

차량이 포함된 이미지를 고려한 사장재 케이블의 장력 측정

김성완¹, 박동욱², 김진수³, 박승수⁴, 박재봉^{5*}

Tension Measurement of Stay Cables in Consideration with Image Including Vehicle

Sung-Wan Kim¹, Dong-Uk Park², Jin-Soo Kim³, Seung-Su Park⁴, Jae-Bong Park^{5*}

Abstract: In this study, cable tension was measured using the vibration method, and a vision-based system was applied as a sensor to measure the displacement response of a cable in a non-contact method. In the vision-based system, the camera is installed in a location that considers the target structure and the field of view of the camera. However, it can be difficult to recognize the control points required to measure the displacement response of a structure as the target structure and other structures such as vehicles may be included in the image at the intended installation location. In this study, a distorted image including a vehicle shows inaccurate results in image analysis due to the installation position of the vision-based system. Accordingly, the image including the vehicle was eliminated by calculating the similarity between the two images. To verify the validity of the method of estimating the cable tension of cable-stayed bridges using the proposed method, the vibration method was applied to cable-stayed bridges in service to measure the tension.

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

1. 서 론

케이블은 사장교에서 주요 하중을 전달하는 구성요소이므로 케이블은 사장교의 구조적 건전성에 중요한 역할을 한다(Zhang et al., 2021). 사장교의 구조적 건전성을 유지하기 위해서는 시공단계에서 도입되는 장력과 공용기간에 케이블 장력을 모니터링하는 것은 중요하다(Bao et al., 2017). 사장교가 공용 중일 때 케이블 장력은 교량의 건전성뿐만 아니라 케이블의 상태를 평가하는 필수 지표이다(Nazarian et al., 2016). 일반적으로 사장교는 공용기간 동안 과도한 진동, 앵커리지 또는 케이블 자체의 부식, 케이블과 연결된 콘크리트 구성요소의 수축 및 크리프 때문에 케이블이 장력이 변화할 수 있다(Au and Si, 2012). 또한 케이블의 부식 및 피로에 의해 발생하는 열화는 케이블이 지지하는 장력을 감소시키는 결과를 초

래하며 전체 교량의 구조적 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Jiang et al., 2020). 열화로 인하여 감소된 장력은 다른 케이블들로 재분배되어 교량의 안전성에 문제가 발생할 수 있다(Ma et al., 2021). 사장교의 안전하고 지속 가능한 운영을 위해서는 정기적으로 케이블 장력을 측정하여야 하며 케이블 장력에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다(Kim et al., 2017).

사장교의 건전도 모니터링에 사용되는 다양한 물리량 중에서 케이블 장력은 교량 구조의 건전도를 평가하기 위한 효율적인 물리량으로 널리 활용된다(Kim et al., 2013). 케이블 장력을 측정하기 위해 사용되는 방법은 장력을 직접 측정하는 방법과 케이블의 거동 특성을 이용하여 간접적으로 장력을 추정하는 방법으로 구분할 수 있다. 직접법은 로드셀과 같은 케이블의 하중을 측정하기 위해 맞도록 만든 장치를 이용한다(Zarba et al., 2018). 간접법인 진동법은 직접법과 비교하여 편리성과 비용 효율성으로 공용 중인 교량의 케이블의 장력 추정에 일반적으로 사용된다(Fang and Wang, 2018). 간접법은 힘이 아닌 케이블에서 동적 응답을 측정한 후에 각각의 진동 모드에 대한 고유진동수와 케이블의 형상조건 등의 자료를 함께 이용하여 장력을 역산하는 방법이다. 간접법은 직접법과 비교하여 정확도는 낮으나 계측 장비가 경제적이고 설치가 쉬우므로 시공 중 또는 공용 중인 교량 모두에 적용할 수 있는 큰 장점이 있다.

¹정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

²정회원, 부산대학교 지진방재연구센터 연구교수

³정회원, 국토안전관리원 특수교관리실 여수분소 소장

⁴정회원, 국토안전관리원 특수교관리실 진도분소 소장

⁵정회원, 국토안전관리원 경영관리실 부장

*Corresponding author: jbpark@kalis.or.kr

Korea Management Office, Korea Authority of Land & Infrastructure Safety, Jinju, 52856, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 연구에서는 간접법인 진동법을 이용하여 케이블 장력을 추정하였으며 케이블의 동적 응답을 측정하기 위하여 영상기반시스템을 적용하였다. 영상기반시스템은 야외에서 구조물의 변위 응답을 측정하려면 디지털 캠코더 또는 디지털 카메라와 삼각대만 있으면 가능하므로 접근성과 편리성이 뛰어나다(Kim and Kim, 2013; Kim et al., 2018). 영상기반시스템은 대상 구조물과 카메라의 FOV(Field Of View)를 고려한 위치에 설치되었다. 그러나 고려된 설치 위치에서 카메라로 획득된 이미지에 대상 구조물과 차량과 같은 다른 구조물이 포함될 수 있으므로 구조물의 변위 응답을 측정하는 데 필요한 기준점의 인식이 어려울 수 있다. 이는 부정확한 기준점을 인식할 수 있으므로 이미지 해석의 결과가 왜곡된 변위 응답을 나타낼 수 있다. 따라서 영상기반시스템의 설치 위치로 인해 차량이 포함된 이미지는 왜곡된 결과를 나타내므로 이미지 해석의 오차를 감소시키는 방법을 제안하였다. 이 연구에서는 제안된 방법을 이용하여 사장교의 케이블 장력을 측정하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 공용 중에 진동법을 적용하여 장력을 측정하고 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 구조유사도 측정

차량이 통행 중인 교량에서 영상기반시스템의 설치 위치, 케이블의 측정 위치 및 카메라의 FOV로 인하여 획득된 이미지에 차량이 포함될 수 있다. 이미지에 차량이 포함되면 이미지에 케이블 외에 다른 정보가 포함되므로 기준점의 인식이 어려워지며 왜곡된 결과를 나타낼 수 있다. 이는 이미지 해석에서 왜곡된 결과를 나타내므로 케이블의 응답을 측정하는 데 어려움이 있다. 따라서 이 연구에서는 SSI(Structural Similarity Index)를 이용하여 참조 이미지와 시간에 따라 변화하는 입력된 이미지를 비교 분석하는 과정을 거쳐 이미지에 차량이 포함된 이미지를 검출하는 방법을 고려하였다(Wang et al., 2004).

