

사장재 케이블 형태를 이용하여 케이블 장력을 추정하는 영상기반 방법

김진수¹, 박재봉², 이덕근³, 박동욱⁴, 김성완^{5*}

Vision-based Method for Estimating Cable Tension Using the Stay Cable Shape

Jin-Soo Kim¹, Jae-Bong Park², Deok-Keun Lee³, Dong-Uk Park⁴, Sung-Wan Kim^{5*}

Abstract: Due to advancements in construction technology and analytical tools, an increasing number of cable-stayed bridges have been designed and constructed in recent years. A cable is a structural element that primarily transmits the main load of a cable-stayed bridge and plays the most crucial role in reflecting the overall condition of the entire bridge system. In this study, a vision-based method was applied to estimate the tension of the stay cables located at a long distance. To measure the response of a cable using a vision-based method, it is necessary to install feature points or targets on the cable. However, depending on the location of the point to be measured, there may be no feature points in the cable, and there may also be limitations in installing the target on the cable. Hence, it is necessary to find a way to measure cable response that overcomes the limitations of existing vision-based methods. This study proposes a method for measuring cable responses by utilizing the characteristics of cable shape. The proposed method involved extracting the cable shape from the acquired image and determining the center of the extracted cable shape to measure the cable response. The extracted natural frequencies of the vibration mode were obtained using the measured responses, and the tension was estimated by applying them to the vibration method. To verify the reliability of the vision-based method, cable images were obtained from the Hwatae Bridge in service under ambient vibration conditions. The reliability of the method proposed in this study was confirmed by applying it to the vibration method using a vision-based approach, resulting in estimated tensions with an error of less than 1% compared to tensions estimated using an accelerometer.

Keywords: Cable-stayed bridge, Cable tension, Vibration method, Vision-based method

1. 서론

최근 건설 기술과 해석 도구의 발전으로 인해 많은 케이블을 이용하는 장기간 교량이 설계되고 건설되었다. 장기간 교량에 대한 수요가 증가함에 따라 사장교는 원거리 지역을 연결하는 효율적인 구조물로 큰 주목을 받고 있다. 사장교에서 케이블은 교량 상판을 지지하고 하중을 주탑에 전달하도록 설계되므로 전체 교량 시스템의 상태를 반영하는 데 중요한 역할을 한다(Zhang et al., 2017). 케이블 장력의 정확한 측정과 유지관리는 사장교의 건전성과 안전성에 영향을 미치는 중요한 요소이다(Nazarian et al., 2016; Kim et al., 2023a).

케이블 모니터링에 사용되는 다양한 물리량 중 케이블 장력은 사장교의 건전도를 평가하기 위한 지표로 널리 활용되고 있다. 현재 케이블 장력 측정에 사용되는 방법은 장력을 직

접적으로 측정하는 방법과 케이블에서 측정된 고유진동수와 케이블의 형상 조건을 이용하여 간접적으로 장력을 추정하는 방법으로 구분할 수 있다. 로드 셀과 유압재를 이용하여 직접적으로 장력을 측정하는 방법은 시공 중에 장력을 측정하기 위해 가장 많이 사용되고 있다(Cho et al., 2018). 로드 셀과 유압재를 이용하는 방법은 장력을 정확하게 측정할 수 있지만 복잡한 설치, 교정으로 인해 공용 중인 교량에는 적용하기 어려울 수 있다. 직접적으로 장력을 측정하는 방법은 센서를 케이블 표면에 설치하기 위해 구조물에 물리적 접근이 필요하며 이는 종종 어렵거나 심지어 불가능할 수 있다.

직접적으로 측정하는 방법의 대안으로 간접적인 방법은 편리성과 효율성으로 공용 중인 교량에서 사용되고 있다(Kangas et al., 2012). 간접적인 방법은 직접적인 방법과 비교하여 정확도는 낮으나 계측 장비가 경제적이고 설치가 쉬운 장점이 있다. 일반적으로 간접적인 방법에서는 진동법을 적용하여 케이블 장력을 추정한다(Shimada, 1994; Zui et al., 1996). 진동법은 먼저 케이블에서 측정된 응답을 이용하여 진동모드에 대한 고유진동수를 추출한다. 추출된 진동모드에 대한 고유진동수와 케이블의 형상 조건의 관계를 이용하여 장력을 추정하는 방법이다. 따라서 케이블에서 신뢰할 수 있는 진동모드에 대한 고유진동수를 측정하는 기술을 개발하기

¹정회원, 국토안전관리원 특수교관리실 여수사무소 소장

²정회원, 국토안전관리원 경영관리실 부장

³정회원, 국토안전관리원 특수시설관리실 처장

⁴정회원, 부산대학교 지진방재연구소 연구교수

⁵정회원, 부산대학교 지진방재연구소 연구교수, 교신저자

*Corresponding author: swkim09@pusan.ac.kr

Seismic Research and Test Center, Pusan National University, Yongsan, 50612

•본 논문에 대한 토의를 2024년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 2024년 4월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

위해 다양한 노력들이 있었다. 일반적으로 공용 중인 사장교에서는 가속도 센서와 같은 접촉식 센서를 이용하여 케이블의 응답을 측정하고 있다(Li et al., 2014). 가속도 센서는 가속도 센서의 설치와 데이터 획득 시스템과 연결하기 위해 케이블 작업이 필요하므로 많은 수의 케이블이 있는 사장교에서 적용하기에는 어려울 수 있다.

접촉식 센서의 문제점을 해결하기 위해 비접촉식으로 케이블의 응답을 측정하는 시스템과 방법이 필요하다. 영상기반 방법은 디지털 영상 처리 기술의 발전으로 케이블의 응답을 측정하는 데 적용되고 있다(Feng et al., 2017). 영상기반 방법을 이용하여 케이블의 응답을 측정하기 위하여 케이블에 특정한 형태의 패턴이 적용된 타겟을 부착할 수 있다(Chen et al., 2015). 또한 케이블의 특이점 또는 나선형 필렛을 기준점으로 선정하여 응답을 측정할 수 있다(Kim et al., 2023b). 그러나 이러한 방법은 케이블에 타겟을 설치하거나 측정하고자 하는 지점에 케이블의 특이점이 존재하여야 하는 한계가 존재한다. 타겟의 형태나 특이점에 따라 이미지 해석에서 추가적인 알고리즘의 적용이 필요할 수 있으며 특이점이 케이블에 존재하지 않으면 케이블의 응답을 측정하는 것이 어려울 수 있다.

