한국소음진동공학회논문집 제 12 권 제 12 호, pp. 956~963, 2002.

진동법을 이용한 인장 케이블의 장력 추정에 관한 연구

Evaluation of Tension Force of Stay Cables Using Vibration Method

김 남 식† · 정 운*

Nam Sik Kim and Woon Jeong

(2002년 7월 30일 접수 : 2002년 11월 15일 심사완료)

Key Words : Cable Supported Structure(케이블 지지구조물), Stay Cable(인장 케이블), Tension Force(장력), Vibration Method(진동법), Measured Frequency(측정 고유진동수), Flexural Rigidity(휨강성), Cable Sag Effect(케이블 새그효과), Single Mode(단일진동모드), Multiple Mode(다중진동모드)

ABSTRACT

In a recent construction industry, cable supported structures such as a cable-stayed bridge or space stadium have been increasingly constructed according to rapidly upgrade their related technologies. Generally stay cables as a critical member need to be rearranged for being satisfied with design tension forces. In this purpose, a vibration method has been applied to estimate the tension forces exerted on existing stay cables. In this study, cable vibration tests were carried out to evaluate the cable tension forces comparing with theoretical and practical formulas. Using the measured frequencies obtained from free vibration and impulsive tests, an accuracy of the estimated tension forces is confirmed according to use the first single mode only or higher multiple modes.

1. 서 론

근래에 들어와 건설산업분야에서는 케이블 소재 및 정착장치(anchorage device)의 발전으로 케이블 지지구조물(cable supported structure)의 수요가 증가하고 있다. 특히, 사장교(cable-stayed bridge), 현수교(suspension bridge), 공간구조(space structure) 등의 케이블 지지구조물에서는 케이블의 장력도입과 장력조정이 매우 큰 중요성을 갖는다. 케이블이 이미 설치된 구조물에서 도입된 장력의 정확한 추정은 전체 구조물의 안정성을 검증하는 차원에서 큰 의미를 갖는다.

일반적으로 케이블의 순차적인 장력 도입과정에서 유압잭(hydraulic jack)에 연결된 압력게이지(pressure gage)를 통한 장력계측은 정확성에 문제가 크며, 또한 순차적인 장력도입으로 인하여 실제적으로 케이블의 장력은 완성상태에서 변화한다. 따라서 케이블 지지구조물의 완성상태에서 장력의 정확한 추정은 간접적인 방법에 의해서 평가하고 있는 실정이다.

케이블의 간접적인 장력추정 방법으로서 진동법(vibration method)이 적용되고 있다. 이것은 케이블의 진동신호로부터 고유진동수를 측정하여 장력을 추정하는 기법이다. 그러나 실제 케이블의 길이나 질량이 매우 큰 경우가 대부분이기 때문에, 현장에서 원하는 진동모드를 얻기 위한 가진(excitation)이 용이하지 않다. 따라서 현장에서 측정한 케이블의 제한된 진동모드로부터 장력을 추정하는 방법에 대한 검증이 필요하다.

가장 간편한 경우로서 현(string)의 운동방정식[1~2]을 이용하여 장력을 추정하는 방법이 있다. 이 방법은 케이블의 단일진동모드(single mode)의 고유진동수를 측정함으로서 장력추정이 가능하나, 케이블의 휨강성(flexural rigidity)과 새그효과(sag effect)가 고

† 책임저자, 정회원, 현대건설기술연구소
E-mail : nskim@hdec.co.kr
Tel : (031) 280-7060, Fax : (031) 280-7061
* 현대건설기술연구소

려되지 않아 고차 혹은 저차 진동모드를 적용할 경우 장력추정결과의 오차가 비교적 크다.

다중진동모드(multiple mode)를 이용한 진동법[3]은 케이블의 휨강성과 새그효과에 의한 영향을 고려하여 장력을 추정할 수 있는 방법으로서, 현재 가장 보편적으로 사용되고 있다. 이 방법은 가능한 많은 진동모드를 현장에서 측정하여 적용할 경우, 케이블이 가지고 있는 비선형특성을 제거할 수 있다. 또 다른 장력추정 방법[3]으로는 케이블의 1차 단일진동모드를 이용하는 방법으로서, 케이블의 휨강성의 영향을 고려한 무차원 변수(non-dimensional parameter)를 기준으로 실용적인 장력추정 공식을 제안하고 있다.

본 연구에서는 케이블의 장력을 간접적으로 추정하기 위하여 제시된 상기의 이론적인 방법들에 대한 검증을 위하여 케이블모형실험을 수행하였다. 케이블 진동실험 결과로부터 각 방법들에 대한 신뢰성과 적용성에 대하여 고찰하였다.

