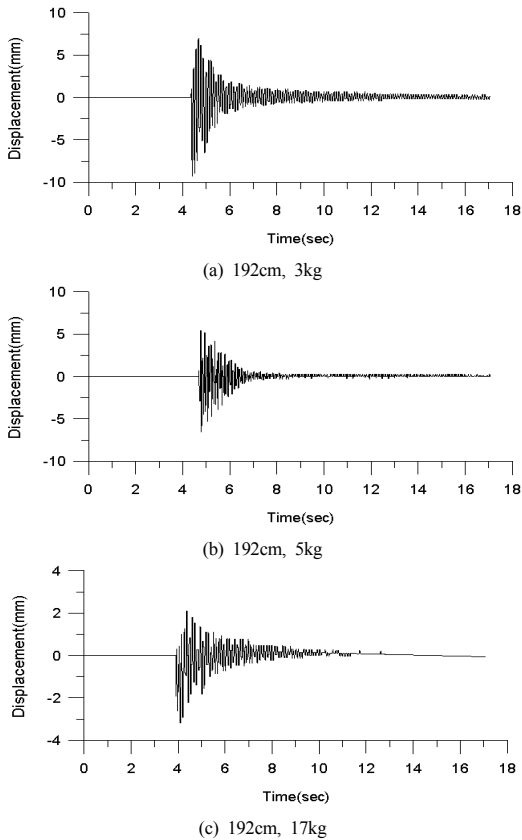


Fig. 9. Measured Time Histories (192cm, 60FPS)

Fig. 10은 구해진 변위시간이력을 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 주파수함수로 변환한 결과를 보인 것이다. Fig. 10 (a)와 같이 Peak이 예상된 주파수가 아닌 곳에서 튀는 Aliasing 효과가 발생됨을 볼 수 있었다. 그림의 경우, 계산된 고유진동수는 13.59 Hz로 20FPS에서 검출할 수 있는 이론적 주파수 범위인 0-10Hz를 벗어난다. 반면, 30FPS, 60FPS에서는 계산된 고유진동수 부근에서 Peak이 발생됨을 확인할 수 있다.

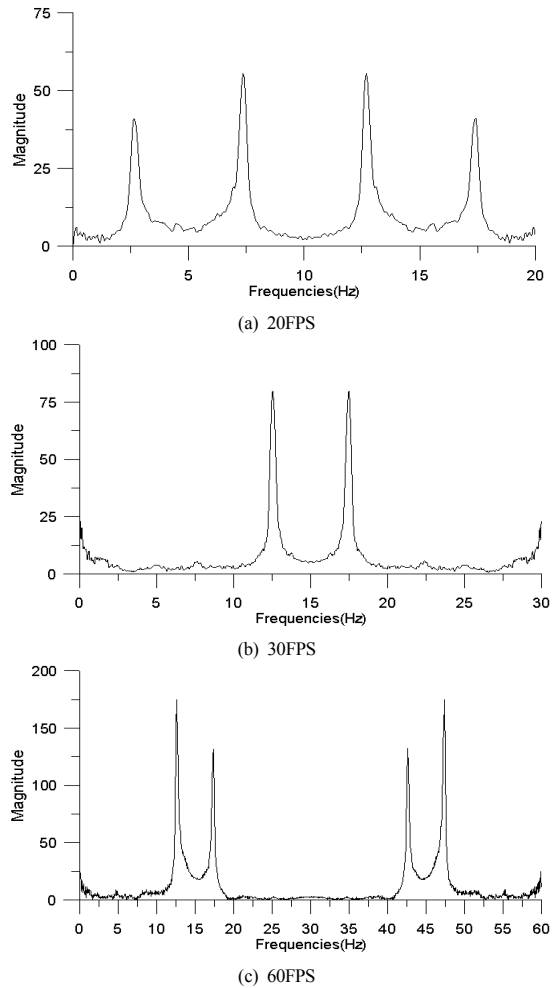


Fig. 10. Frequency Functions of Measured Time Histories According to FPS (154cm, 5 kgf)

다음으로 주파수함수를 이용하여 고유진동수 추정이 수행되었다. 고유진동수 추정에는 다양한 신호처리의 정확도 향상 기법은 배제하고 간단히 Peak Picking 방법만 사용하였다[14].

