

# 현수교 짧은 행어로프의 장력추정시 지점부 회전강성의 영향

## Effect of Support Rotational Stiffness on Tension Estimation of Short Hanger Ropes in Suspension Bridges

이 정 휘†·노 상 곤\*·이 영 대\*·강 병 찬\*\*

Jungwhee Lee, Sang-Kon Ro, Young-Dai Lee and Byung-Chan Kang

(Received June 28, 2013 ; Revised September 3, 2013 ; Accepted September 14, 2013)

**Key Words** : Suspension Bridge(현수교), Hanger Rope(행어로프), Tension Estimation(장력추정), Vibration Method(진동법), System Identification(시스템 인식기법), Support Rotational Stiffness(지점부 회전강성), Flexural Stiffness(휨강성)

### ABSTRACT

Tension force of hanger ropes has been recognized and utilized as an important parameter for health monitoring of suspension bridges. Conventional vibration method based on string theory has been utilized to estimate tension forces of relatively long hanger ropes without any problem, however it is convinced that the vibration method is not applicable for shorter hanger ropes in which the influence of flexural stiffness is not ignorable. Therefore, as an alternative of vibration method, a number of feasibility studies of system identification(SI) technique considering flexural stiffness of the hanger ropes are recently performed. In this study, the influence of support condition of the finite element model utilized for the SI method is investigated with numerical examples. The numerical examples are prepared with the specification of the Kwang-Ahn bridge hanger ropes, and it is revealed that the estimation result of the tension force can be varied from -21.6 % to +35.3 % of the exact value according to the consideration of the support condition of FE model. Therefore, it is concluded that the rotational stiffness of the support spring should be included to the list of the identification parameters of the FE model to improve the result of tension estimation.

## 1. 서 론

현수교 행어로프의 장력은 현수교 전체 거동 및 현재 구조계의 상태를 반영하는 주요 응답 중 하나로, 여러 유지관리계측 항목 중에서도 중요하게 다루어지고 있다. 행어로프의 장력을 정확하게 측정하

기 위해서는 로드셀 등을 설치하여 장력을 직접적으로 계측하는 것이 가장 확실한 방법이겠으나, 여러 가지 현실적인 제약조건으로 인하여 현장에 적용된 사례는 찾아보기 어렵다<sup>(1)</sup>. 대신, 행어로프의 진동가속도를 측정하고, 이로부터 침두 진동수를 추출한 뒤 간접적으로 장력을 추정하는 방법이 현장에서 주로 사용되고 있다.

† Corresponding Author ; Member, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University  
Email: jwhee2@dankook.ac.kr  
Tel : +82-31-8005-3511, Fax: +82-31-8021-7213

\* Dept. of Civil Engineering, Pukyong National University

\*\* Dept. of Civil and Environmental Eng., Dankook University

‡ Recommended by Editor Hyung-Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이러한 방법들 중 가장 일반적으로 사용되는 방법은 케이블의 휨강성을 고려하지 않는 현이론(taut string theory<sup>(2)</sup>)과 휨강성을 고려하기 위해 케이블을 축하중을 받는 보로 해석하는 선형회귀법<sup>(3)</sup> 등이 있다. 하지만 이 방법 역시 행어케이블의 유효길이, 지점조건 등에 따라 정확성이 보장되지 못하는 경우가 발생할 수 있으며, 특히 행어로프의 길이가 짧아 휨강성의 영향이 커지는 경우에는 적용하기 어려운 것으로 알려져 있다. 이에 대한 대안으로 최근에 시스템인식(SI) 기법을 사용한 장력추정 연구가 진행되어 기존의 현이론 및 선형회귀법을 대신하여 짧은 케이블의 장력추정에 활용될 수 있는 방법으로 주목받고 있다.

Kim 등<sup>(4,5)</sup> 및 Park과 Kim<sup>(6)</sup>은 단변분탐색법과 보정계수를 사용한 역해석기법을 사용하여 광안대교 행어로프의 장력추정을 수행하였으며, 트러스요소와 보요소를 사용한 유한요소모델의 시스템인식 결과를 비교하여 휨강성의 영향을 평가하였다. 시스템인식에 사용된 변수는 행어로프의 장력이며, 단부 지점조건은 모두 힌지로 가정하였다.