이 연구에서는 케이블의 장력 추정을 위해 필요한 응답을 타겟의 부착이 필요하지 않으며 특이점이 없는 케이블에서도 응답을 측정하는 방법을 제시하였다. 제시된 영상기반 방법은 획득된 케이블 이미지에서 케이블 형태의 특징을 이용하여 케이블의 응답을 측정하는 방법이다. 공용 중인 사장교에서 영상기반 방법과 가속도 센서를 이용하여 측정된 진동모드에 대한 고유진동수와 장력을 비교함으로써 제시된 방법의 정확도와 신뢰성을 확인하였다.

2. 케이블 형태를 이용한 장력 추정 방법

2.1 캐니 윤곽선 검출기

이미지에서 케이블 형태를 추출하기 위해서는 윤곽선의 추출이 매우 중요하다. 추출된 윤곽선의 신뢰도는 실제 케이블의 형태에 해당하는 윤곽선을 표현할 수 있는 확률이 높아야 한다. 이미지에서 윤곽선을 검출하는 알고리즘은 다양하며 캐니 윤곽선 검출기는 에러율이 낮으며 정확도가 높아 현재 많이 사용되고 있다(Canny, 1986; Kim, 2016). 이 연구에서는 캐니 윤곽선 검출기를 이용하여 케이블 형태의 윤곽선을 추출하였다.

캐니 윤곽선 검출기는 총 5단계로 구성되어 있다. 이미지의 잡음을 가우시안 필터를 사용하여 감소시킨다. 소벨 운영자를 사용하여 윤곽선의 강도와 방향을 검출한다. 비최대 억제를 이용하여 얇은 두께의 윤곽선을 생성한다. 임계값을 적용

하여 잡음 성분의 윤곽선을 제거한다. 마지막으로 강한 윤곽선에 연결되어 있지 않은 윤곽선을 제거하여 최종 윤곽선을 결정한다.

이미지에 잡음이 포함되어 있으면 정확한 윤곽선을 추출하기 어렵다. 이러한 이유로 캐니 윤곽선 검출기에서는 이미지의 잡음을 감소시키기 위하여 가우시안 필터를 적용한다. 가우시안 필터는 이미지의 선명도가 떨어지는 대신 잡음을 감소시키며 이미지에서의 끊어진 픽셀들을 연결하게 된다. 이러한 특징으로 인하여 가우시안 필터는 잡음에 민감한 윤곽선 검출의 전처리 과정에서 사용된다. 가우시안 필터는 2차원 가우시안 함수로 정의할 수 있으며 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다. Eq. (1)에서 (x, y) 는 픽셀의 위치이고, $G(x, y)$ 는 표준편차가 σ 인 가우시안 함수이다. σ 가 작을수록 평활화 효과가 줄어들고 σ 가 커질수록 평활화 효과가 커진다. 이 연구에서는 $\sigma = 2.5$ 인 5×5 마스크를 이용하여 이미지를 평활화 하였다.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

캐니 윤곽선 검출기에서는 소벨 운영자를 이용하여 윤곽선을 검출하였다. 이미지에서 윤곽선은 물체와 배경 사이 및 물체와 물체 사이의 픽셀값이 급격하게 변화하는 영역에서 주로 발생한다. 입력된 이미지인 $I(x, y)$ 에 대한 1차 미분은 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla I(x, y) = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I}{\partial x} \\ \frac{\partial I}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

소벨 운영자는 수평 및 수직 방향으로 적용하여 각각의 기울기를 산정한다. 여기서 입력된 이미지에 대한 기울기의 크기 및 방향은 Eq. (3) 및 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{G_y}{G_x} \right] \quad (4)$$

소벨 운영자에 대하여 3×3 행렬로 이산화한 형태는 Eq. (5)에 나타내었으며 S_x 는 수평 마스크, S_y 는 수직 마스크이다.

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

가우시안 필터와 소벨 운영자를 적용하여 추출된 윤곽선을 얇게 만들어주는 것을 비최대 억제라 한다. 추출된 윤곽선은 흐릿하게 되어 있으므로 더욱 선명한 윤곽선을 찾기 위해 진행한다. 국부 마스크 내에 윤곽선 기울기의 방향을 참조하여 2개의 이웃 픽셀을 선택하여 현재 지점이 윤곽선인지를 결정한다. 기울기 방향은 윤곽선에 수직이므로 이를 통해 윤곽선의 방향을 추측할 수 있다. 윤곽선의 값이 두 개의 이웃보다 크다면 해당 지점은 유지되고 그렇지 않으면 0으로 설정한다.

비최대 억제에서 결정된 윤곽선은 잡음과 약한 윤곽선, 강한 윤곽선으로 나타난다. 히스테리시스 임계값에서는 두 개의 임계값을 적용하여 윤곽선 여부를 결정하게 된다. 픽셀 (x, y) 의 경사 값이 HT(High Threshold)보다 크다면 윤곽선으로 기록하고 그 값은 255가 된다. 픽셀 (x, y) 의 경사 값이 LT(Low Threshold)보다 작다면 윤곽선이 아니므로 0이 된다. 픽셀 (x, y) 의 경사 값이 HT와 LT 사이에 위치하고 3×3 마스크 내의 이웃 점이 윤곽선 픽셀이거나 HT와 LT 사이에 있다면 윤곽선으로 기록하고 그 값은 255가 된다. 이 연구에서는 이미지 해석의 간편성을 위하여 HT만 변수로 사용하기 위해 Eq. (6)과 같이 LT는 HT의 0.4배로 설정하였다.

$$LT = 0.4 \times HT \quad (6)$$

히스테리시스에 의한 윤곽선 추적은 윤곽선의 연관성을 확인하는 단계이다. 강한 윤곽선은 이미지에 바로 추가하고 약한 윤곽선은 강한 윤곽선과 연결되면 이미지에 반영시킨다. 윤곽선의 작은 변화량들은 강한 윤곽선들과 연관성이 떨어져 잡음일 가능성이 크기 때문이다. 실제로 강한 윤곽선들이 거의 실제 윤곽선으로 나타나는 현상이 발생한다. 약한 윤곽선에 대해서만 8방향으로 검색하여 연관성 여부를 확인한다.

