

SI 기법을 이용한 현수교 행어케이블의 장력 추정

Estimating Tensile Force of Hangers in Suspension Bridges Using SI Technique

박 대 효* · 문 석 용** · 김 병 화***

Park, Tae-Hyo · Moon, Seok-Yong · Kim, Byeong-Hwa

ABSTRACT

For the purpose of developing a vibration-based tension force evaluation procedure for hangers in suspension bridges, a 3D finite element model of hangers is constructed in this paper. With the developed finite element formulation, a frequency-based sensitivity-updating algorithm is applied to identify the target cable system. the proposed method is also able to identify the flexural rigidity, the axial rigidity, and the torsion rigidity of a cable. For a field application, a vibration test on hangers of the Yong Jong Grand Suspension Bridge is carried out and the collected data is used to verify the proposed method.

Keywords: cable dynamics, system identification, tension

1. 서 론

장대교량에서 많이 나타나는 교량 형태 중 하나인 현수교는 주케이블(main cable)에 보강형(stiffening girder)을 매달아 하중을 지탱하는 구조를 가지고 있다. 현수교를 이루는 구성 요소로는 주요 인장제인 주케이블과 이를 지지하는 주탑(tower), 차량 하중을 전달 받는 보강형, 그리고 보강형을 주케이블과 연결하는 행어(hanger)가 있다. 이들 요소 중 행어는 보강형의 사하중 및 보강형에 가해지는 활화중을 주케이블로 전달하는 중요한 역할을 담당하는 부재이다. 따라서 현수교의 유지관리에 있어 행어의 장력을 상시 측정하고 관리하는 것이 매우 중요하다.

현수교 행어의 장력 추정을 위해 동적인 방법과 정적인 방법이 사용되고 있다. 안상섭 등(2003)은 건축용 보강용 타이로드의 장력 추정 방법(Bati 등, 2001)을 현수교 행어에 응용하여 행어의 구조 변경 없이 케이블의 장력을 추정할 수 있는 정적 방법을 제시하였다. 일반적으로 정적인 장력 추정 방법은 그 과정이 번거로워 실시간 장력 추정이 불가능하며 비용 또한 높은 편이다. 이에 비해 케이블의 고유진동수를 이용한 동적인 장력 추정 방법들은 신속하고 경제적인 장점을 가지고 있다. 고유진동수를 이용한 장력 추정에 있어서 새그(sag) 및 휨강성을 고려하지 않는 경우, 다음의 현이론(taut string theory)이 사용된다.

* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수 E-mail: cepark@hanyang.ac.kr

** 한양대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: eoos@ihanyang.ac.kr

*** 한양대학교 토목공학과 선임연구원 E-mail: bhk1272@ihanyang.ac.kr

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

여기서, T 는 장력, n 은 모드 번호, f_n 은 n 번째 고유진동수, m 은 케이블의 단위길이 당 질량이고, L 은 케이블의 전체 길이를 나타낸다. 새그의 영향이 없을 때, 휨강성을 고려한 장력 추정법으로는 케이블을 축 하중을 받는 보(Axially loaded beam)로 해석하고 다음의 고유진동수식을 이용한다.

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

여기서, EI 는 케이블의 휨강성을 나타낸다. 측정된 n 개의 고유진동수에 대해서 식(2)의 선형회귀법으로 장력 T 와 휨강성 EI 를 구한다. 휨강성과 새그를 모두 고려한 방법으로는 저차모드법(Zui등, 1996; Yen등, 1997)이 있다. 저차모드법은 계산이 간편하여 신속한 장력추정이 가능하지만 케이블의 정확한 휨강성과 축강성이 제시되어야 한다. 2차원 단일 케이블에 대한 유한요소 모델을 기반으로 시스템 인식기법을 적용하여 케이블의 장력 및 강성을 추정하는 방법이 박대호 등(2005)에 의해 개발되었다. 이 방법의 정확성 및 적용성은 실내 모형실험 및 서해대교 케이블의 장력 추정을 통해 검증되었다(김병화 등, 2005).