대체적으로 1차 Peak에서 계산된 고유진동수와 유사한 값이 구해졌으나 1.54m 17kg, 1.92m 17kg의 경우는 1차 Peak이 가진에 의한 것으로 판단되어 2차 Peak의 진동수를 사용하였다.

계산된 결과의 분포는 Fig. 11에 보였다. 추정된 고유진동수 끼리는 서로 조밀한 분포를 보이고 있으나 이론적 고유진동수와는 약간의 차이를 보이고 있고, 프레임 속도가 맞지 않은 경우는 매우 큰 차이를 보이고 있음을 볼 수 있다.

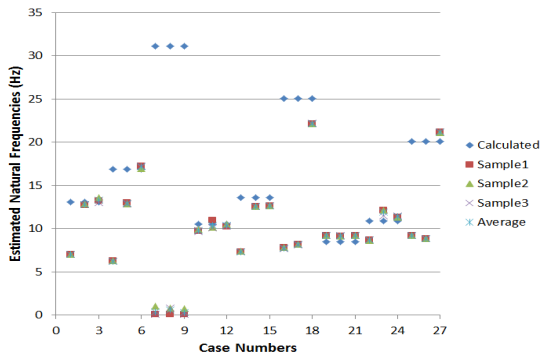
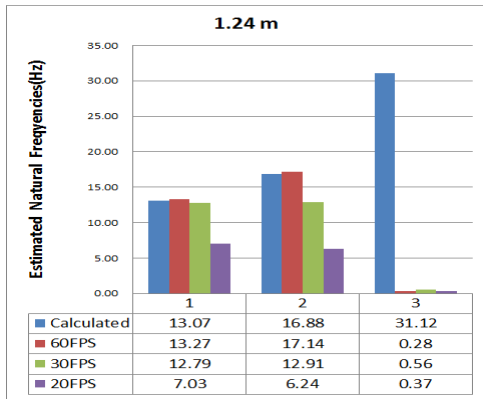
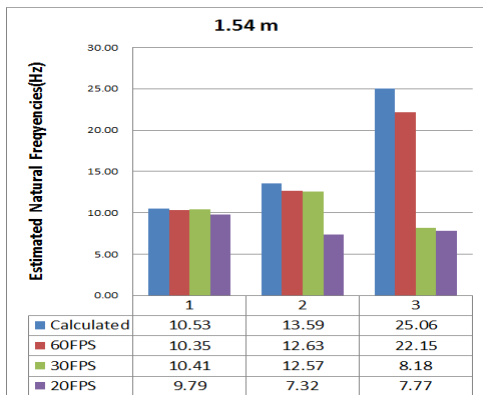


Fig. 11. Distribution of Natural Frequencies According to Cases

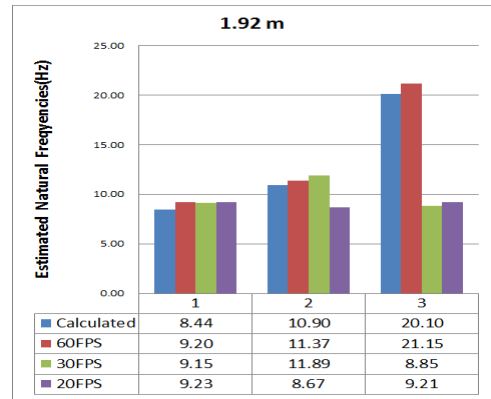
Fig. 12는 추정된 고유진동수의 평균값과 계산된 고유진동수를 비교한 결과이다. 1-3번은 각각 3, 5, 17 kg의 하중 경우이다. 이론값과 추정값이 차이를 보이는 경우를 볼 수 있는 데, 이는 고유진동수가 검출 가능 주파수 범위를 벗어나는 경우임을 볼 수 있다.