2.2 추출된 윤곽선을 응답으로 변환

이미지에 결정된 케이블 형태의 윤곽선은 일반적으로 직선과 유사하게 연속성을 가지고 있다. 또한 이미지에 포함된 잡음과 다양한 광학적인 영향으로 국부적으로 울퉁불퉁해질 수 있다. 따라서 이 연구에서는 추출된 윤곽선의 중심을 산정하여 케이블 응답을 측정하였다.

2차원 이미지에서 윤곽선의 중심 좌표는 x 및 y 방향에 대하여 평균 픽셀 좌표를 산정할 수 있으며 Eq. (7)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 i 와 j 는 이미지 내 픽셀의 x 및 y 좌표를 나타낸다. $I(i, j)$ 는 각각 x 축과 y 축의 i 번째와 j 번째 좌표에서 픽셀의 명암도를 나타낸다. 추출된 윤곽선은 $I(i, j) = 255$ 는 흰색 픽셀을 나타내고 $I(i, j) = 0$ 은 검은색 픽셀을 나타낸다. M 과 N 은 각각 x, y 방향의 전체 픽셀 수를 나타낸다. 시간에 따라 변화하는 각각의 이미지에서 추출된 윤곽선의 중

심을 Eq. (7)을 이용하여 산정하여 응답을 측정할 수 있다.

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (x_{i,j} \cdot I_{i,j})}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m I_{i,j}}, y_c = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{i,j} \cdot I_{i,j})}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m I_{i,j}} \quad (7)$$

2.3 진동법

진동법은 케이블에서 측정된 응답으로부터 케이블의 진동 모드에 대한 고유진동수를 추출하고, 이와 케이블의 형상 조건을 활용하여 케이블의 장력을 산정하는 방법이다. 케이블의 휨강성과 새그의 영향을 고려한 최소자승법에 기반한 진동법이 가장 널리 활용되고 있다(Shimada, 1994).

케이블 장력은 케이블이 인장됨에 따라 고유진동수가 변화하는 특성을 이용하여 측정할 수 있다. 최소자승법에 기반한 진동법은 케이블을 휨이 존재하는 보로 가정한다. 이때 케이블의 운동방정식은 Eq. (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} \quad (8)$$

여기서 x 는 케이블의 길이 방향의 좌표, t 는 시간, $v(x, t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위응답, w 는 케이블의 단위중량, g 는 중력가속도, EI 는 케이블의 휨강성, T 는 길이방향에 대한 케이블의 장력을 의미한다.

케이블의 휨강성은 케이블의 길이, 장력 또는 휨에 의해 변화하나 케이블의 길이에 걸쳐 항상 일정하다고 가정한다. Eq. (8)에서 양단 힌지의 경계조건을 이용하여 미분방정식의 해를 구하면 Eq. (9)와 같이 1차 회귀식으로 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4wL^2} + \frac{n^2 \pi^2 EIg}{4wL^4} = b + a \cdot n^2 \quad (9)$$

1차 회귀식으로부터 매개변수 a 와 b 를 산정하면, 케이블의 휨강성과 장력은 Eq. (10)과 Eq. (11)을 이용하여 산정할 수 있다.

$$EI = \frac{4mL^4}{\pi^2} a \quad (10)$$

$$T = 4(w/g)L^2 \cdot b \quad (11)$$

최소자승법에 기반한 진동법은 측정된 여러 개의 고유진동수를 함께 이용한다. 따라서 측정 오차와 길이 방향으로 균일하지 않은 케이블 휨강성 및 새그로 인해 발생하는 오차를 보

정할 수 있다는 점에서 활용도가 매우 높다. 이 연구에서는 케이블 새그의 영향이 큰 1차 고유진동수를 제외 한 나머지 고유진동수들을 이용하여 케이블 장력을 산정하였다.

3. 영상기반 방법을 이용한 장력 추정

3.1 화태대교

이 연구에서는 케이블 형태의 특징을 이용하여 케이블의 장력을 측정하기 위하여 Fig. 1의 우리나라의 전라남도 여수시 돌산읍과 여수시 화태리를 연결하는 화태대교에서 실험을 수행하였다. 화태대교는 총연장 1,020m(71m + 189m + 500m + 189m + 71m)의 5경간 연속 강합성 사장교이며 폭은 14m, 왕복 2차선이다. 화태대교는 직접기초로 지지가 된 교각 위에 150m의 역 Y형 강재 주탑이 2기 설치되었으며, 주탑 상부로부터 136개의 MS(Multi Strand) 케이블이 2면으로 보강형을 지지하고 있다.