Park 등<sup>(7)</sup>, Kim 등<sup>(8)</sup> 및 Kim과 Park<sup>(9)</sup>에서는 행어로프와 클램프를 포함하는 3차원 상세모델을 작성하고, 행어로프의 장력, 휨강성 및 비틀림강성과 클램프의 강성치들을 인식변수로 사용하는 시스템인식을 수행하여 영종대교 행어로프의 장력 및 서해대교 사장케이블의 장력을 추정하였으며, 이 경우에도 역시 단부의 지지조건은 모두 롤러로 처리하였는데, 행어의 모드형상으로부터 지지조건을 롤러로 판단하는 것이 타당하다고 논문에서 언급하였다.

박규식 등<sup>(1)</sup>은 여러 가지 유한요소모델 기반 장력 추정기법을 사용하여 광안대교 행어로프의 장력을 추정하였으며, 장력 추정시 유한요소모델의 경계조건의 중요성에 대하여 언급하였다. 양단지점을 힌지로 처리한 경우와 고정으로 처리한 경우의 장력추정 결과를 비교하였으며, 힌지로 처리한 경우에 실측치와 수치해석 사이의 고유진동수 오차가 더 작으므로 장력추정의 결과를 더욱 신뢰할 수 있는 것으로 판단하였다.

Ceballos와 Prato<sup>(10)</sup>은 사장교의 케이블을 대상으로 한 연구에서 케이블의 휨강성과 지점부 회전강성을 고려한 해석해를 유도하고, 이를 통하여 케이블의 휨강성이 증가함에 따라 지점부 회전강성이 장력

추정결과에 미치는 영향이 증가함을 보였다.

또한 Ni 등<sup>(11)</sup> 역시 길이가 길고 직경이 큰 케이블의 장력추정을 위해서는 지점조건과 케이블의 휨강성을 고려하여야 함을 해석해를 통하여 보이고, 사장교의 경사케이블과 현수교의 주케이블을 대상으로 결과를 확인하였다.

이상에서 정리한 바와 같이 지금까지의 연구에서는 현수교 행어로프의 장력추정을 위해 단부의 지지조건을 대부분 힌지로 처리하여 SI를 수행하였으며, 케이블의 휨강성 및 지점부의 회전강성을 고려한 장력추정 연구는 대직경의 사장교 경사케이블이나 현수교의 주케이블 대상으로 수행되어 왔다.

현수교의 행어로프는 사장교의 경사케이블이나 현수교의 주케이블과 비교하면 상대적으로 매우 직경이 작고 따라서 휨강성 또한 작은 형상을 가지고 있기 때문에 대부분의 경우는 지점조건 및 휨강성을 고려하지 않아도 추정장력에 큰 오차가 발생하지 않는다. 하지만 경간 중앙부의 행어로프와 같이 그 길이가 짧은 경우에는 기존의 방법을 사용할 경우 추정장력의 정확성을 보장할 수 없기 때문에 보다 개선된 장력추정기법의 적용성에 관한 연구가 필요할 실정이다.

따라서 이 연구에서는 사장교 경사케이블 등 대직경의 장대케이블을 대상으로 진행되어 온 케이블의 휨강성과 지점부 회전강성을 고려한 장력추정기법을 현수교 짧은 행어로프의 장력추정에 적용하기 위한 사전 연구로 수치해석을 통한 분석을 수행하고자 하였다.

## 2. 휨강성 및 지점조건이 행어로프의 진동특성에 미치는 영향

기존의 현이론(taut string theory<sup>(1)</sup>)에 따르면, 수직으로 놓여진 행어로프는 처짐(sag)이 0이므로 팽팽한 현(taut string)의 거동을 보이게 되고, 따라서 1차, 2차, 및 3차 고유진동수의 비는 1:2:3의 규칙성을 띄게 된다. 하지만, 휨강성이 지배하는 보 구조물에서는 단순지지인 경우 고유진동수가 진동차수  $n$ 의 제곱에 비례하게 되어 1:4:9의 비율을 갖게 되고, 양단 고정의 경우는 1:2.76:5.40의 비율로 변화한다<sup>(12)</sup>.

휨강성이 존재하지 않는 이상적인 현의 경우는 지점조건이 힌지인 경우나 고정인 경우에 관계없이

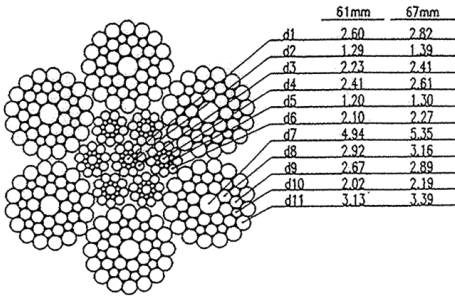


Fig. 1 Section of Kwang-Ahn bridge hanger rope<sup>(15)</sup>

일정한 고유진동수(1:2:3: ...)의 비율을 갖게 되지만, 휨강성의 영향이 있는 짧은 행어케이블의 경우는 팽팽한 현(taut string)과 보의 중간 거동을 보이게 되고, 따라서 휨강성의 영향이 커질수록 지점조건의 영향도 함께 커지게 됨을 예상할 수 있다.

