

사장교 케이블장력 계측장치의 현장적용성 분석

이현철
주식회사 구주엔지니어링

Field Application Analysis of Cable Tension Measuring Device on Cable-Stayed Bridges

Hyun-Chol Lee
Gujuengineering Inc.

요약 본 연구에서는 사장교 케이블에 대한 장력계측장치의 현장적용성에 대한 실험을 수행하였다. 사장교 케이블의 장력을 추정하기 위해서 진동법을 이용하였으며 대상교량에 대해서 케이블의 가진을 통해서 모드특성을 분석하였고 케이블의 장력을 추정하기 위한 계측장치로는 GTDL360, NI Module, 9 Axes Motion Sensor등을 적용하였고 5개의 대상교량에 대해서 상기 계측장치들을 이용하여 케이블의 모드특성을 분석하여 케이블장력측정실험의 적정성을 평가하고 케이블의 장력을 추정하였다. 또한 5개의 대상교량에 대해서 수치해석을 실시하여 케이블의 고유진동수 및 케이블장력을 해석하였다. 현장 계측결과에 의한 케이블의 추정장력과 수치해석에 의한 케이블의 추정장력을 비교하여 현장계측 방법의 적정성을 판단하였으며 분석결과 현장 계측에 의한 케이블의 계측장력과 해석에 의한 추정장력은 오차범위내에 있어서 상기 계측장치들을 현장에 적용하여도 무방할 것으로 판단된다. 현장실증교량의 가속도 기반의 케이블 추정장력과 수치해석에 의한 해석장력과의 값을 비교분석한 결과 값이 허용범위 내로 가속도 기반의 케이블 추정장력값은 적절한 것으로 판단된다. 또한, 현장적용성 분석결과 센서의 설치위치 및 기상조건의 제한 등 계측장치의 한계점이 존재하므로 추후 케이블 스마트 장력계측시스템에 관한 지속적인 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

Abstract In this study, an experiment was carried out on the field applicability of tension measuring devices of the cables in cable-stayed bridges. The vibration method was used to estimate the tension of cables of cable-stayed bridge, and the mode characteristics of the cable were analyzed using a cable tension measuring device. GTDL360, NI Module, and 9 Axes Motion Sensor were applied to estimate the cable tension of five target bridges. Numerical analysis of the five target bridges was conducted to analyze the natural frequency of the cable and cable tension. The estimated tension of the cable based on field measurements and estimated tension of cable by numerical analysis were compared with the estimated tension of the cable based on field measurements. The analysis showed that the measured tension of the cable based on field measurements was within the margin of error. Therefore, it is safe to apply these measuring devices to the site. As a result of comparing and analyzing the values of the acceleration-based cable estimation tension and numerical analysis of the field demonstration bridge, the acceleration-based cable estimation of tension is deemed appropriate within the allowable range. On-site applicability analysis revealed limitations of the measuring devices, such as the installation location of sensors and weather conditions, so continuous follow-up research on smart cable tension measuring systems is expected.

Keywords : Cable Tension, Field Measurement, Numerical Analysis, Cable-Stayed Bridge, 9Axes Motion Sensor

본 논문은 국토교통과학기술진흥원(20CTAP-C143275-03) 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hyun-Chol Lee(Gujuengineering Inc.)

email: lhc0414@naver.com

Received January 4, 2021

Revised March 4, 2021

Accepted April 2, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

최근 들어 장대교량의 건설에 사장교 등과 같은 케이블이 주 요소인 교량 형식이 급증하고 있다[1]. 이와 같은 구조물에서 케이블이 미치는 영향은 매우 커서 케이블의 모드 특성 및 케이블의 장력이 전체 구조계에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다.

케이블은 보강형에 가해지는 하중을 주탑으로 전달하고 캠버조절에도 영향을 미치는 중요한 부재로서, 가설시 가해지는 초기 장력과 완성계의 장력 및 시간이 지난 후 장력을 비교함으로써 교량의 노후 상태와 이상을 점검할 수 있다[2]. Chlko[3] 등은 모드해석에 사용하는 커브피팅(Curve fitting)을 새로운 Direct Simultaneous Modal Approximation(DSMA) 방법으로 적용하여 고유진동수와 고유벡터의 신뢰성을 높이고자 전체 모드에 비선형 함수를 최소화 하여 모달 매개변수의 신뢰성을 검토하였다.

Cornwell et al[4]과 Elliott et al[5] 등은 실내 모드 해석으로 변수가 많은 장대 구조물을 가상실험 모달해석으로 모드 특성을 비교하여 최적의 센서위치에 의한 신뢰성과 교량의 진동특성을 측정하기 위해서 다수의 연구방법을 제안하고 모드특성을 제시하였다. 그리고 Shwarz[6] 등은 다수의 채널을 이용하여 시간영역의 진동응답을 측정하고자 Z24 고속도로에 2개의 가진실험(Shaker Test), 충격해머실험(Impact Hammer Test)와 상시진동실험(Ambient Vibration Test)을 적용한 FRF와 ODS FRF(Frequency Response Function)을 커브피팅 과정으로 얻은 모드 매개변수와 MAC(Modal Assurance Criterion)을 통해 충격해머실험과 상시진동실험의 일치성을 분석하였다.

케이블 장력 추정 기법으로 사용되는 방법은 보통 직접법과 간접법으로 구분할 수 있다. 직접법은 초기 비용이 들고 유지관리의 문제로 간접법을 주로 사용한다. 간접법은 교량의 케이블에서 진동을 계측하여 역으로 장력을 추정하는 진동법이 있다[7-10].

진동 계측 센서는 가속도계가 주로 사용되고 본 연구에서는 9축모션센서를 적용하여 진동계측을 실시하였다. 여기서 9축모션센서는 가속도, 자이로, 지자기의 9자유도에 대한 측정센서이며, 모듈은 아두이노보드를 통해서 데이터를 수집하고 데이터의 처리는 아두이노 통합개발 환경을 통해서 구현된다.

상기와 같이 기존 연구에서는 장력측정방법으로 영상처리법, 상시모니터링방법 및 스마트센서를 이용한 연

구가 수행되었고[11] 구조물 전체에 대한 모드해석을 수행하여 구조물의 손상을 검색하거나 공진을 유발하는 요인 및 구조물의 경계조건에 대한 연구가 주류를 이루었다. 연구대상 구조물은 케이블교량이 아닌 일반교량이었다.

기존 연구내용으로부터 구조물 전체에서 주요부재에 해당하는 케이블의 모드특성을 상세하게 파악하는 데에는 한계가 있었고 본 연구에서는 케이블교량의 주요부재인 케이블에 대해서 충격 해머를 이용해서 모드특성해석을 위해서 ABSignal ModalVIEW를 적용하여 케이블의 모드특성을 파악하였고 GTDL360, NI Module, 9 Axes Motion Sensor에 의한 케이블 장력계측의 현장적용성을 분석하고 수치해석결과와 비교분석을 통해서 상기 계측장치들의 현장적용성을 연구하였다. 본 연구의 목적은 계측장치의 조합과 계측방법의 현장적용성 검증으로서 3가지 계측장치를 다양한 현장에 적용하여 계측값들의 정밀도를 분석하고 추가적으로 수치해석을 통한 현장값과 이론값과의 차이를 비교하였다.

2. 사장교 케이블 장력계측방법

2.1 사장교 케이블 장력 추정방법

기존의 교량 케이블 유지관리 시스템은 단일 센서인 가속도계를 통해서 케이블의 진동 특성을 파악하여 전체적인 케이블 시스템의 진동특성 및 장력특성을 정확하게 파악하는 데에는 미흡한 점이 있다[12]. 본 연구는 이러한 미비점을 보완하고자 경량이면서 케이블에 설치과정이 간단하며, 설치비용이 저렴한 9축모션센서를 통해 케이블 유지관리를 효율적으로 활용하였다.

또한, 기존의 연구는 이론적인 검증에 치중하였으나 본 연구는 다양한 형식과 여러개의 계측장비에 대해서 현장적용성의 검증에 중점을 두고 연구를 실시하였다.

케이블의 장력계측방법은 다음 Fig. 1과 같다.