Fig. 1 Hwatae bridge

3.2 실험 설정

케이블의 장력 측정에 가장 많이 활용되는 간접법 중 하나인 진동법을 이용하여 공용 중인 화태대교에서 케이블 장력을 추정하였다. 케이블 장력의 장기 모니터링을 위해 설치된 가속도 센서는 Fig. 2에서와 같이 케이블의 2면에 총 12개의 센서가 설치되었다. 이 연구에서는 화태리 방향의 중앙경간에서 서쪽에 위치한 4개의 케이블(HCL26, HCL34, HCL35, HCL43)을 선택하였으며 선택된 케이블 사양은 Table 1에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 케이블의 장력의 장기 모니터링을 위해 설치된 가속도 센서(NewConsTech AC310-002)를 나타내었다. 또한 영상기반 방법으로 케이블의 응답을 측정하기 위하여 설치된 디지털 캠코더(SONY HDR-CX130)와 삼각대(ACEBIL I-705DX)를 나타내었다. 이 연구에서는 디지털 캠코더가 가지고 있는 본래의 기능을 이용하였으며 추가적인 장비 없이 케이블의 영상을 획득하였다. 진동모드에 대한 고유진동수들을 측정하는 데 필요한 응답은 상시진동상태에서 가속도 센서와 디지털 캠코더를 이용하여 3분 이상 측정하였다. Fig. 3(b)는 디지털 캠코더를 이용하여 획득된 HCL26 케이블 이미지를 나타내었다. 케이블 형태의 특징을 이용하여 측정된 응답과 진동모드에 대한 고유진동수들을 비교하기 위하여 케이블의 나선형 필렛에 기준점을 지정하여 응답을 측정하였다. 측정된 응답은 총 3가지의 다른 측정값이며 가속도 응답 1개와 영상기반 방법을 이용하여 측정된 응답이 2개가 생성되었다. Fig. 3(b)에서 케이블의 나선형 필렛에 대한 기준점의 응답은 DIC(Digital Image Correlation)의 ZNSSD(Normalized Sum of Squared Difference)를 이용하여 케이블의 응답을 측정하였다(Hild and Roux, 2006). DIC는 임의의 타겟 윈도우를

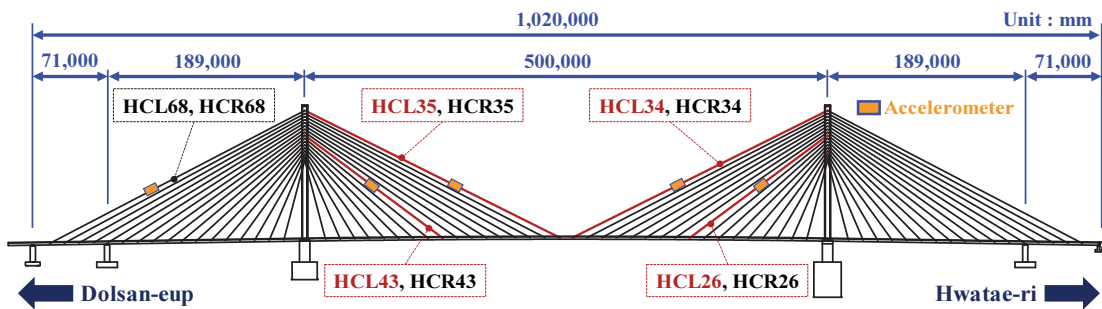


Fig. 2 Locations of accelerometers installed for long-term monitoring of cable tension

Table 1 Specifications of selected cables

Cable	Effective length (m)	Area (m ²)	Elastic modulus (kN/m ²)	Unit weight (kN/m)	Number of strand (ea)	Diameter (m)
HCL26, HCL43	163.66	4.8×10 ⁻³	2.0×10 ⁸	0.44	37	0.18
HCL34, HCL35	271.83	6.0×10 ⁻³		0.55	43	0.20

등록하고 시간에 따라 변화하는 ROI(Region Of Interest) 윈도우에서 가장 유사한 타겟 윈도우의 위치를 찾는 방법이다. 디지털 이미지에서 최소 단위는 1픽셀이기 때문에 ZNSSD에서 계산된 변위는 1픽셀의 정수배로 표현된다. ZNSSD를 이용하여 산정된 픽셀 좌표를 2차 형태함수를 적용하여 단위 픽셀 이하에서의 해상도를 향상하였다. 화재대교는 상시진동상태에서 케이블 응답이 크지 않다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 3(b)에서와 같이 나선형 필렛에 대한 기준점의 응답을 측정하기 위하여 ROI 윈도우는 90×90 픽셀 크기이며 타겟 윈도우는 ROI 윈도우의 1/3배인 30×30 픽셀 크기로 설정하였다. 또한 케이블 형태의 윤곽선을 추출하기 위한 ROI 윈도우는 101×101 픽셀 크기로 같게 설정하였다. 선정된 모든 케이블에 대하여 ROI 윈도우는 모두 같은 101×101 pixel 크기로 설정되었다. 픽셀 단위의 응답은 케이블 직경이 차지하는 픽셀의 수를 이용하여 단위 픽셀에 대한 해상도를 계산할 수 있으

며 이를 이용하여 실제 변위 단위로 변환할 수 있다. 디지털 캠코더를 이용하여 측정된 응답은 가속도 응답과 같은 케이블 표면에 수직인 방향으로 나타내었다. 주파수 영역에서의 정확도를 확인하기 위하여 영상기반 방법을 이용하여 측정된 진동모드에 대한 고유진동수들을 가속도 센서에서 측정된 진동모드에 대한 고유진동수들과 비교하였다. 디지털 캠코더는 1920×1080의 영상을 60FPS(Frames Per Second)로 주파수 해상도는 Δf 는 0.004Hz로 측정하였다. 가속도 센서는 데이터 취득 속도 100Hz이며 주파수 해상도 Δf 는 0.003Hz로 측정하였다.

3.3 케이블 형태의 윤곽선 추출

시간에 따라 획득된 이미지는 빛의 강도와 잡음 성분이 변화할 수 있다. 캐니 윤곽선 검출기로 추출된 케이블 형태의 윤곽선에 잡음 또는 히스테리시스 임계값의 잘못된 설정으로 윤곽선이 아닌 부분이 포함되거나 또는 윤곽선을 잃을 수 있다. 캐니 윤곽선 검출기의 HT 및 LT에 대한 매개변수는 자동화가 이루어지지 않아 수동적으로 설정하여 사용하게 된다. 설정된 임계값이 낮으면 잡음의 영향을 받기 쉬우며, 임계값이 높으면 중요한 윤곽선의 정보를 잃을 수 있다. 따라서 임계값의 조정은 추출된 윤곽선의 정확도에 영향을 미치게 된다.

