

# 진동기반의 SI 기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정 : III. 실험적 검증

## Estimating Tensile Force of Hangers in Suspension Bridges Using Frequency Based SI Technique : III. Experimental Verification

장한택\* · 김병화\*\* · 박대효\*\*\*

Jang, Han Teak · Kim, Byeong Hwa · Park, Taehyo

### Abstract

This paper introduces an experimental verification of a tension estimation method based on system identification approach for a double hanger system on a suspension bridge. A laboratory model of such double hanger system has been made for this study. Total nine cases of the vibration tests have been conducted with respect to three levels of applied tension and three cases of the location of clamp. For a set of the collected acceleration response data, modal analysis has been followed in order to extract the natural frequencies and mode shapes of the selected cable systems. For the extracted modal parameters, the existing tension estimation methods based on the string theory and axially loaded beam theory have been firstly applied to estimate the tensile force on the double hanger cable system. Next, the tensile force on cables has been estimated by the system identification approach. It is seen that the errors in the tension estimation using the frequency-based system identification technique are about 3% for all cases while the estimation error using the existing method is up to 53.1%.

**Keywords :** double hanger, tension estimation, cable dynamics, system identification

### 요 지

본 논문은 현수교 이중 행어 시스템에 대한 진동기반 SI 장력추정기법의 실험적 검증을 소개한다. 현수교 이중 행어 시스템을 모사한 실험 모델을 제작되었으며, 세가지 경우의 클램프 위치에 대한 세가지 경우의 행어장력에 대해서 총 9회의 진동실험이 반복 수행되었다. 각각의 계측된 가속도 응답 데이터에 대해서, 모달분석을 통한 고유진동수와 모드 형상이 추출되었다. 추출된 일련의 동특성치들에 대하여 기존의 장력추정 이론인 현이론과 선형회기법을 적용하여 장력을 추정하였다. 또한 진동기반 SI 장력추정기법을 적용하여 장력을 추정하였는데, 추정된 장력은 수치모델과 계측모델의 동적 특성치들이 동일하게 될 때, 수치모델의 케이블 장력을 인식함으로써 추정되었다. 추정결과, 클램프의 위치에 따라서 기존의 이론을 이용한 추정장력의 오차는 최대 53.1%까지 보이는 반면, 진동기반 SI기법을 이용한 추정장력기법의 장력추정 오차는 모든 경우에 대하여 3% 이내 이다.

**핵심용어 :** 이중 행어, 장력 추정, 케이블 동역학, 시스템 인식

### 1. 서 론

시스템 인식 기법을 이용한 케이블 장력추정기법은 사장교 케이블에 대하여 최초 개발(박대효와 김병화, 2005; 김병화와 박대효, 2005; Kim, B.와 Park, T., 2007) 되었고, 향후 현수교 이중 행어 시스템에 대하여 확대 적용(박대효 등, 2007; 김병화 등, 2007) 되었다. 그러나 현재까지 이론 제안과 현장 적용을 통한 실용성만 검증되었고, 실험실 모델을 이용한 행어 시스템에 대한 시스템 인식기법의 정확성 검증이 없는 상태이다. 본 논문은 SI(System

Identification) 기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정 이론 연구 및 현장 적용성 연구(박대효 등, 2007; 김병화 등, 2007; Kim, B. 등, 2007)에 대한 후속 연구로서, 실험실 모델을 통한 상기 제안기법의 실험적 검증 결과를 소개한다.

행어의 장력 추정을 위한 동적 추정 방법들 중에서 가장 간단한 방법은 현이론(taut string theory)이다. 이중 행어에 대한 현이론의 적용은 식 (1)에 보이는 단일 케이블의 고유진동수-장력 사이의 관계식을 이중 행어의 한쪽 케이블에 적용하여 장력을 추정한다.

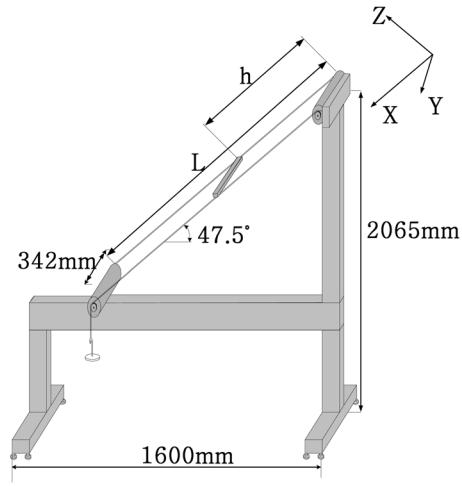
\*정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 대학원 석사과정 (E-mail : jjanghante@hanyang.ac.kr)

\*\*정회원 · 경남대학교 공과대학 토목공학과 전임강사 (E-mail : bhkim@kyungnam.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : cepark@hanyang.ac.kr)



(a) 실제 실험 모델



(b) 실험 모델의 제원

그림 1. 축소 실내 실험 모형

$$T = 4mL_e^2 \left(\frac{f_n}{n}\right)^2 \quad (1)$$

여기서,  $n$ 은 모드번호,  $f_n$ 은  $n$ 번째 고유진동수,  $m$ 은 행어 케이블의 단위 길이 당 질량, 그리고  $L_e$ 는 행어 케이블의 유효길이를 각각 나타낸다. 상기 현이론은 행어 케이블의 휨강성(flexural rigidity)과 클램프(clamp)의 영향을 고려하지 않았기 때문에 행어의 길이가 짧아서 클램프의 영향이 커질 경우 정확도가 매우 낮다.

다른 동적 추정 방법으로는 행어 케이블의 휨강성을 고려하기 위하여, 행어 케이블을 축 하중을 받는 보(Axially loaded beam)로 해석하는 방법이다. 이 이론은 측정된  $n$ 개의 고유진동수에 대해 장력과 휨강성을 미지수로 두고 식 (2)에 대하여 선형회귀법을 이용하는 방법이다.

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

여기서,  $EI$ 와  $T$ 는 케이블의 휨강성 및 장력을 각각 나타낸다.