2. 케이블 장력 추정기법

2.1 현의 공식을 이용한 장력 추정

케이블 휨강성과 새그효과를 무시할 수 있는 경우, 현의 운동방정식[1, 2]으로부터 다음과 같은 식 (1)을 적용하여 케이블의 장력을 추정할 수 있다.

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

여기서 T는 케이블에 도입된 장력, f_n은 측정된 n차 고유진동수, W는 케이블의 단위길이당 중량, g는 중력가속도 그리고 L은 케이블의 길이를 나타낸다.

식 (1)과 같이 케이블이 완전한 현의 거동($f_n = nf_1$)을 한다고 가정하면, 모든 진동모드에 대해서 동일한 크기의 장력이 얻어진다. 그러나 실제 케이블은 휨강성과 새그효과에 의한 영향이 포함되어 있기 때문에 모든 진동모드에 대해서 선형적인 관계를 갖지는 않는다.

2.2 다중진동모드를 이용한 장력 추정

식 (1)을 기준으로 케이블의 휨강성을 고려하여 장력을 추정하는 방법[3]은 다음의 식 (2)와 같이 휨강성을 고려한 항이 추가된다. 이 방법은 케이블의 다중진동모드를 이용하는 방법으로써, 측정된 고유진동수와 모드차수(order of mode)와의 상관관계를 분석함으로써 케이블의 장력과 이에 대응하는 등가정적 휨강성(equivalent static flexural rigidity) $(EI)_{eq}$을 추정할 수 있다. 식 (3)과 식 (4)는 각각 분석결과로부터 얻어지는 케이블의 장력과 등가정적 휨강성을 나타내고 있다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{T \cdot g}{4WL^2} + \frac{(EI)_{eq}\pi^2 g}{4WL^4} \cdot n^2 = b + a \cdot n^2 \tag{2}$$

$$T = \frac{4WL^2}{g} \cdot b \tag{3}$$

$$(EI)_{eq} = \frac{4WL^4}{\pi^2 g} \cdot a \tag{4}$$

이 방법에서는 케이블 새그효과의 영향이 큰 1차 진동모드를 배제하며 나머지 고차 진동모드(higher mode)를 이용함으로써, 평균적인 개념의 케이블 장력과 이에 대응하는 등가정적 휨강성을 얻을 수 있다. 여기서 얻어진 등가정적 휨강성은 특정한 진동모드 범위 내에서 얻어진 값으로서 Table 1의 공칭 휨강성 EI와 다른 값을 나타낸다.

2.3 단일진동모드를 이용한 장력 추정

일반적으로 케이블의 휨강성이 진동모드에 영향을 미치는 정도를 나타내는 무차원 변수 ξ는 $\sqrt{T/EI} \cdot L$로 정의된다.[4] 여기서 무차원 변수 ξ가 증가할수록 휨강성의 영향은 감소하여 케이블이 현의 거동에 근접한다. 따라서 케이블에 도입된 장력과 케이블의 길이에 비해 상대적으로 휨강성이 작으며($\xi = \sqrt{T/EI} \cdot L \geq 17$) 케이블의 새그효과를 무시할 만한 경우에, 식 (5)와 같이 1차 단일진동모드를 측정하여 케이블의 장력을 추정할 수 있다.[4]

$$T = \frac{4W}{g}(f_1 L)^2 \left[1 - 2.20\frac{C}{f_1} - 0.550\left(\frac{C}{f_1}\right)^2\right] ; \ (\xi \geq 17) \tag{5}$$

여기서 f_1은 측정된 1차 고유진동수, C는 $\sqrt{(EIg)/(WL)^4}$을 나타낸다. 또한 상기 식 (5)의 적용범위는 케이블 새그효과를 무시할 수 있는 조건을 가져야 하기 때문

에 식 (6)과 같이 무차원 변수 Γ가 3이상인 경우에 적용이 가능하다.[4]

$$\Gamma=\sqrt{\frac{WL}{128EA\delta^3\cos^5\theta}}\cdot\begin{pmatrix}0.31\xi+0.5\\0.31\xi-0.5\end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 EA는 케이블의 축방향 강성, δ는 sag-to-span ratio, θ는 케이블의 경사각을 의미한다.

3. 케이블 모형 진동실험

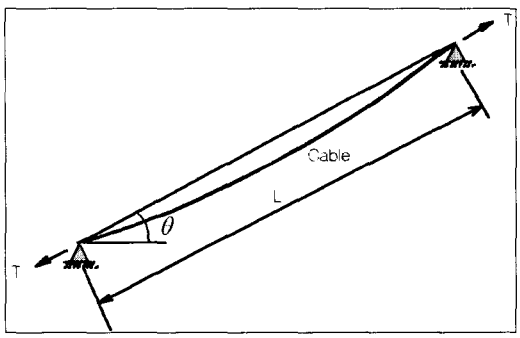
3.1 케이블 모형

진동실험 수행을 위한 케이블모형은 실제 사장교에 적용된 PVC 피복을 갖는 고장력 케이블로서, 실험모형의 설치는 Fig. 1과 같다. 케이블모형의 설치 경사각은 8.37° degree이며, 단면형상과 제원은 Fig. 2 및 Table 1과 같다. Fig. 2와 같이 케이블모형의 단면은 7개의 wire로 이루어진 strand 7가닥으로 구성되어 있다.