SSI는 이미지 안에서 구조적 정보를 이용하여 왜곡된 이미지를 검출하는 방법이다. SSI는 휘도, 대비, 구조의 값들을 연립하여 전체 이미지의 구조적 유사도를 파악할 수 있다. 휘도, 대비, 구조는 독립적이며 각각 1에 가까울수록 참조 이미지에 가깝고, 0에 가까울수록 참조 이미지와 다른 것을 의미한다. $M \times N$ 크기의 참조 이미지인 f 와 입력된 이미지인 g 를 가정했을 때, SSI는 Eq. (1)와 같이 나타낼 수 있다. Eq. (1)에서 휘도(l), 대비(c), 구조(s)는 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SSI(f, g) = [l(f, g)]^\alpha \cdot [c(f, g)]^\alpha \cdot [s(f, g)]^\alpha \quad (1)$$

$$\begin{aligned} l(f, g) &= \frac{2\mu_f\mu_g + c_1}{\mu_f^2 + \mu_g^2 + c_1}, \\ c(f, g) &= \frac{2\sigma_f\sigma_g + c_2}{\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + c_2}, \\ s(f, g) &= \frac{\sigma_{fg} + c_3}{\sigma_f\sigma_g + c_3} \end{aligned} \quad (2)$$

$$SSI(f, g) = \frac{(2\mu_f\mu_g + c_1)(2\sigma_{fg} + c_2)}{(\mu_f^2 + \mu_g^2 + c_1)(\sigma_f^2 + \sigma_g^2 + c_2)} \quad (3)$$

Eq. (2)에서 μ_f 와 μ_g 는 이미지 f 와 g 의 평균, σ_f 와 σ_g 는 이미지 f 와 g 의 표준편차, σ_{fg} 는 이미지 f 와 g 의 공분산을 나타낸다. 상수 c_1, c_2 는 분모가 0이 되어 오차가 발생하는 것을 방지하기 위한 상수이다. SSI를 간단하게 표현하기 위하여 Eq. (1)에서 $\alpha = 1, \beta = 1, \gamma = 1$ 로 설정하고 $c_3 = c_2/2$ 로 설정하면 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 이 연구에서는 Eq. (3)의 SSI를 이용하여 왜곡된 이미지인 차량이 포함된 이미지를 검출하였다.

3. 진동법

진동법은 케이블에서 측정된 응답으로부터 케이블의 각각의 진동 모드에서 측정된 고유진동수와 케이블의 형상조건을 이용하여 케이블의 장력을 역산하는 간접법이다(Shimada, 1994).

진동법은 케이블의 휨강성을 고려하기 위해 케이블을 단순보로 가정할 수 있으며 케이블의 운동방정식은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, x 는 케이블의 길이 방향의 좌표, t 는 시간, $v(x, t)$ 는 케이블의 수직 방향의 변위 응답, w 는 케이블의 단위 중량, g 는 중력가속도, EI 는 케이블의 휨 강성, T 는 길이 방향에 대한 케이블의 장력을 의미한다. 실제 케이블의 휨 강성은 케이블의 길이, 장력 및 휨에 의하여 변화하나 케이블의 길이에 따라 항상 일정하다고 가정한다. 또한 케이블 양단의 경계조건을 힌지라고 가정하여 Eq. (4)의 미분방정식의 해를 구하면 Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T = 4ml_e^2 \left(\frac{f_n}{n} \right)^2 - \frac{EI\pi^2}{l_e^2} n^2 \quad (5)$$

Eq. (5)에서 l_e 는 케이블의 유효길이, f_n 은 n 차의 진동 모드를 가지는 케이블의 고유진동수이다. Eq. (5)의 $(f_n/n)^2$ 에 대

하여 최소자승법을 이용하여 1차 식의 형태로 표현하면 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다. Eq. (6)에서 1차 식의 기울기(a)와 절편(b)를 이용하면 Eq. (7)의 케이블의 휨 강성과 Eq. (8)의 케이블 장력을 산정할 수 있다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4wL^2} + \frac{n^2\pi^2 EIg}{4wL^4} = b + a \cdot n^2 \quad (6)$$

$$EI = \frac{4ml_c^4}{\pi^2} a \quad (7)$$

$$T = 4(w/g)l_c^2 \cdot b \quad (8)$$

진동법은 각각의 진동 모드에 대한 고유진동수를 함께 이용하기 때문에 측정 오차, 케이블의 길이 방향으로 균일하지 않은 휨 강성 및 새그로 인하여 발생하는 오차를 보정할 수 있다는 점에서 활용도가 매우 높다. 또한 새그의 영향이 큰 1차 진동 모드를 배제하며 나머지 진동 모드들을 이용함으로써 평균적인 개념의 케이블 장력과 이에 대응하는 등가정적 휨 강성을 산정할 수 있다. 이 연구에서는 1차 진동 모드를 제외한 다중 진동 모드들을 이용하여 케이블의 장력을 산정하였다.

4. 영상기반시스템을 이용한 장력 측정

4.1 완도대교



Fig. 1 Wando bridge

이 연구에서는 영상기반시스템을 이용하여 사장재 케이블의 장력을 측정하기 위하여 Fig. 1의 우리나라의 완도군과 해남군을 연결하는 완도대교에서 상시진동상태에서 실험을 수행하였다. 완도대교는 2012년 3월 29일에 완공되어 개통하였으며 1주탑 2면식 비대칭 사장교 형식으로 총 500m이며 사장교 주경간은 200m, 폭은 25.9m이다. 완도대교는 A형 강재 주탑, 강상관상형의 보강형과 16쌍 2면으로 32개의 케이블로 구성되었다. 완도대교의 케이블은 부분 교체가 가능하고 긴장 및 재긴장이 쉬운 MS(Multi Strand) 형태로 설치되었다. 케이블은 스트랜드의 수에 따라 5가지 케이블 그룹(27H, 31H, 55H, 61H 및 73H)이 있으며 케이블 크기에 따라 직경은 160mm, 200mm, 225mm 및 250mm이다. 케이블은 내풍 안정성의 증진을 위하여 나선형의 필릿이 처리된 덕트를 이용하여 보호되고 있다.