행어의 길이가 상대적으로 긴 경우에, 식 (1)과 식 (2)를 이용한 장력추정 결과는 비교적 높은 정확도를 보여주는 반면에 행어의 길이가 짧은 경우에는 클램프의 구속영향이 상대적으로 크게 되어서 추정된 장력의 정확도는 매우 낮다(김병화 등, 2007). 이러한 문제를 개선하고자, 유한요소 모델과 시스템 인식기법을 이용한 장력 추정 방법이 제안되었다(박대효 등, 2007; 김병화 등, 2007). 시스템 인식기법을 이용한 장력 추정 방법은, 행어 장력을 포함한 시스템 인식변수 벡터  $\mathbf{U}$ 에 대하여, 다음 식 (3)과 같은 반복 계산을 이용하여, 수치 모델의 동적 특성치가 계측 모델의 동적 특성치와 일치 하도록 최적화 하는 방법이다.

$$\mathbf{U}^{k+1} = (1 + \alpha)\mathbf{U}^k \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 인식 변수 변화율, 위 첨자  $k$ 는 계산단계를 나타낸다.

## 2. 실험

### 2.1 실험모델의 소개

그림 1(a)와 같이 현수교 이중 행어를 모사한 축소 실험

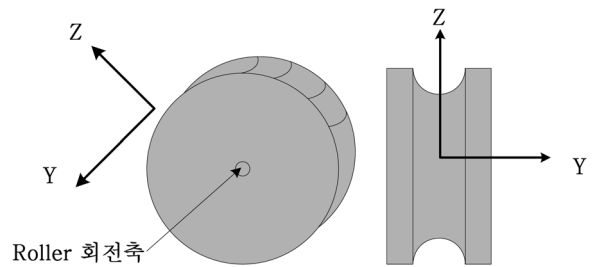


그림 2. 실험체 롤러

모형이 제작되었다. 그림 1(b)는 실내 실험 모형의 제원 및 좌표축을 나타낸다. X축은 실험체 와이어의 종방향을 나타내고, Y축은 클램프의 종방향을 나타낸다. 실험체의 상단 롤러는 힌지(hinge) 지점으로 모사되었고, Y축을 중심으로 한 회전은 가능하나 X, Y 및 Z축의 이동은 구속되었다. 이는 현수교 행어와 주 케이블의 접촉부 자유도를 이상화 한 것이다. 그림 2에 보이는 실험체 와이어 하단의 구속조건은 롤러(roller) 지점으로서 교량 상판과 행어가 연결되는 부분을 나타낸다. 실험체 와이어 하단은 Y축을 중심으로 한 회전 및 X축 방향으로의 이동은 가능하나 Y 및 Z축으로 이동은 구속 함으로써 실제교량 구조물의 행어와 상판의 연결부인 카라(collar)와 유사한 조건을 만족하게 하였다. 이러한 경계조건들은 영종대교의 현장적용에서 김병화 등 (2007)이 보고한 경계조건을 따랐다.

실험체 와이어의 장력은 하단롤러 하부에 하중 재하 용추를 매달아서 도입하였다. 상단 롤러의 회전축부터 하단 롤러의 회전축까지의 거리( $L$ )는 1.772 m 이다. 여기서, 상단과 하단 롤러의 회전축은 그림 2와 같다. 클램프로 구속된 대부분의 현수교의 이중 행어는 교량 상판에 대하여 연직에 가깝게 설치되지만, 본 연구에 이용된 실험체 와이어는 사선으로 배치하였다. 이는 충격망치(impact hammer)를 이용한 와이어 가진(excitation)시, 추의 흔들림에 따른 가짜 모드(fictitious mode)의 발생을 최소화 하기 위해서이다.

실제 현수교 이중 행어에서 케이블들은 평행을 유지하고 있으므로 실험체의 두 와이어 사이 간격은 그림 3에 보이는 턴버클(turnbuckle)을 이용하여 0.342 m를 유지하였다. 여기서, 턴버클은 양쪽 편에 서로 반대 방향의 수나사가 있어서

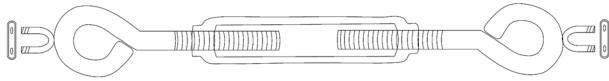


그림 3. 턴버클

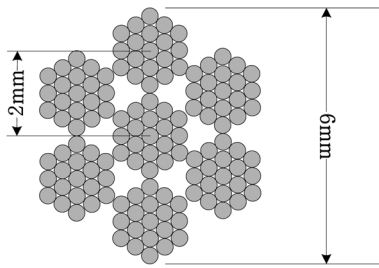


그림 4. 와이어 로프 형상

표 1. 기타 실험 조건

부속품	제원
가속도계 질량 (IEA)	0.9 g
와이어 로프 질량	0.1520 kg/m
턴버클 질량	511 g
추 거치용 갈고리 질량	0.2641 kg

표 2. 현장실험과 실내실험 조건 비교

행어 케이블	영종대교	실험모델
케이블 단위길이당 질량	3.303 kg/m	0.152 kg/m
케이블 공칭지름	84 mm	6 mm
행어의 길이	2.87~43.36 m	1.772 m
행어의 폭	0.62~0.76 m	0.342 m

회전 방향에 따라 길이의 조절이 가능하기 때문에 와이어들 사이의 수평간격을 유지할 수 있다. 또한 실험체 상단 롤러의 회전축으로부터 클램프까지의 거리  $h$ (그림 1(b) 참조)를 자유롭게 조절할 수 있어서, 클램프에 위치에 따른 고유진동수의 변화를 관찰 하기에 적절하다.

실내 실험 모델에 사용된 와이어는 그림 4와 같이  $7 \times 19$  와이어 로프이고 공칭지름은  $\phi$  6.0 mm이다. 기타 실험에 사용한 부속품의 제원 및 영종대교 현장실험과 실내실험의 조건 비교가 표 1과 표 2에 각각 보인다.