실제 케이블모형은 하부 지점에 설치된 유압잭에 의해서 Table 2와 같이 6단계로 나누어 도입장력의 크기(applied tension level)를 증가시켰다. 여기서 도입된 장력은 압력게이지로부터 측정된 값으로서 정확한 케이블 도입장력을 나타내지는 않는다.

실험대상으로 적용된 케이블모형의 무차원 변수 ξ와 Γ를 도입장력의 크기에 따라 계산하면 Table 2와 같다. 얻어진 무차원 변수로부터 케이블모형의 새그효과는 일반적으로 무시할 수 있으며, 휨강성에 의한 영향도 작다고 가정할 수 있다.[4]

Fig. 3은 현재 케이블 지지구조물(사장교, 공간 스타디움 등)에 적용되고 있는 케이블의 다양한 길이에 따른 무차원 변수 ξ를 정리한 것이다. 여기서 휨강성의 영향을 나타내는 무차원 변수 ξ는 일반적으로 20~160사이의 범위를 나타내고 있다. 따라서 본 연구에 사용된 케이블모형은 일반적인 케이블의 특성범위 내에 포함되어 있다.



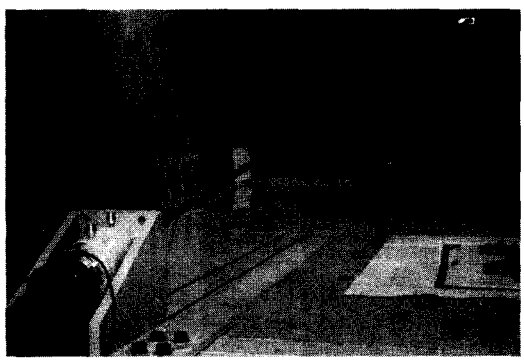


Fig. 1 View of cable installation

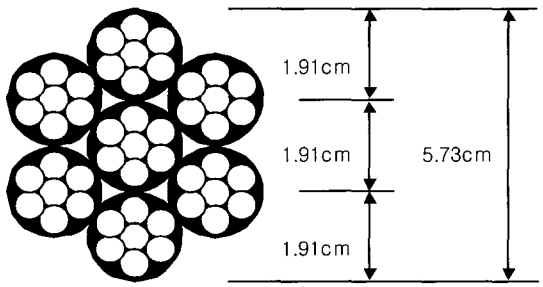


Fig. 2 Cross section of the cable model consisted of 7 strands

Table 1 Cable dimension and properties

L (m)	W (kN/m)	E (kN/m²)	EA (kN)	EI (kN·m²)
44.7	0.08985	1.89×10^8	3.79×10^5	77.36

Table 2 Applied tension level and non-dimensional parameters

Tension level	Measured tension inaccurately (kN)	ξ	Γ
I	200	71.2	49.4
II	300	87.2	91
III	400	100.7	141
IV	500	112.6	191.9
V	600	123.3	246
VI	700	133.2	331.7

3.2 자유진동 실험

케이블의 1차 진동모드를 얻기 위한 자유진동실험(free vibration test)은 3L/8지점에 가속도센서(accelerometer)를 부착하여 저차 진동모드의 가진을 수행하였다. Fig. 4와 5는 각각 도입장력 크기 II에서의 가속도응답신호와 power spectrum을 나타내고 있다.

Fig. 4에 나타난 시간이력에 대한 가속도응답신호로부터 대수감쇠(logarithmic decrement)방법을 이용하여 케이블모형의 1차 진동모드에 대한 모드 감쇠비(modal damping ratio)를 구하면 0.04 %로 얻어진다. 또한 일반적인 사장교 케이블의 감쇠비 산정을 위한 간략식[5]은 다음의 식 (7)로부터 계산할 수 있다.