기존의 동적 방법들은 대부분 실제 케이블의 거동을 단순한 수학적 모델로 해석하여 고유진동수와 장력 간의 관계식을 유도하고 있다. 따라서 케이블의 거동이 수학적 모델과 상이할 경우 큰 오차를 수반할 수밖에 없다. 특히 기존의 연구들은 모두 양단이 지지되어 있는 일반 케이블 구조에 대한 장력 추정에 초점을 맞추고 있어 행어와 같이 케이블의 일부가 클램프에 의해 구속되는 형태의 구조에 대해서는 적용성에 문제가 있다. 실제로 영종대교 건전도 모니터링 시스템에서는 길이가 비교적 짧은 행어의 경우 기존의 동적 방법을 적용하지 못하고 있다(배인환 등, 2002). 이는 길이가 짧을수록 클램프의 영향이 커져 기존 방법으로는 정확한 장력 추정이 불가능하기 때문이다.

본 논문에서는 클램프의 영향이 큰 행어에 대해서도 신뢰성 있는 장력 추정을 위하여 시스템 인식기법이 도입되었다. 현수교 행어는 교축방향과 교축직각방향의 동특성이 서로 다르기 때문에 정확한 시스템 인식을 위해서는 각 방향의 동특성 정보를 고려할 수 있는 모델이 요구된다. 이를 위하여 행어의 3차원 유한요소모델이 구성되었으며 장력 이외에도 정확한 값을 모르는 케이블 강성값들 또한 추정 대상으로 지정되었다. 개발된 방법의 현장 적용성 검토를 위하여 영종대교 행어의 가속도 이력이 계측되었다. 계측된 정보로부터 교축방향 및 교축직각방향의 고유진동수가 추출되었고 이를 이용한 장력 및 케이블 강성이 추정되었다. 추정 결과는 기존의 방법에 의한 추정값과 비교 검토되었다.

2. 현수교 행어의 유한요소모델 개발

2.1. 케이블의 진동 지배방정식

그림 1은 초기 형상이 직선인 케이블의 변형을 나타낸다. 장력을 받는 상태에서의 진동 지배방정식을 유도하기 위하여 케이블의 포텐셜 에너지가 계산되었다. 포텐셜 에너지는 축 방향 변형, 휨, 그리고 비틀림에 의한 포텐셜 에너지를 각각의 경우에 대해 구한 뒤, 이들의 선형 합으로 표현될 수 있다. 휨과 비틀림에 대한 변형 에너지는 일반적인 프레임 요소와 같게 고려되었다. 단, 케이블은 장력에 의해 축 방향 변형이 상대

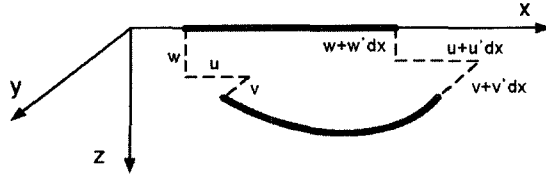


그림 1 케이블의 변형

적으로 크므로 축 방향 변형에 관한 에너지 항은 케이블의 축방향 변형률을 고려하여 계산되었다. 축 방향 변형만을 고려한 경우, 축 방향 변형률은 다음과 같으며 나머지 변형률은 0이다.

$$\epsilon_x'' = \sqrt{(1+u')^2 + v'^2 + w'^2} - 1 \approx u' + \frac{1}{2}u'^2 + \frac{1}{2}v'^2 + \frac{1}{2}w'^2 \quad (3)$$

여기서, 위첨자 프라임은 x 에 대한 미분을 나타내고, u, v, w 는 케이블 중립축에서의 각각 x, y, z 축 방향 변형률이다. 축 방향 변형에 대한 변형 에너지를 2차항까지만 고려하여 계산하고 나머지 휨과 비틀림에 대한 변형 에너지를 선형 항으로 표현하면 전체 변형 에너지는 다음과 같다.

$$U = \int_L \left(\frac{EA}{2}u'^2 + \frac{EI_z}{2}v''^2 + \frac{EI_y}{2}w''^2 \right) dx + \int_L \left(\frac{EI_y}{2}w''^2 \right) dx + \int_L \left(\frac{EI_z}{2}v''^2 \right) dx + \int_L \left[\frac{GJ}{2}(\theta_x')^2 \right] dx \quad (4)$$

여기서, θ_x 는 비틀림 x 이고 EA, EI_y, EI_z, GJ 는 케이블의 각각 축강성, y 방향 휨강성, z 방향 휨강성, 비틀림 강성을 나타낸다.