케이블이 진동하게 되면 센서를 통해 수집된 가속도 신호를 주파수 영역으로 전개한 후 고유진동수를 결정하고 수학적 모델의 특성방정식인 현이론 방정식을 이용하여 장력을 구한다.

현이론 방정식에 의할 경우 케이블의 강성을 고려한 경우 길이가 비교적 짧고 새그의 영향을 무시할 수 있는 경우에 전 시간에 걸쳐서 케이블의 휨 강성이 일정하다고 가정하는 것이므로 다음 Eq. (1)과 같이 휨 강성을 고려한 미분방정식으로 표시할 수 있다.

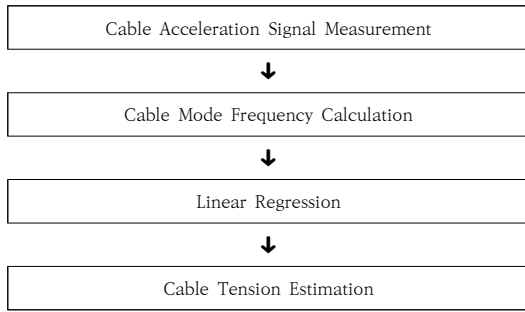


Fig. 1. Cable Tension Estimation Flow Chart

$$\frac{w}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

여기서, EI는 케이블의 휨 강성, y 는 진폭, x 는 길이, t 는 시간, w 는 단위중량, g 는 중력가속도이며 Eq. (1)을 양단 고정 경계조건으로 풀면 Eq. (2)와 같이 n 차 고유진동수를 이용한 장력추정식을 얻을 수 있다.

$$T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 - \frac{EI\pi^2}{L_{eff}^2} n^2 \quad (2)$$

여기서, T 는 장력, L 은 케이블 길이, w 는 단위중량, g 는 중력가속도, f_n 은 n 차 고유진동수이다.

Eq. (2)을 케이블의 진동으로 고유진동수를 실험적으로 획득하는 경우 장력을 추정하기 위하여 다음 Eq. (3)과 같은 1차 회귀식으로 정리한다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = T \cdot \frac{g}{4wL_{eff}^2} + \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4} n^2 = b + a \cdot n^2 \quad (3)$$

따라서 센서에 의해 측정된 케이블의 가속도의 FFT 분석결과를 위의 Eq. (3)과 같이 1차 회귀식으로 나타낸 후, 매개변수 a (기울기)와 b (y 절편)를 구하면 아래의 Eq. (4)에 의해 케이블의 장력과 휨 강성을 산정할 수 있다[8-9].

$$a = \frac{EI\pi^2 g}{4wL_{eff}^4}, EI = \frac{4wL_{eff}^4}{\pi^2 g} a \quad (4)$$

$$b = \frac{Tg}{4wL_{eff}^2}, T = \frac{4wL_{eff}^2}{g} b$$

위의 Eq. (4)와 같이 휨 강성 EI와 장력값 T를 구할 수 있다[13].

3. 사장교 케이블 현장실증실험방법

3.1 사장교 케이블 장력 현장실증실험

사장교 케이블의 장력을 측정하기 위해서 교량의 종류 및 지간장의 크기를 고려하여 5개의 교량을 선정하고 현장답사를 통해서 측정위치 및 측정방법을 계획하였다. 측정위치는 수치해석을 통해 장력이 큰 위치를 선정하였고 측정방법은 대상케이블에 대해서 3가지 장력계측장치를 설치하여 각 계측장치별 현장적용성에 대해서 분석을 실시하였다.

사장교 케이블 장력에 대한 현장실증실험방법은 다음과 같이 실시하였다.

Table 1은 가속도계에 대한 기술적인 사양이며, Fig. 2은 가속도계 및 모듈의 사진을 나타내고 있다. 하드웨어는 NI 9234, PXIe 4464, GTDL360를 사용하였다.

Table 1. Accelerometer Specification

Division	Specifications
Sensitivity(±15%)	1.02 mV/(m/s ²)
Measurement Range	±4900 m/s ² pk
Frequency Range	0.5 to 10000 Hz

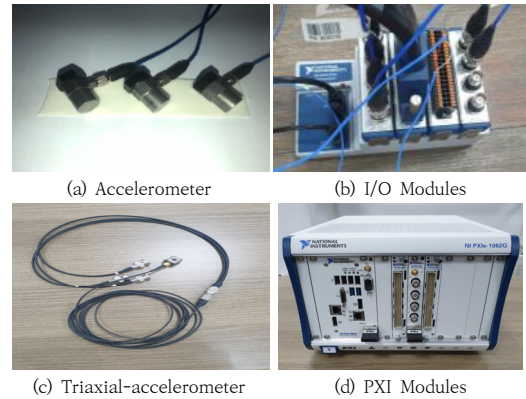


Fig. 2. Data Acquisition System

3.1.1 Arduino Uno etc. Sensors

아두이노 우노는 Atmel 사의 16MHz 마이크로컨트롤러인 ATmega328을 사용하여 다양한 주변 장치를 연결할 수 있다[14]. 본 연구에서는 아두이노 우노는 9축모션센서로부터 수신받은 신호를 디지털신호로 변환하여 모니터상에 출력하는 역할을 한다[14]. Fig. 3은 센서 사진을 나타내고 있다.

9축모션센서는 Bosch 사의 BNO055로 3축 가속도계, 3축 자이로스코프, 3축 지자계센서로 구성되어 있다. 센서는 선형 가속도와 같은 신호를 출력한다[14]. 본 연

구에서 9축 모션센서의 측정값은 케이블의 고유진동수를 산출하는 데 활용된다. Table 2은 9축모션센서의 기술적 사양을 나타낸다.



(a) Arduino Uno (b) 9Axes Motion Sensor

Fig. 3. Arduino etc. Sensors

Table 2. 9Axes Motion Sensor Specification

Division	Specifications
Chip based	BOSCH Sensortech BNO055
Thinker Kit interface	2 × TWI, 2 × OUT, 2 × IN
Motion Sensors	3-axial accelerometer, 3-axial gyroscope, 3-axial geomagnetic
Fusion Engine	32-bit microcontroller with BSX3.0 FusionLib
Operating Voltage	5 / 3.3 V

3.1.2 Data Logger etc. Sensors

Data Logger는 노트북과 연결하여 데이터를 측정하고 저장하며, 그래프를 나타내는 PC연결형 스트레인 측정기이다. Table 3은 Data Logger에 대한 기술적 사양, Fig. 4은 데이터로거, 가속도계를 나타내고 있다. Table 4은 1축 가속도계에 대한 기술적 사양을 나타낸다.

Table 3. Data Logger Specification

Division	Specifications
Number of Channel	4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40 Channel
Measure Hz	1000 Hz
Connector for sensor	5p Screw connector or TAJIMI
Input Sensor	- 1Gage & 2Gage : 120Ω, 350Ω - 4Gage Bridge Sensor : 0.5 mV/V ~ 100 mV/V - Protectionmeter Sensor - Pt100, thermocouple(J~S) - Voltage : 10V
Strain Input Range	10000, 100000, 1000000*10 ⁻⁶ strain
Low Pass Filter	10Hz, 100Hz, 1KHz, Pass Program Selectable
Interface	USB
Program	Multiscan S/W & Multiload S/W
Demension	470(W)*190(H)*320(D)mm
Power	AC220V, 50~60Hz