## 2.2 실험 모델의 동적 특성치 추출

본 실험은 충격망치(PCB® Model 086C04)를 이용하여 측정하는 진동실험(ambient vibration test)으로 수행되었다. 턴버클의 위치와 장력에 따른 진동 실험으로부터 실내 실험 모델의 고유진동수를 추출하였다. 턴버클의 위치  $h$ 는 세가지 경우(150 mm, 300 mm, 450 mm)에 대해서 실시하였다. 와이어의 장력 변화는 실험체 하단 롤러에 연장된 와이어 끝단에 재하 추를 이용하여 구현되었으며, 총 세가지 단계(591.2N, 689.3N, 787.4N)에 대하여 진동실험이 반복 수행되었다.

가속도계(PCB Piezotronics Inc. 모델 352B10)는 총 8개를 사용하였다. 가속도계의 위치는 그림 5에 보인 바와 같이 한 개의 와이어에 4개의 가속도계를 부착하였다. 계측된 가속도는 케이블 접촉면에 연직인 가속도이며, 각 방향(그림 1(b)의 Y, Z축)에 대하여 진동실험을 반복 수행 하였다.

표 3과 같이 진동실험은 3가지 경우의 턴버클 위치와 3가지 경우의 장력단계의 조합으로서 총 9회가 반복 수행되었다. 표 3에서 총 재하 하중은 하중 재하 시 추를 거치시키

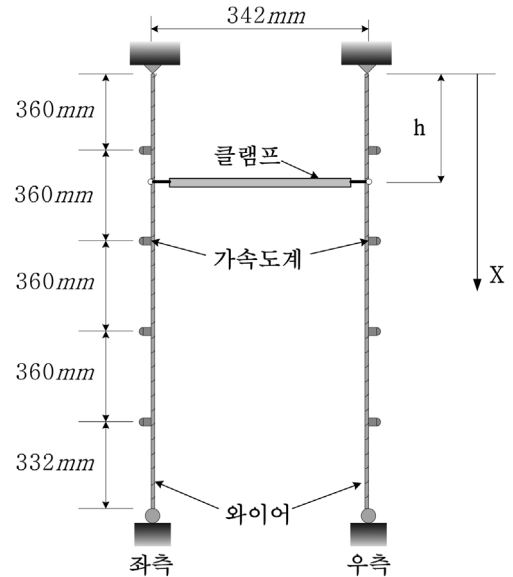


그림 5. 가속도계 위치

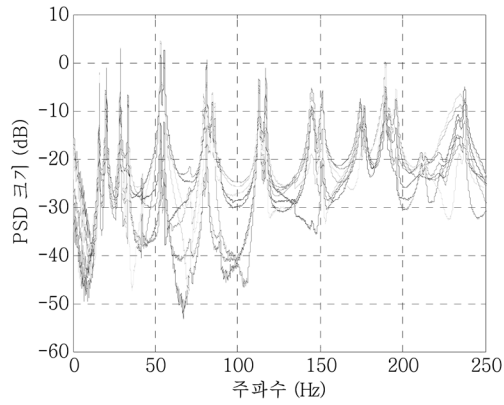
표 3. 진동 실험 조합

실험 번호	턴버클 위치 $h/L$ (%)	총 재하 하중 (N)
1	8.7	591.2
2		689.3
3		787.4
4	17.4	591.2
5		689.3
6		787.4
7	26.1	591.2
8		689.3
9		787.4

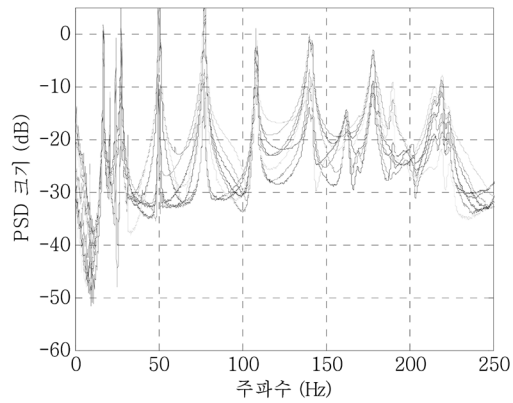
기 위한 갈고리의 질량(0.2641 kg)에 재하 추의 질량(60 kg, 70 kg, 80 kg)에 의한 하중의 합계를 나타낸다.

실험체 와이어에 가속도계를 부착 후에 Y축과 Z축 방향으로 와이어 로프를 충격망치로 가진 하였다. 가진 위치는 임의였고, 가진 신호는 기록되지 않았다. 시간이력 가속도 데이터는 NI®4472 보드와 LabView® 이용하여 수집되었다. 샘플링 빈도는 1000Hz로 하였으며, 총 252.999sec동안 Z축과 Y축 각각에 대하여 총  $2.53 \times 10^5$  개의 가속도 시간 샘플이 기록되었다. 이렇게 모아진 샘플들은 자체 코딩한 MatLab® 프로그램을 이용하여 스펙트럼을 확인하였다. 그림 6은 표 3의 진동실험 6번(턴버클 위치  $h/L=17.4\%$ , 와이어 장력 787.4 N)에서의 Z축 방향 및 Y축 방향의 8개의 가속도계에 대한 PSD(Power Spectrum Density)를 각각 보여 주고 있다(NFFT=10<sup>4</sup>, Hanning window). Z축 방향과 Y축 방향의 고유진동수가 다름을 알 수 있고, 행어의 Z축 방향 가속도 스펙트럼이 Y축 방향 가속도 스펙트럼보다 침두가 명확하다는 것을 알 수 있다. 또한 각 방향 별로 동조모드와 비동조 모드가 비슷한 진동수에서 나타나는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 김병화 등(2007)이 보고한 영종대교의 행어 시스템의 가속도 스펙트럼과 유사한 결과이다. 또한 근접한 주파수에서 각각 한 쌍의 침두가 존재함을 보여주고 있는데, 이는 클램프의 영향으로 박대효 등(2007)이 보고한 것과 유사한 결과를 보인다.