Fig. 4는 HCL26 케이블에서 획득된 이미지에 대하여 캐니 윤곽선 검출기의 히스테리시스 임계값을 적용하는 과정을 나타내었다. Fig. 4에서 첫 번째 이미지는 명암도로 변환된 101×101 픽셀 크기의 ROI 이미지이다. 두 번째 이미지에서는 캐니 윤곽선 검출기를 적용한 결과이다. 히스테리시스 임계값의 잘못된 설정으로 케이블 형태의 윤곽선이 아닌 정보들이 윤곽선으로 추출되거나 윤곽선의 일부를 잃을 수 있음을 확인할 수 있었다. 세 번째 이미지는 적절한 히스테리시스 임계값의 적용으로 케이블 형태에 대한 윤곽선만 추출됨을 확인할 수 있다. 그러나 이 연구에서 제시된 방법은 응답을 측정하고자 하는 지점이 각각의 이미지에 대해 산정하므로 이미지 해석에서 기준점이 연속적이지 않다. 또한 상시진동상태에서 3분 이상 이미지를 획득하였으며 시간에 따라 변화하는 이미지에서 잡음의 변화량은 크지 않다. 최소자승법에 기반한 진동법을 이용하여 장력을 추정하기 위해서는 케이블의

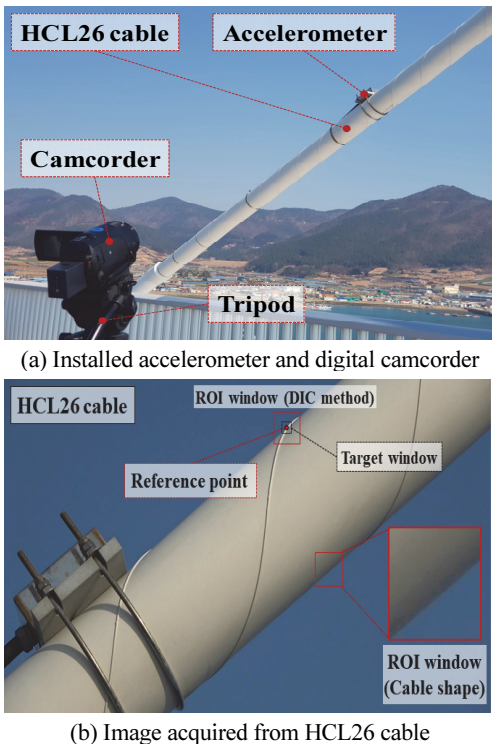


Fig. 3 Experimental setup to measure responses of HCL26 cable

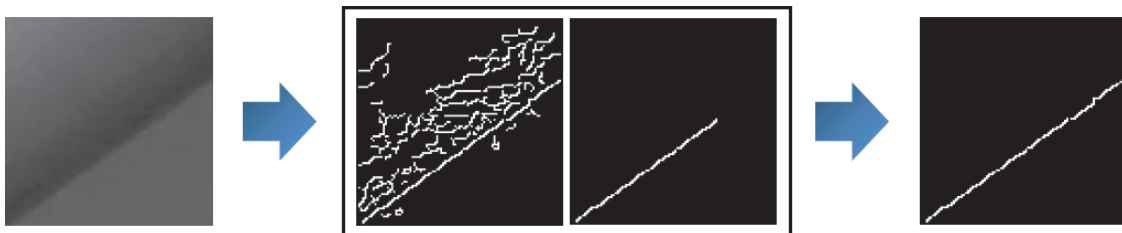


Fig. 4 Cable shape edge extracted using Canny edge detection

진동모드에 대한 고유진동수의 추출이 목적이다. 따라서 영상기반 방법에서 측정된 응답의 크기 오차에 대한 영향은 미소하다. 이는 주파수 영역에서의 정확도를 확보할 수 있다면 응답의 크기 오차는 무시할 수 있는 것을 의미한다. 이 연구에서는 LT는 0.4HT로 설정하였다. 획득된 이미지는 10,000장이상이므로 1번째, 5000번째, 10000번째 이미지인 총 3개의 이미지에 대하여 히스테리시스 임계값의 HT를 설정하였다. 이 연구에서는 케이블에서 획득된 영상을 캐니 윤곽선 검출기가 만족하는 조건일 때까지 반복적으로 3개의 이미지에 대하여 산정된 HT를 모든 이미지에 대하여 동일하게 적용하였다. 히스테리시스 임계값은 각각의 케이블에서 측정된 영상마다 다르므로 각각의 케이블에 대하여 HT를 산정하였다.

3.4 케이블 형태의 윤곽선을 이용한 장력 추정

영상기반 방법은 비접촉식 측정 방법이므로 센서를 설치하기 위해 케이블에 접근할 필요가 없다. 케이블의 특정 위치에

서는 타겟의 부착이 어려울 수 있으며 케이블의 특이점이 없을 수 있다. 이 연구에서 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 응답을 측정하는 방법을 제안하였다. Fig. 5는 HCL26 케이블에서 가속도 센서 및 영상기반 방법을 이용하여 측정된 응답과 응답에 대한 PSD(Power Spectral Density) 함수를 나타내었다. 영상기반 방법은 나선형의 필렛의 기준점을 DIC를 이용하여 측정된 응답과 케이블 형태의 윤곽선 중심에 대한 응답을 나타내었다. DIC와 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 측정된 응답은 차이가 발생하였다. DIC를 이용하여 측정된 응답은 실 좌표계에서의 응답이다. 그러나 윤곽선을 이용하여 측정된 응답은 고정된 ROI 윈도우에서 윤곽선의 중심을 산정하므로 제한된 방향의 응답이다. 또한 고정된 2차원 이미지의 중심은 외부 하중으로 인한 케이블의 거동이 지배적인 방향에 대하여 응답의 성분이 크게 나타나게 되므로 DIC에서 측정된 응답과 차이가 발생하였다. Fig. 5에서 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 측정된 응답은 왜곡된 응답이 없음을 확인할 수 있었다. 따라서 케