(a) Data Logger (b) Accelerometer

Fig. 4. Data Logger Photograph

Table 4. Accelerometer Specification

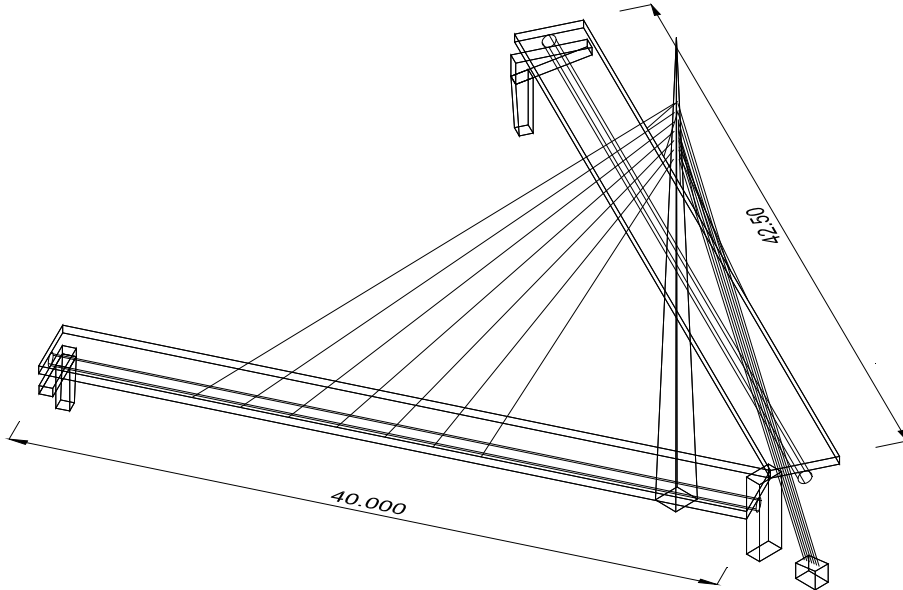
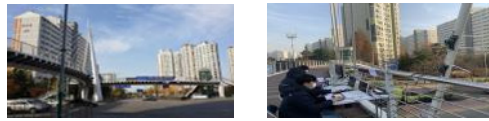
Division	Specifications
Capacity	20 m/s ²
Rated Output	0.5 mV/V(1000*10 ⁻⁶)
Non-linearity	1% RO
Frequency Response (Hz)	80
Natural Frequency (Hz)	150
Permissible Temperature Range	-10 ~ +50 °C
Permissible Overload	300%
Input&Output resistance	120Ω
Recommend Impressed Voltage	2V less than
Allowable Impressed Voltage	5V
Connection Cable	Φ3mm 0.05mm2 4-core shielded Chloroprene Cable 5m
Mass	13g

본 실험은 Impact Hammer를 이용하여 측정하는 진동실험으로 수행되었다. 사장교 케이블에 다양한 센서들을 부착하고 충격해머를 이용하여 가진하면서 실험을 수행하였다.

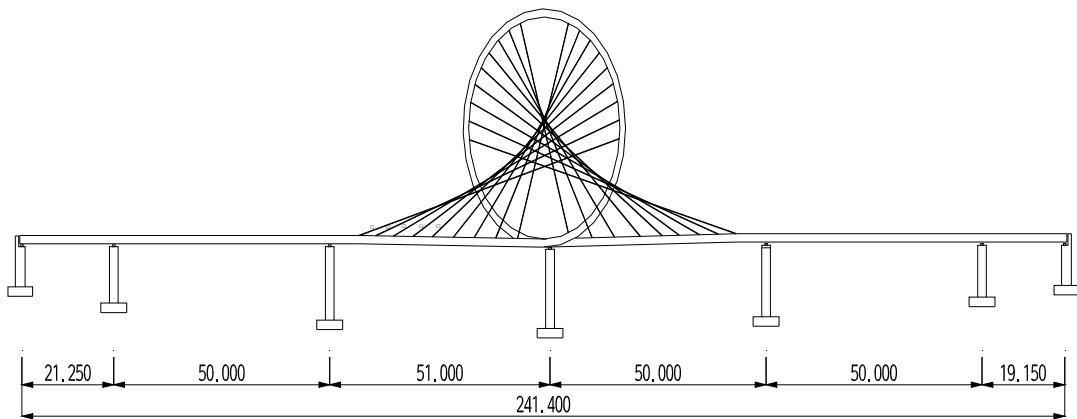
실험으로부터 얻어진 모드특성 결과데이터를 ModalVIEW R2를 통하여 분석을 실시하였다[15]. 데이터 수집은 NI 9234 하드웨어를 적용하였다. FRF(Frequency Response Function) 결과로부터 Mode Stabilization Chart를 산정하여 모드평가를 실시하였다. 고유진동수는 Peak Picking Method을 사용하여 구하고 감쇠비는 3dB Method를 이용하였으며 다음 Eq. (5)과 같다.

$$Damping\ ratio(\%) = \frac{f_0}{f_1 - f_2} \quad (5)$$

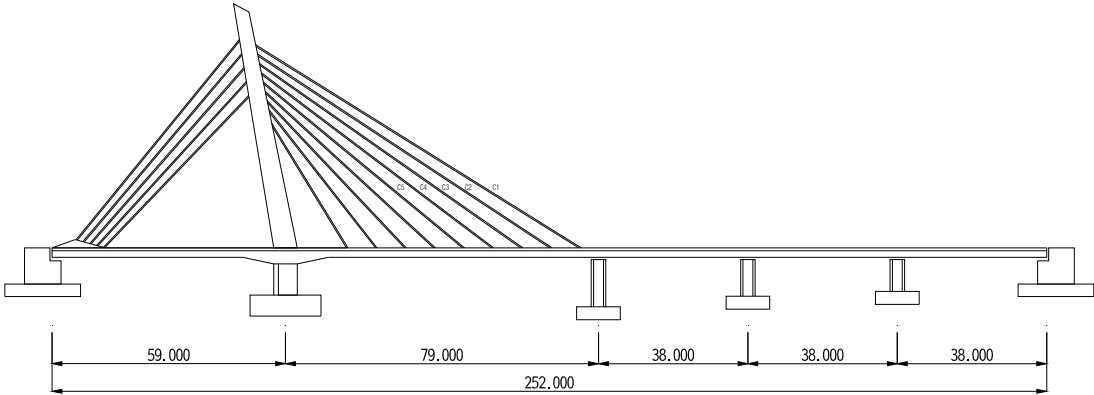
여기서 f_0 는 공진주파수이며, f_1 는 공진주파수보다 낮은 주파수로서 3dB 작은 주파수, f_2 는 공진주파수보다 높은 주파수로서 3dB 작은 주파수이다.



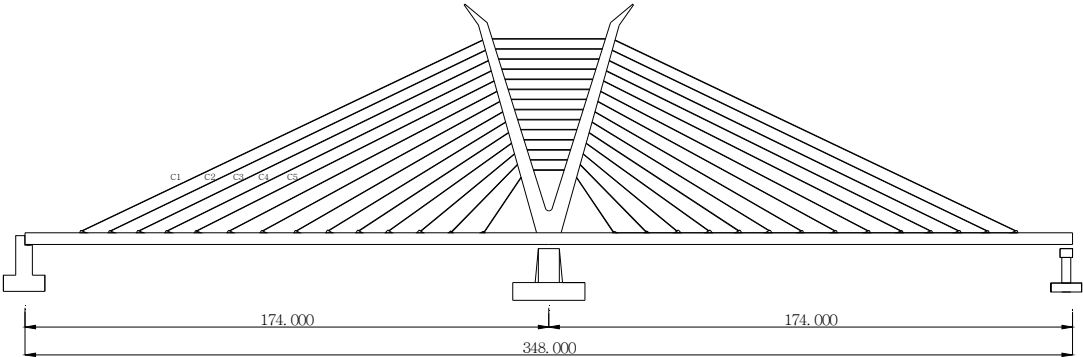
(a) A Birdge Longitudinal Section & Panorama



