

영상신호를 이용한 현수교 행어케이블의 장력 추정

김성완¹, 윤다운², 박시현³, 공민준⁴, 박재봉^{4*}

Tension Estimation for Hanger Cables on a Suspension Bridge Using Image Signals

Sung-Wan Kim¹, Da-Woon Yun², Si-Hyun Park³, Min-Joon Kong⁴, Jae-Bong Park^{4*}

Abstract: In suspension bridges, hanger cables are the main load-supporting members. The tension of the hanger cables of a suspension bridge is a very important parameter for assessing the integrity and safety of the bridge. In general, indirect methods are used to measure the tension of the hanger cables of a suspension bridge in traffic use. A representative indirect method is the vibration method, which extracts modal frequencies from the cables' responses and then measures the cable tension using the cables' geometric conditions and the modal frequencies. In this study, the image processing technique is applied to facilitate the estimation of the dynamic responses of the cables using the image signal, for which a portable digital camcorder was used due to its convenience and cost-efficiency. Ambient vibration tests were conducted on a suspension bridge in traffic use to verify the validity of the back analysis method, which can estimate the tension of remote hanger cables using the modal frequencies as a parameter. In addition, the tension estimated through back analysis method, which was conducted to minimize the difference between the modal frequencies calculated using finite element analysis of the hanger cables and the measured modal frequencies, was compared with that measured using the vibration method.

Keywords: Back analysis method, Hanger cable, Tension, Vibration method

1. 서론

최근 들어 재료 및 시공 기술의 지속적인 발전으로 인하여 국내외적으로 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 그중에서도 케이블 교량은 다수의 케이블에 대해 장력을 조정하는 구조물로서 다양한 형태의 설계가 가능하고 미관이 뛰어나기 때문에 현재 많은 중장대형 교량에 적용되고 있다. 사장교 및 현수교와 같은 케이블 교량은 대부분의 하중을 케이블이 지지하므로 정확한 장력의 추정방법은 교량의 건전도나 안전성 평가에 매우 중요한 사항이다 (Kim et al., 2017; Haji Agha Mohammad Zarbaf et al., 2018).

공용 중인 케이블 교량의 효율적인 장력 관리를 위하여 편리하고 정확한 케이블 장력 추정 방법과 관련된 많은 연구가 수행되어왔다. 현재 흔히 사용되는 케이블의 장력 추정 방법은 정적인 실험을 통해서 직접적으로 장력을 측정하는 방법과 케

이블의 형상조건과 계측된 고유진동수를 활용하여 케이블의 장력을 간접적으로 추정하는 방법으로 크게 나눌 수 있다. 직접법으로는 케이블 내부에 유압재와 로드셀, 변위계를 설치하여 힘과 변위의 관계로 케이블의 장력을 산정하는 리프트 오프 테스트 방법이 있다. 다른 방법들에 비해서 정확한 장력 측정이 가능하다는 장점이 있으나 이는 케이블 가설 시 주로 사용하는 방법이며 공용 중인 케이블 교량의 유지관리단계에서 이러한 직접법을 적용하기에는 비용적인 측면에서 효율적이지 못하다. 간접법으로는 케이블 외부에 설치한 가속도 센서의 응답으로부터 추출된 모드별 고유진동수와 케이블의 형상조건을 이용하여 장력을 산정하는 진동법이 있다. 또한 공용 중인 케이블 교량의 장력을 효율적으로 측정하기 위하여 레이저 진동센서(Kim et al., 2012), EM(Elasto-Magnetic) 센서(Chu et al., 2013), FBG(Fiber Bragg Grating) 센서(Park et al., 2011) 등을 이용하여 장력을 측정하는 방법에 대한 연구도 수행되었다.

일반적으로 케이블의 장력을 측정하기 위해 사용되는 센서의 종류는 크게 로드셀, 유압재, 가속도 센서, EM 센서 등의 접촉식 센서와 레이저 진동 센서, 무선 가속도 센서(Sim et al., 2014), 영상계측시스템 (Kim et al., 2013, Kim et al., 2017) 등의 비접촉 센서로 나눌 수 있다. 직접법을 이용하여 케이블 장력을 측정하기 위해서는 초기 설치비용의 문제와 센서의 지

¹정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

²정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 주임연구원

³정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터, 센터장

⁴정회원, 한국시설안전공단 특수교관리센터, 차장

*Corresponding author: jbpark@kistec.or.kr

24, Ena-ro 128beon-gil, Jinju, Gyeongnam, 52856, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2020년 7월 31일까지 학회로 보내주시면 2020년 8월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

속성에 대한 유지 문제가 있다. 간접법은 센서의 설치에 따른 작업의 어려움이나 모든 케이블에 대하여 모니터링하기 위해서 각 케이블의 수만큼의 센서가 요구된다. 따라서 중요하다고 생각되는 케이블과 일정 간격에 대한 케이블의 장력을 상시 모니터링하고 있다.

케이블 장력의 측정에 대한 정확도 향상과 측정 과정의 효율성을 고려한 연구도 수행되었다. 측정된 가속도 응답을 이용하여 사장교 케이블의 휨강성 유·무에 따른 장력을 측정하고 장기 모니터링에 대한 안전성과 신뢰성을 평가(Yang, 2004)하였다. 휨강성의 영향이 큰 짧은 행어케이블에서도 장력 추정이 가능한 역해석 기법을 제안(Kim et al., 2007)하고 현수교를 대상으로 그 타당성을 평가하였다. 짧은 행어케이블의 신뢰성 있는 장력 추정을 위해 시스템 인식 방법을 활용한 방법을 제안(Park et al., 2007, Kim et al., 2007)하였다. 리프트 오프 테스트, EM 센서, 진동법의 정확성 및 활용성을 비교(Cho et al., 2013)한 연구가 수행되었다. 배경에 위치한 고정된 물체를 이용하여 영상계측시스템의 흔들림 성분을 보정하여 행어케이블의 장력을 측정하는 연구도 수행되었다(Kim and Kim, 2013). 이미지를 이용하여 최소화된 계측 및 신호처리를 통해 상시진동상태에서 케이블의 장력을 추정하기 위하여 FDD(Frequency Domain Decomposition)방법을 적용한 연구도 수행되었다(Lee, 2018). 사장교의 케이블에 설치된 가속도 센서로부터 측정된 데이터의 활용을 확대하고자 인공지능 기반의 케이블 장력 추정 모델을 개발한 연구가 수행되었다(Kim et al., 2020).