가속도 스펙트럼으로부터 PP(Pick-Picking)기법을 이용하여 추출된 Z축 및 Y축의 고유진동수는 표 4 및 표 5에 각각



(a) Z축



(b) Y축

그림 6. 진동 실험 6번의 가속도 스펙트럼

보인다. 표 4 및 표 5에서 빈칸은 가진 되지 못한 모드를 나타낸다. 저차모드의 경우, 각 진동 방향에 따라 동조 모드와 비동조 모드가 각각 한 쌍씩 총 4개의 근접 고유진동수가 나타난다. 근접한 고유진동수를 자세히 살펴보면, Y축의 고유진동수가 Z축의 고유진동수보다 항상 크다는 것을 알 수 있다. 이는 턴버클의 영향 때문이며 이중 와이어 시스템의 Y축 휨강성이 Z축 휨강성보다 다소 크다는 것을 의미한다.

또한 그림 7에서는 진동실험 4번, 5번, 6번(클램프의 위치  $h/L=17.4\%$ )에서의 장력변화에 따른 Z축 모드번호와 고유진동수의 변화를 보여주고 있는데, 식 (1)에서 확인되듯이 장력의 증가에 따라 모드번호 대비 고유진동수의 기울기는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 단일 케이블에서와는 다르게

장력 증가에 따라서 PSD에서의 첨부 부분이 쌍을 이루고 같이 쌍을 이루고 있고, 일정한 간격을 두며 고유진동수도 증가하는 것을 관찰 할 수 있다.

그림 8 및 그림 9는 진동실험 5번의 진동데이터에 대하여 TDD(Time Domain Decomposition)기법(Kim, B. 등, 2005)을 적용하여 추출한 Z축과 Y축의 모드 형상을 각각 보여주고 있다. 가로축은 실험 모델 와이어의 종축 X를 나타내며, 그림 5에 좌측 및 우측과 X의 원점을 나타내었다. 세로축은 무 차원의 모드형상의 크기를 나타낸다. 여기서, TDD기법을 사용한 이유는 계측 점이 다수일 때 가장 신속 정확하게 모드형상을 추출할 수 있는 방법이기 때문에 본 연구에서 채택되었다. 각각의 Z축 및 Y축 방향에 대해서 동조모드와

표 4. Z축 고유진동수 (Hz)

모드 번호	실험 번호								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	17.45	18.55	19.53	14.15	15.20	15.85	11.25	12.12	13.04
2	19.23	20.57	21.91	17.92	19.11	20.38	14.78	15.87	17.00
3	29.47	31.2	32.69	25.32	27.25	28.75	25.43	27.45	29.40
4	37.20	39.25	43.65	29.50	31.66	33.30	27.96	30.22	32.47
5	43.52	46.45	49.33	46.90	50.43	53.22	49.00	52.90	56.40
6		53.50	55.80	48.82	52.37	55.35	51.15	55.06	59.32
7		68.60	73.25	71.50	76.60	81.20	74.40	80.60	85.30
8		71.60	75.42	74.10	80.27	85.96	78.20	83.70	89.90
9		94.15	100.00	100.55	107.60	112.90	91.00	97.00	102.30
10			102.85	104.35	111.50	117.00	100.00	106.10	112.10
11				129.90	138.40	144.70	110.00	116.80	120.00
12				135.50	145.00	151.40	113.00	120.00	127.00
13				158.30	167.90	176.80	143.50	152.70	155.00
14				171.40	181.80	189.60	148.20	158.30	160.00
15							170.00		
16							175.00		

표 5. Y축 고유진동수 (Hz)

모드 번호	실험 번호								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	19.29	19.41	19.86	15.22	16.2	17.08	12.38	13.29	13.91
2	21.67	21.80	22.10	21.25	22.83	24.42	24.02	26.14	27.55
3	34.45	35.01	35.25	24.29	26.00	27.72	26.24	28.42	29.91
4		44.70	44.95	43.52	46.67	49.92	49.50	53.60	56.45
5		47.85	48.05		47.92	51.17	50.50	54.75	57.74
6			69.10		72.30	77.22		83.40	87.80
7			70.75		73.30	78.13			88.50
8					101.70	108.30			
9						109.10			

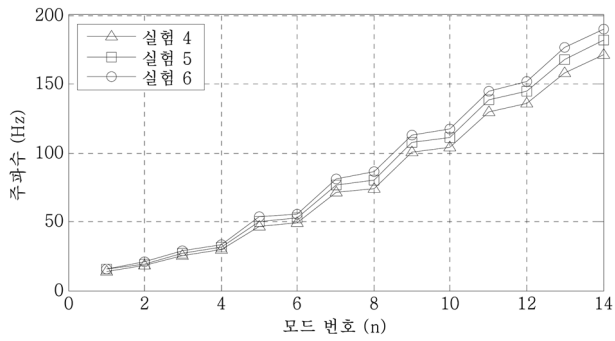
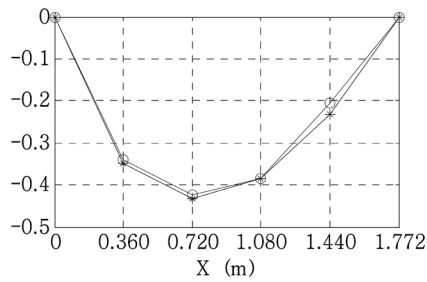


그림 7.  $h/L=17.4\%$ 에서 Z축 방향으로의 고유진동수와 장력과의 관계

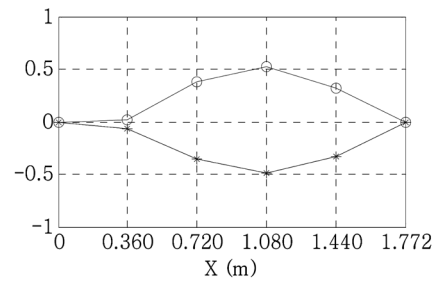
비동조모드가 쌍으로 나타났고, 클램프의 영향이 각각의 방향에 따라 다르게 나타났다. 즉, Y축 방향과 Z축 방향의 동

조모드들은 서로 유사하지만, 비동조 모드는 매우 상이하다.