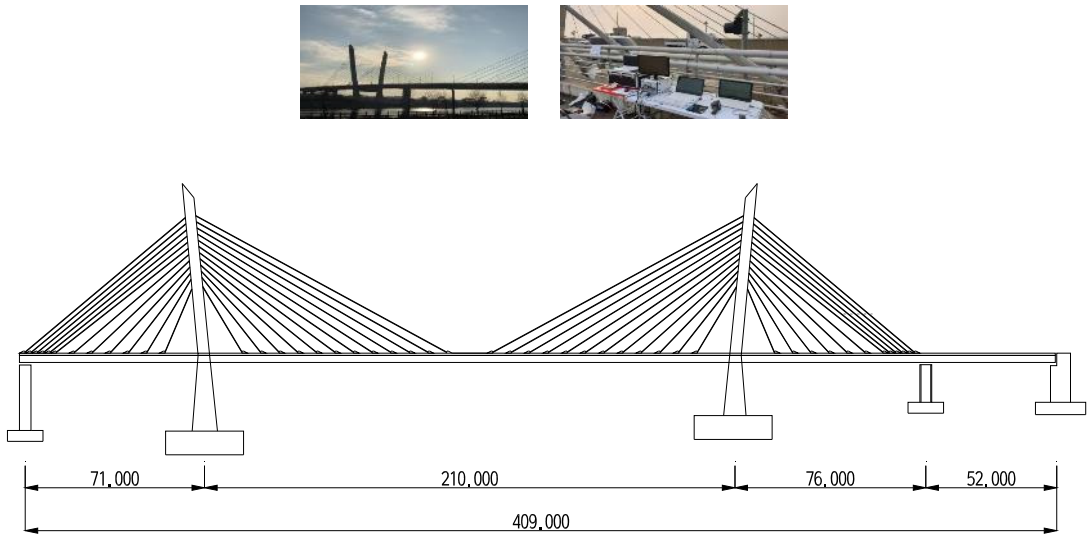
(b) B Birdge Longitudinal Section & Panorama



(c) C Birdge Longitudinal Section & Panorama



(d) D Birdge Longitudinal Section & Panorama



(e) E Birdge Longitudinal Section & Panorama

Fig. 5. A~E Bridge Longitudinal Section and Panorama

3.1.3 케이블의 주파수응답함수(FRF) 결과

Fig. 5은 실험 case별 모드평가를 실시한 교량의 현황을 나타내었다. FRF는 다음 Eq. (6)와 같이 전달함수는 힘(X_n)의 라플라스 변환으로부터 출력(Y_n)의 라플라스 변환의 관계로 나타내었다.

$$\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 Y_i 는 자유도 i 에서 응답신호스펙트럼이다. X_j 는 자유도 j 에서 가진신호스펙트럼이다. H_{ij} 는 자유도 i 와 j 사이에 FRF이다.

현장실증시험에 적용한 교량의 명칭과 교량형식은 다음 Table 5와 같다.

Table 5. Brige Name and Type

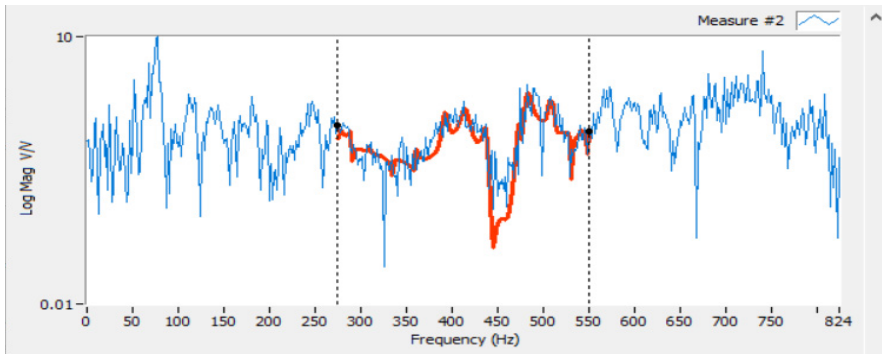
Division	Name	Type
A	Nonhyeontaekji2yukgyo	Foot Bridge
B	Songdogukjegyo	Foot Bridge
C	Ateucentergyo	Driveway Bridge
D	Baiosaneopgyo	Driveway Bridge
E	Baekseokdaegyo	Driveway Bridge

Table 6에서 나타난 FRF 결과는 케이블의 무게와 길이에 따라 케이블에 작용하는 고유진동수와 감쇠비의 변화는 미소한 것으로 나타났다. 고유진동수에 대해서 초기 파형에 대해서 중첩분석을 한 결과 A~E교량 전체적으로 고유진동수가 일치하는 것으로 나타나서 측정결과는 적절한 것으로 판단된다.

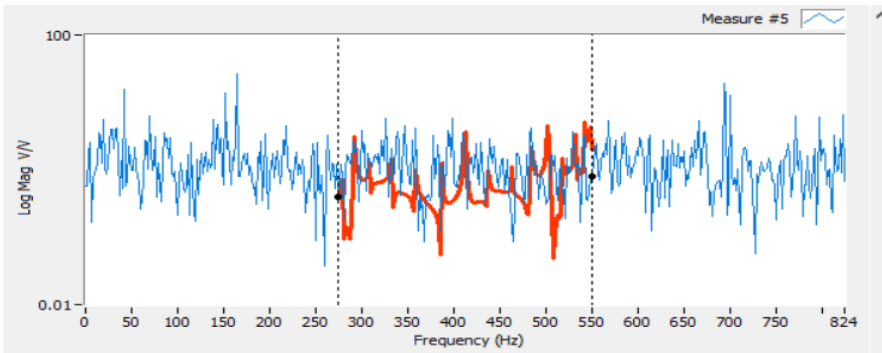
Table 6. Cable FRF Result

Division	Frequency (Hz)	Damping (%)	Cable Length (m)
A Bridge	277.8	0.2549	24.3
B Bridge	279	-0.1528	57.8
C Bridge	285.7	-0.08229	93.9
D Bridge	270.3	0.9896	138.7
E Bridge	249.4	0.6526	76.3

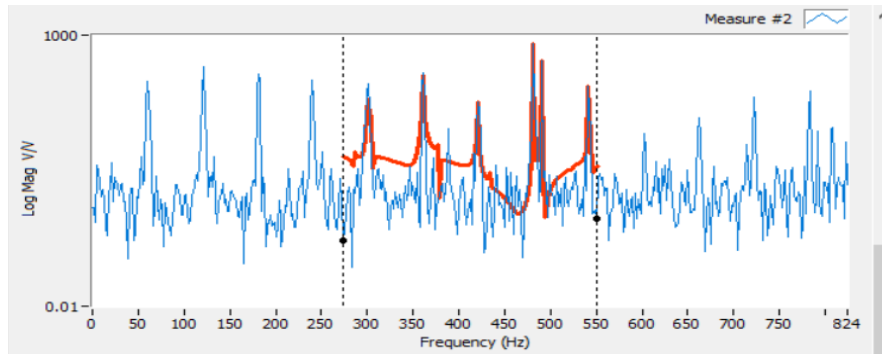
Fig. 6은 A~E 교량에 대한 주파수응답함수에 대한 분석결과를 나타내었으며 중첩분석결과 측정결과는 적절한 것으로 판단된다.



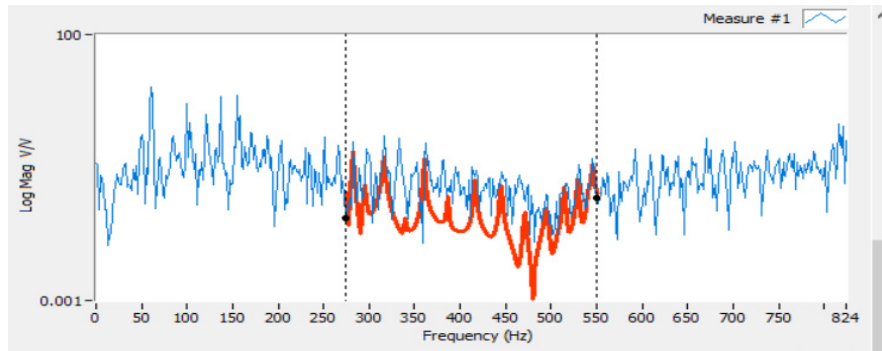
(a) A Birdge FRF



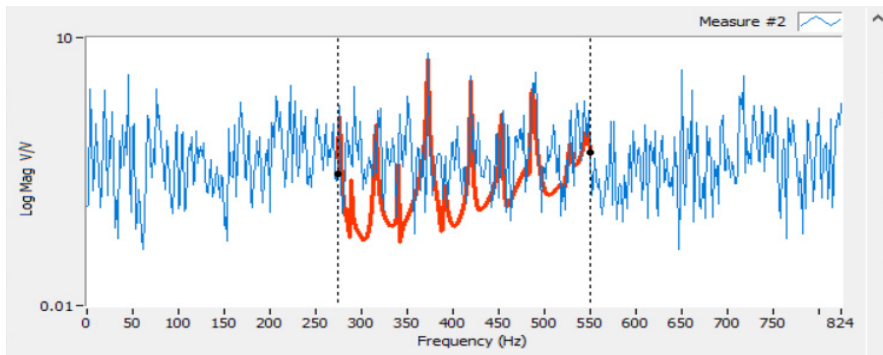
(b) B Birdge FRF



(c) C Birdge FRF



(d) D Birdge FRF



(e) E Birdge FRF

Fig. 6. A~E Bridge FRF

3.1.4 케이블의 모드분석 결과

Table 7에서는 Cable Stabilization Criteria를 나타내었다. Fig. 7에서는 케이블에 대한 Stabilization Chart 결과를 나타내었다.