이미 가해지고 있는 장력에 의한 응력 σ_T 가 y 축과 z 축에 대해 대칭으로 분포한다고 가정하고 축 방향 변형, 휨, 그리고 비틀림에 대해 장력의 포텐셜 에너지 V 를 계산한 뒤 선형 항으로 나타내면 다음과 같다.

$$V = -\int_V \sigma_T \epsilon_x dV = \int_L \left(Tu' + \frac{1}{2}Tu'^2 + \frac{1}{2}Tv'^2 + \frac{1}{2}Tw'^2 \right) dx \quad (5)$$

미소변형에 의한 케이블의 총 운동 에너지 K 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$K = \int_L \left(\frac{\rho A}{2}\dot{u}^2 + \frac{\rho A}{2}\dot{v}^2 + \frac{\rho A}{2}\dot{w}^2 + \frac{\rho J}{2}\dot{\theta}_x^2 \right) dx \quad (6)$$

여기서, $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$, 그리고 $\dot{\theta}_x$ 는 각각 u, v, w , 그리고 θ_x 의 시간에 대한 도함수를 나타낸다.

식(4), 식(5), 그리고 식(6)을 다음의 Hamilton's Principle에 적용하여 변분하고 부분적분한 뒤, 경계조건을 고려하면 식(8)의 진동 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} (K - (U + V)) dt = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 \delta u : m\ddot{u} - ((T + EA)u)' &= 0 & \delta v : m\ddot{v} + (EI_z v''')' - (Tv)' &= 0 \\
 \delta w : m\ddot{w} + (EI_y w''')' - (Tw)' &= 0 & \delta \theta_x : \rho J \ddot{\theta}_x - (GJ \theta_x)' &= 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

2.2. 현수교 행어의 유한요소 모델

현수교 행어의 3차원 유한요소모델이 자체 코딩되었다. 그림 2는 해석의 대상이 되는 영종대교 행어의 구성을 나타내며 그림 3은 완성된 행어의 유한요소모델을 보인다. 대문자 X, Y, Z은 전체 좌표계를 나타내며 $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 은 요소의 지역 좌표계를 나타낸다. 전체 좌표계의 X축은 교축방향을 나타내고, Y축은 교축직각방향으로서 도로축을 나타낸다. 유한요소 모델은 총 58개의 격점에 57개의 식(8)을 기반으로 한 3차원 선형 보요소로 이루어져있다. 지점 1, 29는 주 케이블의 중심을 나타내고 한지로 가정하여서, X, Y, Z 방향의 자유도 및 Z축에 대한 비틀림 자유도를 구속하였다. 지점 28과 56은 상판의 위치를 나타내며, X축과 Y축의 자유도는 한지로 가정하여 구속시키고, Z축의 자유도는 케이블 장력에 대한 변위를 고려하기 위하여 풀러로 가정되었다.