이러한 경향을 확인하기 위하여 길이 2.1 m인 수직 로프의 장력을 고정하고 단면2차모멘트(I값)와 지점조건을 변화시켜가며 고유치해석을 수행하여, 그 결과를 다음의 Table 1에 정리하였다. 참고로 대상교량인 광안대교의 행어로프의 길이는 최장 약 60 m에서 최단 약 1.4 m까지 분포한다. 수치해석은 범용구조해석 프로그램인 Midas Civil 2012<sup>(13)</sup>를 사용하여 수행하였다. 행어로프의 단면2차모멘트는 Fig. 1에 나타난 행어로프의 단면도로부터 계산된 각 소선의 단면2차모멘트의 단순합을 하한치로, 합성단면의 단면2차모멘트를 상한치로 설정하였으며, 이는 각각 소선사이의 마찰이 전혀 없는 경우(완전비합성)와 마찰이 무한대인 경우(즉 소선 사이의 미끄러짐이 전혀 없는 경우, 완전합성)에 해당되는 것으로 생각할 수 있다. 수치해석에 사용된 입력값은 Table 2에 수록하였다.

Table 1에 정리된 바와 같이 단면의 휨강성이 매우 작은 경우(완전비합성)에는 지점조건이 현저한 경우와 고정인 경우에 고유진동수 값 자체의 차이도 크지 않으며, 고유진동수 사이의 비 역시 1:2:3과 거의 같은 값을 나타내어 예상한 대로 지점조건이 진동특성에 거의 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 단면의 휨강성이 최대치인 경우(완전합성)는 지점조건에 따라 고유진동수의 변화도 클 뿐만 아니라 고유진동수의 비율 역시 상당한 차이를 나타내어 휨강성의 영향이 커짐에 따라 지점조건이

Table 1 Natural frequency variation due to support condition and flexural stiffness

I value	Support condition	Hinge-hinge		Fix-fix	
		Frequency	Ratio	Frequency	Ratio
1040 mm <sup>4</sup> (non-composite)	f <sub>1</sub>	34.865 Hz	1.00	35.627 Hz	1.00
	f <sub>2</sub>	69.823 Hz	2.00	71.337 Hz	2.00
	f <sub>3</sub>	104.958 Hz	3.01	107.199 Hz	3.01
83,700 mm <sup>4</sup> (20% of full-composite)	f <sub>1</sub>	36.094 Hz	1.00	43.498 Hz	1.00
	f <sub>2</sub>	79.188 Hz	2.19	94.821 Hz	2.18
	f <sub>3</sub>	134.469 Hz	3.73	159.177 Hz	3.66
413,500 mm <sup>4</sup> (full-composite)	f <sub>1</sub>	40.694 Hz	1.00	61.326 Hz	1.00
	f <sub>2</sub>	109.192 Hz	2.68	151.251 Hz	2.47
	f <sub>3</sub>	216.089 Hz	5.31	280.017 Hz	4.57

Table 2 Input values of numerical analysis

Parameter	Value
Length	2.1 m
Tension force	349.2 kN
Sectional area	1976 mm <sup>2</sup>
Elastic modulus	137.2 GPa
Mass density	8.249 × 10 <sup>-9</sup> tonne/mm <sup>3</sup>

진동특성에 미치는 영향 또한 증가하게 됨을 확인할 수 있다.

### 3. 지점조건이 장력추정 결과에 미치는 영향

케이블의 휨강성을 고려하는 선형회귀법에서는 다음의 식 (1)을 사용하여 케이블의 장력을 추정한다<sup>(3)</sup>.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T}{4mL_e^2} + \left(\frac{EI\pi^2}{4mL_e^4}\right)n^2 \tag{1}$$