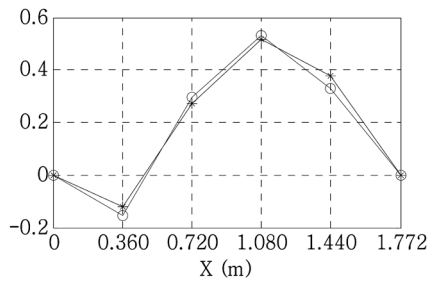
여기서, Y축 방향의 모드의 형상 중에서 짝수 번째 저차 모드형상을 살펴보면(그림 8b, 8d), 식 (2)의 선형회귀법 적용 시 와이어의 유효길이를 턴버클부터 하단롤러 지점까지 고려하는 것이 합리적인 것으로 보인다. 이는 윤자걸 등 (1999)에 의해 보고 된 바 있다. 또한, Z축 방향의 비동조 모드형상들(그림 9b, 9d) 에서도 상단롤러의 회전축에서 하단롤러의 회전축까지 정현파가 관찰된다. 그러므로, Z축 방향의 모드를 사용하려면 유효길이는 상단롤러의 회전축에서 하단롤러의 회전축까지를 유효길이를 설정하는 것이 합리적이다. 여기서, 동조모드 대신 비동조 모드를 선택한 이유는 동조모드의 경우에 두 개의 케이블이 동일한 방향으로 움직이기 때문에 클램프의 위치에서 클램프의 질량관성이 배가되는 반면, 비동조 모드에서는 두 개의 케이블이 반대방향으