4.2 선택된 케이블

케이블은 Fig. 2에 표시된 완도 방향 경간의 왼쪽 첫 번째 케이블(CL01)에서 여덟 번째 케이블(CL08)까지를 선택하였다.

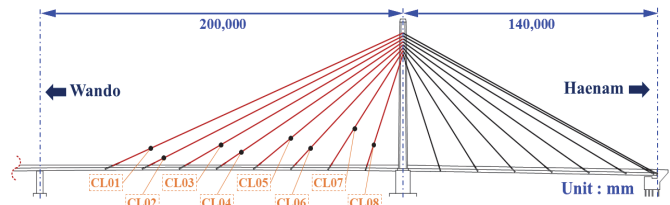


Fig. 2 Positions of cables selected for measuring cable tension

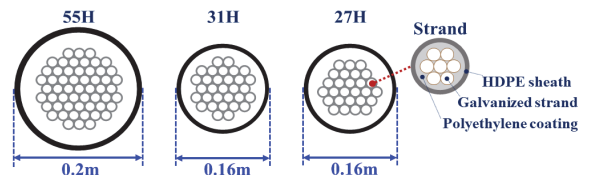


Fig. 3 Cross section of selected cables and strands

Table 1 Specification 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)
BLC01	175.50	6.90×10 ⁻³	1.95×10 ⁸	0.59	55	0.2
BLC02	156.33	7.65×10 ⁻³		0.65		
BLC03	137.55	6.45×10 ⁻³		0.55		
BLC04	119.01	6.60×10 ⁻³		0.56		
BLC05	101.45	6.60×10 ⁻³		31	0.16	
BLC06	85.04	5.50×10 ⁻³				0.47
BLC07	70.60	4.50×10 ⁻³				0.38
BLC08	58.68	3.60×10 ⁻³				0.27

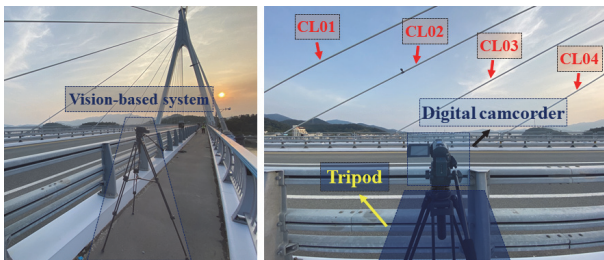
대상 케이블의 스트랜드 수는 49, 55, 61이며 케이블의 직경은 0.16m, 0.2m이다. 선택된 케이블의 세부사항은 Table 1과 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 케이블의 개별 아연도금한 스트랜드는 고밀도 HDPE(High Density Polyethylene) 덕트로 코팅되어 있다.

4.3 케이블의 장력 측정

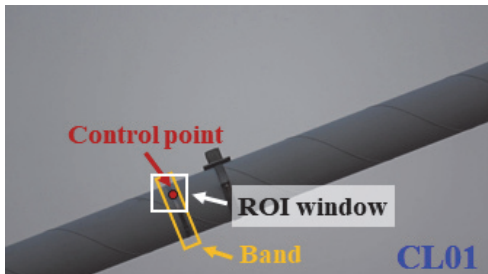
이 연구에서는 케이블 장력 측정에 가장 많이 활용되는 간접법 중 하나인 진동법을 이용하여 공용 중인 상시진동상태에서 케이블 장력을 측정하였다. Fig. 4(a)는 공용 중에 케이블의 변위 응답을 측정하기 위하여 설치된 영상기반시스템을 나타내었다. 영상기반시스템은 휴대성과 설치의 간편성을 위하여 디지털 캠코더(SONY HDR-CX130)와 삼각대(ACEBIL I-705DX)를 선택하였으며, 디지털 캠코더의 광학 줌, 영상촬영, 저장 기능을 활용하였다.

Table 2 Resolution of unit pixels for selected cables

Cable	Unit pixel resolution (mm/pixel)
CL01	0.89
CL02	0.87
CL03	0.85
CL04	0.88
CL05	0.88
CL06	0.93
CL07	0.89
CL08	0.87



(a) Installed vision-based system

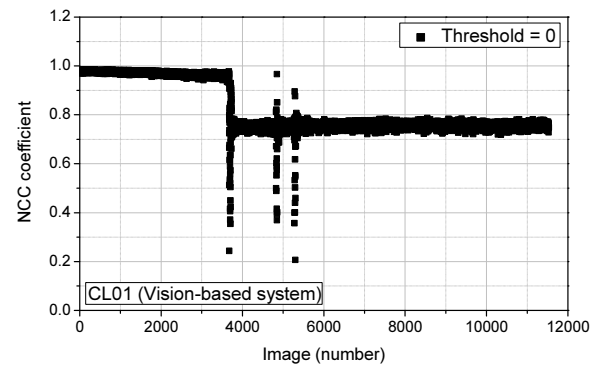


(b) CL01 cable image

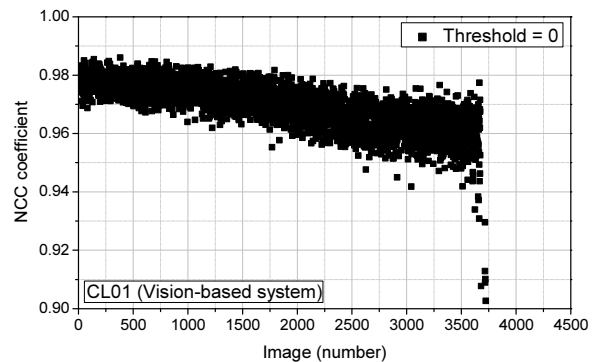
Fig. 4 Vision-based system installed in service