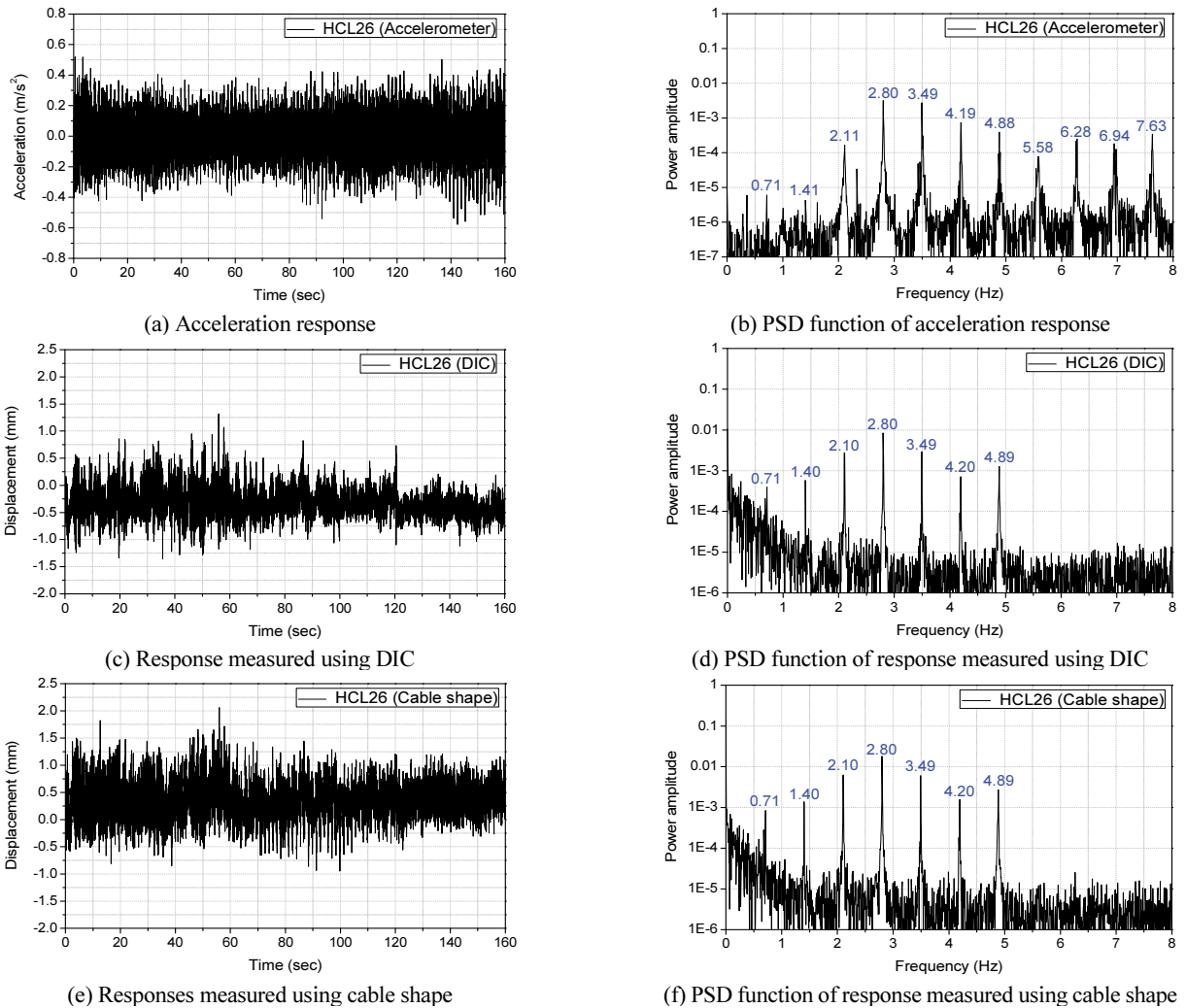


Fig. 5 Responses and PSD functions measured from HCL26 cable

이블 형태의 윤곽선이 정확하게 추출됨을 확인할 수 있었으며 이 연구에서 제시된 케이블 형태의 윤곽선을 추출하는 방법의 타당성을 확인할 수 있었다. Table 2는 가속도 센서와 영상기반 방법을 이용하여 측정된 진동모드에 대한 고유진동수와 진동법을 이용하여 추정된 장력을 나타내었다. 진동모드에 대한 고유진동수들은 최대 10차 고유진동수까지 나타내었다. Table 2에서 가속도 센서와 영상기반 방법을 이용하여 측정된 진동모드에 대한 고유진동수와 장력이 1% 이내의 차이를 확인할

수 있었다. Table 2에서 DIC와 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 측정된 진동모드에 대한 고유진동수는 같게 나타났다. 이 연구에서 제안된 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 응답을 측정하는 방법은 주파수 영역에서의 해상도 저하가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 상시진동상태에서 HCL34, HCL35 및 HCL43 케이블들에 대하여 장기 모니터링을 위해 설치된 가속도 센서와 영상기반 방법을 이용하여 측정된 응답의 PSD 함수를 나

Table 2 Comparison of natural frequencies and tensions measured from HC26L cable

Cable	Sensor	Position	Frequency (Hz)										Tension (kN)	Difference (%)
			1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th		
HCL26	Accelerometer	Cable	0.71	1.41	2.11	2.80	3.49	4.19	4.88	5.58	6.28	6.94	2376.51	0.45
	Vision-based method	DIC	0.71	1.40	2.10	2.80	3.49	4.20	4.89				2365.82	
		Cable shape	0.71	1.40	2.10	2.80	3.49	4.20	4.89				2365.82	