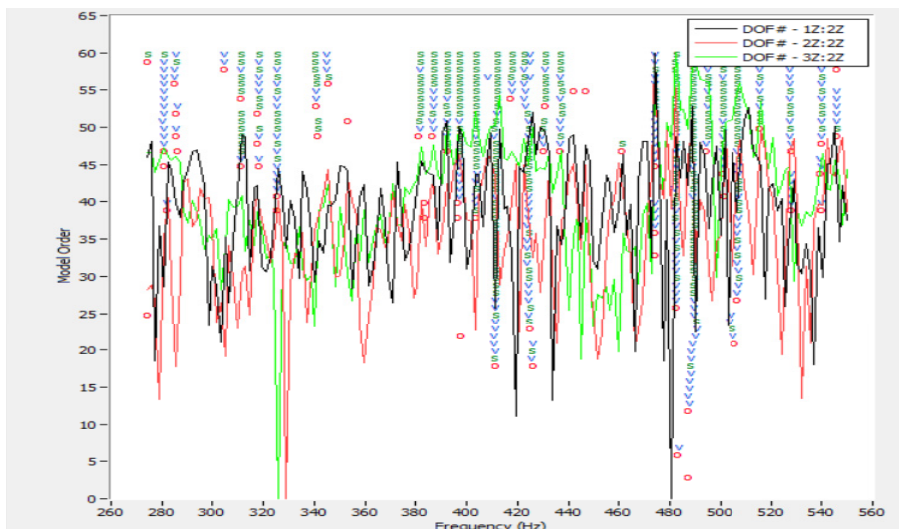
여기에서 Stabilization Criteria는 Frequency stability에 관해서 1%, Damping stability은 5%이며, Mode Shape stability는 2%를 사용하였다[16].

또한, Stabilization Chart는 케이블의 고유진동수와 감쇠비 및 모드형상에 따라 기호를 부여하여 일정 기준치를 충족하는 경우 yes로 표현하였고, 불충족하는 경우 no로 표시한다.

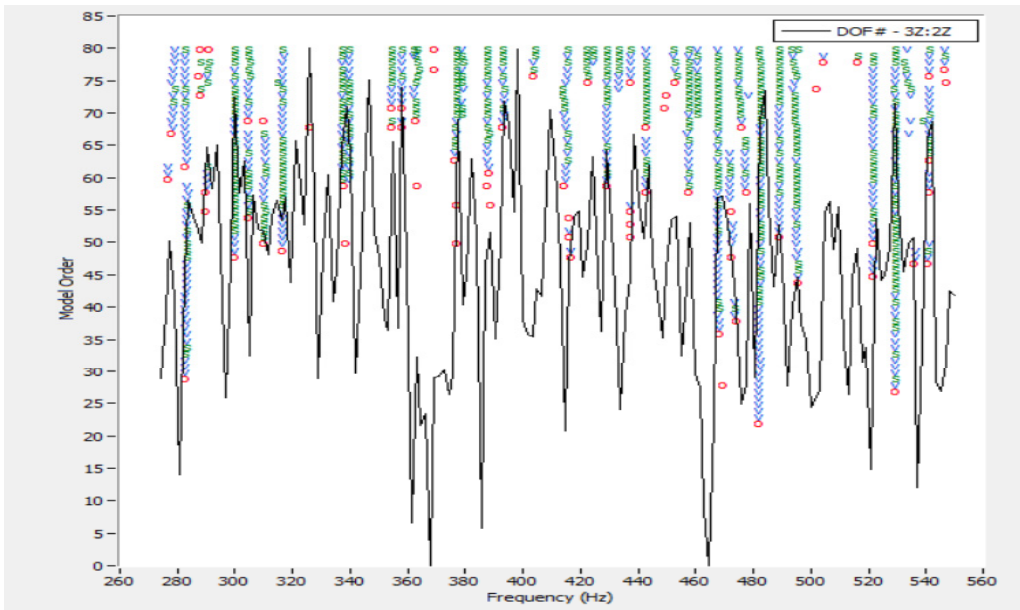
Table 7. Cable Stabilization Criteria

Symbol	Frequency	Damping Ratio	Mode Shape
s	yes	yes	yes
v	yes	no	yes
d	yes	yes	no
f	yes	no	no
o	no	no	no

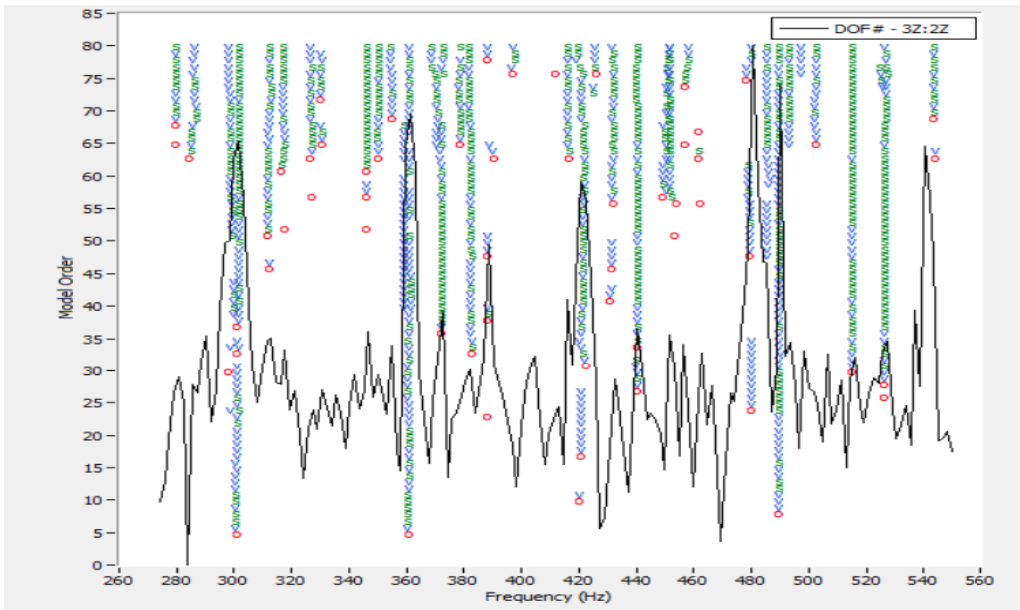
Table 7에서 기호 s, v, d, f, o는 고유진동수, 감쇠비 및 모드형상이 각각의 기준을 만족하는 경우의 수에 따라 구분하여 표시하였다.