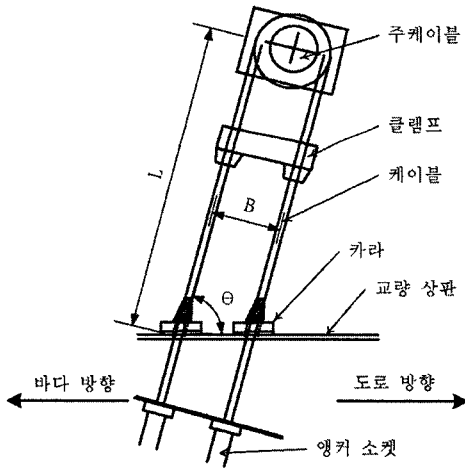


그림 2 영종대교 행어의 구성

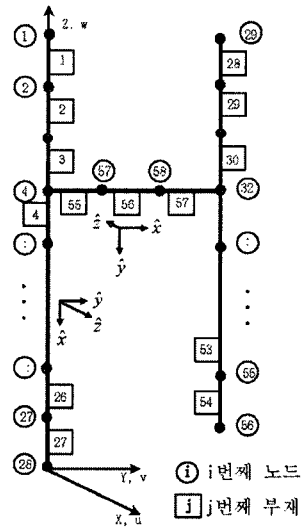


그림 3 현수교 행어의 유한요소모델

3. SI 기법을 이용한 장력 추정 방법

인식해야 할 변수들은 케이블의 장력과 케이블 및 클램프의 축강성, 휨강성, 그리고 비틀림강성으로 설정되었다. 케이블의 장력 이외에 강성 값들을 인식해야하는 이유는 행어 케이블의 경우 여러 가닥의 케이블로 구성되어 일반 연속체 구조와 달리 그 값을 정확히 알 수 없기 때문이다. 클램프 또한 그 형상이 복잡하여 가능한 모든 강성들이 변수로 설정되었다. 이들 인식변수들을 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = [T \quad EA \quad EI_y \quad EI_z \quad GJ \quad EA_c \quad EI_{yc} \quad EI_{zc} \quad GJ_c]^T \tag{9}$$

여기서, EA_c , EI_{yc} , EI_{zc} , GJ_c 는 행어클램프의 축강성, y 방향 휨강성(수직방향), z 방향 휨강성(교축방향), 비틀림강성 등을 나타낸다.

개발된 유한요소 모델을 이용한 고유진동수의 계산은 다음과 같은 벡터 함수 \mathbf{f} 로 해석할 수 있다.

$$\mathbf{f} : \Omega \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \Lambda \subset \mathbb{R}^m$$

$$\mathbf{f}(\mathbf{U}) = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_p \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_q]^T \tag{10}$$

여기서, Ω 는 인식변수 벡터 공간, $n=9$ 는 인식변수 개수, Λ 는 고유진동수 벡터 공간, p 와 q 는 각각 시스템 인식에 참여하는 교축방향과 교축직각방향의 계측 고유진동수의 개수, m 은 참여하는 전체 고유진동수, 그리고 $\{a_1, \dots, a_p\}$ 와 $\{b_1, \dots, b_q\}$ 는 임의의 인식변수벡터 \mathbf{U} 에 대해서 계산된 교축방향과 교축직각방향 고유진동수 값이다. 케이블의 장력 추정은 결국 함수 \mathbf{f} 의 값이 실제 계측된 고유진동수와 같아질 때의 가정된 장력 값을 찾는 문제가 된다. 따라서 장력 추정을 위한 시스템 인식은 다음의 최적화 문제로 표현될 수 있다.

$$\text{minimize} \sum_{i=1}^m (\beta_i - f_i(\mathbf{U}))^2 \tag{11}$$

여기서, $\{\beta_1, \dots, \beta_p\}$ 와 $\{\beta_{p+1}, \dots, \beta_m\}$ 는 각각 계측된 교축방향과 교축직각방향의 고유진동수이다. 계측된 고유진동수벡터를 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1 \ \dots \ \beta_m]^T$ 라고 하면 목적함수가 최소가 되는 \mathbf{U} 에서는 다음을 만족시켜야한다.

$$\nabla(\boldsymbol{\beta}(\mathbf{U}) - \mathbf{f}(\mathbf{U}))^T (\boldsymbol{\beta}(\mathbf{U}) - \mathbf{f}(\mathbf{U})) = 0 \tag{12}$$

따라서 k 번째 단계의 인식변수벡터 \mathbf{U}^k 와 $k+1$ 번째 단계의 인식변수벡터 \mathbf{U}^{k+1} 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{U}^{k+1} = \mathbf{U}^k + (\mathbf{J}(\mathbf{U}^k)^T \mathbf{J}(\mathbf{U}^k))^{-1} \mathbf{J}(\mathbf{U}^k)^T (\boldsymbol{\beta} - \mathbf{f}(\mathbf{U}^k)) \tag{13}$$

여기서, \mathbf{J} 는 함수 \mathbf{f} 의 야코비안 행렬이며 실제 계산에서는 수치적 근사값으로 대체된다.

식(13)을 이용한 반복 수행을 통해 인식변수벡터값이 일정한 값에 수렴하게 되면 그 때의 인식변수벡터값이 케이블의 장력 및 강성들의 추정값이 된다.