영상계측시스템을 이용하여 케이블의 응답을 측정할 경우 응답은 변위 기반이므로 측정 조건에 따라 고차 모드까지의 고유진동수 추출에 어려움이 있을 수 있다. 또한 한 영상 안에 배경에 위치한 고정된 물체가 없는 경우 영상계측시스템의 흔들림 성분의 보정이 어려우며, 흔들림 성분으로 인하여 고유진동수 추출에 어려움이 있다(Kim and Kim, 2013). 따라서 적은 수의 모드별 고유진동수를 이용하여도 신뢰성 있는 장력 측정 방법이 필요하다.

본 논문에서는 간접법을 이용하여 비접촉식으로 행어케이블의 장력을 산정하기 위해 필요한 영상계측시스템으로 디지털 캠코더를 이용하였다. 역해석 방법을 이용하여 원거리에 위치한 행어케이블의 장력을 추정할 수 있는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 공용중인 현수교에서 상시진동실험을 수행하였다. 상시진동실험에서 계측된 모드별 고유진동수와 유한요소해석에서 계산된 모드별 고유진동수의 차이를 이용하여 역해석하여 계산된 장력을 진동법에 의해 산정된 장력과 비교함으로써 역해석 방법의 신뢰도를 확인하였다. 또한 역해석 방법에서 측정된 모드별 고유진동수의 차수를 변수로 하여 장력을 계산하였으며, 그 결과 적은 차수의 모드별 고유진동수를 이용하여도 신뢰성 있는 장력 추정이 가능한 것으로 나타났다.

2. 영상처리기법을 이용한 케이블의 장력 추정

2.1 이미지 상관법

이미지 상관법(Bruck et al., 1989; Kim, 2012)은 물체의 외력에 의한 변형 전, 후 이미지의 상관관계를 분석하여 각각의 지점의 변형을 측정하는 비접촉식 계측 방법 중 하나이다. 변형 전, 후 상관관계 분석을 위하여 획득한 이미지의 명암을 이용하여 두 이미지간의 상관관계를 분석한다. 일반적으로 사용되는 8비트의 이미지는, 구조물 표면의 정보가 0~255 사이의 명암으로 표현되며 같은 명암을 가지는 지점이 무수히 많게 되어 상관관계의 비교 자체가 불가능하다. 이러한 점을 고려하여 이미지 상관법을 이용한 계측 방법은 변형 전, 후 이미지에서 정사각형의 이미지를 분리하여 상관관계를 비교한다. 이때 변형 전, 후 이미지에서 분리한 정사각형의 작은 이미지를 윈도우라 한다. Fig. 1은 이미지 상관법을 이용하여 구조물의 변형을 측정하는 방법을 나타내었다. 본 연구에서는 두 이미지 간의 상관관계 비교를 위한 방법으로 Eq. (1)의 ZNCC(Zero Normalized Cross Correlation) 방법을 이용하였으며 최댓값을 갖는 좌표가 외력에 의한 물체의 변형을 나타낸다. Eq. (1)에서 $f(x_i, y_i)$ 는 참조 이미지의 ROI(Region of Interest) 윈도우, $g(x'_i, y'_j)$ 는 변형된 이미지의 ROI 윈도우의 명암값을 각각 나타낸다.

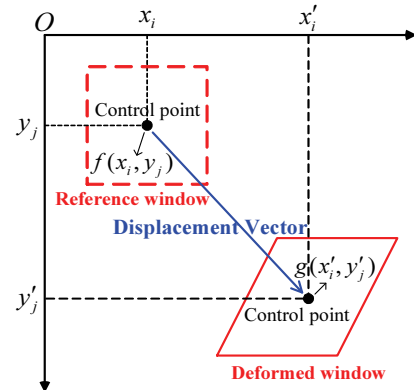


Fig. 1 Deformation measurement using image correlation method

$$C_{ZNCC} = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M \left\{ \frac{f(x_i, y_j) - f_m \times g(x'_i, y'_j) - g_m}{\Delta f \Delta g} \right\} \quad (1)$$

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M f(x_i, y_j)$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M g(x'_i, y'_j) \quad (2)$$

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [f(x_i, y_j) - f_m]^2}$$

$$\Delta g = \sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M [g(x_i, y_j) - g_m]^2} \quad (3)$$

외력에 의한 구조물의 변형은 연속적으로 발생하기 때문에 그 주변 지점의 변형은 추측이 가능하며 주변의 값을 도출하기 위하여 형상함수를 이용한다 (Pan et al., 2009). 이미지 상관법을 이용한 형상함수는 일반적으로 0~2차 형상함수가 사용되며, 외력에 의한 물체의 비선형적인 움직임을 고려하기 위하여 2차 형상함수를 적용하였다.

$$\xi_2(x_i, y_j) = u + u_x \Delta x + u_y \Delta y + \frac{1}{2} u_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} u_{yy} \Delta y^2 + u_{xy} \Delta x \Delta y$$

$$\eta_2(x_i, y_j) = v + v_x \Delta x + v_y \Delta y + \frac{1}{2} v_{xx} \Delta x^2 + \frac{1}{2} v_{yy} \Delta y^2 + v_{xy} \Delta x \Delta y \quad (4)$$

Eq. (4)에서 $\Delta x = x_i - x_0$, $\Delta y = y_j - y_0$ 를 나타내며 u, v 는 참조 윈도우의 중심에 대한 x, y 방향의 변위 성분을 나타낸다. u_x, u_y, v_x, v_y 는 참조 윈도우의 1차 변위 그래디언트를 $u_{xx}, u_{xy}, u_{yy}, v_{xx}, v_{xy}, v_{yy}$ 는 2차 변위 그래디언트를 나타낸다.