여기서 n은 고유진동 차수, f<sub>n</sub>은 n차 고유진동수를 나타내며, T는 케이블의 장력, m은 케이블의 단위길이당 질량, L<sub>e</sub>는 케이블의 유효길이를 나타내고 EI는 케이블의 휨강성을 뜻한다. 가진 실험을 통해 여러 개의 고유진동수를 측정된 뒤, x축을 n<sup>2</sup>, y축을 (f<sub>n</sub>/n)<sup>2</sup>으로 하여 도시하고 선형회귀분석을 수행하면 1차 식이 얻어지게 되는데, 이 회귀식의 y절편이 식(1)의 우변 첫 번째 항과 같게 되므로, 이 관계를 사용하면 케이블의 장력을 산출할 수 있게 된다<sup>(14)</sup>. 하지만 이 경우에도 케이블의 휨강성은 고려되어 있지만 지점조건의 영향은 반영되어



(1) 양단 힌지

지점조건을 양단 힌지로 설정하고 행어로프의 장력과 단면2차모멘트를 인식변수로 사용하여 역해석을 수행한 결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 x축은 역해석의 반복계산 횟수를 나타내며, y축은 고유진동수 및 SI 변수를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 9번의 반복계산을 통해서 세 개의 고유진동수가 모두 목표값에 수렴하였으나, 수렴된 장력 및 단면2차모멘트는 정해와 차이를 나타내고 있다. 최종적으로 추정된 장력은 378.9 kN으로, 정해 280.0 kN에 비해 약 35.3 % 큰 값으로 나타났으며, 추정된 단면2차모멘트는 132,770 mm<sup>4</sup>으로 정해 124,050 mm<sup>4</sup>에 비해 약 7.0 % 크게 나타났다. 이는 실제로 적용되어 있는 지점 스프링을 고려하지 않고 양단힌지 조건으로 SI를 수행하였기 때문에 나타나는 차이이며, 추정된 장력이 실제 장력에 비해 크게 나타나는 것이 타당하다.

(2) 양단 고정

지점조건을 양단 고정으로 설정하고 행어로프의 장력과 단면2차모멘트를 인식변수로 사용하여 역해석을 수행한 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7에 나타내었다. 양단 힌지의 경우와 마찬가지로 11번의 반복계산을 통하여 세 개의 고유진동수가 모두 목표값에 수렴하였으나, 장력 및 단면2차모멘트는 정해와 차이를 나타내고 있다. 최종적으로 추정된 장력은 219.5 kN으로, 정해 280.0 kN에 비해 약 21.7 % 작은 값으로 나타났으며, 추정된 단면 2차모멘트는 96,438 mm<sup>4</sup>으로 정해 124,050 mm<sup>4</sup>에 비해 약 22.2 % 작게 나타났다. 이는 실제로 적용되어 있는 지점 스프링을 고정단 조건으로 처리하여 역해석을 수행하였기 때문에 나타나는 차이이며, 추정된 장력이 실제 장력에 비해 작게 나타나는 것이 타당하다.

(3) 지점부 회전스프링 적용

양단 지점에 회전스프링을 적용하고 스프링 강성

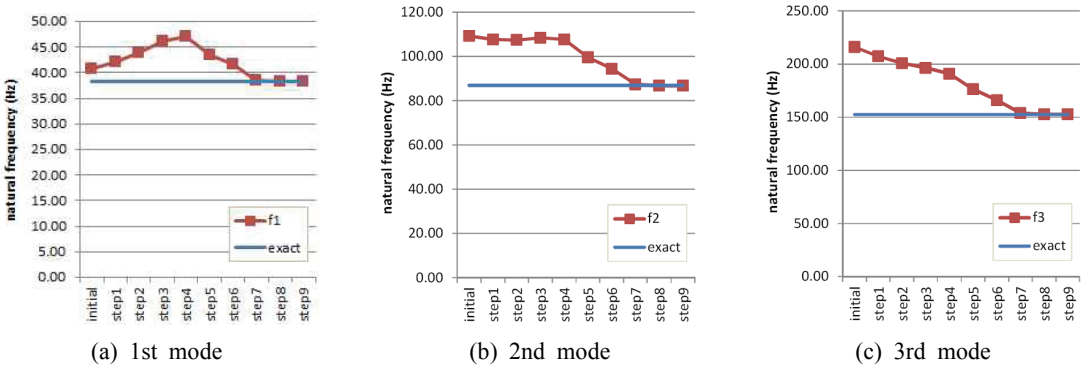


Fig. 4 Convergence of natural frequencies(hinge support)