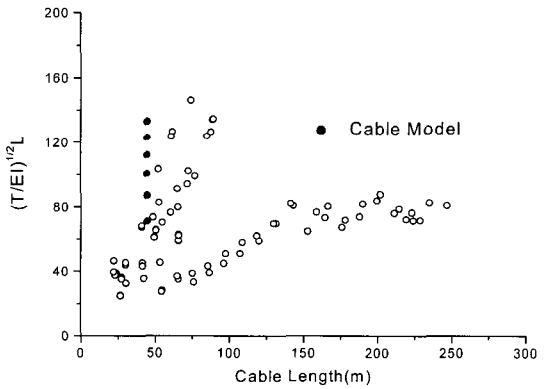


Fig. 3 Relationship between cable length and non-dimensional parameter($\xi=\sqrt{T/EI}\cdot L$) for existing stay cables

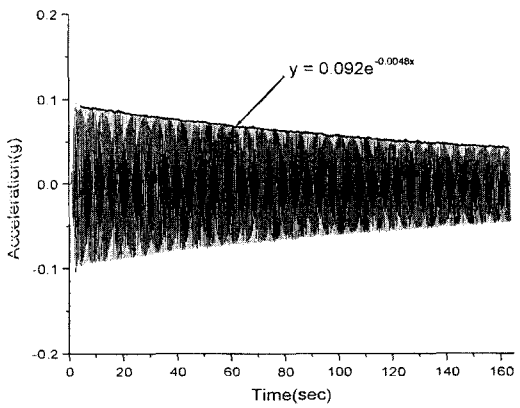


Fig. 4 Acceleration response by free vibration test(applied tension level-II)

$$\beta = 0.24 - 6\times10^{-4}\times L \tag{7}$$

여기서 β는 실제 케이블의 지점조건 등을 고려한 구조적인 감쇠비(%)를 나타내며, 케이블 길이의 단위는 meter이다. 식 (7)로부터 계산된 케이블모형의 구조감쇠비는 0.21 %로써 케이블의 마찰감쇠(friction damping)를 포함하고 있다. 이것은 실제 자유진동실험으로부터 얻어진 1차 진동모드 감쇠비의 약 5배에 해당한다.

도입장력의 크기에 따라 자유진동실험으로부터 얻어진 1차 단일진동모드에 해당하는 각각의 측정 고유진동수는 Table 3과 같다. 일반적으로 실제 케이블에서 1차 진동모드에 대한 자유진동신호를 얻기는 용이하지 않지만 비교적 정확히 측정할 수 있다면, 케이블의 장력을 간편하게 추정할 수 있다. 그러나 1차 진동모드는 케이블의 새그효과에 의한 영향이 가장 민감하게 나타나기 때문에, 무차원 변수 Γ가 작은 경우 측정 고유진동수의 왜곡에 의하여 장력 추정결과의 오차가 커질 가능성이 매우 높다.

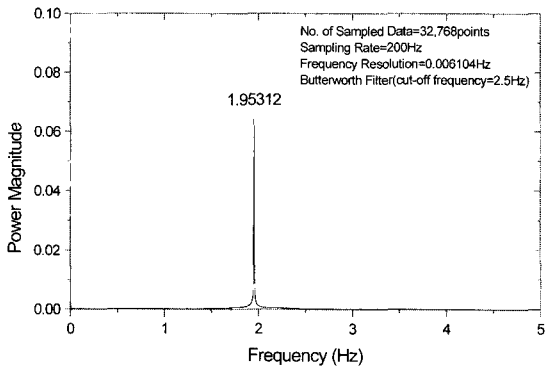


Fig. 5 Power spectrum of acceleration response by free vibration test(applied tension level - II)

Table 3 Measured frequencies on the 1st mode by free vibration test

Tension level	Measured frequency (Hz)
I	1.63
II	1.95
III	2.25
IV	2.52
V	2.77
VI	3.01

3.3 충격하중 실험

다중진동모드를 이용한 케이블 장력추정을 위하여 자유진동실험과 동일한 조건에서 충격하중실험(impulsive test)을 수행하였다. 여기서 충격하중실험의 응답결과는 실제 케이블의 상시진동(ambient vibration)에 의한 계측결과와 상응하는 것으로 간주할 수 있다. 그러나 현장에서 측정된 일반적인 케이블의 상시진동신호를 살펴보면, 원하는 진동모드범위를 만족하지 않는 경우가 있으며 측정된 진동모드의 차수를 명확하게 정의하기 어려운 경우가 있다. 또한 현장여건의 제약으로 인하여 가속도센서가 지점부근에 설치되는 경우가 일반적이기 때문에, 휨강성의 영향이 큰 고차 진동모드가 두드러지게 얻어지는 경우가 있다.

Fig. 6은 도입장력 크기 I에서 충격하중실험으로부터 얻어진 가속도응답신호를 나타내며, Fig. 7~12는 각각의 도입장력 크기에 따라 얻어진 가속도응답신호의 averaged power spectrum이다.