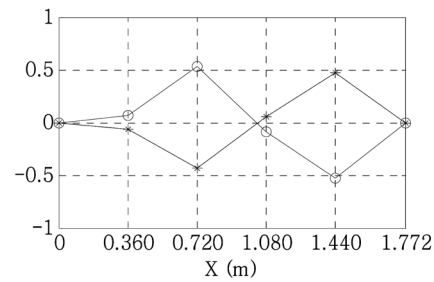
(a) 1차 모드형상



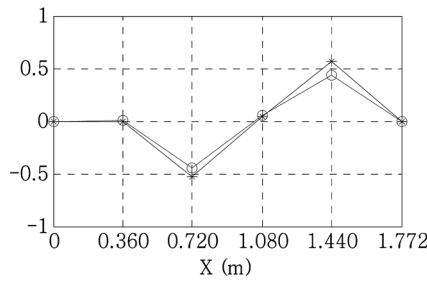
(b) 2차 모드형상



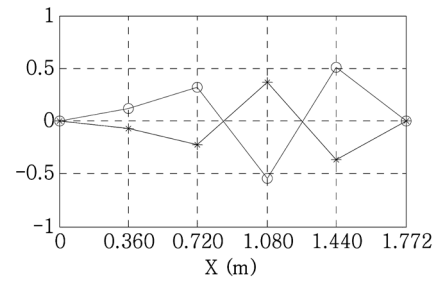
(c) 3차 모드형상



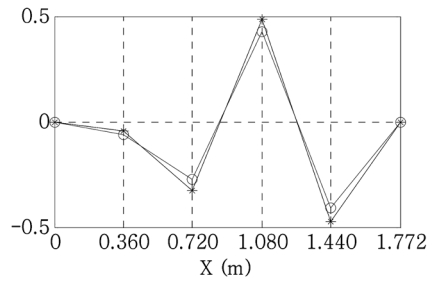
(d) 4차 모드형상



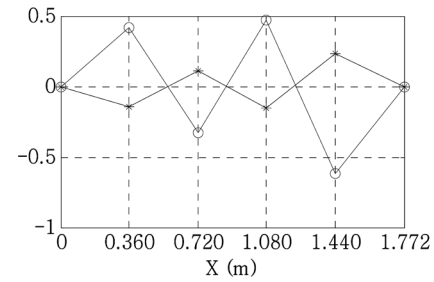
(e) 5차 모드형상



(f) 6차 모드형상



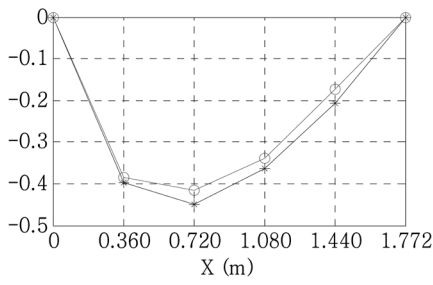
(g) 7차 모드형상



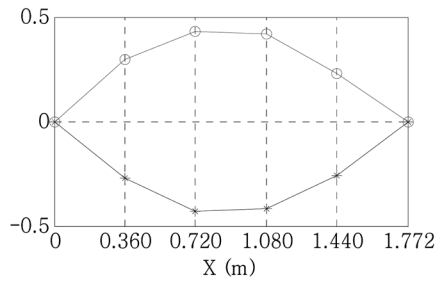
(h) 8차 모드형상

—○—; 우측와이어, —\*—; 좌측와이어

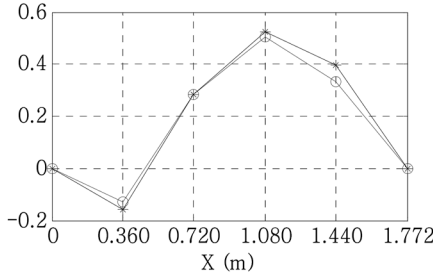
그림 8. 진동실험 5번의 Y축 방향 모드형상



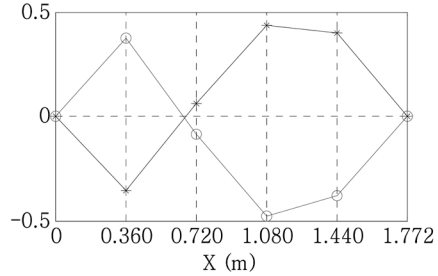
(a) 1차 모드형상



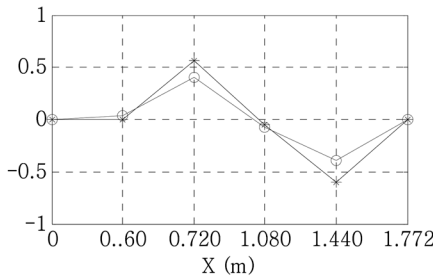
(b) 2차 모드형상



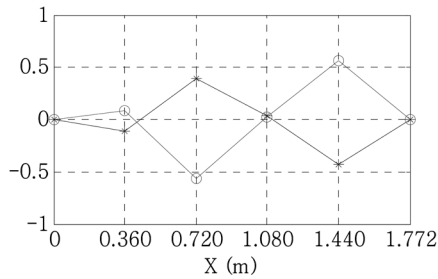
(c) 3차 모드형상



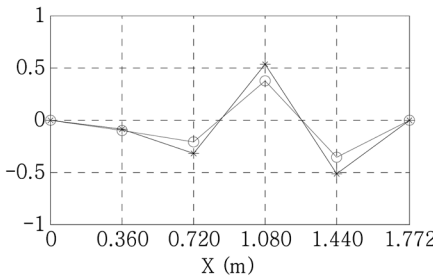
(d) 4차 모드형상



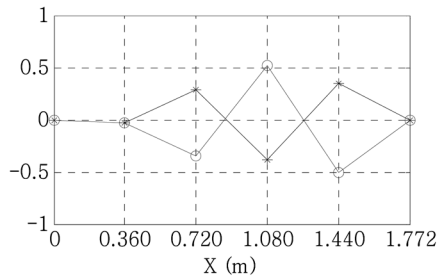
(e) 5차 모드형상



(f) 6차 모드형상



(g) 7차 모드형상



(h) 8차 모드형상

—○—; 우측와이어, —\*—; 좌측와이어

그림 9. 진동실험 5번의 Z축 방향 모드 형상

로 움직이기 때문에 클램프의 질량관성이 서로 상쇄되는 경향이 관찰 되기 때문이다. 또한, 김병화 등 (2007)이 실제 현수교 이중 행어로부터 추출한 모드형상과 본 연구의 실험체로부터 추출한 모드 형상이 매우 유사한 것을 알 수 있다.

모드형상은 변형곡선의 기저 (basis)이기 때문에 모드 형상의 단부들을 살펴보면, 실험체의 경계조건 및 자유도를 쉽게 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 실험체 상단을 힌지로, 하단은 롤러로 가정하였다. 그림 8 및 그림 9에서 보이듯이 각 지점에서 회전각이 발생하는 것이 확인된다.

### 2.3 SI 기법에 의한 장력추정

SI 기법을 이용한 장력 추정기법의 기본가정은 구조물의 경계조건 및 형상은 알려져 있고, 재료의 밀도 변화는 없는 것으로 한다. 장력 추정은 측정된 고유진동수에 대하여, 다

음 식 (4)의 민감도 방정식을 이용한 반복계산을 통하여 이루어 진다(박대호 등, 2007).

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}^k)^T \mathbf{Z}(\mathbf{U}^k) = \mathbf{F}(\mathbf{U}^k)^T \mathbf{F}(\mathbf{U}^k) \boldsymbol{\alpha} \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{U}$ 는 장력을 포함한 인식 변수 벡터, 위 첨자  $k$ 는 계산 단계,  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{F}$  및  $\boldsymbol{\alpha}$ 는 각각 고유진동수의 변화율 벡터, 민감도 행렬, 인식변수의 변화율 벡터이다.

본 논문에서는 식 (3)에서 장력에 대한 인식변수 벡터의 초기치는 임의의 장력을 대입하는 대신, 현이론 식 (1)에 의한 장력 추정치가 대입되었다. 이는 현이론에 의해서 추정된 장력은 케이블 시스템에 대한 장력의 초기 가정치로 활용될 수 있기 때문이다(Kim, B. 등, 2007). 나머지 인식변수 벡터의 초기 가정치는 일반적인 탄성계수와 단면 값을 주었다. 그림 10은 진동실험 6번 조건에 대하여 인식벡터의 초

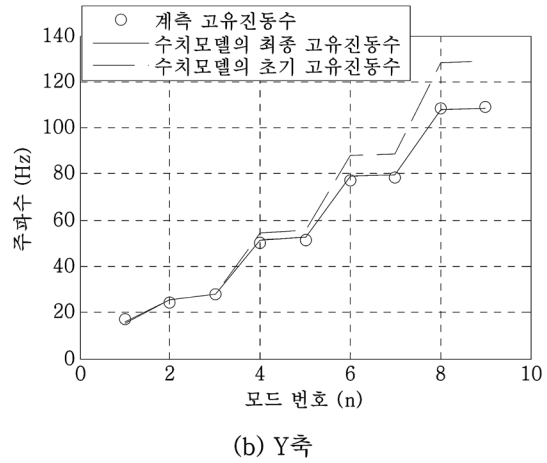
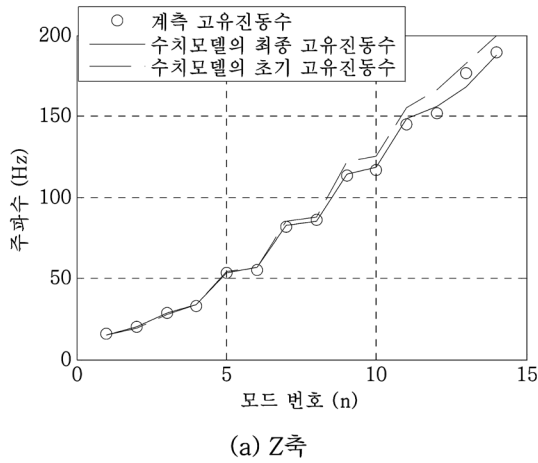


그림 10. 진동실험 6번에 대한 계측 고유진동수, 초기 고유진동수 및 수립된 고유진동수 비교

기 가정치를 이용한 FE(Finite Element)모델로부터 산정한 고유진동수, SI기법을 이용하여 최종 인식된 FE 모델로부터 산정한 고유진동수, 및 실험을 통해서 계측된 고유진동수를 비교한 것이다. 그림 10에서 가로축은 모드의 수를 세로축은 주파수(frequency)를 나타낸다. 고차 모드로 갈수록 계측 고유진동수치와 초기 FE 모델의 고유진동수들 사이의 오차는 커지는 경향이 관찰된다. 또한 그림 10(b)를 그림 10(a)와 비교해 보면, 계측 고유진동수와 초기 FE 모델의 고유진동수 사이의 Y축 방향 오차가 Z축 방향 오차 보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 클램프가 Y축 방향의 거동에 더 큰 영향을 미친다는 것으로 판단된다. 또한 수립된 최종 FE 모델의 고유진동수는 계측 고유진동수로 수립한 것을 알 수 있다.