영, 저장 기능을 활용하였다. 디지털 캠코더는 1920×1080의 영상을 초당 60프레임으로 획득하였으며 160초 이상을 확보할 수 있도록 하였다. 모든 이미지는 컬러 정보를 가지고 있으며 명암도 이미지로 변환하여 이미지 해석을 수행하였다. 케이블의 변위 응답을 측정하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 케이블에 설치된 밴드를 기준점으로 지정하였으며 케이블에는 임의의 타겟을 설치하지 않았다. 케이블은 디지털 이미지 상관법에서 NCC(Normalized Cross Correlation)를 이용하여 변위 응답을 측정하였다(Kim et al., 2013). 디지털 이미지 상관법은 측정하고자 하는 구조물의 외력에 의한 변화에 대해 변형 전과 변형 후인 이미지 사이의 상관관계를 비교하여 기준점들에 대한 변형을 찾는 방법이다. 원도대교는 상시진동상태에서 케이블의 변위가 작다. 따라서 이미지에서 분리한 사각형 형태의 작은 이미지인 ROI(Region Of Interest) 윈도우를 추출하여 시간에 따라 변화하는 ROI 윈도우를 비교하여 케이블의 변위 응답을 측정하였다. 이미지 해석을 이용하여 측정된 변위 응답은 픽셀 단위이므로 실제 거리로 환산하여야 한다. 케이블의 직경과 케이블의 직경이 차지하는 픽셀의 거리를 이용하여 실제 거리로 환산할 수 있으며 각각의 케이블의 단위 픽셀에 대한 해상도는 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5(a)는 CL01 케이블에서 디지털 이미지 상관법을 이용하여 산정된 NCC 계수를 나타내었다. 차량이 포함된 이미지



(a) Calculated NCC coefficient



(b) 0 ~ 4500 image section

Fig. 5 NCC coefficient calculated on CL01 cable

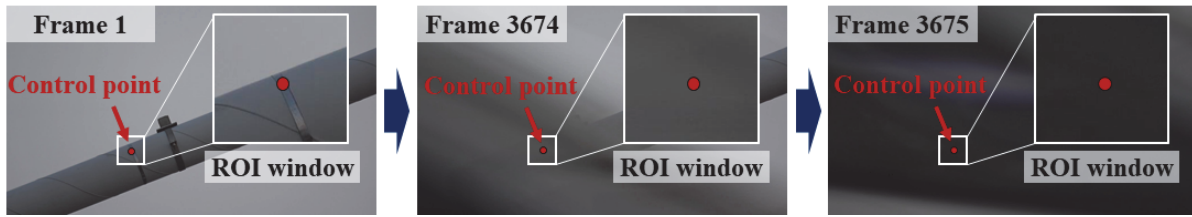
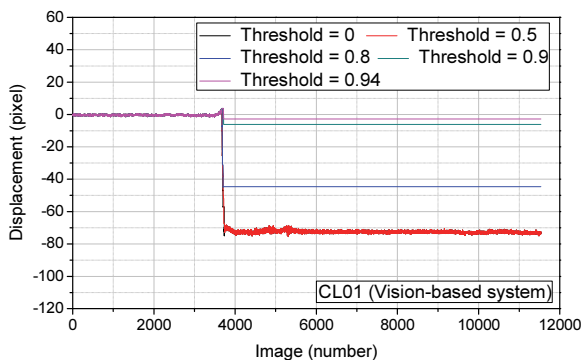


Fig. 6 Original image and image with vehicle

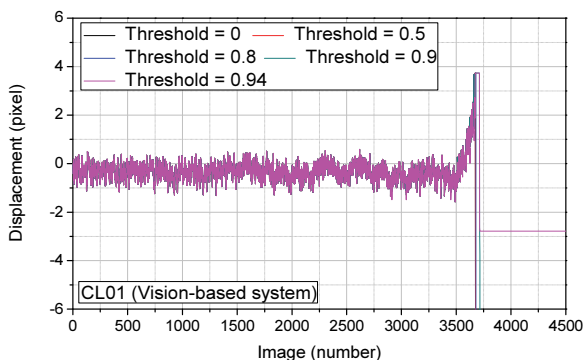
인 왜곡된 이미지의 영향을 확인하기 위하여 NCC 계수의 허용 한계는 0으로 설정하였다. Fig. 5(b)는 0~4500 이미지 구간을 나타내었다. NCC 계수는 -1에서부터 1까지 분포하며 최댓값을 나타내는 좌표가 참조 윈도우가 변형된 윈도우의 상관관계가 가장 높은 지점이다. 1은 완전히 일치함을 나타내며, -1일 경우는 모양은 동일하나 위상이 역전된 경우, 0은 완전히 상관관계가 없음을 의미한다. 산정된 NCC 계수가 허용 한계보다 작으면 그 이미지에서의 변형은 그전 이미지와 같은 변형을 산정하며 다음 이미지로 해석을 수행하게 설정하였다. Fig. 6에서 3674번째 이미지부터 차량이 포함되어 왜곡된 이미지임을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 5(b)에서 차량이 포함된 이미지부터 NCC 계수가 0.94 이하로 감소함을 확인할 수 있었다.

Fig. 5(b)에서 차량이 포함되지 않은 이미지에서는 NCC의 계수가 0.94 이상임을 확인할 수 있었다. 따라서 NCC의 계수의 허용 한계를 0, 0.5, 0.8, 0.9 및 0.94로 변환하여 이미지 해석을 수행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 기준점은 차량이 지나간 이후 참조 이미지에서 지정한 기준점의 위치가 아닌 밴드의 다른 지점으로 이동하였으며 왜곡된 변위 응답이 나타났다. 변위를 측정하고자 하는 기준점이 다른 위치로 이동하였으므로 Fig. 5(a)에서 NCC 계수는 0.8 이하로 나타났다. NCC 계수의 허용 한계가 0.5 이하에서의 변위 응답은 밴드의 다른 지점에서 응답이므로 NCC 계수가 낮게 산정되었다. 따라서 왜곡된 이미지를 고려하기 위해서는 허용 한계가 아닌 다른 방법이 필요한 것으로 나타났다.