2.2 진동법

진동법은 케이블에서 획득된 응답으로부터 케이블의 모드 특성을 추정하고, 이와 케이블의 형상조건을 활용하여 케이블의 장력을 산정하는 방법이다 (Shimada 1994). 일반적으로

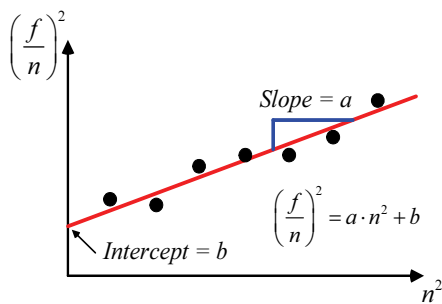


Fig. 2 Cable tension estimation using vibration method

케이블의 처짐이 크지 않은 경우, Fig. 2와 같이 고유진동수 여러 개를 추출하여 각각을 모드차수로 나눈 값의 제곱 $(f_n/n)^2$ 과 해당 모드차수의 제곱 (n^2) 에 대한 1차회귀선을 그려 장력을 산

정하는 방법을 많이 활용한다. Eq. (5)에 나타난 1차 선형회귀식의 b 를 구하여 Eq. (6)과 같이 케이블 장력을 추정할 수 있다. 여기서 T 는 케이블의 장력, EI 는 휨 강성, w 는 단위길이당 중량, g 는 중력가속도, L_c 는 케이블의 유효 길이를 나타낸다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4wL_c^2} + \frac{n^2\pi^2 EIg}{4wL_c^4} = b + a \cdot n^2 \quad (5)$$

$$T = 4(w/g)L_c^2 \cdot b \quad (6)$$

2.3 역해석 방법

역해석 방법은 일반적으로 정해석의 수치해석결과가 현장 계측자료에 일치하도록 수치해석 모형의 매개변수를 정의하는 해석과정을 말한다(Kim and Jang, 1995). 현재까지 역해석 방법으로는 해석적인 방법을 이용한 직접법과 수치해석적 방법을 이용한 역산법이 많이 이용되고 있다. 직접법은 가정된 설계변수로부터 응답변수를 계산하고, 그 응답변수와 계측치의 차이를 오차로 하는 목적함수를 정의한다. 목적함수가 최소화되도록 설계변수를 수정하여 재계산하는 반복과정을 거쳐 최적의 설계변수를 구한다. 따라서 본 연구에서는 역해석 방법 중 다양한 문제에 적용 가능하며 또한 상용 유한요소 프로그램을 사용하여 간단한 보정만으로 적용할 수 있는 직접법을 이용하였다.

계산된 고유진동수 f_i^c 와 계측된 고유진동수 f_i^m 에 의해 구성된 Eq. (7)과 같은 오차함수를 최소화하는 최적화 방법에 의하여 매개변수인 장력(T)를 찾아내는 방법이다.

$$f(T) = \left\{ \sum_{i=1}^n (f_i^c(T) - f_i^m(T))^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

최적화 알고리즘에 포함된 반복 연산 과정은 다음의 Eq. (8)과 같이 매개변수인 장력을 계산한다.

$$T_{i+1} = T_i + \lambda_i^* S_i \quad (8)$$

여기서 초기 장력 T_i 를 설정하며 이동할 단계 길이인 λ_i^* 를 정의하여 새로운 장력인 T_{i+1} 를 구하게 된다. T_{i+1} 이 최적점이면 반복연산 과정은 종료하나 그렇지 않으면 $i = i + 1$ 로 증가하여 반복연산 과정을 계속하게 된다. 직접법은 매개변수를 최적화 과정을 통하여 보정함으로써 오차함수가 최소가 되는 최적의 매개변수의 값을 찾아내는 것이다. 매개변수를 최적해로 수렴할 때까지의 단계 길이 λ_i^* 는 Eq. (9)와 같다.

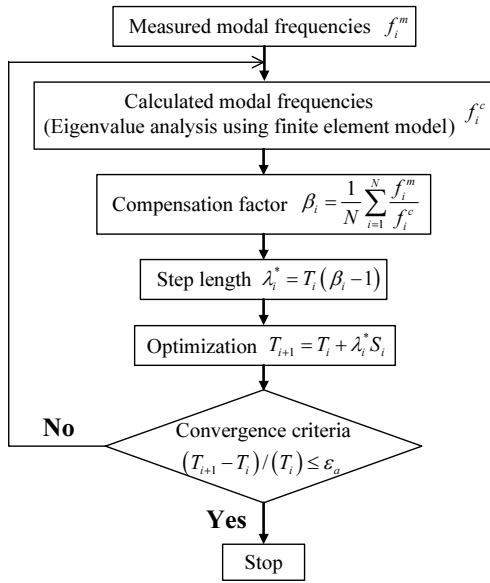


Fig. 3 Tension estimation using back analysis method

$$\lambda_i^* = T_i(\beta_i - 1) \quad (9)$$

Eq. (9)에서 보정계수 β_i 는 계측된 고유진동수와 해석된 고유진동수의 관계인 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 n 은 계측지점의 수이다.

$$\beta_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{f_i^m}{f_i^c} \quad (10)$$

최적화 과정에서 최적해에 대한 탐사과정을 종료하는 수렴 기준을 결정하는 것이다. 수렴기준은 보정계수와 더불어 최

적화 과정의 효율성 및 신뢰성에 영향을 미친다. 본 연구에서의 수렴기준은 연속적으로 반복 연산되는 목적함수의 상대적인 변화를 비교하는 것으로 Eq. (11)과 같이 나타낼 수 있다. Eq. (11)에서 ϵ_a 은 허용범위로 0.0005로 설정하였다.

$$\frac{|T_{i+1} - T_i|}{|T_i|} \leq \epsilon_a \quad (11)$$

Fig. 3과 같은 계산 절차로 상용 유한요소해석프로그램에서 모델링된 행어케이블의 계산진동수(f_k^c)와 현장에서 측정된 계측진동수(f_k^m)를 비교함으로써 역해석을 반복적으로 수행할 수 있다.

2.4 알고리즘 요약

Fig. 4는 영상해석을 이용한 장대교량 케이블의 장력 추정 알고리즘을 나타내었다. 먼저 케이블 응답의 시간 이력을 추출하기 위하여 획득된 영상 파일을 이미지 파일(JPEG)로 변환하며 시간 순서대로 배열한다. 획득된 이미지를 명암 이미지로 변환하며 참조 이미지에서 케이블의 응답을 알고 싶은 지점에 대하여 기준점을 지정한다. ROI 윈도우의 설정을 위해 상관관계 크기인 정사각형의 윈도우 사이즈를 결정한다. 케이블 응답을 알고 싶은 지점인 기준점을 포함한 ROI 윈도우가 변형된 이미지에서 최적으로 매칭되는 곳의 지점을 찾기 위하여 ZNCC를 계산하며, 2차 형상함수를 이용하여 단위 픽셀 이하를 계산하게 된다. 최적으로 매칭되는 지점의 픽셀과 계산된 단위픽셀 이하의 정보를 이용하여 픽셀 기반의 응답을 해석하게 된다. 계측된 응답을 PSD(Power Spectral Density) 함수를 적용하여 각 모드별 고유진동수를 추출하게