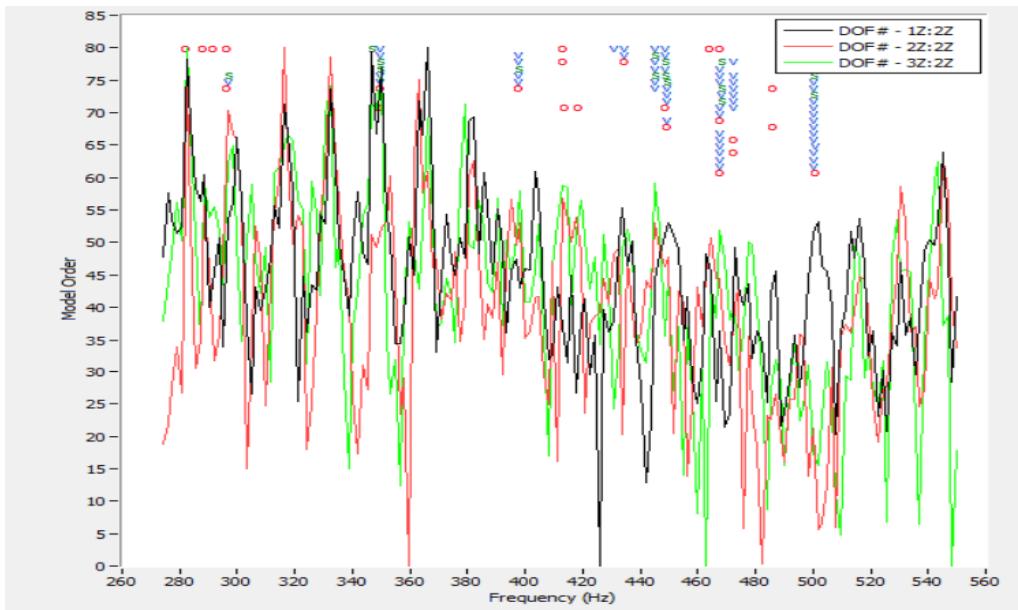
(a) A Bridge Stabilization Chart



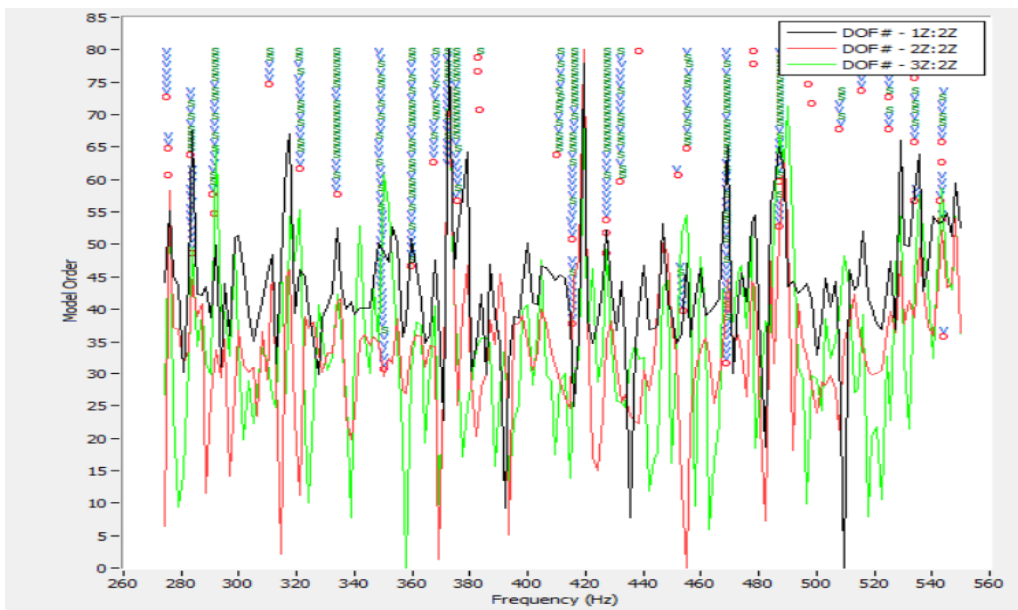
(b) B Bridge Stabilization Chart



(c) C Bridge Stabilization Chart

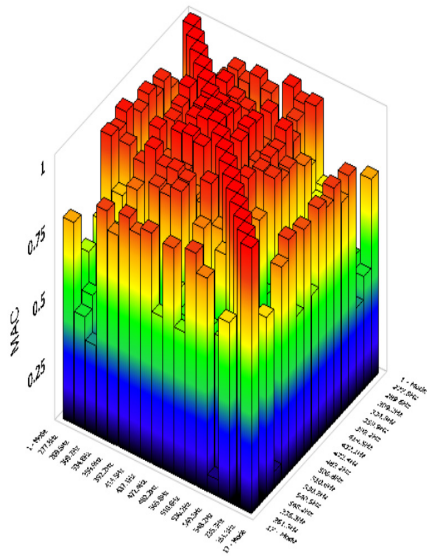


(d) D Bridge Stabilization Chart

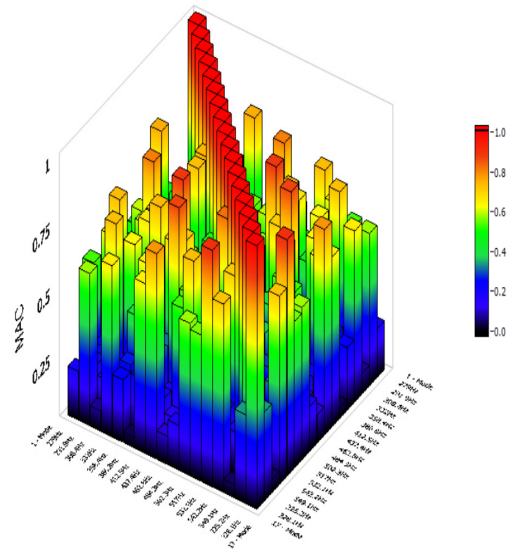


(e) E Bridge Stabilization Chart

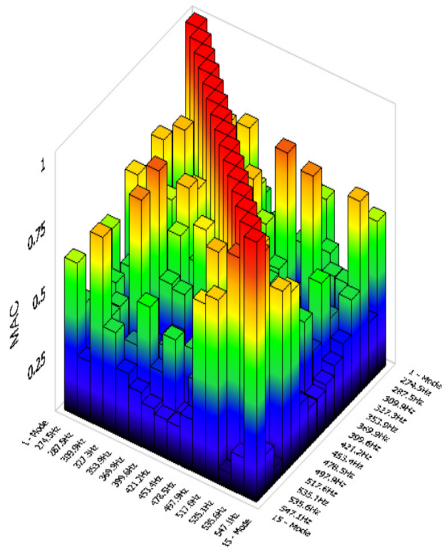
Fig. 7. A~E Bridge Cable Stabilization Chart Result



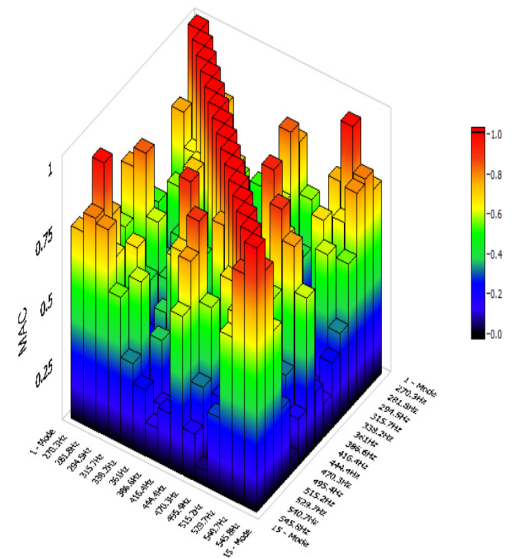
(a) A Bridge MAC



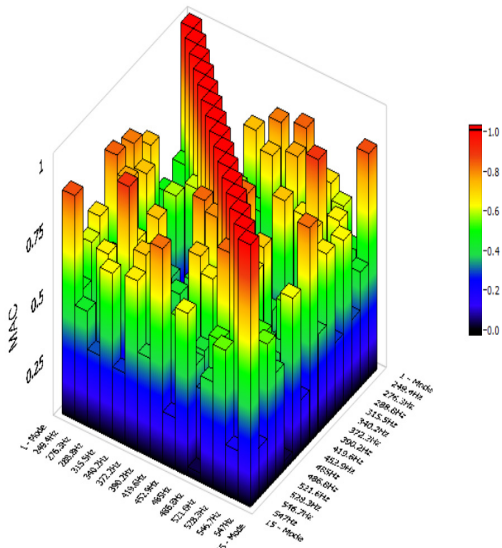
(b) B Bridge MAC



(c) C Bridge MAC



(d) D Bridge MAC



(e) E Bridge MAC

Fig. 8. A~E Bridge MAC

Stabilization Chart에 따른 케이블의 고유진동수와 감쇠비의 관계를 분석한 결과 고유진동수가 높을수록 감쇠비는 낮아지는 양상을 나타내었다. A~E 교량에 대해

서 Stabilization Chart는 케이블의 고유진동수와 감쇠비 및 모드형상의 안정기준인 Table 7을 모두 만족하는 것은 고차모드에서 나타났다.