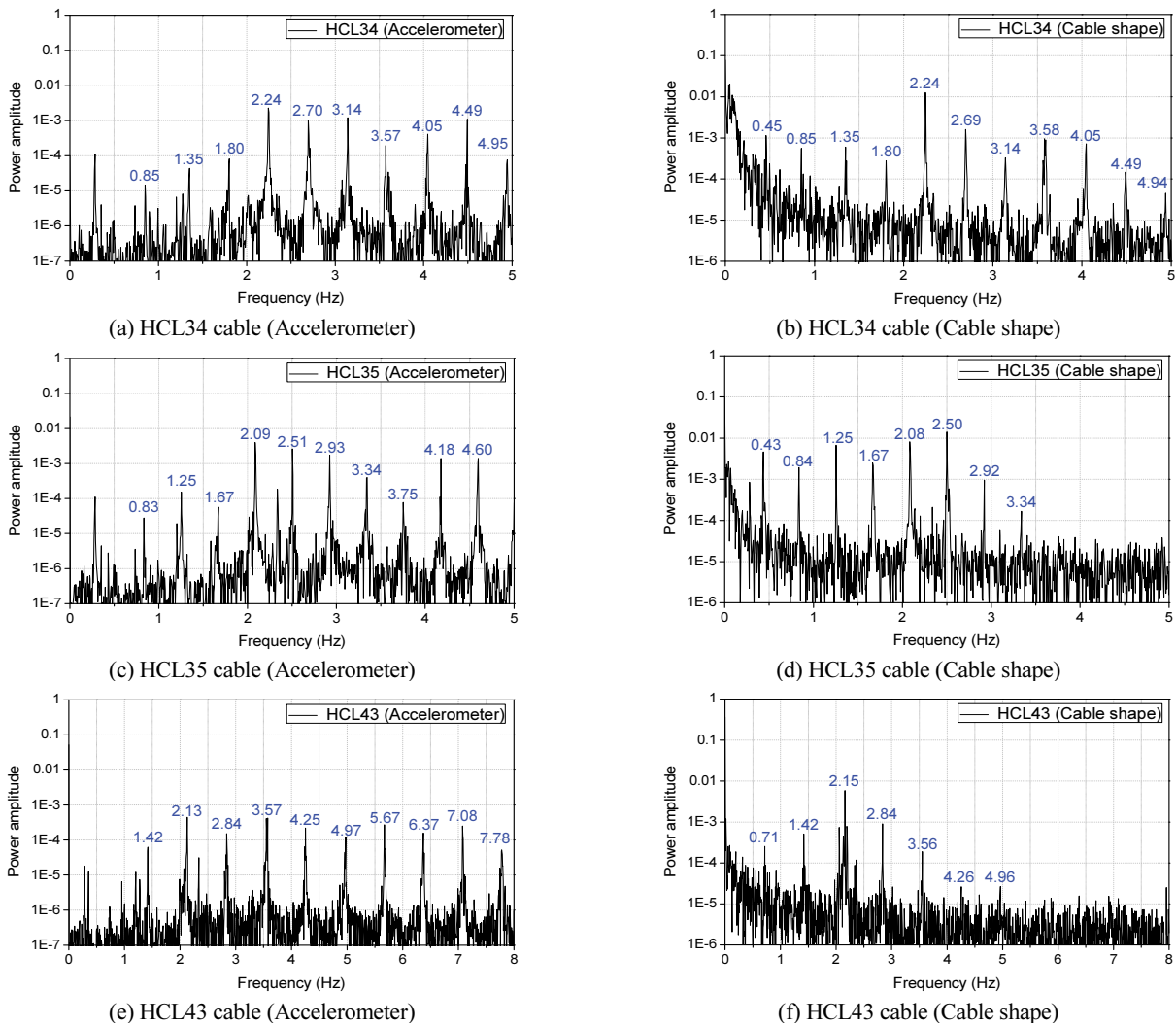


Fig. 6 PSD function of measured response from HC34L, HC35L, and HC43L cables

Table 3 Comparison of natural frequencies and tensions measured from HC34L, HC35L, and HC43L cables

Cable	Sensor	Frequency (Hz)										Tension (kN)	Difference (%)
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th		
HCL34	Accelerometer	-	0.85	1.35	1.80	2.24	2.70	3.14	3.57	4.05	4.49	3236.29	0.05
	Vision-based method	0.45	0.85	1.35	1.80	2.24	2.69	3.14	3.59	4.05	4.49	3238.03	
HCL35	Accelerometer	-	0.83	1.25	1.67	2.09	2.51	2.93	3.34	3.75	4.18	2877.51	0.03
	Vision-based method	0.43	0.84	1.25	1.67	2.08	2.50	2.92	3.34			2878.49	
HCL43	Accelerometer	0.74	1.42	2.13	2.84	3.57	4.25	4.97	5.67	6.37	7.08	2438.36	0.74
	Vision-based method	0.71	1.42	2.16	2.84	3.55	4.26	4.96				2456.51	

타내었다. Fig. 6에서 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 측정된 응답의 PSD 함수에서 왜곡된 응답이 없음을 확인할 수 있었다. 이는 이 연구에서 제시된 방법을 이용하여 케이블 형태의 윤곽선이 정확하게 추출되었음을 확인할 수 있었다. Table 3은 HCL34, HCL35 및 HCL43 케이블들에 대하여 진동모드에 대한 고유진동수와 장력을 나타내었다. Table 3에서 가속도 센서와 영상기반 방법을 이용하여 측정된 진동모드에 대한 고유진동수와 장력은 1% 이내의 차이를 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서 제시된 케이블 형태의 윤곽선을 이용하여 케이블의 장력을 추정하는 방법의 타당함을 확인할 수 있었다. 가속도 센서는 영상기반 방법보다 더 많은 진동모드에 대한 고유진동수가 측정되었다. 가속도 센서와 영상기반 방법은 측정할 수 있는 모든 주파수 영역에서 백색잡음이 존재한다. 케이블의 참여 질량이 큰 저주파수 모드에서는 높은 변위 응답과 상대적으로 낮은 가속도 응답이 발생한다. 케이블은 고차모드로 갈수록 참여 질량은 낮아지고 상대적으로 모드 강성은 증가하게 된다. 영상기반 방법을 이용하여 측정된 고차모드의 응답은 영상기반 방법이 가지고 있는 백색잡음보다 작아 측정이 어려웠다. 그러나 영상기반 방법은 최소자승법에 기반한 진동법을 적용하는데 충분한 진동모드에 대한 고유진동수의 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