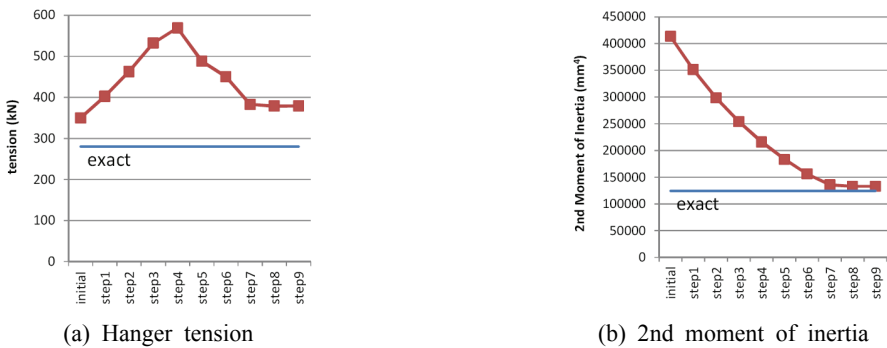


Fig. 5 Identification results of SI parameters(hinge support)

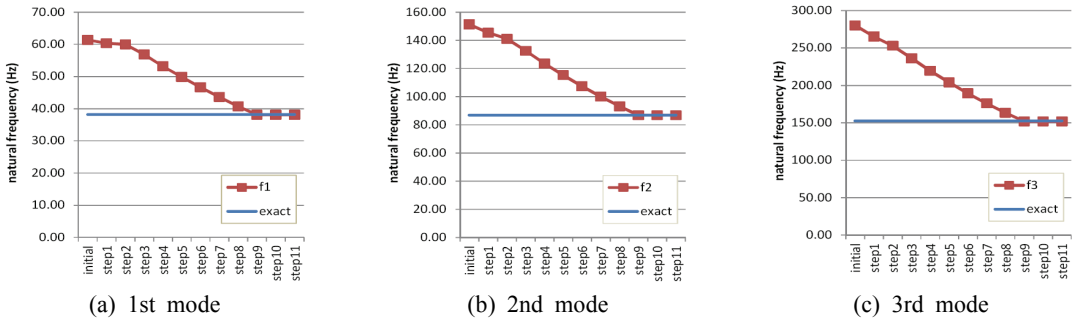


Fig. 6 Convergence of natural frequencies(fixed support)

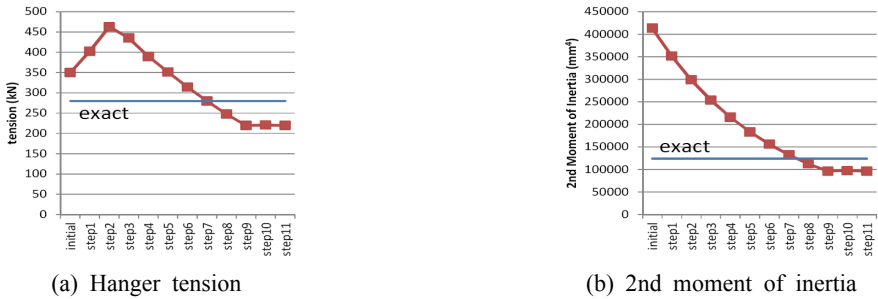


Fig. 7 Identification results of SI parameters(fixed support)

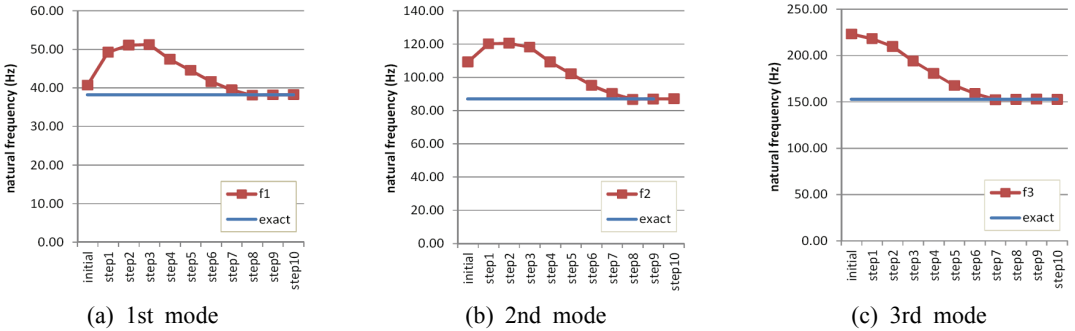


Fig. 8 Convergence of natural frequencies(rotational spring support)

