

다양한 해석적 방법에 의한 케이블 구조의 장력 추정

노명현¹ · 이상열²

포항산업과학연구원 강구조연구소 에너지인프라본부 선임연구원¹, 안동대학교 토목공학과 조교수²

Tension Force Identification of Cable Structures using Various Analytical Methods

Noh, Myung-Hyun¹ · Lee, Sang-Youl²

¹Sr. Researcher, Energy Infrastructure Research Department, Steel Structure Research Division, Research Institute of Industrial Science & Technology, POSCO Global R&D Center, South Korea

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, South Korea

Abstract: The method based on various mathematical characteristic equations for identifying tensile forces in the cable structure system are used as response data to reflect the properties of the dynamic sensitivity. The vibration tests have been conducted with respect to levels of applied weight for the sagged cable. In this study, a set of natural frequencies are extracted from the measured dynamic data. Next, existing characteristic equation methods based these extracted natural frequencies are applied to identify tensile forces of the sagged cable system. Through several verification procedures, the proposed methods could be applied to a sagged cable system when the initial material data are insufficiency.

Key Words: analytical identification, dynamic response, natural frequency, tensile force

1. 서론

케이블을 주재료로 시공된 교량은 시공단계에서 구조계가 수시로 변하기 때문에 주탑(Pylon)의 처짐에 따라 케이블 장력이 변화로 인한 시공오차가 발생된다. 또한 교량의 시공시 단면상수 산정오차, 사하중 오차, 제작오차, 측정오차(계측 정밀도), 케이블 설치길이 오차 등에 의하여 발생하는 케이블 장력의 오차, 오차의 누적에 따른 장력의 변화가 발생된다. 이러한 장대교량의 주요부재로 사용되는 케이블에 대한 장력관리 기술은 시공과정과 준공 이후에도 필요하며, 이는 교량의 가설시의 안전사고 예방과 유지관리 측면에서 필요한 핵심기술이다(Park and Kim, 2005).

장력추정 기법 중, 정적 방법으로는 로드셀(Load Cell)과 유압잭(Hydraulic Jack)을 이용한 방법과 동적 방법으로는 수학적 모델의 특성방정식(Characteristic Equation)과 고유진동수를 이용한 현이론(Taut String Theory)과 축하중을 받는 보(Axially loaded beam)에 의한 이론이 있으며, 또한 컴퓨터의 발달로 인하여 시스템 인식기법의 적용이 수월해 짐에 따라 시스템 인식기법의 도입이 고려되었다(Lee and Noh, 2010). 정적인 방법 중, 로드셀을 이용하는 방법은, 인장 정착부 또는 고정 정착부의 지압판에 로드셀을 부착하여 장력을 계측하는 방법으로 정확한 장력측정이 가능하다는 장점이 있으나, 비용이 고가이고, 구조물에 비해 수명이 짧기 때문에 센서 오작동과 유지보수가 곤란하다. 또한 유압잭을 이용하는 방법은, 케이블 단부에 설치한 유압잭의 압력을 측정하여 케이블에 도입된 장력을 계측하는 방법이다. 사장교 케이블의 경우 장연선 1본의 장력을 계측하여 케이블 1본의 장력을 추

주요어: 해석적 규명, 동적응답, 고유진동수, 장력

Corresponding author: Lee, Sang-Youl

Department of Civil Engineering, Andong National University, 388 Songchon-dong, Andong, Kyongsangbuk-do 760-749, South Korea
Tel: +82-54-820-5847, E-mail: lsy@andong.ac.kr

투고일: 2012년 8월 3일 / 수정일: 2012년 9월 6일 / 게재확정일: 2012년 9월 10일

정하기 때문에 로드셀을 이용하는 방법보다는 저렴하나 정확도가 다소 떨어진다. 또한 유압잭을 설치할 위한 작업공간이 확보되어야 하는 단점이 있다. 동적인 방법은 정적인 방법들에 비해서 비교적 신속하고 경제적이어서 실무에서 빈번히 사용된다. 수집된 시간이력 가속도를 이용하여 고유치 추출기법(Modal Analysis)을 통해서 대상케이블의 고유진동수가 추출된다(Park et al., 2006).