이 연구에서는 케이블의 장력을 측정하기 위한 비접촉식 방법인 영상기반 방법을 적용하였다. 케이블의 응답을 효율적으로 측정하기 위해 케이블 형태의 윤곽선을 이용하는 이미지 처리 방법이 제시되었다. 제시된 방법은 케이블에 임의의 타겟이 설치되지 않고 특이점이 없는 케이블에서도 응답의 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

영상기반 방법을 이용하여 화태대교의 케이블에서 측정된 응답의 PSD 함수에서 왜곡된 응답이 나타나지 않았다. 가속

도 센서와 영상기반 방법에서 측정된 진동모드에 대한 고유진동수와 장력은 1% 이내의 차이로 이 연구에서 제시된 방법은 정확한 장력의 추정 결과를 제공할 수 있음을 보여주었다. 따라서 케이블 형태의 윤곽선을 이용하면 신뢰성 있는 진동모드에 대한 고유진동수와 장력의 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

영상기반 방법을 이용하여 장력을 추정하는 방법은 기존의 접촉식 센서를 이용하는 방법과 비교하여 편리성과 효율성을 확인할 수 있었다. 따라서 이 연구에서 제안된 방법은 사장교의 케이블 장력에 대한 모니터링을 위한 편리하고 경제적인 방법일 것이다. 그러나 복잡한 배경 조건, 이미지의 열화 및 광학의 급격한 변화로 인한 잡음이 포함된 이미지에 대해서 케이블의 응답을 측정하기 위한 추가적인 연구들도 필요할 것이다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C1012093).

References

- Zhang, L., Qiu, G., and Chen, Z. (2021), Structural health monitoring methods of cables in cable-stayed bridge: A review, *Measurement*, 168(2021), 108343.
- Nazarian, E., Ansari, F., Zhang, X., and Taylor, T. (2016), Detection of tension loss in cables of cable-stayed bridges by distributed monitoring of bridge deck strains, *Journal of Structural Engineering*, 142(6), 04016018.
- Kim, S. W., Park, D. U., Kim, J. S., Park, S. S., and Park, J. B. (2023a), Tension measurement of stay cables in consideration with image including vehicle, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 27(2), 58-66 (in Korean).
- Cho, S. J., Yim, J. S., 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.
5. Kangas, S. Helmicki, A., Hunt, V., Sexton, R., and Swanson, J. (2012), Cable-stayed bridges: case study for ambient vibration-based cable tension estimation, *Journal of Bridge Engineering*, 17(6), 839-846.
 6. Shimada, T. (1994), Estimating method of cable tension from natural frequency of high mode, *Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, 501, 163-171.
 7. Zui, H., Shinke, T., and Namita, Y. (1996), Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method, *Journal of Structural Engineering*, 122(6), 651-656.
 8. Li, H., Zhang, F., and Jin, Y. (2014), Real-time identification of time-varying tension in stay cables by monitoring cable transversal acceleration, *Structural Control and Health Monitoring*, 21(7), 1100-1117.
 9. Feng, D., Scarangelo, T., Feng, M. Q., and Ye, Q. (2017), Cable tension force estimate using novel noncontact vision-based sensor, *Measurement*, 99, 44-52.
 10. Chen, C. C., Wu, W. H., Tseng, H. Z., Chen, C. H., and Lai, G. (2015), Application of digital photogrammetry techniques in identifying the mode shape ratios of stay cables with multiple camcorders, *Measurement*, 75, 134-146.
 11. Kim, S. W., Park, D. U., Kim, J. S., and Park, J. B. (2023b), Estimating tension of a prestressed concrete cable-stayed bridge under construction and traffic use conditions using a vision-based system, *Structures*, 47, 299-312.
 12. Canny J. (1986), A computational approach to edge detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8, 679-698.
 13. Kim, Y. (2016), Development of Crack Recognition System for Concrete Structure Using Image Processing Method, *Journal of Korean Institute of Information Technology*, 14(10), 163-168 (in Korean).
 14. Hild, F., and Roux, S. (2006), Digital image correlation: From displacement measurement to identification of elastic properties-a review, *Strain*, 42(2), 69-80.

Received : 01/12/2024

Revised : 02/05/2024

Accepted : 02/05/2024

요 지 : 건설 기술과 해석 도구의 발전으로 인해 최근에는 점점 더 많은 사장교가 설계되고 건설되었다. 케이블은 사장교의 주요한 하중을 전달하는 부재이며 일반적으로 전체 교량 시스템의 상태를 반영하는 데 가장 중요한 역할을 한다. 이 연구에서는 원거리에서 위치한 사장재 케이블의 장력을 추정하기 위하여 영상기반 방법을 적용하였다. 영상기반 방법을 이용하여 케이블의 응답을 측정하기 위해서는 케이블에 특이점 또는 타겟의 설치가 필요하다. 그러나 측정하고자 하는 지점의 위치에 따라 케이블에 특이점이 존재하지 않을 수 있으며 또한 케이블에 타겟의 설치가 어려울 수 있는 한계가 존재한다. 따라서 기존의 영상기반 방법의 한계를 극복하여 케이블 응답을 측정하는 방법이 필요하다. 이 연구에서는 케이블 형태의 특징을 이용하여 케이블 응답을 측정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 획득된 이미지에서 케이블 형태를 추출하였으며 추출된 케이블 형태의 중심을 산정하여 케이블 응답을 측정하였다. 측정된 응답을 이용하여 진동모드에 대한 고유진동수들을 추출하였으며 진동법에 적용하여 장력을 추정하였다. 영상기반 방법의 신뢰성을 확인하기 위해 공용 중인 화태대교에서 케이블 이미지를 상시진동 조건에서 획득하였다. 영상기반 방법을 이용하여 진동법에 적용하여 추정된 장력은 가속도 센서를 이용하여 추정된 장력과 1% 이내의 오차로 이 연구에서 제시된 방법의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 사장교, 케이블 장력, 진동법, 영상기반 방법