그림 11은 진동실험 6번의 조건에 대하여 SI 기법의 각 반복계산 단계별 인식변수들의 변화율을 나타낸다. 또한, 그림 12는 기존의 이론논문(박대호 등, 2007)의 식 (4)에 정의된 9 개의 인식변수들의 변화율을 진동실험 6번의 조건에 대하여 보여주고 있다. 인식변수들 중에서도 장력의 수립도  $a_1$ 가 가장 빠르는데, 이는 고유진동수에 대한 장력의 민감도에 가장 크기 때문이다. 예를 들면, 50회 정도의 반복수행 후[-2.6651%(804.4M)] 실제 장력과의 오차가 3% 미만으로 상당히 정확한 값을 얻을 수 있다. 반면, 와이어 및 클램프의 축강성과 비틀강성의 수립성은 매우 낮다. 이는 계측 고유진동수가 와이어의 휨모드이기 때문이다. 다시 말하면, 휨거동에 대한 와이어 및 클램프의 축강성과 비틀강성의 민감도는 매우 낮다는 것이다. 이러한 문제점은 와이어의 축모드 및 비틀모드를 계측하여 SI 반복계산시 고려함으로써 개선 될 수 있다. 그러나, SI기법을 이용한 행어의 장력추정 기법의 본 취지는 행어 시스템의 장력 추정에 국한하기 때문에 행어 재료강성들의 정확한 인식을 목적으로 행어의 축모드 및 비틀모드 계측이 추가되지 않았다. 그림 11에서 인식변수들의 변화율은 500회를 반복 계산하여도 완전히 영으로 수렴하지 않는다. 이는 실제 실험모델에 대한 수치모델의 오차로 볼 수 있다.

표 6는 클램프의 위치와 장력 변화에 따른, 기존 이론을 이용한 장력 추정치와 SI 기법을 이용하여 수립한 장력 추정치를 비교하였고, 그림 12는 기존이론과 SI기법의 장력추정 오차를 비교하였다.

표 6에서 현이론에 의한 추정장력 값은 표 4와 표 5에서의 고유진동수와 모드 번호, 단위길이당 질량과 유효 길이를

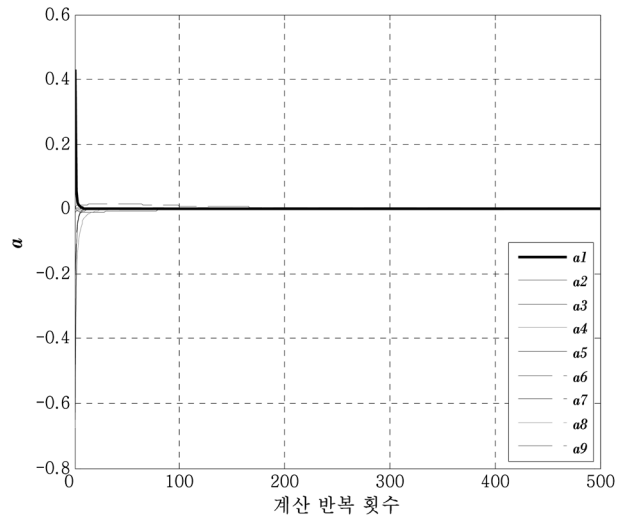


그림 11. 실험 6번 조건에 대한 인식 변수들의 변화율

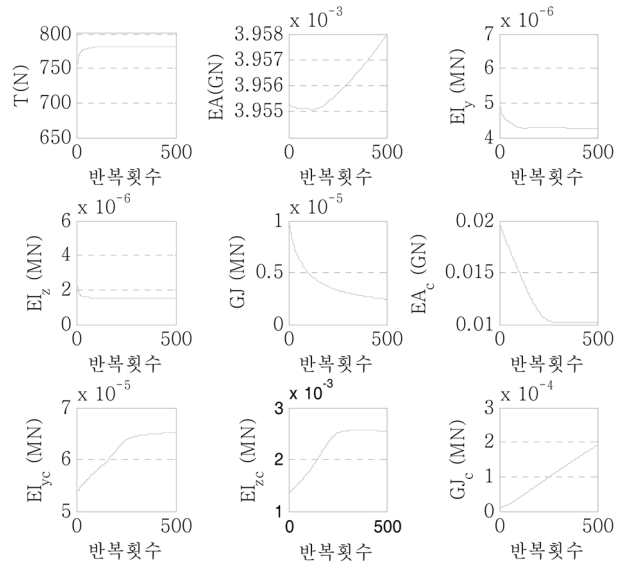


그림 12. 실험 6번 조건에 대한 각 인식 변수들의 수립도

식 (1)에 대입하여 구한 결과값 중 오차가 가장 적은 것을 기록하였다. 이 때 유효 길이( $L_e$ )는 상단 롤러의 중앙부부터 하단 롤러의 회전축까지의 거리( $L$ )이 사용되었다. 그리고 고유진동수는 진동실험 1번과 5번은 표 4의 1차 고유진동수를 나머지 실험에 대해서는 표 5의 1차 고유진동수가 사용 하였

표 6. 기존이론과 SI기법에 의한 추정장력

실험 번호	실제 장력	추정장력 (N)		
		현이론	선형회귀법	SI 기법
1	591.2	574.1	629.1	600.1
2	689.3	719.3	712.1	700.8
3	787.4	753.0	791.0	800.4
4	591.2	442.2	402.6	594.9
5	689.3	441.1	464.2	698.4
6	787.4	556.9	501.7	781.8
7	591.2	282.6	216.6	573.7
8	689.3	337.2	250.9	669.4
9	787.4	369.4	291.7	770.2

다. 현이론의 경우 클램프의 위치가  $h/L = 8.7\%$ 에서  $10\%$  내의 오차를 보여주고 있다. 반면, 클램프 위치가  $h/L = 17.4\%$ 인 진동실험 4번, 5번, 및 6번에서는 현이론을 이용한 추정 장력의 오차가 대략  $36.0\%$ 까지 증가하였고, 클램프 위치가  $h/L = 26.1\%$ 에 이르면 장력추정 오차는  $53.1\%$ 까지 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이, 현이론을 이용한 추정장력은 클램프의 위치가 행어 단부에서 멀어질 수록 클램프의 영향 때문에 정확도가 낮아진다.