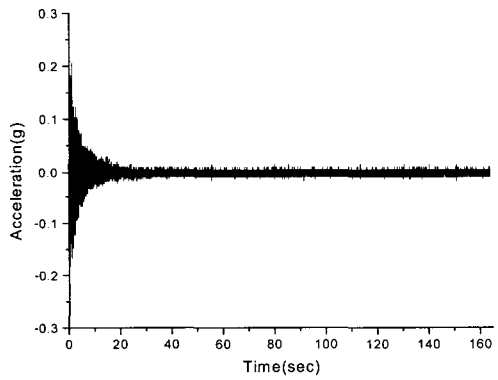


Fig. 6 Acceleration response by impulsive test (applied tension level-I)

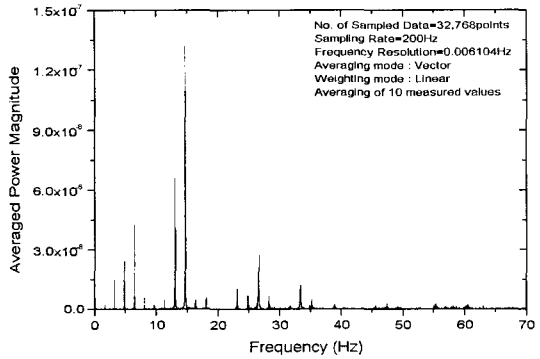


Fig. 7 Averaged power spectrum of acceleration response by impulsive test(applied tension level - I)

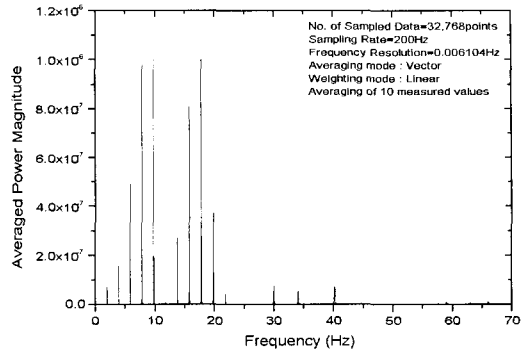


Fig. 8 Averaged power spectrum of acceleration response by impulsive test(applied tension level - II)

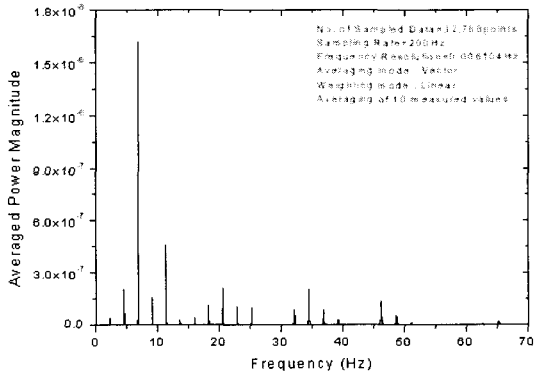


Fig. 9 Averaged power spectrum of acceleration response by impulsive test(applied tension level - III)

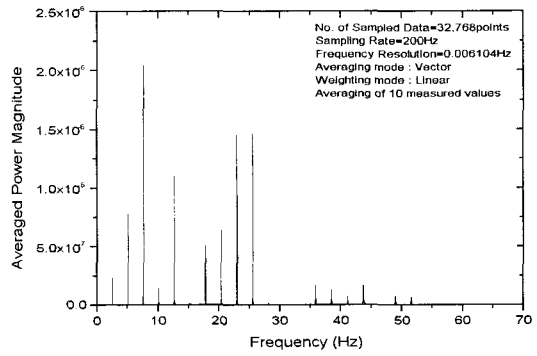


Fig. 10 Averaged power spectrum of acceleration response by impulsive test(applied tension level - IV)

Fig. 7~12에 나타난 결과를 보면, 비교적 고차 진동모드에서 peak이 두드러진다. 또한 케이블모형의 장력추정을 위하여 다중진동모드로써 사용되는 측정 고유진동수는 2번째 진동모드에서 20번째 진동모드까지 사용하였다.

Table 4는 충격하중실험으로부터 얻어진 20번째 진동모드까지의 측정 고유진동수를 도입장력의 크기에 따라 정리한 것이다. 충격하중실험으로부터 얻어진 1차 고유진동수는 Table 3의 자유진동실험 결과와 동일한 값을 보이고 있다.

충격하중실험으로부터 얻어진 각 도입장력 크기에 따른 진동모드의 차수와 측정된 고유진동수와의 상관관계를 Fig. 13에 나타내고 있다. 20번째 진동모드 범위 내에서 측정된 고유진동수는 첫번째 진동모드를 기준으로 정규화(normalization)된 값으로 표현하였다. Fig. 13에서 보이고 있는 상관관계는 식 (2)로부터 다중진동모드를 이용한 장력추정 방법의 신뢰성 검증을 의미한다.