획득된 이미지에서 변위 응답을 측정하고자 하는 구조물을 제외한 다른 구조물이 포함되면 이미지 해석에서 왜곡된 변위 응답이 나타남을 확인할 수 있었다. 이 연구에서는 획득된 이미지에서 차량이 포함된 이미지는 SSI를 이용하여 검출하였다. Fig. 8은 공용 중인 완도대교에서 참조 이미지에서 추출

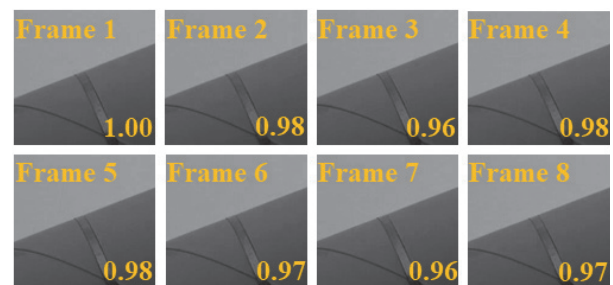


(a) Displacement response

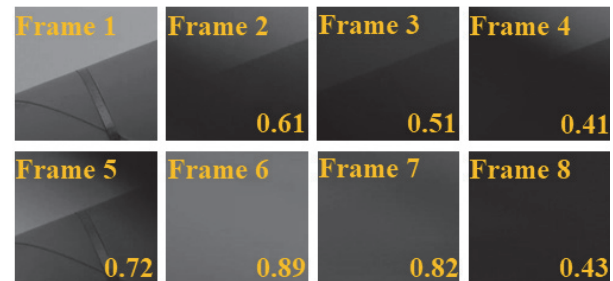


(b) 0 ~ 4500 image section

Fig. 7 Displacement response according to threshold of NCC coefficient



(a) SSI calculation of cable that changes with time



(b) SSI calculation of cable whose images contain vehicles

Fig. 8 SSI calculation of CL01 cable

Table 3 Natural frequencies and tension values measured on CL01 cable before and after correction

Correction	Frequency (Hz)						Measured tension (kN)	Difference (%)
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th		
Before	0.68	1.35	2.02	2.70	3.37	4.06	3336.76	1.03
After	0.68	1.35	2.03	2.70	3.37	4.05	3371.50	

된 ROI 윈도우 기준으로 시간에 따라 변화하는 이미지, 차량이 포함된 이미지에서 산정된 SSI를 나타내었다. SSI는 0에서 1 사이로 분포하며 1과 가까울수록 원본 이미지와 유사함을 의미한다. 따라서 Fig. 8(a)의 프레임인 참조 이미지와 참조 이미지에 대해 SSI를 산정하면 1이 나타남을 확인할 수 있었다. Fig. 8(a)에서 상시진동으로 인한 케이블의 변위는 작으므로 차량이 포함되지 않고 시간에 따라 변화하는 이미지에서는 SSI가 0.96 이상으로 산정됨을 확인할 수 있었다. Fig. 8(b)와 같이 차량이 전체적으로 포함된 이미지에서는 원 이미지에 대한 명암도의 유사도에 따라 SSI 0.43에서 0.89 사이로 산정되었다. 차량이 조금 포함된 이미지에서는 0.41에서 0.61 사이의 SSI가 산정되었다. 따라서 이 연구에서는 이미지 해석에서 왜곡된 결과로 나타날 수 있는 차량이 포함된 이미지에 대한 SSI의 허용 한계를 0.95로 설정하였다. 따라서 SSI가 0.95 이하로 산정된 이미지는 제거하고 다음 이미지로 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 측정된 변위 응답에 대한 주파수 영역에서의 왜곡된 응답을 확인하기 위하여 SSI의 적용 여부에 대한 변위 응답과 변위 응답에 대한 PSD(Power Spectral Density) 함수를 나타내었다. Fig. 7에서 디지털 이미지 상관법을 이용하여 측정된 변위응답은 NCC 계수의 허용 한계를 변화하여도 왜곡된 응답이 나타남을 확인할 수 있었다. 따라서 Fig. 9(a)의 변위 응답은 SSI 계수가 0.95 이하이면 그 직전의 변위와 같게 산정하도록 설정하였으며, Fig. 9(b)는 SSI 계수가 0.95 이하의 이미지를 제거한 변위 응답이다. Table 3에서 SSI 적용으로 측정된 진동 모드에 대한 고유진동수는 유사하게 나타났으며, 진동법을 이용하여 측정된 장력은 약 1%의 차이가 나타났다. 일반적으로 케이블 교량에 설치된 영상기반시스템의 FOV에 영향을 미치는 차량은 대형차량인 버스, 덤프트럭 및 특장차이다. Fig. 9의 CL01 케이블에서는 획득된 이미지가 총 11,532개 이미지이며 왜곡된 이미지는 109개 이미지이므로 약 1% 이내의 왜곡된 이미지가 포함되었다. 따라서 Table 3에서