케이블의 단순화된 수학적모델의 해(장력과 고유진동수 사이의 관계식)를 이용하여서 계측된 고유진동수로부터 장력을 역산하는 방법들이 실무에서 유용하게 이용된다. 이는 대상 케이블의 역학적 거동 메커니즘이 단순화된 수학적 모델과 유사할 경우, 비교적 정확한 장력 값을 얻을 수 있다(Irvine, 1981). 그러나, 측정하고자 하는 케이블의 형상이 단순화된 수학적 모델과 상이 할 경우에는 추정된 장력 값의 신뢰도는 크게 떨어진다. 예를 들면, 현수교 행어와 같이 두 개의 독립된 케이블을 클램프(Clamp)를 이용하여서 구속되어 있다면, 전체 케이블 시스템의 역학적 거동 메커니즘에 대한 정확한 해를 알지 못하기 때문에, 정확한 장력의 추정이 어렵다. 또한 케이블의 새그가 클 경우는 추정된 장력 값의 신뢰도가 크게 떨어지게 된다. 또한, 케이블의 새그가 커지면, 케이블내의 장력변화를 무시할 수 없다. 예를 들면, 현수교의 주케이블은 일반적으로 새그의 크기가 커서 케이블내의 장력이 일정하지 않다. 이러한 경우는 앞서 언급한 동적인 방법들로는 정확한 장력의 추정이 불가능하다. 또한, 사장교 케이블의 경우는, 가설시 단단계 긴장으로 인해서 경사 케이블은 준공 전까지 광범위한 새그 값의 변화가 발생된다. 도입장력이 상대적으로 낮은 경우는 새그가 상대적으로 커서 추정 장력에 큰 오차가 포함될 수 있다.

본 연구에서는 본격적인 수치해석 방법에 의한 접근에 선행하여 다양한 수학적 모델의 특성방정식에 대하여 케이블 구조의 장력을 추정하는 기법을 개발하고자 하며 수치해석 기법의 기반 연구자료로 제시하고자 한다.

2. 해석 모델 및 고유진동수 추출

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 새그를 갖는 경사 케이블에 대하여 해석을 수행하였다. Table 1에 나타난 4가지 수평 케이블은 Ni et al.(2002)이 제안한 수평케이블 수치실험의 검증예제와 동일한 조건을 만족하고, 케이블의 경사각(θ)을 주었다. 이를 통해 수학적 모델의 의한 특성방정식을 이용한 방법에 의하여 장력 추정을 수행하기로 한다. 해석 대상 케이블 구조의 단위길이당 질량(m)은 400kg/m이고, 케이블의 길이(L)

는 100m이고, 케이블의 경사각(θ)은 30° 이고, 중력 가속도(g)는 9.8m/sec^2 이 각각 사용되었다. 동일한 길이를 갖는 60개의 선형 범요소가 이용되었고, 케이블의 처짐 형상은 포물선 가정된다. 또한 그림에서 h는 케이블의 높이를, l은 수평길이를 각각 나타낸다. 또한, A와 I는 케이블의 공칭단면과 단면 모멘트를 각각 의미하고, H는 수평력을 나타낸다. 또한 E, A, I는 Table 1에 제시된다.

Table 1에서 재료 특성과 기하학적 형상에 따른 특성치를 보여준다. 여기서, NTS1 작은 새그에 큰 휨강성을 가지고 있는 케이블을, NTS2 새그가 크고 휨강성이 보통인 경우를, NTS3 새그와 휨강성이 중간 정도이고, NTS4는 중간 정도의 새그에 큰 휨강성의 케이블을 각각 의미한다.

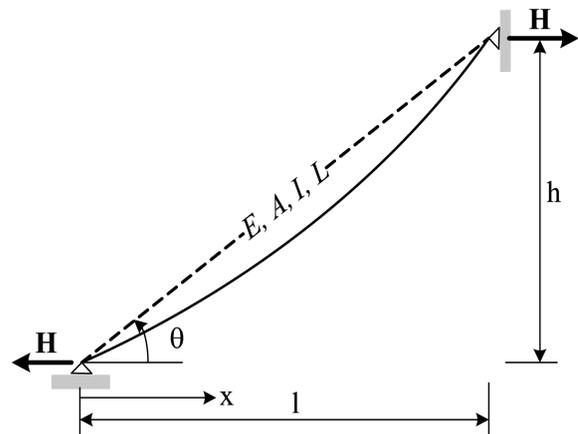


Fig. 1 Sagged cable model for the numerical test

Table 1의 재료 물성치와 기하학적 특성으로부터, 총 20차까지의 케이블 길이방향의 직각방향에 대한 고유진동수가 Table 2와 같이 추출되었다. 이렇게 추출된 고유진동수를 기반으로 기존 수학적 모델을 이용한 장력추정법을 적용하게 된다.

이렇게 추출된 고유진동수에 대한 모드 형상 중 NTS4에 대한 첫 번째 종축 방향 비대칭 모드에 대하여 종, 횡축방향에 대한 모드형상이 Fig. 2에 제시된다. 이때 케이블 길이 방향에 대한 최대크기는 중앙점이 아닌 약1/4 지점에서 발생된다(Irvine 과 Caughey, 1974).