3.1.5 케이블의 MAC 분석결과

Modal Assurance Criteria(MAC)는 모드간의 직교성을 나타내며 MAC가 0에 가까우면 선형독립적인 관계를 가지며 1에 가까우면 선형비례적인 관계를 갖는다. MAC는 상호 비교되는 서로 다른 두 개의 세트에서 해석 모드간의 상관관계를 비교 분석하는 방법이다[17]. MAC는 다음식 Eq. (7)로 나타내었다.

$$MAC = \frac{|X_i X_j|}{|X_i| |X_j|} \quad (7)$$

여기서, X_i 는 모드형상행렬 $[\varnothing_1, \varnothing_2, \dots, \varnothing_{m_i}]$ 의 열벡터이다. Fig. 8에서 A~E 교량에 대한 교량 MAC 결과를 분석한 결과 모드형상에 대한 MAC는 1.0에 가까운 값을 나타내어 A~E 교량의 모드간의 직교성을 나타내고 있는 것으로 판단된다.

Table 8. Cable Measurement Tension(A Bridge~E Bridge)

Division	Cable Number	Tension(kN)				
		A Bridge	B Bridge	C Bridge	D Bridge	E Bridge
GTDL360	Cable 1	31.267	17.506	1946.065	4770.434	8152.997
	Cable 2	54.297	66.448	3976.063	6765.702	8362.523
	Cable 3	63.963	106.771	5546.620	8158.837	8573.703
	Cable 4	75.198	113.867	6552.311	9544.691	8811.415
	Cable 5	85.669	207.625	6873.544	10834.285	9054.293
NI Module	Cable 1	30.655	6.621	-	-	-
	Cable 2	55.102	-	-	6632.484	8337.568
	Cable 3	-	-	5757.901	-	-
	Cable 4	-	-	-	-	-
	Cable 5	-	-	-	-	-
9-Axes Motion Sensor	Cable 1	31.041	17.257	-	4792.118	-
	Cable 2	54.787	-	3916.942	6705.536	8348.644
	Cable 3	66.122	-	5546.620	-	8581.497
	Cable 4	71.306	-	-	-	-
	Cable 5	-	-	-	-	-

4. 현장실증결과 및 수치해석결과

4.1 사장교 케이블장력 현장실증 실험결과

A~E 교량의 케이블 장력에 대한 현장실증 실험결과는 상기 Table 8과 같다.

Table 8에서 각각의 교량별, 계측방법별 케이블장력을 추정하였으며 각각의 계측방법별 케이블장력의 편차는 A교량인 경우 0.728~1.996%이며 B교량인 경우 1.443%이며, C교량인 경우 1.509~3.669%이며, D교량인 경우 0.452~2.009%이며, E교량인 경우 0.091~0.299%로서 최대편차는 3.669%로서 온도변화에 따른 장력값의 변동폭을 고려할 때 각각의 교량 및 계측방법에 대한 현장실증시험을 한 결과 상기 계측방법들에 대해서 현장에 적용하여도 문제가 없을 것으로 판단된다.

4.2 사장교 케이블 수치해석결과

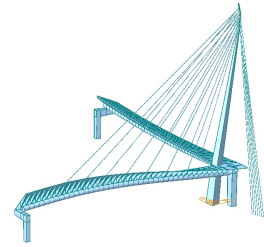
사장교의 케이블 장력에 대한 수치해석결과는 다음과 같이 고유진동수 및 장력에 대해서 나타내었다. 사장교 케이블에 대한 고유진동수 결과는 다음의 Fig. 9 및 Table 9와 같이 나타났었으며 고유진동수는 지배모드인 경우에 대해서 모드형상을 나타냈었다.

Table 9에서 교량의 기하형상에 따라 모드형상이 비틀림모드 및 연직모드가 지배적인 모드로 나타났으며 지배모드에서의 고유진동수는 0.371Hz~1.590Hz로 나타나 공용중인 사장교의 고유진동수 범위와 유사한 것으로 나타났다[18].

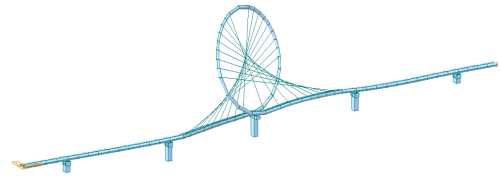
Table 9. Cable Analysis Frequency

Division	Frequency (Hz)	Mode Shape
A Bridge	1.590	Torsion
B Bridge	0.455	Torsion
C Bridge	0.995	Vertical
D Bridge	0.371	Vertical
E Bridge	0.492	Vertical

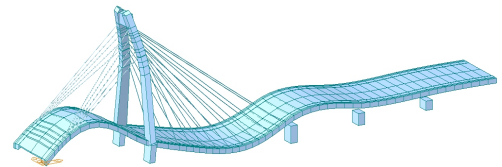
A~E 교량에 대한 케이블장력에 대한 수치해석결과 케이블의 장력은 Fig. 10 및 Table 10과 같이 나타났다.



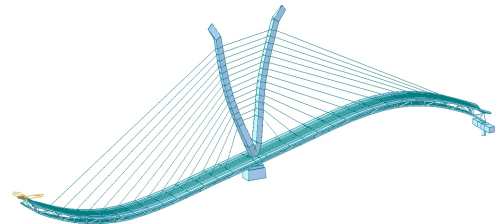
(a) A Bridge Analysis Frequency



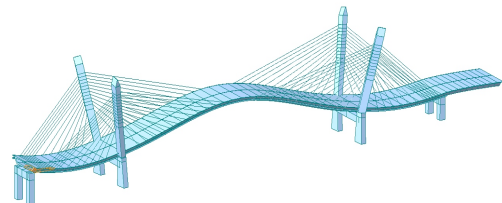
(b) B Bridge Analysis Frequency



(c) C Bridge Analysis Frequency

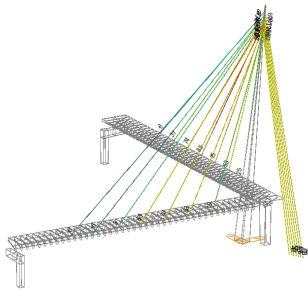


(d) D Bridge Analysis Frequency



(e) E Bridge Analysis Frequency

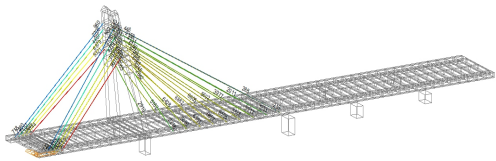
Fig. 9. A~E Bridge Analysis Frequency



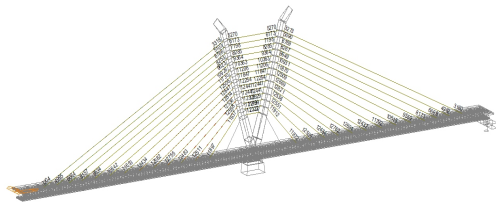
(a) A Bridge Cable Analysis Tension



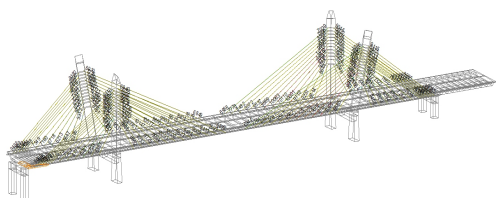
(b) B Bridge Cable Analysis Tension



(c) C Bridge Cable Analysis Tension



(d) D Bridge Cable Analysis Tension



(e) E Bridge Cable Analysis Tension

Fig. 10. A~E Bridge Cable Analysis Tension

Table 10에서 A, B교량은 보도사장교로서 장력의 크기가 일반사장교 대비 작게 나타났으며 C~E교량은 일반 사장교로서 케이블장력의 크기가 공용중인 사장교의 케이블장력과 유사하게 나타나서 수치해석결과는 적정한 것으로 판단된다[19].