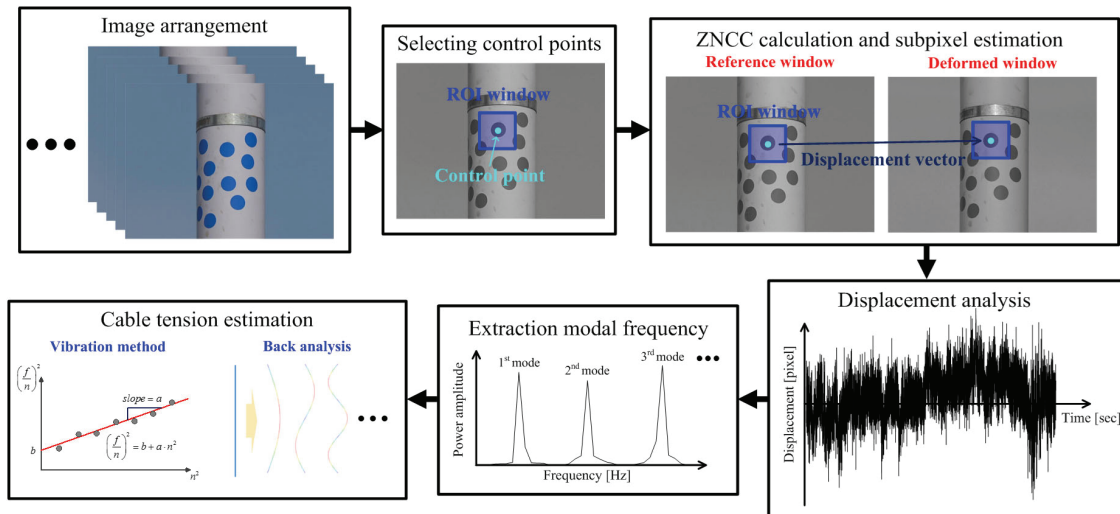


Fig. 4 Cable tension estimation algorithm using image analysis

된다. 측정된 모드별 고유진동수와 형상조건을 진동법 및 역 해석 방법을 적용하여 케이블의 장력을 추정하게 된다. 일반적으로 현장에서 측정된 1차 모드의 고유진동수는 유효길이 때문에 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 진동법 및 역해석 방법을 이용하여 행어케이블의 장력을 추정하면서 1차 모드의 고유진동수는 제외하고 장력을 추정하였다.

3. 행어케이블의 장력 추정

3.1 영상계측시스템

영상계측시스템은 휴대성과 설치의 간편성에 최대한 초점을 맞추어 계측을 위한 센서로 디지털 캠코더(SONY HDR-CX130)와 삼각대(ACEBIL I-705DX)를 선택하였다. 또한 디지털 캠코더가 가지고 있는 광학 줌, 촬영, 저장 기능을 활용함으로써 다른 부가장치 없이 경제적으로 구성되었다.

3.2 소록대교

본 연구에서는 영상신호를 이용하여 현수교 행어케이블의 장력 추정 알고리즘을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 현재 전라남도 고흥군 도양읍과 소록도를 연결한 공용 중인 소록대교에서 실험을 수행하였다. 소록대교는 2008년 6월에 완공되

었으며 총 경간 470m (중앙경간 250m, 측 경간 각 110m)의 3경간 연속자정식모노 케이블 현수교로 두 개의 다이아몬드형 주탑, 총 66개의 행어와 주케이블로 이루어졌다. 소록대교의 행어케이블은 주탑에서 경간 중앙으로 갈수록 길이가 점점 짧아지는 형태를 가지고 있으며, Fig. 6과 같이 1개소의 행어시스템은 2개의 행어케이블들로 구성되어 있다. 행어시스템은 케이블밴드, 행어케이블 및 보강거더의 정착구조로 구성되어 있으며, 본 연구에서 계측된 행어케이블은 직경 68mm로 케이블당 151EA의 소선으로 구성되어 있다. 또한 행어케이블은 폴리에틸렌(Polyethylene) 재질의 보호관으로 강연선을 보호하고 있으며, 보호관 위로 얇고 고무계 도료로 도장이 되어 있다. 본 연구에서는 Fig. 7과 같이 휨강성의 영향이 적은 행어케이블을 선정하여 장력을 측정하였다. 장력측정 대상 케이블은 3개소의 행어케이블로서 총 6개의 행어

Table 1 Specification of selected hanger cable

Cable	Effective length (m)	Design tension (kN)	Area (m ²)	Young's modulus (kN/m ²)	Unit weight (kN/m)
8L	41.390	1373	2.965×10 ⁻³	1.4×10 ⁸	0.239
8R	40.992				
9L	32.853	1426			
9R	32.449				
10L	25.316	1436			
10R	25.007				



Fig. 5 Sorok bridge

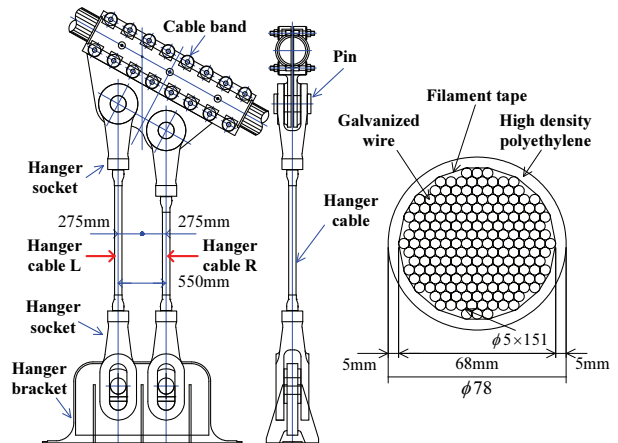


Fig. 6 Sorok bridge hanger cable

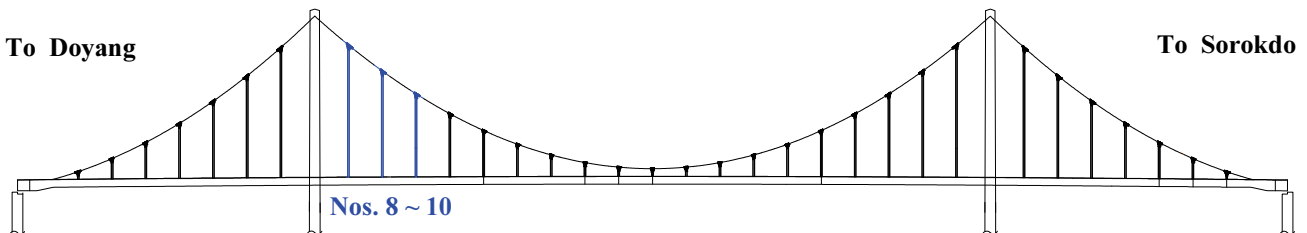


Fig. 7 Measurement position

케이블을 선정하였으며, 제원은 Table 1에 나타내었다.