(a) 1.24m



(b) 1.54m



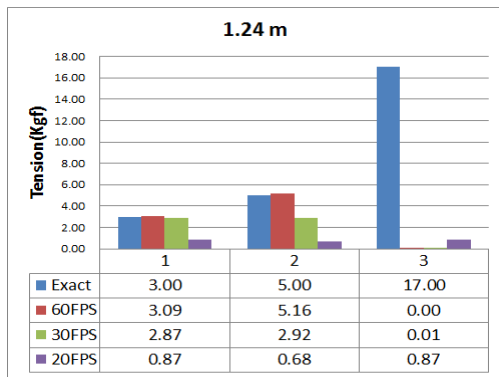
(c) 1.92m

Fig. 12. Comparison between Calculated and Estimated Natural Frequencies

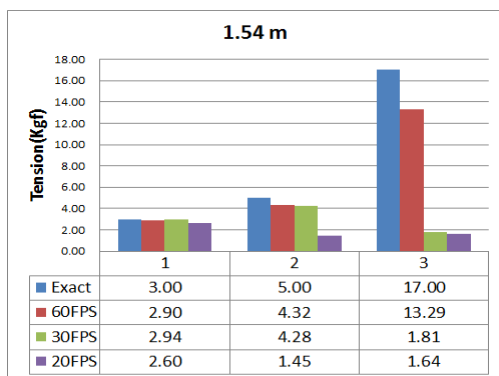
또한, 고유진동수가 이론적 주파수의 범위의 경계에 있는 경우도 그 정확도가 낮아짐을 볼 수 있다. 예를 들어 1.24m 1번 항목(3kg)의 경우 30 FPS에서는 이론적 주파수 범위가 15Hz 까지로 예측되는 고유진동수가 주파수범위 내에 속하나 그 경계에 있다. 이 경우도 추정된 고유진동수의 정확도가 낮아질 수 있음을 볼 수 있다. 또한, 0Hz 근처의 저주파 대역에서도 가진의 영향으로 생긴 Peak과 고유진동수 Peak을 혼동할 수 있어 오차가 발생할 수 있었다. 따라서, 안전한 유효 주파수 범위는 이론적 영역 보다 충분히 작은 영역으로 설정해야 하리라 생각한다. 가진 종류나 설정된 주파수 범위 등에 따라 편차가 커 수치적 설정은 힘들으나 경험적으로 이론적 주파수 범위( $0 \sim f_s/2$  Hz)의 10%에서 75%까지의 범위가 적당하다 판단되었다.

### 2.2.2 장력추정

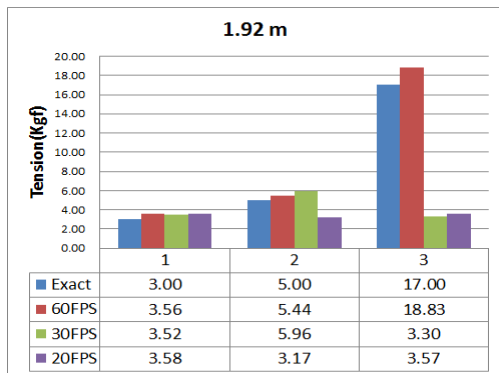
추정된 고유진동수의 평균값으로 계산된 장력은 Fig. 13에 보였다. 저속촬영에 따른 진동수 추정의 부정확성은 장력추정에서도 그대로 보이나 60 FPS의 고속촬영에서는 1.24m 17kg(3항)과 1.54m 17kg(3항)을 제외하고는 비교적 정확한 결과를 보임을 알 수 있다. 대부분의 실제 케이블의 1차 고유진동수가 30Hz이하임을 감안하면 60 FPS의 촬영속도를 가지는 상용캠코드는 충분히 현장 적용이 가능한 수준임을 알 수 있다.



(a) 1.24m



(b) 1.54m



(c) 1.92m

Fig. 13. Comparison between Exact and Estimated Cable Tensions

### 3. 결론

본 연구에서는 사장교 인장 케이블의 장력을 추정하기 위하여 비접촉 방식인 캠코더를 이용하는 영상변위측

정법의 효율적 적용 방안에 대해 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 케이블의 장력 추정에서는 영상변위측정법이 가지는 작업의 편이성이나 장비의 간편성에 비해 단점인 해상도저하의 영향이 적어 장력 추정에 매우 적합한 방법이라 생각된다.
- 2) 케이블 장력 추정을 위한 영상변위측정법에서는 촬영프레임속도의 통제가 가장 큰 변수로 판단되었다. 예측되는 케이블의 고유진동수가 이론적 주파수 범위보다 충분히 좁은(10%~75% 정도) 영역 내에 위치하도록 촬영프레임속도를 설정하는 것이 필요하다고 판단되었다.
- 3) 사용된 60 FPS의 일반 상용캠코더 장비만으로도 충분히 현장작업이 가능하다 판단되며, 이 보다 더 정확한 변위의 측정이나 실시간 작업을 위해서는 고속캠이나 부가장비가 필요하리라 판단되었다.
- 4) 사용거리, 광량, 촬영각도, Target의 크기 등의 요인에 의한 오차 문제나 보정방법 등에 대해서는 보다 세밀한 연구가 필요하리라 생각되었다.