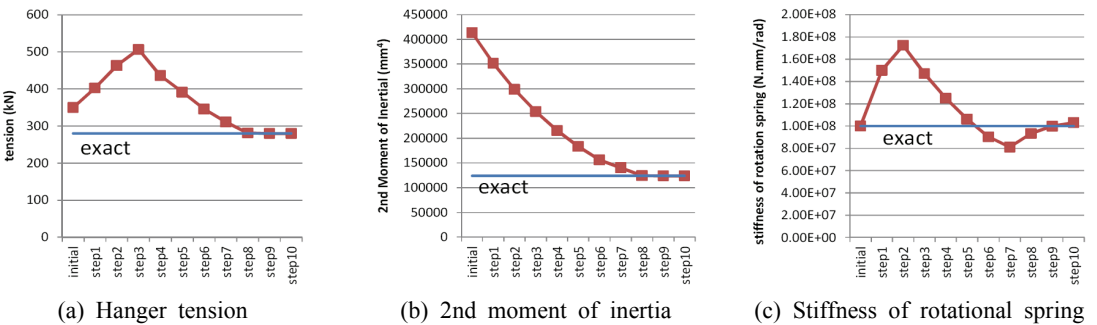


Fig. 9 Identification results of SI parameters(rotational spring support)



을 인식변수에 추가하여 역해석을 수행한 결과를 다음 Fig. 8 및 Fig. 9에 나타내었다. 양단 힌지 및 양단 고정 의 경우와 마찬가지로 세 개의 고유진동수가 모두 목표값에 수렴하였으며, 장력, 단면2차모멘트 및 지점부 회전스프링 강성이 모두 정해와 일치하는 값으로 수렴하였다.

위의 세 경우에 대한 장력추정 결과와 고유진동수 수렴값을 Table 3에 정리하였다. 표에 나타난 바와 같이 양단 힌지, 양단 고정 및 회전스프링 적용시 모두 고유진동수는 목표값에 수렴하였으나 추정된 장력은 상당한 차이를 나타내고 있다. 지점조건을 양단 힌지로 가정하여 지점부 강성을 실제보다 과소평가하는 경우에는 장력이 과대평가되는 결과가 나타나며, 양단 고정으로 가정하는 경우에는 반대로 장력이 과소평가되었다. 추정 장력의 오차는 -21.6%에서 +35.3% 범위로 나타났으며 지점부 회전스프링 강성을 인식변수에 추가한 경우에는 정확한 장력추정이 이루어졌다. 따라서 SI기법을 사용한 짧은 케이블의 장력추정을 수행할 때는 반드시 지점부 회전스프링 강성이 인식변수에 추가되어야 함을 알 수 있다.

**3.3 수치해석 예제 2**

앞의 예제 1에서는 상/하단 지점의 스프링계수가 동일한 경우에 대한 검토를 수행하였다. 하지만 일반적인 행어로프의 지점조건은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 상단은 주케이블에 설치된 행어밴드에 걸려 있는 상태, 하단은 바닥판과 연결된 상태로, 상단과 하단의 지점조건이 동일하다고 볼 수 없으므로, 수치해석 예제 2에서는 상/하단의 지점조건을 다르게 설정한 뒤, 이의 영향을 검토하였다.

목표 구조물의 사양은 Table 5와 같이 설정하였으며, 상단지점과 하단지점의 스프링 상수를 각각  $0.2 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 와  $0.8 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 로 서로 다르게 설정하였다.

계산된 1, 2, 3차 고유진동수는 각각 39.850 Hz, 97.974 Hz 및 183.429 Hz로 나타났으며, 각 모드 의 모드형상은 Fig. 2에 나타난 예제 1의 모드형상과 큰 차이가 없다. 계산된 세 개의 고유진동수를 목표치로 하여 SI를 수행하였으며, 예제 1의 세 번째 경우와 마찬가지로 상/하단 스프링상수가 동일한 것으로 가정하였다.

따라서, SI에 사용된 인식변수는 행어로프의 장력 ( $T$ )과 단면2차모멘트( $I$ ) 및 지점부 회전스프링강성 ( $K_r$ , 상/하단 공통)의 세 개가 된다.