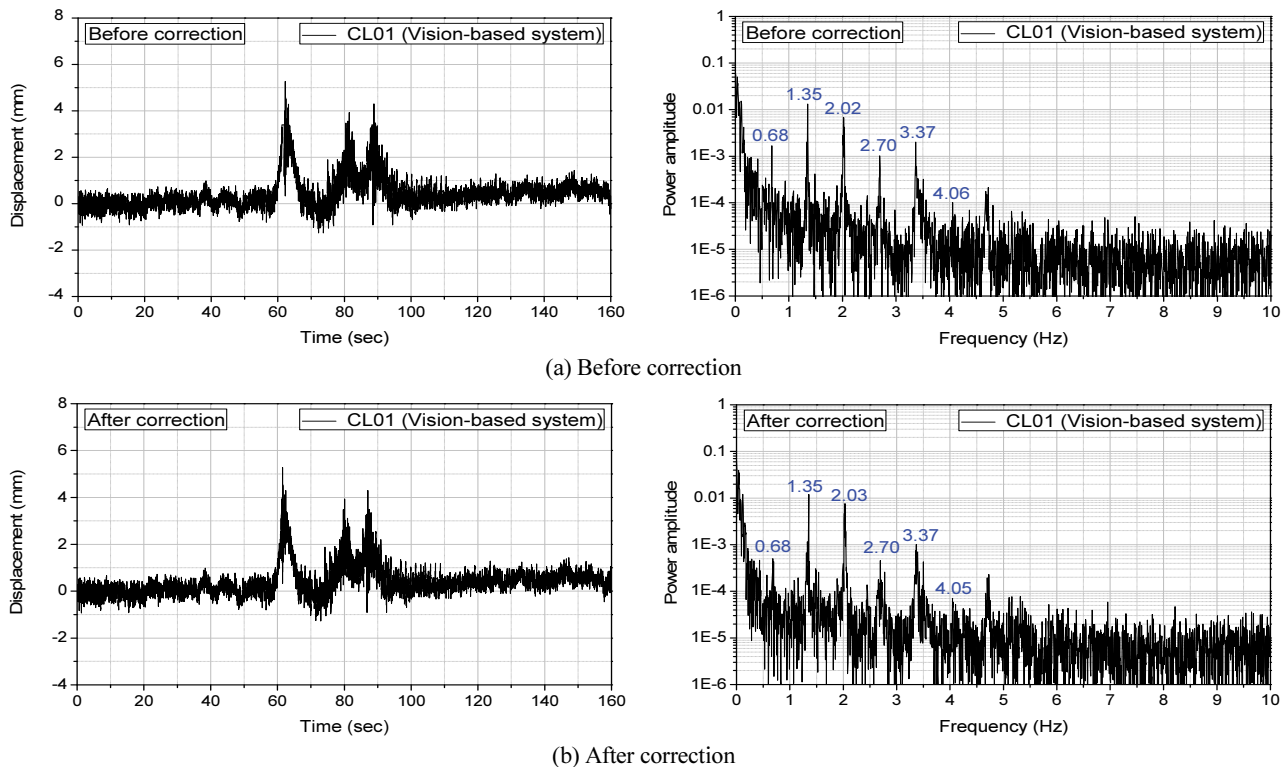


Fig. 9 Displacement response and NCC coefficient of CL01 cable

SSI 적용으로 왜곡된 이미지의 제거에 따른 진동 모드에 대한 고유진동수와 장력은 유사하게 측정됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 공용 중에 상시진동상태에서 CL04, CL06 및 CL08 케이블들에 대하여 영상기반시스템을 이용하여 측정된 변위 응답과 측정된 변위 응답에 대한 PSD 함수를 나타내었다. Fig. 10에서 상시진동으로 인한 케이블에서 측정된 변위 응답의 범위는 약 5mm 이내로 나타났다. Fig. 10에서 측정된 변위 응답과 측정된 변위 응답의 PSD 함수에서 왜곡된 응답이 없음을 확인할 수 있었다. 이는 이미지 해석에서 왜곡된 결과를 나타낼 수 있는 차량이 포함된 이미지가 잘 제거됨을 확인할 수 있었다.

완도대교 케이블의 장력 점검에서 측정된 CL06 및 CL08 케이블의 가속도 응답에 대한 PSD 함수를 Fig. 11에 나타내었다. 가속도 응답은 2019년 10월 18일, 영상기반시스템은 2020년 5월 26일에 측정하였으며 약 6개월의 차이가 있다. 영상기반시스템을 이용하여 공용 중에 진동법으로 측정된 케이블 장력은 가장 최근에 업데이트된 데이터로 간주할 수 있다. Table 4는 완도대교 케이블의 장력 점검에서 측정된 가속도 응답과 영상기반시스템을 이용하여 측정된 변위 응답에 대한 진동 모드에 대한 고유진동수와 장력을 나타내었다. 영상기반시스템을 이용하여 상시진동상태에서 측정된 케이블의 진동 모드에 대한 고유진동수는 4-6차까지 측정되었다. Table 4