3.3 진동법을 이용한 행어케이블의 장력 산정

진동법을 이용한 소록대교 행어케이블의 장력을 산정하기 위하여 필요한 모드별 고유진동수들을 획득하기 위하여 가속도 센서(PCB 393BO4)와 영상계측시스템을 설치하여 상시진동실험을 수행하였다. 진동법을 적용하기 위해 필요한 모드별 고유진동수들은 가속도 센서는 8차 모드까지, 영상계측시스템은 측정된 최대 차수의 모드별 고유진동수까지를 이용하였다. Fig. 8(a)의 컬러 정보를 가지는 원이미지를 Fig. 8 (b)와 같이 명암 이미지로 변환하여 영상해석을 수행하였다. 센서는 행어케이블에 Fig. 8 (a)와 같이 원 모양의 타겟을 설치하였으며 Fig. 8(c)와 같이 가속도 센서를 설치하였다. Fig. 8(d)는 가속도 응답을 저장하기 위한 시스템을 나타내었으며 노트북, DAQ(National Instruments cRio-9002) 및 현장에서 전원 연결을 위한 배터리(ROCKET ES 12-12)이다.

실험은 일반 휴대용 디지털 캠코더를 이용하여 1920×1080의 영상을 초당 60프레임으로 주파수 해상도는 Δf 는 0.0037Hz로 계측하였다. 가속도 센서는 데이터 취득속도 200Hz로 주파수 해상도 Δf 는 0.0031Hz로 계측하였다. 영상해석 결과는 픽셀 단위를 갖게 되며 이를 실제 거리로 환산하기 위해서는 이미지에서 단위픽셀이 갖는 실제 크기의 계측이 필요하다. 실제 크기

를 알고 있는 구조물을 촬영한 이미지에서 구조물이 차지하는 픽셀 개수로 나누어 단위픽셀에 대한 해상도를 구할 수 있다. 따라서 실험을 수행하기에 앞서 케이블의 직경에 대응하는 픽셀의 값을 계측하였다. 케이블의 직경은 78mm이고 이에 상응하는 픽셀은 138개이므로 한 픽셀의 해상도는 0.348mm이다.

Fig. 9는 No. 8B 행어케이블의 가속도 센서에 의해 계측된 응답, 영상계측시스템을 이용하여 추출된 응답, 각 응답에 대한 PSD함수를 나타내었다. 그리고 각 행어케이블에 대한 모드별 고유진동수와 진동법에 의해 추출된 장력을 Table 2에 나타내었다. Table 2

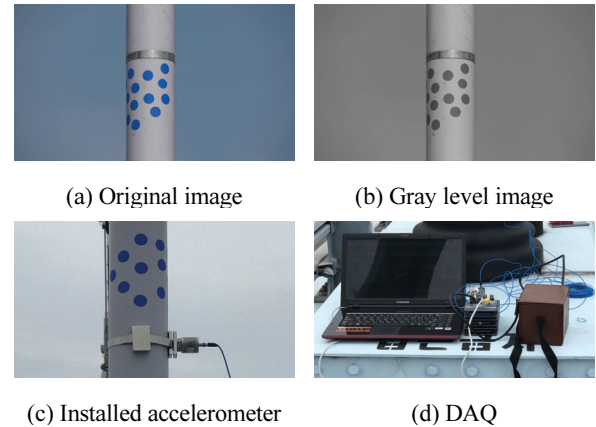


Fig. 8 Experimental setup

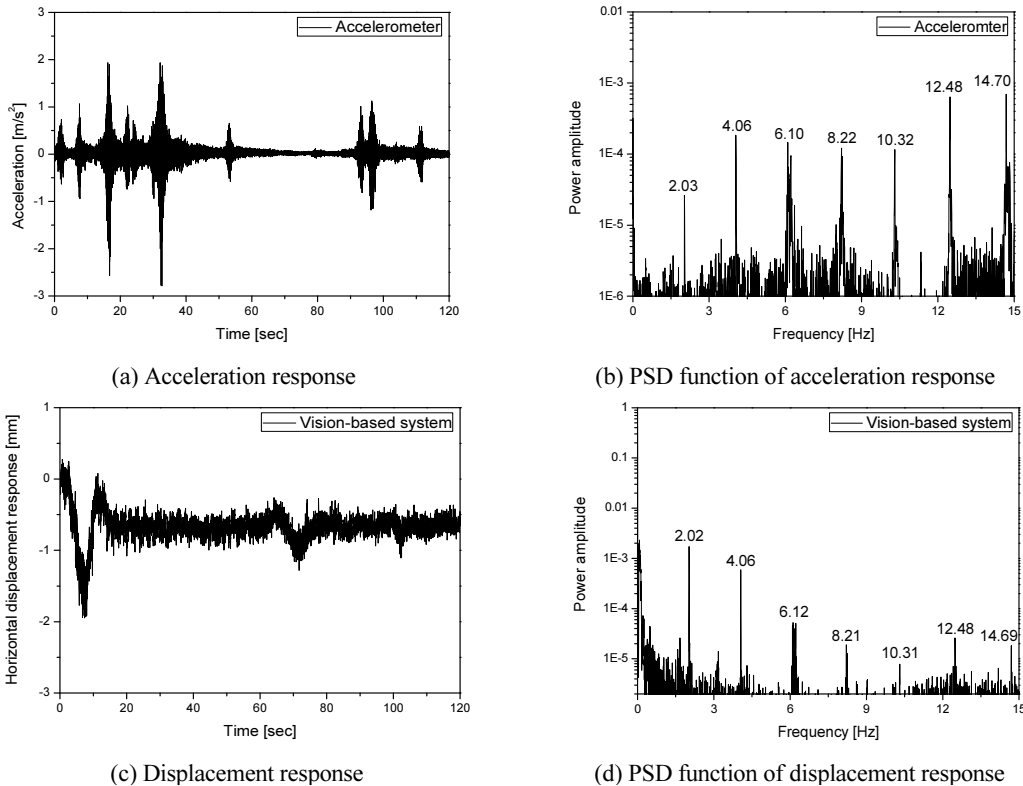


Fig. 9 Response and PSD function of No. 8R hanger cable

에서 가속도 센서와 영상계측시스템을 이용하여 추출된 모드별 고유진동수와 장력이 $\pm 1\%$ 이내의 정확도를 확인할 수 있었다.