Table 10. Cable Analysis Tension

Division	Cable Number	Tension(kN)
A Bridge	Cable 1	25
	Cable 2	53
	Cable 3	75
	Cable 4	85
	Cable 5	74
B Bridge	Cable 1	207
	Cable 2	116
	Cable 3	16
	Cable 4	9
	Cable 5	14
C Bridge	Cable 1	1933
	Cable 2	3917
	Cable 3	5546
	Cable 4	6566
	Cable 5	6857
D Bridge	Cable 1	4982
	Cable 2	6668
	Cable 3	8171
	Cable 4	9559
	Cable 5	10848
E Bridge	Cable 1	9055
	Cable 2	8818
	Cable 3	8586
	Cable 4	8361
	Cable 5	8144

4.3 사장교 케이블장력 현장실증 분석결과

A~E 교량의 케이블 장력에 대한 현장실측계측값과 수치해석에 의한 케이블 장력값과의 비교분석은 다음 Table 11와 같이 나타났다.

Table 11에서 현장실측계측장력과 수치해석에 의한 장력값과의 차이를 분석한 결과 최대 97kN의 차이로서 현장실측계측장력 대비 1% 차이가 발생하는 것으로 나타나 수치해석에 의한 장력값은 현장실측계측장력과 유사한 것으로 판단된다.

Table 11. Cable Tension Analysis Result

Division	Cable Number	Field Tension (kN)	Analysis Tension (kN)	Difference
A Bridge	Cable 1	31	25	6
	Cable 2	54	53	1
	Cable 3	75	75	0
	Cable 4	85	85	0
	Cable 5	64	74	-10
B Bridge	Cable 1	207	207	0
	Cable 2	113	116	-3
	Cable 3	17	16	1
	Cable 4	6	9	-3
	Cable 5	13	14	-1
C Bridge	Cable 1	1946	1933	13
	Cable 2	3976	3917	59
	Cable 3	5546	5546	0
	Cable 4	6552	6566	-14
	Cable 5	6873	6857	16
D Bridge	Cable 1	4916	4982	-66
	Cable 2	6765	6668	97
	Cable 3	8158	8171	-13
	Cable 4	9544	9559	-15
	Cable 5	10834	10848	-14
E Bridge	Cable 1	9054	9055	-1
	Cable 2	8811	8818	-7
	Cable 3	8573	8586	-13
	Cable 4	8362	8361	1
	Cable 5	8152	8144	8

A~B 교량은 보도사장교로서 계측값의 편차가 크게 발생한 상태이며 C~E 교량은 차도사장교로서 계측값의 편차가 크지 않고 전체적으로 수치해석에 의한 장력값과 유사한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 케이블의 장력추정방법 중 진동법을 사용하여 5개소의 현장교량 실험에서 GTDL360, NI Module 및 9 Axes Motion Sensor를 사용하여 장력을 추정하고 수치해석을 통해서 계측장력과 분석하여 케이블의 장력측정장치의 적정성을 분석하였다. 해석방법에 대한 검증으로 장력측정방안에 대한 연구로서 상용중인 GTDL360 및 NI Module를 사용하였으며 9 Axes Motion Sensor에 대해서 다양한 현장계측을 실시하여

장력을 측정하였고 그 결과 장력계측값이 기존 연구수행 결과와 유사한 것으로 나타났다.

향후 케이블장력 안전진단과정에서 상기의 장력측정 장비를 실무에 활용하여도 무방할 것으로 사료되며 연구 수행 과정에서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 현장실증교량의 케이블에 대해서 모드특성을 분석한 결과 주파수응답함수, 안정차트 및 MAC값은 모두 공용중인 사장교의 값과 유사한 값으로 측정되어 실험결과는 타당한 것으로 판단된다.
- 2) 현장실증교량에 대한 다양한 케이블 장력계측방법 (GTDL360, NI Module, 9 Axes Motion Sensor)의 장력계측값의 최대편차가 3.669%로서 유사하게 측정되어 장력계측방법의 현장적용성에 대한 문제는 없는 것으로 판단된다.
- 3) 현장실증교량의 가속도 기반의 케이블 추정장력과 수치해석에 의한 해석장력과의 값을 비교분석한 결과 값이 1%로서 가속도 기반의 케이블 추정장력 값은 적절한 것으로 판단된다.
- 4) 현장적용성 분석결과 센서의 설치위치의 제한 등 계측장치의 한계점이 존재하므로 추후 케이블 스마트 장력계측시스템에 관한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Korea Expressway Corporation, Final research report of general program for super long span bridge R&D Project, 2016.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201700000193>
- [2] Korea Expressway Corporation, Technical Report for Special Bridges(Seo Hae, Young Jong and Bang Hwa Grand Bridges), 1998.
- [3] Chlko, T. J., Haritos, N. and Gershkovich, V., "Non-linear curve fitting for modal analysis", *Environmental Software*, Vol.11, pp.9-18, 1996.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-9838\(96\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0266-9838(96)00016-0)
- [4] Cornwell, P., Farrar, C. R., Doebbling, S. W. and Sohn H., "Environmental Variability of Modal Properties", *Experimental Techniques*, Vol.23, pp.45-48, 1999.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.1999.tb01320.x>
- [5] Elliott, A. S. and Richardson, M. H., "Virtual Experimental Modal Analysis(VEMA)", *Proceeding of 16th IMAC*, 1998.
- [6] Shwarz, B. and Richardson, M., "Modal Parameter

- estimation from ambient response data”, *Proceeding of 19th IMAC*, 2001.
<https://www.semanticscholar.org/paper/MODAL-PARAMETER-ESTIMATION-FROM-AMBIENT-RESPONSE-Schwarz-Richardson/56d13c4e127087b272a946a2750b89f33c76ea59#paper-header>
- [7] 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.
- [8] T. Shimada, *A Study on the Maintenance and Management of the Tension Measurement for the Cable of Bridge*, Ph Dissertation, Kobe University, 1995.
- [9] 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))
- [10] 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.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200211922274860>
- [11] Lee, H.J., “Study on the Efficient Application of Vision-Based Displacement Measurements for the Cable Tension Estimation of Cable-Stayed Bridges”, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.17, No.9, pp.709-717, 2016.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO201631261655438>
- [12] Korea Expressway Corporation, Development of Monitoring-Based Maintenance System for Cable-Supported Bridges, 2011.
- [13] Park, Y.S., Choi, S.M., Lee, B.G., Kim, N.J., “Estimation of Stay Cable Tension Using String Vibration Theory”, *Journal of the Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol.9, No.2, pp.17-22, 2009.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200916762902305>
- [14] Lee, H.C., Kwon, K.M., Moon, C.Y., Jo, Y.H., “Measurement Equipment Development of Stability Evaluation for Joint Slope using Unmanned Aerial Vehicle”, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Vol.28, No.3, pp.193-208, 2018.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO201820540192141>
- [15] ABSignal, ModalVIEW – Operating Tutorial Version R2, pp.1-199, 2012. <https://www.absignal.com>
- [16] Jenny Lau, Jeroen Lanslots, Bart Peeters, Herman Van derAuweraer., Automatic modal analysis: reality or myths, 2007.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.150.236>
- [17] Jeong-In Shin., Damage Detection In Braced Steel Frame using Modal Analysis, 2017.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=DIKO0014383551>
- [18] Kim, B.H., Park, M.S., Lee, I.K., “Modal Parameter Extraction of Seohae Cable-stayed Bridge : I. Mode Shape”, *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol.28, No.5A, pp.631-639, 2008.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO200830265652213>
- [19] Seoul City, Han River Bridge Online Safety Maintenance System Report, 2012.
http://hbsafety25.eseoul.go.kr/open_content/system/introduce.html

이 현 철(Hyun-Chol Lee)

[정회원]



- 1998년 2월 : 인천대학교 대학원 토목공학과 (토목공학석사)
- 2015년 2월 : 인천대학교 대학원 건설환경공학과 (구조공학박사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : 주식회사 구주엔지니어링 대표

<관심분야>

토목구조, 시설물 유지관리