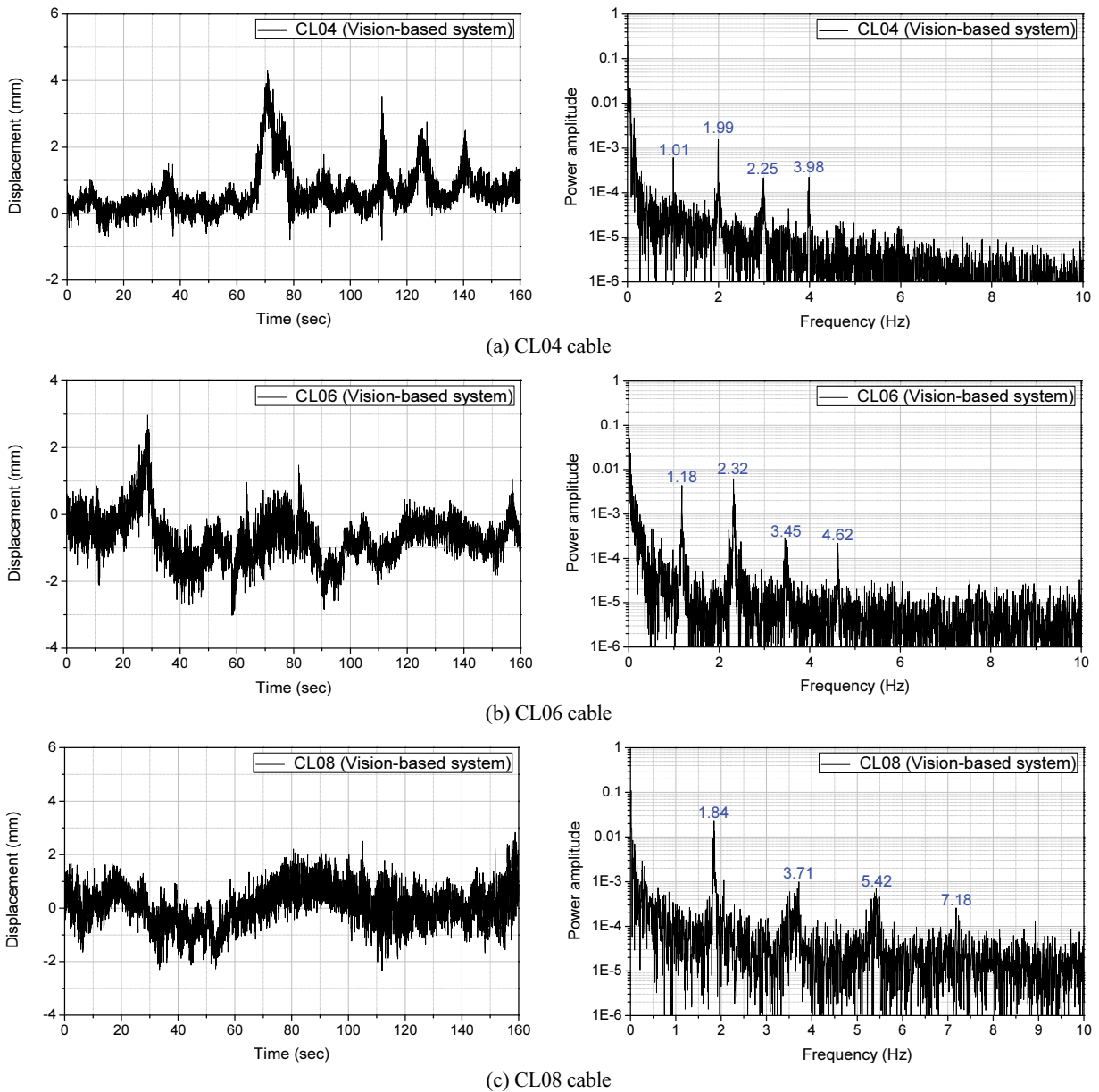
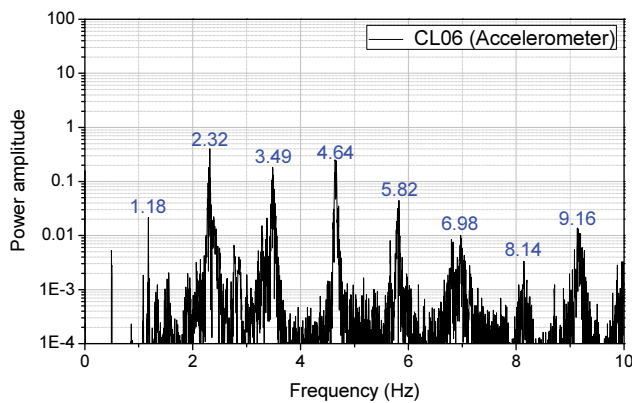


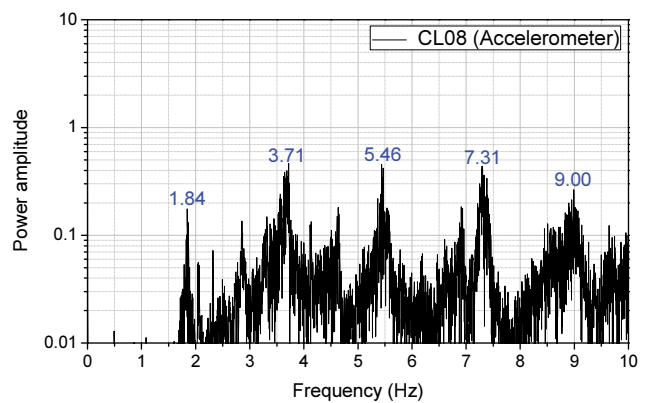
Fig. 10 Displacement response of cables in service and PSD function for the displacement response

Table 4 Natural frequencies measured at each cable and tension values calculated using the vibration method

Cable	Sensor	Frequency (Hz)						Measured tension (kN)	Difference (%)
		1st	2nd	3rd	4th	5th	6th		
CL01	Vision-based system	0.68	1.35	2.03	2.70	3.37	4.05	3355.98	0.29
	Accelerometer	0.68	1.35	2.03	2.71	3.37	4.04	3365.61	
CL02	Vision-based system	0.76	1.48	2.25	2.99	3.75	-	3554.51	1.45
	Accelerometer	-	1.49	2.25	2.99	3.75	4.49	3606.76	
CL03	Vision-based system	0.93	1.85	2.78	3.70	-	-	3601.33	2.12
	Accelerometer	0.93	1.84	2.77	3.70	4.63	5.49	3526.64	
CL04	Vision-based system	1.01	1.99	2.99	3.98	-	-	3219.22	0.41
	Accelerometer	1.00	1.99	2.99	3.97	4.96	5.96	3206.04	
CL05	Vision-based system	1.05	2.12	3.15	4.21	-	-	2638.94	0.19
	Accelerometer	1.09	2.10	3.16	4.21	5.30	6.31	2634.02	
CL06	Vision-based system	1.18	2.32	3.45	4.62	-	-	1891.10	1.08
	Accelerometer	1.18	2.32	3.49	4.64	5.82	6.98	1870.87	
CL07	Vision-based system	1.47	2.94	4.39	5.83	-	-	1685.74	0.70
	Accelerometer	1.48	2.94	4.39	5.85	7.30	8.73	1673.97	
CL08	Vision-based system	1.84	3.71	5.42	7.18	-	-	1309.10	2.09
	Accelerometer	1.84	3.71	5.46	7.31	9.00	-	1282.30	



(a) CL06 cable



(b) CL08 cable

Fig. 11 PSD function for measured acceleration response on CL06 and CL08 cables

에서 가속도 응답과 영상기반시스템을 이용하여 측정된 진동 모드에 대한 고유진동수는 유사하게 나타났으며 장력은 3% 이내의 정확도를 확인할 수 있었다.