3.4 역해석 방법 적용

본 연구에서는 역해석 방법을 이용한 행어케이블의 장력을 추정하기 위하여 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 유한

요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 X-Y 평면에서 모델링을 수행하였으며 상단 및 하단은 핀 지점으로 경계조건을 이상화하였다. 행어케이블의 설계 장력은 역해석을 위한 초기 인장력으로 정의하였다. Fig. 10은 ABAQUS를 이용하여 모델링 된 유한요소 모델을 나타내었다.

Table 3은 Eq. (10)의 보정계수 β_i 의 n 을 2차, 2차~3차, ...,

Table 2 Comparison of natural frequency and tension of each hanger cable

Cable	Sensor	Natural frequency (Hz)								Tension (kN)	Difference (%)
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th		
8L	Accelerometer	1.92	3.85	5.79	7.75	9.76	11.82	13.90	16.06	614.03	0.08
	Vision	1.92	3.85	5.79	7.77	9.76	11.82	-	-	614.55	
8R	Accelerometer	2.03	4.06	6.10	8.22	10.32	12.48	14.70	16.96	672.20	0.01
	Vision	2.02	4.06	6.12	8.21	10.31	12.48	14.69	-	672.11	
9L	Accelerometer	2.50	5.04	7.62	10.18	12.87	15.67	18.55	21.51	661.72	0.30
	Vision	2.51	5.03	7.62	10.17	12.87	-	-	-	663.71	
9R	Accelerometer	2.66	5.34	8.06	10.82	13.68	16.59	19.64	22.75	729.76	0.50
	Vision	2.65	5.34	8.07	10.82	13.67	-	-	-	726.12	
10L	Accelerometer	3.33	6.70	10.15	13.72	17.49	21.34	25.46	29.78	691.69	0.33
	Vision	3.33	6.69	10.15	13.72	-	-	-	-	689.41	
10R	Accelerometer	3.45	6.94	10.52	14.18	18.26	22.12	26.39	30.88	724.25	0.04
	Vision	3.45	6.94	10.53	14.20	-	-	-	-	723.98	

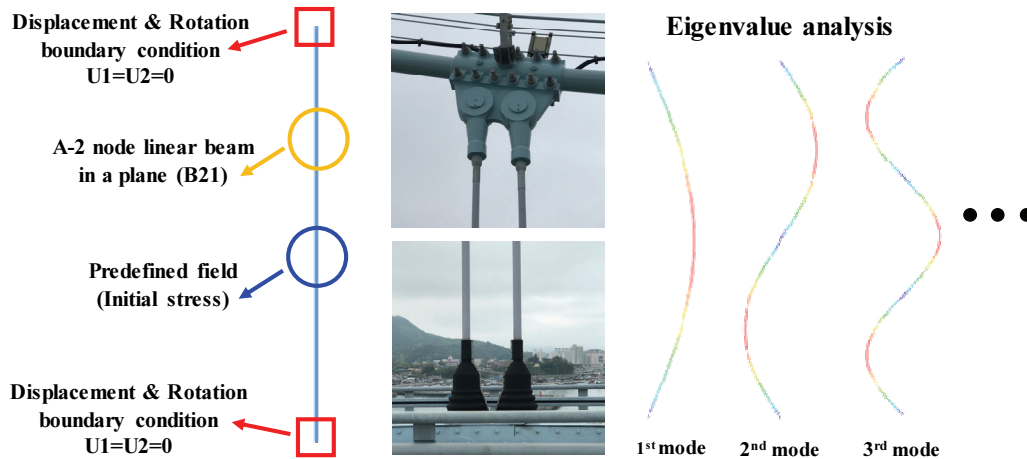


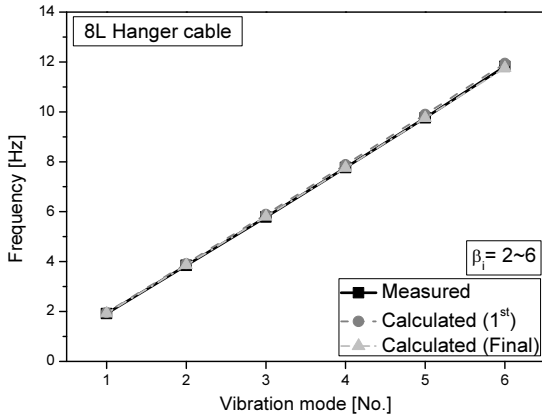
Fig. 10 Finite element model of hanger cable

Table 3 Tension calculated using back analysis method

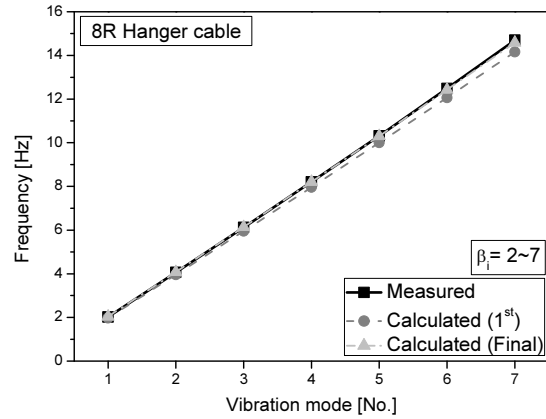
Cable	Vibration Method (kN)	Back analysis (kN), Error (%)					
		n=2	n=2~3	n=2~4	n=2~5	n=2~6	n=2~7
8L	614.55	615.84, (0.21)	616.09, (0.25)	617.24, (0.44)	618.47, (0.63)	619.94, (0.87)	-
8R	672.11	672.45, (0.05)	673.99, (0.28)	675.72, (0.53)	677.01, (0.72)	678.80, (0.99)	680.68, (1.26)
9L	663.71	666.57, (0.17)	666.54, (0.42)	665.88, (0.33)	667.29, (0.54)	-	-
9R	726.12	726.83, (0.10)	730.57, (0.61)	732.02, (0.81)	734.43, (1.13)	-	-
10L	689.41	693.62, (0.61)	697.24, (1.12)	700.81, (1.63)	-	-	-
10R	723.98	726.97, (0.41)	731.10, (0.97)	734.19, (1.39)	-	-	-