SI 수행시, 각 변수의 초기값은 장력의 경우 350 kN



(a) Upper support



(b) Lower support

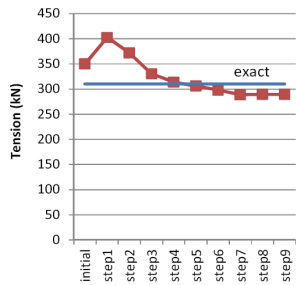
**Fig. 10** Support condition of Kwan-Ahn suspension bridge

**Table 4** Comparison of tension estimation results

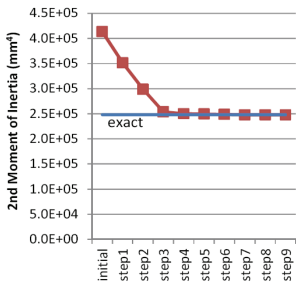
	Exact		Fix-fix		Hinge-hinge		Rotational spring	
$f_1(\text{Hz})$	38.20	38.07	-0.3%	38.20	0.0%	38.19	0.0%	
$f_2(\text{Hz})$	86.96	86.81	-0.2%	86.83	-0.1%	86.95	0.0%	
$f_3(\text{Hz})$	152.65	151.90	-0.5%	152.78	0.1%	152.63	0.0%	
$T(\text{kN})$	280.0	219.5	-21.6%	378.9	35.3%	279.9	0.0%	

**Table 5** Target parameters of example 2

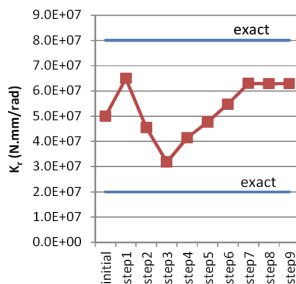
Parameter	Value
Hanger tension	310 kN
2nd Moment of Inertia	$248,100 \text{ mm}^4$
Stiffness of rotational spring (upper support)	$0.2 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$
Stiffness of rotational spring (lower support)	$0.8 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$



(a) Hanger tension



(b) 2nd moment of inertia



(c) Stiffness of rotational spring

**Fig. 11** Identification results of SI parameters(Ex2.  $K_{r1} \neq K_{r2}$  case)

(설계장력), 단면2차모멘트는  $413,500 \text{ mm}^4$ (완전합성), 지점스프링 강성은  $0.5 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 로 하였다.

Fig. 11에 상/하단 지점의 회전스프링 강성을 동일한 것으로 가정하고 수행한 SI의 결과로 얻어진 각 인식변수의 수렴과정을 나타내었다. 고유진동수는 이전의 경우와 마찬가지로 1, 2, 3차 고유진동수가 모두 목표값에 수렴하였으므로 별도로 도시하는 것을 생략하였다.

그림에 나타난 바와 같이 행어로프의 장력은 약 289.2 kN에 수렴하여 정해진 310.0 kN에 비하여 약 6.7% 낮은 값으로 추정되었다. 단면2차모멘트는 최종 반복계산단계에서  $247,691 \text{ mm}^4$ 에 수렴하여 정해진  $248,100 \text{ mm}^4$ 과는 -0.16%의 오차를 나타내었다.

지점부 회전스프링 상수의 경우, 실제로는 상단  $0.2 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ , 하단  $0.8 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 의 값이 적용되어 있으나, SI 수행시 상/하단의 스프링상수가 같다고 가정하여 최종적으로  $0.63 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{rad}$ 의 값에 수렴하였다.

따라서, 상/하단 지점의 스프링 상수를 동일한 것으로 가정하여 SI를 수행하면, 실제 행어에 도입되어 있는 장력과 차이가 있는 값에 수렴하게 되지만, 현지 또는 고정단으로 가정하는 경우에 비해서 그 오차의 수준이 상당히 낮은 것을 알 수 있다.

보다 정확한 장력의 추정을 위하여 상/하단 지점부 회전스프링의 강성을 별도의 인식변수로 사용하는 SI를 수행하여야 하지만, 이 경우 해의 유일성을 보장하기 위해 4개 이상의 고유진동수를 사용하여야 할 것으로 생각된다.

앞의 수치예제에서 보인 바와 같이 길이 2 m 내외의 짧은 행어케이블의 경우 3차 고유진동수가 약 200 Hz 근처로 나타나며, 가진망치를 사용한 가진실험에서 행어로프를 이 이상의 높은 진동수로 가진하는 것은 매우 어렵다. 따라서 이 연구의 대상이 되는 짧은 행어로프에 대하여 4차 이상의 신뢰성있는 고유진동수를 실험적으로 측정하는 것이 현실적으로 불가능하므로 상/하단 지점의 스프링 상수를 동일한 것으로 가정하고 SI를 수행하는 것이 현실적으로 타당할 것으로 생각된다. 또한 추정장력의 정확성을 개선하기 위해 고주파 가진이 가능한 가진장치를 개발하고, 인식변수의 수를 증가시켜 SI를 수행하는 방향도 고려해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 SI기법을 사용하여 현수교 짧은 행어로프의 장력추정을 수행할 때 장력추정 결과에 지점조건이 미치는 영향을 확인하기 위한 수치해석적 검토를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 행어로프의 길이가 짧은 경우 휨강성의 영향이 커짐과 동시에 지점조건에 영향 또한 함께 증가한다.