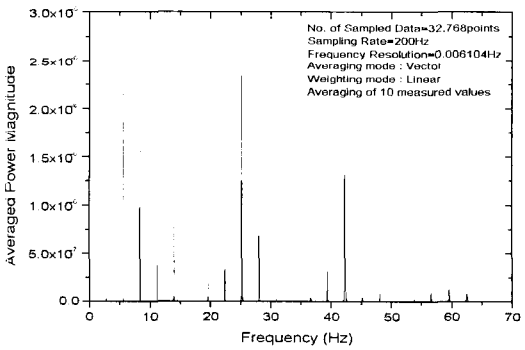


Fig. 11 Averaged power spectrum of acceleration response by impulsive test(applied tension level - V)

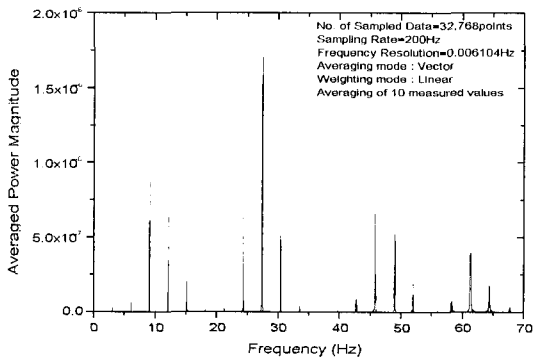


Fig. 12 Averaged Power Spectrum of acceleration response by impulsive test(applied tension level - VI)

만일 케이블이 완전한 현의 거동을 보인다면, Fig. 13의 결과는 기울기가 zero이며 1.0값에 수렴한다. 그러나 실제 케이블의 거동은 부분적으로 휨강성이 나타나기 때문에 Fig. 13과 같이 기울기가 있는 결과가 얻어진다. 따라서 선형관계로 나타나는 고차 진동모드 범위에서 케이블의 장력과 등가정적 휨강성을 추정할

Table 4 Measured frequencies on multiple modes by impulsive test

Mode	Measured frequency (Hz)					
	T.L.I	T.L.II	T.L.III	T.L.IV	T.L.V	T.L.VI
1st	1.63	1.95	2.25	2.52	2.77	3.01
2nd	3.19	3.89	4.48	5.04	5.54	6.02
3rd	4.80	5.85	6.74	7.58	8.33	9.04
4th	6.40	7.80	8.99	10.11	11.13	12.08
5th	8.01	9.78	11.27	12.66	13.91	15.08
6th	9.74	11.77	13.55	15.22	16.75	18.13
7th	11.34	13.76	15.84	17.79	19.56	21.19
8th	13.00	15.78	18.16	20.36	22.41	24.29
9th	14.66	17.78	20.43	22.94	25.17	27.35
10th	16.31	19.81	22.77	25.53	28.07	30.36
11th	18.06	21.84	25.09	28.13	30.87	33.44
12th	19.73	23.88	27.41	30.72	33.67	36.48
13th	21.45	25.90	29.75	33.33	36.58	39.66
14th	23.13	27.91	32.03	35.88	39.36	42.67
15th	24.85	29.98	34.38	38.50	42.26	45.73
16th	26.53	32.02	36.78	41.15	45.13	48.96
17th	28.26	34.07	39.10	43.73	48.01	51.93
18th	30.02	36.20	41.45	46.41	50.90	55.02
19th	31.76	38.20	43.44	48.98	53.79	58.30
20th	33.35	40.18	46.07	51.56	56.50	61.32

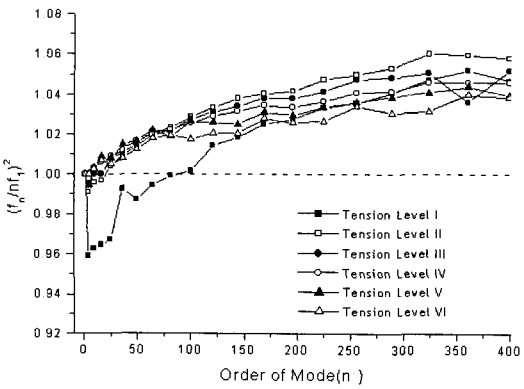


Fig. 13 Normalized frequencies $(f_n/nf_1)^2$ versus n^2

수 있다. 그러나 저차 진동모드에서는 새그효과에 의한 비선형 특성이 발생하기 때문에 왜곡된 장력추정 결과를 얻을 수 있다. 특히 Fig. 13에서 도입장력의 크기 I에서는 저차 진동모드의 새그효과에 의한 영향이 두드러지게 나타나고 있다.

4. 케이블 장력추정 결과 분석

앞서 수행된 케이블의 자유진동실험과 충격하중실험 결과로부터 얻어진 측정된 고유진동수를 기준으로 케이블모형의 장력추정 결과를 분석하였다.