표 6에서 선형회귀법에 의한 추정장력 값은 표 4의 고유진동수 중 비동조모드의 고유진동수와 그의 모드번호, 단위 길이당 질량, 유효길이를 식 (2)에 대입하여 얻은 것이다. 클램프의 구속영향이 적은 Z축 방향 비동조모드의 고유진동수가 이용되었고(박대호 등, 2007), 유효길이( $L_e$ )는 상단 롤러의 중앙부부터 하단 롤러의 회전축까지의 거리( $L$ )가 사용되었다. 여기서, 기존 기법의 적용을 위한 유효길이 선정시, 주요 고려사항은 모드형상이 정현파를 유지하는 구간으로 설정하는 것이다. 왜냐하면, 기존 기법들의 이론적 모드형상이 정현파이기 때문이다. 그림 9의 비동조 모드들을 살펴보면, 상단 롤러의 중앙부부터 하단 롤러의 회전축까지 구간이 정현파에 근사한 것을 알 수 있다. 선형회귀법의 변수 중 Z축 방향 휨강성에 대한 추정은 본 논문의 취지와 맞지 않으므로 고려되지 않았다. 선형회귀법을 이용한 추정장력의 정확도를 살펴보면 클램프 위치가  $h/L = 8.7\%$ 인 경우에는  $10\%$  내의 오차를 보여주는 반면, 클램프의 위치가 단부에서 멀어질수록 추정장력의 오차는 커진다.

표 6의 SI 기법에 의한 추정장력은 인식 변수 벡터의 초기치와 표 4와 표 5의 계측 고유진동수를 가지고 식 (4)의 민감도 방정식을 500회 반복 수행 후의 수렴된 값을 나타낸다. SI기법을 이용한 장력 추정치는 클램프의 위치와는 독립적으로 모든 실험의 경우에 대하여 실제 장력과 매우 근사한

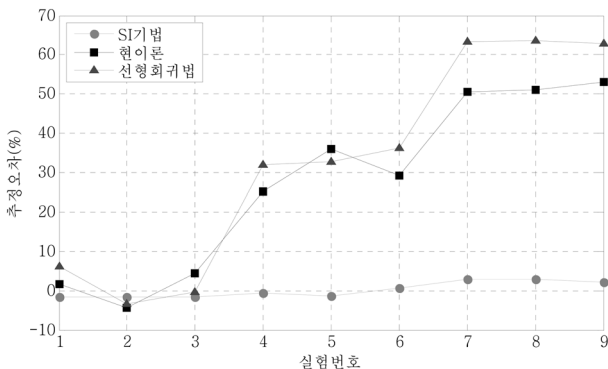


그림 13. 클램프의 위치에 따른 장력의 정성적 비교

값임을 알 수 있다. 그림 13에서 보이 듯이 장력추정오차는 모든 실험의 경우에 대하여  $3\%$ 이내의 오차를 보여 주었다. 이는 행어의 클램프의 대한 영향을 고려하여 행어의 장력과 강성 및 클램프의 강성 모두를 고려한 결과로 보인다.

### 3. 결 론

본 논문은 기존에 발표된 시스템 인식 기법을 이용한 행어의 장력추정 기법에 대한 후속 연구로서, 시스템 인식 기법의 정확성을 실험적으로 검증하였다. 실험적 검증을 위하여 현수교 이중 행어 시스템의 모형을 제작되었으며, 행어의 도입장력과 클램프의 위치 변화에 따른 장력 추정기법들의 정확성을 비교 평가하였다.

클램프의 위치( $h$ )가 행어의 전체길이( $L$ )에 비해서 상대적으로 작을 경우( $h/L$  작을 경우)에는 클램프의 영향이 작아서 기존 장력추정기법 및 시스템 인식 기법의 장력 추정결과는 유사한 결과를 보여 주었다. 이는 클램프의 구속영향이 작기 때문에 두 개의 케이블이 각각 단일 케이블의 거동으로 보아도 무방하다는 것을 의미한다. 그러나, 클램프의 위치가 행어의 전체 길이에 비해서 상대적으로 긴 경우( $h/L$ 이 클 경우)에는 클램프의 구속영향이 커서 기존기법을 이용한 추정장력은 신뢰도가 매우 낮았다. 반면 시스템 인식 기법을 이용한 장력추정오차는  $h/L$ 이 클 경우에도 모든 경우에 대하여  $3\%$  이내의 오차를 보여주었다.

### 감사의 글

본 논문의 연구는 “건설핵심기술연구사업(06 건설 핵심 D20)”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

박대호, 문석용, 주환중, 김병화(2007) 진동기반의 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정: I. 이론, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2-A호, pp. 165-172.

김병화, 문석용, 배인환, 박대호(2007) 진동기반의 SI기법을 이용한 현수교 행어의 장력 추정: II. 현장적용, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2-A호, pp. 173-179.

박대호, 김병화(2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력 추정: I. 이론, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제4-A호, pp. 661-668.

김병화, 박대호(2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력 추정: II. 실험 및 적용, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제4-A호, pp. 669-675.

윤자걸, 손진, 장승필(1999) 교량 케이블의 장력 측정에 관한 연구, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 117-120.

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.

Kim, B.H., Park, T., Shin, H., and Yoon, T.-Y. (2007) A comparative study of the tension estimation methods for cable supported bridges, *International Journal of Steel Structures*, Vol. 7, pp. 77-84.

Kim, B.H., Stubbs, N., and Park, T. (2005) A new method to extract modal parameters using output-only responses, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 282, No. 1-2, pp. 215-230.

(접수일: 2007.10.9/심사일: 2007.11.28/심사완료일: 2007.11.28)