4. 영종대교 행어 케이블의 장력 추정

영종대교는 총길이 4,420m, 교량너비 35m, 주탑높이 107m, 교각 수 49개로, 인천국제공항고속도로 구간 중 장도와 영종도를 연결하는 황해 횡단 다리이다. 주항로부 550m 구간은 국내 최초로 도로·철도 병용 3차원 자정식 현수교로 건설되었다. 현수교 행어는 주케이블을 따라서 북측과 남측에 각각 43개소에 설치되어 있다. 북측 행어 7개소(NTS03 ~ NTS09번)에서 인천방향 행어케이블 2본씩에 대해서 진동 실험이 수행되었다. 교축방향 및 교축직각방향의 가속도 시간이력의 측정을 위하여 3개의 저주파용 가속도 센서가 사용되었다.

표 1은 계측된 PSD로부터 Pick-picking 기법을 이용하여 추출된 고유진동수를 나타낸다. 측정되지 않은 고유진동수는 빈 칸으로 두었다. 교축 방향과 교축직각방향의 진동 특성이 다르다는 것을 알 수 있고, 각 방향 별로 대칭모드와 비대칭모드가 비슷한 진동수에서 나타나는 것이 확인된다. 다시 말하면 중첩모드는 아니지만 특정 고유진동수 주변에 4개의 고유진동수가 존재한다.

계측된 동특성을 바탕으로 개발된 장력 추정법을 이용한 영종대교 행어의 장력 추정이 수행되었다. 각각의 행어에 대해서 500회의 반복계산이 수행되었으며 계산 과정에 따른 인식변수의 수렴성을 증명하였다. 실험공항하이웨이㈜에서 제공한 계측 대상행어들의 제원은 표 2에 보이며 길이 L 폭B 경사 θ 는 그림 2에 표기되었다. 행어 케이블의 단위 길이당 중량은 32.4 kgf/m 이고, 직경은 8.4cm 이다. 주 케이블의 중심부로부터 클램프의 중심까지는 모든 대상 행어에 대해서 1.1m로 적용되었다.

표 1 측정된 고유진동수 (Hz)

	교축 방향의 고유진동수							교축 직각 방향의 고유진동수						
	NST 03	NST 04	NST 05	NST 06	NST 07	NST 08	NST 09	NST 03	NST 04	NST 05	NST 06	NST 07	NST 08	NST 09
1	34.79	13.55	7.07	4.53	3.52	2.26	1.78	35.65	13.67	7.15	4.63	3.59	2.52	1.71
2	42.36	14.28	7.19	4.69	3.67	2.32	1.84	104.98	16.97	7.81	4.84	3.77	2.64	1.88
3	102.54	25.76	14.08	9.08	7.05	4.57	3.57	118.16	25.63	14.18	9.32	7.23	4.65	3.61
4	115.2	27.47	14.41	9.39	7.34	4.65	3.68	214.2	36.01	16.02	9.79	7.56	5.08	3.76
5	193.0	40.65	21.02	13.73	10.64	6.88	5.40	232.4	41.26	21.06	13.98	10.90	7.03	5.47
6	222.4	42.60	21.64	14.18	11.07	7.04	5.55		58.6		14.86	11.41	7.64	5.66
7		61.52	28.32	18.50	14.26	9.22	7.21		63.72		18.57	14.45	9.41	7.32
8		64.33	29.16	19.00	14.84	9.39	7.40		84.48		19.75	15.37	10.23	7.52
9		87.52	37.01	23.30	17.91	11.62	9.06		91.92				11.86	9.18
10		90.70	38.05	23.90	18.67	11.88	9.36						12.89	9.47
11		116.7					10.96							11.08
12		121.09					11.25							11.43
13							12.89							13.04
14							13.24							13.48
15							14.80							15.19
16							15.16							15.53
17							16.80							
18							17.27							
19							18.84							
20							19.30							

표 2 영종대교 행어의 제원

행어	길이 L (m)	폭 B (m)	경사 θ (°)
NTS03	2.87	0.62	85.33
NTS04	7.37	0.76	78.96
NTS05	12.83	0.76	77.70
NTS06	19.14	0.76	77.32
NTS07	26.33	0.76	77.19
NTS08	34.41	0.76	77.17
NTS09	43.36	0.76	77.20