Table 5는 케이블 진동실험에서 얻어진 20개의 진동모드를 각각 식 (1)의 현의 운동방정식에 적용하여 추정된 장력값을 나타내고 있다. 케이블이 현의 거동을 한다고 가정한 장력추정 결과에서 알 수 있듯이, 도입장력의 크기가 작은 경우의 1차 진동모드로부터 추정된 장력은 새그효과로 인하여 비교적 큰 오차를 포함하고 있다. 그러나 나머지 진동모드로부터 추정된 장력은 고차 진동모드로 갈수록 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 케이블의 휨강성이 고려되지 않았기 때문에 고차 진동모드로 갈수록 추정장력이 증가하는 것으로 판단된다.

Table 5 Estimated tension forces by Eq. 1

Mode	Tension force (kN)					
	T.L.I	T.L.II	T.L.III	T.L.IV	T.L.V	T.L.VI
1st	194.45	279.31	369.38	465.24	562.21	662.94
2nd	186.52	276.70	367.38	464.12	562.20	662.94
3rd	187.23	278.14	369.38	466.75	563.86	664.74
4th	187.59	278.43	369.38	468.07	567.17	667.66
5th	188.09	280.36	372.20	469.31	566.67	666.17
6th	192.99	281.93	373.41	470.89	570.49	668.33
7th	191.96	283.06	374.85	473.00	571.44	671.04
8th	193.36	284.79	377.20	474.30	574.66	674.76
9th	194.29	285.74	377.23	475.57	572.71	675.85
10th	194.74	287.22	379.49	477.03	576.91	674.56
11th	197.24	288.59	380.79	478.65	576.71	676.46
12th	197.98	289.88	381.87	479.81	576.33	676.46
13th	199.30	290.56	383.41	481.15	579.48	681.27
14th	199.79	290.90	383.28	480.82	578.78	679.96
15th	200.91	292.49	384.66	482.22	581.02	680.45
16th	201.34	293.22	386.77	484.16	582.35	685.49
17th	202.32	294.08	387.19	484.39	583.82	683.03
18th	203.62	296.14	388.13	486.64	585.28	683.87
19th	204.54	295.90	382.60	486.47	586.71	689.24
20th	203.51	295.51	388.50	486.55	584.34	688.19
Avg.	196.09	287.15	378.86	476.76	575.16	675.67

Table 6은 앞서 언급한 식 (2)와 식 (5)를 기준으로, 각각 다중진동모드와 단일진동모드를 이용하여 추정한 케이블 장력값을 정리한 것이다. 따라서 Table 6에서 얻어진 각각의 추정 장력값은 케이블의 휨강성이 고려되어 있다.

다중진동모드에 의해 추정한 장력값은 1차 진동모드를 제외하고 2차 진동모드에서 20차 진동모드까지의 측정된 고유진동수를 사용하여 얻어진 값으로서, 실제 케이블모형의 도입장력에 가장 근접하는 값으로 간주할 수 있다. 결국 케이블 새그효과를 배제하기 위하여 1차 진동모드를 제외하였으며, 나머지 진동모드에 대한 평균적인 개념의 추정장력과 등가정적 휨강성이 얻어진다. 여기서 얻어진 등가정적 휨강성은 도입장력에 비례하여 증가하지만, Table 1에서 계산된 공칭 휨강성보다는 작은 값을 보이고 있다.

Fig. 14는 2차 진동모드부터 20차 진동모드까지 순차적으로 사용한 진동모드 수를 증가시키면서 계산한 등가정적 휨강성을 나타낸다. 많은 진동모드를 사용함에 따라서 등가정적 휨강성은 점점 감소하며 도입장력의 크기에 관계없이 일정하게 수렴해 가는 경향을 보인다.

케이블의 휨강성을 고려하여 단일진동모드를 이용한 장력추정 결과는 Table 6에 나타나 있다. 1차 진동모드를 이용하여 케이블의 장력을 추정할 경우에 발생되는 오차는 휨강성의 영향보다는 새그효과로 인한 영향이 크게 나타나기 때문에, 실제 도입장력의 크기를 과소평가하게 된다.

Fig. 15는 앞서 각 방법에 의해서 얻어진 추정된 장력값을 다중진동모드를 이용한 결과를 기준으로 그

Table 6 Estimated tension forces by Eqs. 2 & 5

Tension level	I	II	III	IV	V	VI
Estimated by Eq. 2, using multiple modes						
Forces (kN)	189.43	280.36	372.15	469.37	567.64	667.36
$(EI)_{eq}$ (kN·m^2)	8.89	10.37	10.37	10.37	10.37	11.86
Estimated by Eq. 5, using single mode						
Forces (kN)	182.29	264.75	352.66	446.48	541.59	640.56
ξ	71.2	87.2	100.7	112.6	123.3	133.2

상대적인 차이를 나타내고 있다.