Table 4 Natural frequency of 9L hanger cable calculated using back analysis method

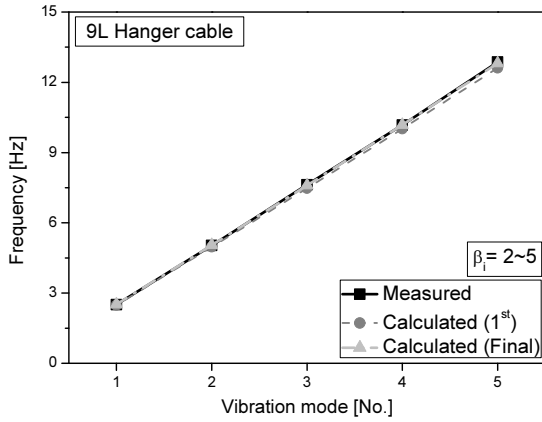
Cable	Method	Natural frequency (Hz), Error (%)					
		1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th	
9L	Measured	2.51	5.03	7.62	10.17	12.87	
	Calculated (β_i)	2	2.51, (0.03)	5.03, (0.04)	7.57, (0.66)	10.15, (0.20)	12.77, (0.72)
		2~3	2.52, (0.28)	5.05, (0.26)	7.60, (0.35)	10.18, (0.10)	12.81, (0.44)
		2~4	2.52, (0.24)	5.04, (0.20)	7.59, (0.41)	10.18, (0.05)	12.80, (0.49)
		2~5	2.52, (0.36)	5.05, (0.32)	7.60, (0.30)	10.19, (0.15)	12.82, (0.39)



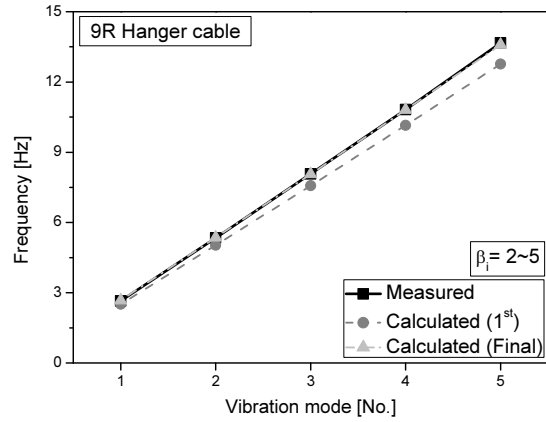
(a) No. 8L hanger cable



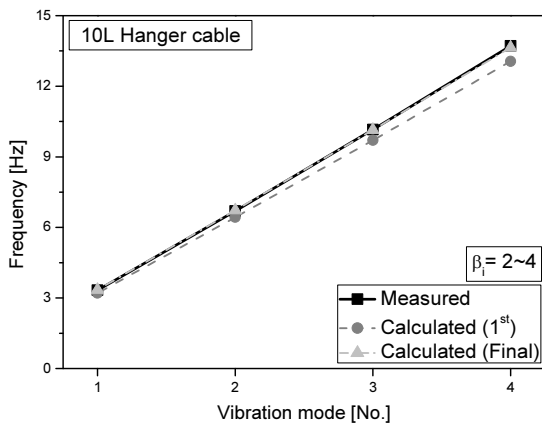
(b) No. 8R hanger cable



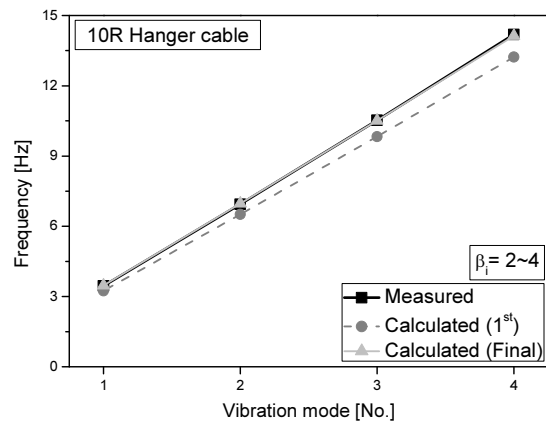
(c) No. 9L hanger cable



(d) No. 9R hanger cable



(e) No. 10L hanger cable



(f) No. 10R hanger cable

Fig. 11 Natural frequency of hanger cable calculated using back analysis method

2차 ~ 측정된 모드별 고유진동수까지를 적용하였을 때의 역 해석 방법을 이용하여 계산된 장력을 나타내었다. Table 3에서 역해석 방법을 이용하면 적은 차수의 계측된 모드별 고유진동수를 이용하여도 비교적 정확한 장력 추정이 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 보정계수 β_i 의 n 을 단지 2차 모드만을 적용하여도 신뢰성 있는 장력 추정이 가능함을 확인하였다. Table 4는 보정계수 β_i 의 n 을 계산할 때 사용된 모드별 고유진동수에 따른 9L 행어케이블에 대해 최종 수렴된 장력에서의 모드별 고유진동수를 나타내었다. Table 4에서 역해석에서 계산된 모드별 고유진동수는 측정된 모드별 고유진동수와 $\pm 1\%$ 이내의 오차를 확인할 수 있었다.

Fig. 11은 2차부터 ~ 측정된 모드별 고유진동수까지를 적용하였을 때 행어케이블의 초기 모드별 고유진동수와 수렴된 최종 모드별 고유진동수를 나타내었다. 최종 수렴이 되었을 때에는 측정된 모드별 고유진동수와 계산된 모드별 고유진동수가 유사함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 원거리에 위치한 케이블의 장력을 추정하는 경우에 적합한 방법으로 디지털 캠코더를 기반으로 하는 장력 추정 방법을 제안하였다.