### References

- [1] Sung-Kon Kim, Hyun-Moo Koh, Jung-Whee Lee, In-Hwan Bae, "Signal Analysis from a Long-Term Bridge Monitoring System in Yongjong Bridge", Journal of EESK, EESK, vol. 10, no. 6, pp. 52, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2006.10.6.009>
- [2] A. Deraemaeker, E. Reynders, G. De Roeck, and J. Kullaa, "Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment," Mechanical Systems and Signal Processing, Elsevier, vol. 22, no. 1, pp. 34-56, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2007.07.004>
- [3] Z. Zhou, X. Zhao, C. Wang, Z. Zhang, Q. Hu, and J. Ou, "A new kind of smart bridge cable based on FBG sensors", SPIE Proceedings, 5502, pp. 196-199, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.566622>
- [4] Ja Geul Yun, Jin Son, Seung-Pi Jang, "A Study on Tension Measurement for Cable-Supported Bridge", Proc. of the KSCE Conf., KSCE, pp. 117-120, 1999.
- [5] T. Shimada, *A Study on the Maintenance and Management fo the Tension Measurment for the Cable of Bridge*, Ph Dissertation, Kobe University, 1995.
- [6] H. Zui, T. Shinke and Y. Namita., Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method. ASCE Journal of SE, vol. 122, no. 6, pp. 651-656, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1996\)122:6\(651\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1996)122:6(651))



- [7] Nam-Sik Kim, Woon Jeong, "Evaluation of Tension Force of Stay Cables Using Vibration Method", Journal of the KSNVE, KSNVE, vol. 12, no. 12, pp. 956-963, 2002.
- [8] Hae-Won Park, Bong-Young Ahn Seung-Seok ,Lee, Jong-Woo Kim, "Development of Magnetic Sensor for Measurement of the Cable Tension of Large Scale Bridge", Journal of the KSNT, vol. 27, no. 4, pp. 339-344, 2007.
- [9] Jinsuk Im, Ming L. Wang, Sung Woo Shin, Chung-Bang Yun, Hyung-Jo Jung, Jeong-Tae Kim, Seung-Hyun Eem, "Field application of elasto-magnetic stress sensors for monitoring of cable tension force in cable-stayed bridges", Smart structures and systems, Techno Press, vol. 12, no. 3, pp. 465-482, 2013.
- [10] Gyungmin Toh, Dongki Min, Junhong Park, "The study of method for measuring tension of cable by using ultrasonic wave", Proc. of the KSME Conf., KSME, pp. 2817-2818, 2015.
- [11] Soojin Jo, Hongki Cho, Shinae Jang, Jongwoong Park, Hyung-Jo Jung, Chung-Bang Yun, Billie F. Jr. Spencer, Ju-Won Seo, "Structural health monitoring of a cable-stayed bridge using wireless smart sensor technology: data analyses", Smart structures and systems, Techno Press, vol. 6 no. 5, pp. 461-480, 2010.
- [12] Jong-Jae Lee, Jong-Woong Park, Young-Soo Park, Hyung-Jo Jung, Jae-Min Kim, Ki-Sung Kim, "Remote Displacement Measurement of a Bridge Using Image Processing Techniques", Proc. of the KSNVE Spring Conf., KSNVE, pp. 316-317, 2009.
- [13] Sung-Wan Kim, Nam-Sik Kim, "Verification of Multi-point Displacement Response Measurement Algorithm Using Image Processing Technique", Journal of the KSCE, KSCE, vol. 30, no. 3A, pp. 297-307, 2010.
- [14] D. J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, 2<sup>nd</sup> Edition, Research Press Ltd, pp. 86-188, 2000.

이 형 진(Hyeong-Jin Lee)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 공과대학 토목공학과 (공학사).
- 1992년 2월 : KAIST 토목공학과 (토목공학석사).
- 1997년 2월 : KAIST 토목공학과 (토목공학박사).
- 2003년 2월 ~ 2004년 1월 : 미국 Univ. of Cal. at Irvine, 방문연구원.
- 1997년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 토목공학과/토목환경화공융합공학부 교수

<관심분야>

구조동역학, 구조물 건전성 모니터링, 구조물 계측, 손상도 추정