표 3 영종대교 행어의 인식벡터 초기치

	T	EA	EI_y	EI_z	GJ	EA_c	EI_{yc}	EI_{zc}	GJ_c
	MN	GN	MNm ²	MNm ²	MNm ²	GN	MNm ²	MNm ²	MNm ²
NST3	1.1772	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621
NST4	1.1772	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621
NST5	0.9810	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621
NST6	0.9810	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621
NST7	0.9810	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621
NST8	0.7848	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621
NST9	0.7848	1.1084	0.4888	0.4888	0.3760	1.2800	6.1214	4.2667	0.0621

행어의 장력을 추정하기 위해서 가정한 인식벡터의 초기치는 표 3에 보인다. NST03 및 NST04번 행어의 장력은 1.1772MN로 초기 가정되었고 NST05, NST06, 및 NST07번 행어의 장력은 0.9810MN으로 가정되었으며 NST08 및 NST09번 행어의 장력은 0.7848MN으로 초기 가정되었다. 행어의 재료변수들은 NST03번 행어의 것과 동일하도록 가정되었다.

그림 4는 NTS03번 행어에 대한 장력 추정 과정에서 인식벡터의 각각의 반복계산과정에 따른 수렴도를 나타낸다. 각각의 반복회수마다 비선형 유한요소해석모델의 민감도 계산이 반복 수행되었다. 장력과 휨강성은 빠른 속도로 수렴하였고 다른 인식변수들은 상대적으로 느린 수렴성을 보여준다. 동일한 시스템 인식 절차가 TS04번~NTS09번 행어에 대해서 적용되었다. 표 4는 실험 대상 행어들의 인식된 수렴치를 보여준다. 클램프의 강성에 대한 수렴성은 좋지 않으나 이들의 고유진동수에 대한 민감도는 매우 낮기 때문에 케이블의 장력과 강성 추정에는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

표 4 영종대교 행어의 인식벡터 수렴치 집계표

	T MN	EA GN	EI _y MNm ²	EI _z MNm ²	GJ MNm ²	EA _c GN	EI _{yc} MNm ²	EI _{zc} MNm ²	GJ _c MNm ²
NST3	1.2296	0.9793	0.4191	0.3788	0.0677	0.6947	33.939	1.4793	0.5350
NST4	1.2025	61.110	0.2373	0.2665	0.0026	2.9019	3.2764	0.0975	0.8456
NST5	1.0688	2.5985	0.1247	0.0324	0.0094	1.2468	6.3140	4.0264	0.0347
NST6	0.9776	0.4266	0.1620	0.0793	0.0629	1.2892	6.0420	3.5250	0.1569
NST7	1.1286	0.8751	0.1394	0.1350	0.3607	1.3101	6.1221	3.7718	0.0639
NST8	0.8440	3.2149	0.0087	0.1849	0.0058	1.3371	6.1547	11.302	0.0093
NST9	0.7818	0.5788	0.1889	0.2641	0.2946	1.4791	5.9438	0.0203	0.1722