가속도 센서 및 영상신호를 이용하여 얻어진 각 모드별 고유진동수와 진동법을 이용하여 산정된 장력이 $\pm 1\%$ 이내의 오차를 가짐으로써 영상처리 데이터의 타당함을 확인할 수 있었다. 역해석 방법을 이용하여 계산된 모드별 고유진동수와 측정된 모드별 고유진동수는 $\pm 1\%$ 이내의 정확도를 확인할 수 있었다. 또한 역해석 방법을 이용하여 계산된 장력은 진동법에 의해 산정된 장력과 $\pm 2\%$ 이내의 오차를 가짐으로써 역해석 방법의 타당성을 확인할 수 있었다. 보정계수 β_i 의 n 을 2차 모드, 2차~3차 모드, ..., 2차~측정된 모드별 고유진동수까지를 적용하였을 때의 역해석 방법을 이용하여 계산된 장력은 진동법에 의해 산정된 장력과 적은 오차를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 역해석 방법은 보정계수 β_i 의 n 을 2차 모드만 적용하여도 신뢰성 있는 장력 추정이 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서 역해석 방법을 이용하면 행어케이블에서 적은 차수의 계측된 모드별 고유진동수를 이용하여도 비교적 정확한 장력 추정이 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B03031033).

References

1. Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A. and Peters, W. H. (1989), Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction, *Experimental Mechanics*, 29(3), 261-267.
2. Cho, S., Yim, J., Shin, S. W., Jung, H. J., Yun, C. B. and Wang, M. L. (2013), Comparative field study of cable tension measurement for a cable-stayed bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 18(8), 748-757.
3. Chu, C. K., Chang, C. W., Huang, M. J., Zhang, Q. W. and Lin, C. H. (2013), Tension measurements for XINBEI cable-stayed bridge with ambient vibrations and an EM tension sensor, *Disaster Advances*, 6(9), 63-68.
4. Haji Agha Mohammad Zarbaf, S. E., Norouzi, M., Allemang, R., Hunt, V., Helmicki, A. and Venkatesh, C. (2018), Vibration-based cable condition assessment: a novel application of neural networks, *Engineering Structures*, 177, 291-305.
5. Kim, B. H., Moon, S. Y., Bae, I. H. and Park, T. H. (2007), Estimating tensile force of hangers in suspension bridges using frequency based SI technique: II. Field applications, *The Korean Society of Civil Engineers*, 28(2A), 173-179.
6. Kim, C. H., Jo, B. W. and Jun, J. T. (2012), Application of laser vibrometer to the measurement and control of cable tensile forces in cable-stayed bridges, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10, 810682.
7. Kim, M. K. and Jang, J. B. (1995), Back Analysis of the Measured Displacements by the Coupled Method of Finite Elements -Boundary Elements in Tunnel, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, 5(3), 205-213.
8. Kim, N. S., Park, D. U., Park, Y. M. and Cheung, J. H. (2007), Back analysis technique for the estimation of tension force on hanger cables, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 11(3), 1-10.
9. Kim, K. J., Park, Y. S. and Park, S. W. (2020), Development of artificial neural network model for estimation of cable tension of cable-stayed bridge, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 21(3), 414-419.
10. Kim, K. S. (2012), Principle of digital image correlation, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, 32(5), 597-602.
11. Kim, S. W., Jeon, B. G., Cheung, J. H., Kim, S. D. and Park, J. B. (2017), Stay cable tension estimation using a vision-based monitoring system under various weather conditions, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(3), 343-357.
12. Kim, S. W., Jeon, B. G., Kim, N. S. and Park, J. C. (2013), Vision-based monitoring system for evaluating cable tensile forces on a cable-stayed bridge, *Structural Health Monitoring*, 12(5-6),

- 509-517.
13. Kim, S. W. and Kim, N. S. (2013), Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing, *NDT & E International*, 59, 509-517.
 14. Lee, H. J. (2018), A study in the efficient tension estimation of cables under ambient vibration using minimized measurement and signal processing system, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 19(11), 594-603.
 15. Pan, B., Qian, K., Xie, H. and Asundi, A. (2009), Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review, *Measurement Science and Technology*, 20(6), 1-17.
 16. Park, D. Y., Kim, S. H. and Kim, D. Y. (2011), Monitoring of cable force on cable-stayed bridge of multi-Strand type using FBG Sensors, *The Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24(2), 72-78.
 17. Park, T. H., Moon, S. Y., Joo, H. J. and Kim, B. H. (2007), Estimating tensile force of hangers in suspension bridges using frequency based SI technique: I. theory, *The Korean Society of Civil Engineers*, 28(2A), 165~172.
 18. Shimada, T. (1994), Estimating method of cable tension from natural frequency of high mode, *Proceeding of Japan Society of Civil Engineers*, 501(1-29), 163-171.
 19. Sim, S. H., Li, J., Jo, H., Park, J. W., Cho, S., Spencer, B. F. and Jung, H. J. (2014), A wireless smart sensor network for automated monitoring of cable tension, *Smart Materials and Structures*, 23(2), 025006.
 20. Yang, K. T. (2004), Indirect estimation of cable tension using dynamic characteristics, *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, 6(2), 15-23.

Received : 04/29/2020

Revised : 06/12/2020

Accepted : 06/26/2020

요 지: 최근 재료 및 시공 기술의 지속적인 발전으로 인하여 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 특히 케이블을 이용한 장대교량에서는 시공 중, 그리고 공용상태에서 케이블의 장력을 측정하여 교량의 안전성을 지속적으로 감시하는 것이 중요하다. 케이블 장력을 측정하기 위한 다양한 방법이 있으며, 그중에서도 케이블의 형상조건과 고유진동수를 이용하여 장력을 산정하는 진동법은 로드셀 등을 이용하여 케이블의 응력을 측정하는 직접법에 비해 경제적이며 편리하므로 현재 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 영상신호를 이용하여 케이블의 응답을 측정하기 위해 영상처리기법을 적용하였으며 사용의 편의성과 경제성을 고려하여 상업용 디지털 캠코더를 사용하였다. 모드별 고유진동수들을 변수로 하여 원거리에 위치한 행어케이블의 장력을 추정할 수 있는 역해석 방법의 타당성을 검증하기 위하여 공용중인 현수교에서 상시진동실험을 수행하였다. 그리고 각 행어케이블의 해석모델을 통해서 계산된 모드별 고유진동수와 계측된 모드별 고유진동수의 차이를 이용하여 역해석하여 추정된 장력을 진동법에 의해 산정된 장력과 비교하였다.

핵심용어 : 역해석 방법, 행어케이블, 장력, 진동법