(2) SI 수행시 사용하는 수치모델의 지점조건이 실제의 지점강성보다 작은 강성을 갖도록 모델링된 경우(양단 현지)에는 장력의 과대평가가 이루어지며,



반대의 경우(양단 고정)에는 장력의 과소평가가 이루어질 수 있다.

(3) 수치해석 예제에서 지점조건의 모델링 방법에 무관하게 고유진동수는 목표값에 수렴하였으므로, 고유진동수 오차를 사용하여 추정장력의 신뢰성을 판단하는 것은 적절하지 않을 수 있다.

(4) SI기법을 사용하여 짧은 행어로프의 장력추정을 수행할 때는 지점부 회전스프링의 강성을 인식변수에 추가하는 것이 필수적이며, 이를 통하여 보다 정확한 장력추정 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 이상적인 조건 하에서 수행된 수치해석 연구를 통하여 진행되었으며, 이 연구의 결과를 현장 실측 데이터를 사용하여 확인하기 위한 연구가 진행중에 있다.

## References

(1) Park, K. S., Lee, J., Seong, T. R., Yoon, T. Y. and Kim, B. H., 2009, A Comparative Study of Finite Element Model-Based Tension Estimation Techniques, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol. 21, No. 2, pp. 165~173.

(2) Irvine, H. M., 1981, Cable Structures, the MIT Press.

(3) Shimada, T., 1995, A Study on the Maintenance and Management of the Tension Measurement for the Cable of Bridge, Ph.D. Dissertation, Kobe University.

(4) Kim, N. S., Bin, J. M. and Chang, S. J., 2006, Back Analysis for Estimating Tension Force on Hanger Cables, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, p. 194.

(5) 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, Vol. 11, No. 3, pp. 1~10.

(6) Park, D.-U. and Kim, N.-S., 2012, Back Analysis Technique for Tensile Force on Hanger Cables of a Suspension Bridge, Journal of Vibration and Control, DOI: 10.1177/107754631264679.

(7) Park, T., Moon, S., Joo, H. J. and Kim, B. H., 2007, Estimating Tensile Force of Hangers in

Suspension Bridges Using Frequency Based SI Technique: I. Theory, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 2A, pp. 165~172.

(8) Kim, B. H., Moon, S., Bae, I. H. and Park, T., 2007, Estimating Tensile Force of Hangers in Suspension Bridges Using Frequency Based SI Technique: II. Field Applications, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 27, No. 2A, pp. 173~179.

(9) Kim, B. H. and Park, T., 2007, Estimation of Cable Tension Force Using the Frequency-based System Identification Method, Journal of Sound and Vibration, Vol. 304, No. 3-5, pp. 660~676.

(10) Ceballos, M. A. and Prato, C. A., 2008, Determination of the Axial Force on Stay Cables Accounting for Their Bending Stiffness and Rotational end Restraints by Free Vibration Tests, Journal of Sound and Vibration, Vol. 317, No. 1-2, pp. 127~141.

(11) Ni, Y. Q., Ko, J. M. and Zheng, G., 2002, Dynamic Analysis of Large-diameter Sagged Cables Taking Into Account Flexural Rigidity, Journal of Sound and Vibration, Vol. 257, No. 2, pp. 301~319.

(12) Paz, M. and Leigh, W., 2004, Structural Dynamics: Theory and Computation 5<sup>th</sup> ed., Kluwer Academic Publishers.

(13) Midas IT, 2012, Midas Civil 2012 User Manual.

(14) Yoon, J. G., Sohn, J. and Chang, S.-P., 1999, A Study on Tension Measurement for Cable-supported Bridge, Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers(KSCE) Annual Conference, pp. 1418~1423.

(15) Busan Metropolitan City Construction Headquarters, 2003, Container Transportation Back Road (Kwang-Ahn street) Construction Work: the 2<sup>nd</sup> Zone.



**Jungwhhee Lee** received the B.S., the M.S. and the Ph.D. degrees in Dept. of Civil Engineering from Seoul National University in 1995, 1997, and 2002 respectively. He is currently working in Dankook University as a professor of the civil engineering department. His research interests include the structural vibration and health monitoring.