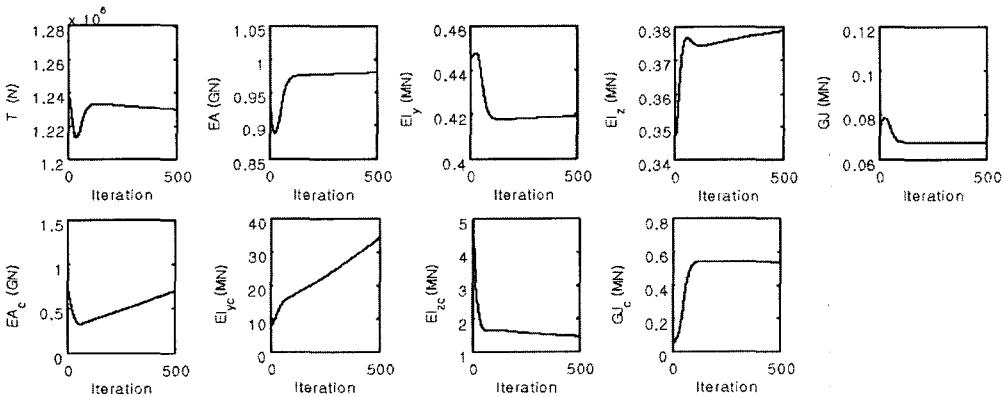


그림 4 NTS03번 행어의 반복 계산에 따른 인식 변수들의 SI 수렴도

표 4의 인식된 최종 장력들을 기존의 추정 자료인 용환선 등(2002)의 보고서(이하 신공항하이웨이보고서)에서 나온 추정장력들과 비교하면 표 5와 같다. 신공항하이웨이보고서에서는 행어의 휨강성을 고려한 선형회귀법이 적용되었다. 개발된 SI기법을 이용한 장력추정치는 NST07번 행어를 제외하고, 길이가 짧은 행어보다 긴 행어보다 큰 장력을 부담하고 있다는 것이 관찰 된다. 또한 신공항하이웨이보고서의 선형회귀법을 이용한 장력추정치는 NTS03번 과 NTS04번 행어들에 대해서는 신뢰성이 다소 떨어지는 것으로 판단된다. 특히 NTS04번의 경우, 개발된 SI기법과 기존의 선형회귀법을 이용한 결과와는 41%의 오차를 보였다.

표 5 행어 케이블 장력 추정 결과 비교

케이블 번호	NTS03	NTS04	NTS05	NTS06	NTS07	NTS08	NTS09
제안된 SI 기법	125.3	122.6	109.0	99.0	114.2	85.0	79.2
신공항하이위예보고서	111.6	72.5	104.8	105.7	123.7	96.5	82.2
설계치	99.9	84.5	82.0	82.3	82.6	82.8	83.0

5. 결 론

본 논문에서는 클램프의 영향이 큰 행어의 정확하고 신속한 장력 추정을 위한 기법이 제안되었다. 기존의 케이블 고유진동수를 이용한 장력 추정 방법들은 양단 지지된 단일 케이블만을 대상으로 하여 실제 구조물이 그 모델과 상이할 경우, 큰 오차를 가져올 수 있다. 특히 행어의 경우 케이블의 일부가 구속되어 있어 이에 대한 장력 추정에는 한계가 있었다. 이러한 문제를 해결하고자 행어에서의 클램프가 미치는 영향과 행어의 교축방향 및 교축직각방향의 동특성을 모두 고려할 수 있는 3차원 유한요소모델이 구성되었다. 개발된 유한요소모델을 기반으로 시스템 인식기법을 적용한 케이블의 장력 및 강성값들의 추정이 수행되었다. 제안된 방법은 기존에 불가능하였던 길이가 비교적 짧은 행어에 대해서도 신뢰성 있는 장력 추정값을 보였다.

감사의 글

본 논문의 연구는 “삼성물산(주) 건설부분 기술개발과제”와 “건설교통부 건설기술기반구축사업(05기반구축 D03)”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- Bati, S.B. and Tonietti, U. (2001) Experimental Methods for Estimating In Situ Tensile Force in Tie-Rods, *Journal of Engineering Mechanics*, 127(12), pp.1275~1283.
- Zui, H., Shinke, T., and Namita, Y. (1996) Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method, *Journal of Structural Engineering*, 122(6), pp.651~656
- Yen, W.H., Megrabi, and A.B., Tabatabai, H. (1997) Evaluation of stay cable tension using a non-destructive vibration technique, *Proc. 15th Structures Congress*, ASCE, 1, pp.503~507.
- 안상섭, 이일근, 배인환, 최호근 (2003) 행어 케이블 장력 산정을 위한 정적 방법, **대한토목학회 2003 대한 토목학회 정기학술대회**, 대한토목학회, pp.1418~1423
- 박대효, 김병화 (2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력추정: I. 이론, **대한토목학회논문집**, 25(4A), pp.661~668
- 김병화, 박대효 (2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력추정: II. 실험 및 적용, **대한토목학회논문집**, 25(4A), pp.669~675
- 배인환, 하강희 (2002) 진전도모니터링시스템을 이용한 3차원 자정식 현수교의 구조거동, **대한토목학회 2002년 학술발표회 -한국건설 비전 2025-**, 대한토목학회, pp. 513~516
- 용환선 외 52명 (2001) 인천국제공항 고속도로 교량 유지관리를 위한 초기점검 및 구조안전성 평가, **신공항 하이웨이(주)**