케이블의 휨강성이 고려되지 않은 현의 운동방정식을 이용하여 장력값을 추정할 경우, 1차 진동모드를 이용한 결과는 새그효과에 의해서 실제 케이블의 도입장력보다 과대평가될 가능성을 가지고 있다. 또한 고차 진동모드를 이용한 경우에는 케이블의 휨강성이 고려되지 않아 실제보다 큰 장력값을 추정하게 된다. 따라서 고차 진동모드로 갈수록 케이블 휨강성의 영향이 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 5차 혹은 6차 진동모드를 이용해서 추정한 장력은 휨강성이 고려된 다중진동모드를 이용한 결과와 매우 근사한 값을 갖는다. 이것은 케이블의 지점조건으로부터 각 진동모드의 유효길이(effective length)를 정확히 산정할 수 있다면, 가장 단순한 현의 운동방정식으로부터 신뢰성있는 케이블의 장력추정이 가능하다.

케이블의 휨강성을 고려하여 1차 진동모드를 이용한 추정 장력값은 다중진동모드를 이용한 결과와 비교할 때 상당히 큰 오차를 보이고 있다. 특히 도입장력이 작아질수록 전체적으로 오차가 증가하는 경향으로부터 미루어, 단일진동모드를 이용한 장력추정방법의 신뢰성은 무차원 변수 ξ의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 결과적으로 케이블의 1차 진동모드를 사용할 경우는 휨강성의 영향과 무관하게 새그효과에 의해서 왜곡된 장력추정 결과를 얻을 수 있다.

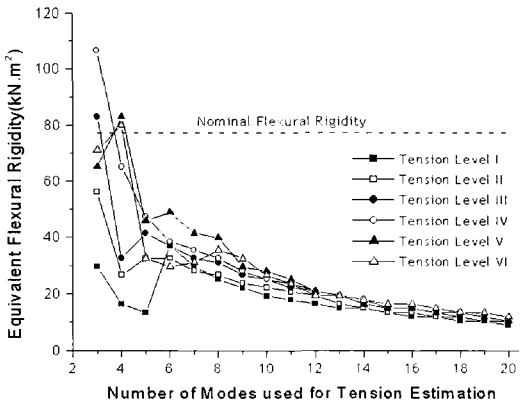


Fig. 14 Equivalent static flexural rigidity

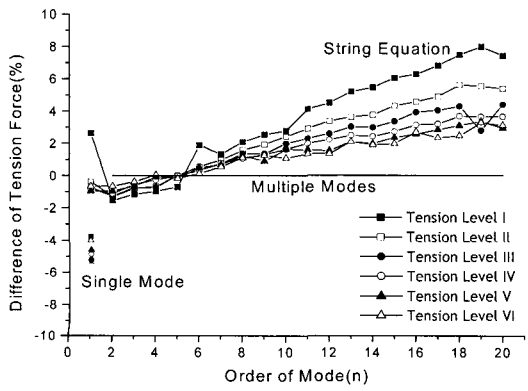


Fig. 15 Comparison of estimated cable tension forces

5. 결 론

본 연구에서는 인장 케이블에 도입된 장력을 간접적으로 추정하기 위하여 기존의 진동법에 대한 실험적인 검증을 수행하였다.

케이블의 장력추정을 위하여 1차 진동모드를 이용할 경우, 케이블 새그효과에 의해서 실제 케이블의 도입장력을 과대평가할 가능성이 있다. 특히, 도입장력이 작을수록 상대적으로 새그효과가 커지기 때문에 장력추정 결과의 신뢰도는 낮아진다.

케이블의 휨강성을 고려하지 않은 현의 운동방정식을 이용한 장력추정 결과는 고차 진동모드를 이용할 경우 실제 케이블의 도입장력을 역시 과대평가할 수 있다. 결국 고차진동모드로 갈수록 케이블의 휨강성 영향은 증가하는 경향을 보인다.

참 고 문 헌

(1) Humar, J. L., 1990, Dynamics of Structures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

(2) Cunha, A., Caetano, E. and Delgado, R., 2001, "Dynamic Tests on Large Cable-stayed Bridge", Journal of Bridge Engineering, Vol. 6, No. 1, ASCE, pp. 54~62.

(3) 島田忠幸, 1996, "橋梁ケーブルの張力測定と維持管理に關する研究", Ph.D Thesis, 神戶大學.

(4) Zui, H., Shinke, T. and Namita, Y., 1996, "Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method", Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 6, ASCE, pp. 661~666.

(5) 안상섭 등, 1998, "지점운동에 의한 케이블 공진과 길이조절에 의한 제진 대책 연구", 한국도로공사, 연구보고서 도로연 98-67-41.

(6) 장서일, 1998, "2:1 내부공진을 갖는 케이블의 비선형 진동의 분기해석", 한국소음진동공학회논문집, 제8권, 제6호, pp. 1144~1149.