5. 결론

이 연구에서는 원거리에 위치한 케이블의 장력을 측정하는 경우에 적합한 방법으로 디지털 캠코더를 기반으로 하는 영상기반시스템을 이용한 비접촉식 방법을 제안하였다. 공용 중에 영상기반시스템의 설치 위치 때문에 발생할 수 있는 차량이 포함된 이미지를 검출하여 이미지 해석의 성능을 향상하였다.

완도대교의 케이블에서 측정된 변위 응답과 측정된 변위 응답의 PSD 함수에서 왜곡된 응답이 나타나지 않았다. 따라서 SSI의 적용으로 이미지 해석에서 왜곡된 결과를 나타낼 수 있는 차량이 포함된 이미지가 잘 검출됨을 확인할 수 있었다. 공용 중에 가속도 센서 및 영상계측시스템을 이용하여 측정된 장력은 3% 이내의 차이로 이미지 처리 데이터의 타당함을 확인할 수 있었다.

영상기반시스템을 이용한 진동법은 경제성과 효율성을 고려하면 활용도가 높은 것으로 나타났다. 기존의 가속도 센서와 데이터 획득 시스템을 이용하는 시간 소모적인 방법과 비교하여 비접촉식인 영상기반시스템은 센서를 설치하기 위해

케이블에 물리적으로 접근할 필요가 없다. 사장교는 일부의 케이블에만 장력을 상시 모니터링을 위한 가속도 센서가 설치된 점을 고려할 때 이 연구에서 제시된 방법을 이용하면 도로교통에 방해가 되지 않고 안전하게 케이블 장력에 대하여 주기적인 측정이 가능한 것으로 나타났다.

이 연구에 관한 추후 연구로서 케이블의 각각의 진동 모드에 대한 고유진동수가 4-6차까지 측정되었다. 따라서 4-6차 진동 모드의 고유진동수를 진동법을 적용하여 추정된 장력은 고차의 진동 모드를 이용하여 추정된 장력과 차이가 날 수 있다. 따라서 이미지를 획득하면서 발생하는 이미지의 열화, 측정 조건에 따른 광학의 변화, 단위 픽셀 이하에서의 정확도, 영상기반시스템의 설치 장소의 진동 등에 대한 변위 응답의 해상도 향상을 위한 추가적인 연구들이 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, *Journal of the International Measurement Confederation*, 168, 108343.
- Bao, Y., Shi, Z., Beck, J. L., Li, H., and Hou, T. Y. (2017), Identification of time-varying cable tension forces based on adaptive sparse time-frequency analysis of cable vibrations, *Structural Control and Health Monitoring*, 24(3), e1889.
- Nazarian, E., Ansari, F., and Azari, H. (2016), Recursive optimization method for monitoring of tension loss in cables of cable-stayed bridges, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 27(15), 2091-2101.
- Au, F. T. K., and Si, X. T. (2012), Time-dependent effects on dynamic properties of cable-stayed bridges, *Structural Engineering and Mechanics*, 41(1), 139-155.
- Jiang, C., Wu, C., Cai, C. S., Jiang, X., and Xiong, W. (2020), Corrosion fatigue analysis of stay cables under combined loads of random traffic and wind, *Engineering Structures*, 206, 110153.
- Ma, Y., Peng, A., Wang, L., Dai, L., and Zhang, J. (2021) Structural performance degradation of cable-stayed bridges subjected to cable damage: Model test and theoretical prediction, *Structure and Infrastructure Engineering*, 1-17.
- 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.
- Kim, J. T., Hguyen, K. D., and Huyuh, T. C. (2013), Wireless health monitoring of stay cable using piezoelectric strain response and smart skin technique, *Smart Structures and Systems*, 12(3-4), 381-397.
- Zarba, S. E. H. A. M., Norouzi, M., Allemang, R. J., Hunt, V. J., Helmicki, A., and Venkatesh, C. (2018), Ironton-Russell Bridge: Application of vibration-based cable tension estimation. *Journal of Structural Engineering*, 144(6), 04018066.
- Fang, Z. and Wang, J. Q. (2012), Practical formula for cable tension estimation by vibration method, *Journal of Bridge Engineering*, 17(1), 161-164.
- Kim, S. W., Kim, N. S. (2013), Dynamic characteristics of suspension bridge hanger cables using digital image processing, *Ndt & E International*, 59, 25-33.
- Kim, S. W., Cheung, J. H., Kim, S. D. (2018), Cable Tension Measurement of Long-span Bridges Using Vision-based System, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(2), 115-123.
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., Simoncelli, E. P. (2004), Image quality assessment: From error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612.

Received : 03/14/2023

Revised : 04/05/2023

Accepted : 04/06/2023

요 지 : 이 연구에서는 진동법을 이용하여 케이블 장력을 추정하고 비접촉 방식으로 케이블의 변위 응답을 측정하기 위한 센서로 영상기반 시스템을 적용하였다. 영상기반시스템에서 카메라는 대상 구조물과 카메라의 시야를 고려한 위치에 설치된다. 그러나 설치하려는 위치의 이미지는 대상 구조물과 차량 등의 다른 구조물이 포함될 수 있어 구조물의 변위 응답 측정에 필요한 기준점을 인식하기 어려울 수 있다. 영상기반시스템의 설치 위치로 인해 차량이 포함된 왜곡된 이미지는 이미지 해석에서 부정확한 결과를 나타내므로 두 이미지 사이의 유사성을 산정하여 차량이 포함된 이미지를 제거하였다. 제안된 방법을 이용한 사장교 케이블의 장력을 측정하는 방법의 타당성을 확인하기 위해 공용 중인 사장교에서 진동법을 적용하여 장력을 측정하였다.

핵심용어 : 사장교, 케이블 장력, 이미지 유사도, 진동법, 영상기반시스템