Table 1. Material characteristic and geometric parameters of the four numerical cable models

| No. of Test | NTS1 | NTS2 | NTS3 | NTS4 |
|------------------------|---------|---------|----------|---------|
| λ^2 | 0.079 | 5075.8 | 1.41 | 0.508 |
| ξ | 1923.5 | 3.0295 | 50.459 | 505.113 |
| H(MN) | 2.90360 | 0.72590 | 26.13254 | 0.72590 |
| E(GPa) | 1.5988 | 17.186 | 20826.0 | 0.00478 |
| A($10^{-3}m^2$) | 7.8507 | 7.6110 | 7.8633 | 273.45 |
| d(m) | 0.1 | 0.984 | 0.1001 | 0.5901 |
| I($10^{-6}m^4$) | 4.9535 | 4.6097 | 4.9204 | 5950.6 |
| T _{max} (MN) | 3.4409 | 0.9348 | 30.261 | 0.9348 |
| T _{mean} (MN) | 3.3539 | 0.8427 | 30.175 | 0.8427 |
| T _{min} (MN) | 3.2711 | 0.7675 | 30.091 | 0.7675 |

Table 2. Extracted natural frequencies from the numerical FE model(Hz)

| No. of mode | NTS1 | NTS2 | NTS3 | NTS4 |
|-------------|--------|---------|---------|--------|
| 1 | 0.4583 | 0.9689 | 1.4044 | 0.2307 |
| 2 | 0.9129 | 1.9039 | 2.7650 | 0.4618 |
| 3 | 1.3728 | 3.1253 | 4.1827 | 0.6761 |
| 4 | 1.8307 | 3.6291 | 5.6388 | 0.9110 |
| 5 | 2.2885 | 5.6211 | 7.1490 | 1.1409 |
| 6 | 2.7461 | 7.9832 | 8.7235 | 1.3700 |
| 7 | 3.2040 | 10.8347 | 10.3737 | 1.5994 |
| 8 | 3.6618 | 14.1039 | 12.1093 | 1.8220 |
| 9 | 4.1197 | 17.8257 | 13.9393 | 2.0572 |
| 10 | 4.5775 | 21.9727 | 15.8718 | 2.2869 |
| 11 | 5.0354 | 26.5694 | 17.9140 | 2.5167 |
| 12 | 5.4933 | 31.6098 | 20.0721 | 2.7467 |
| 13 | 5.9512 | 37.0677 | 22.3518 | 2.9774 |
| 14 | 6.4093 | 42.9752 | 24.7581 | 3.2072 |
| 15 | 6.8673 | 49.3165 | 27.2951 | 3.4381 |
| 16 | 7.3254 | 56.1007 | 29.9668 | 3.6693 |
| 17 | 7.7836 | 63.3273 | 32.7763 | 3.9009 |
| 18 | 8.2418 | 70.9878 | 35.7266 | 4.1329 |
| 19 | 8.7001 | 79.0923 | 38.8204 | 4.3650 |
| 20 | 9.1584 | 87.6422 | 42.0600 | 4.5978 |

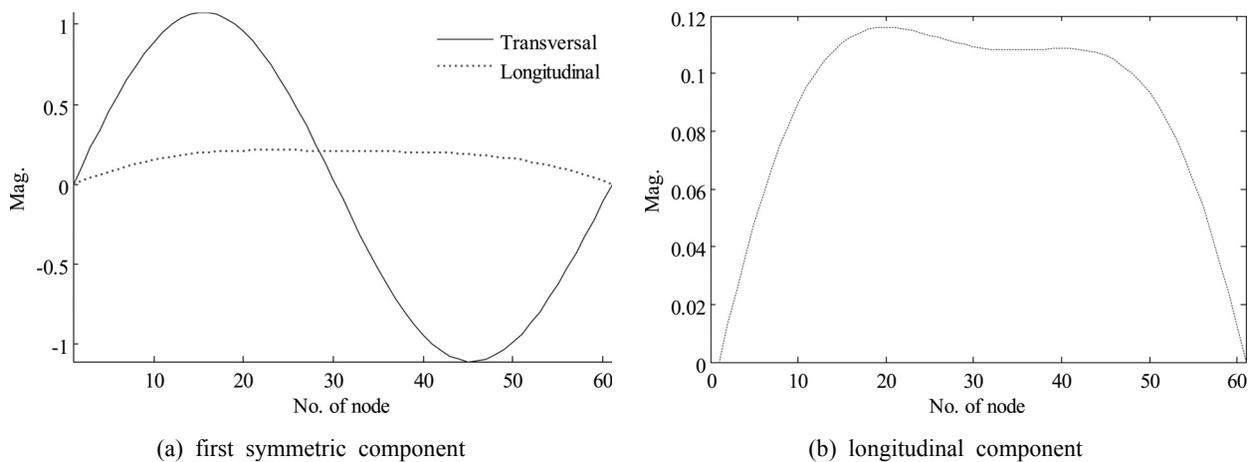


Fig. 2 NTS4 Longitudinal components and associated vertical components of the first antisymmetric in-plane modes(vertical scale arbitrary)

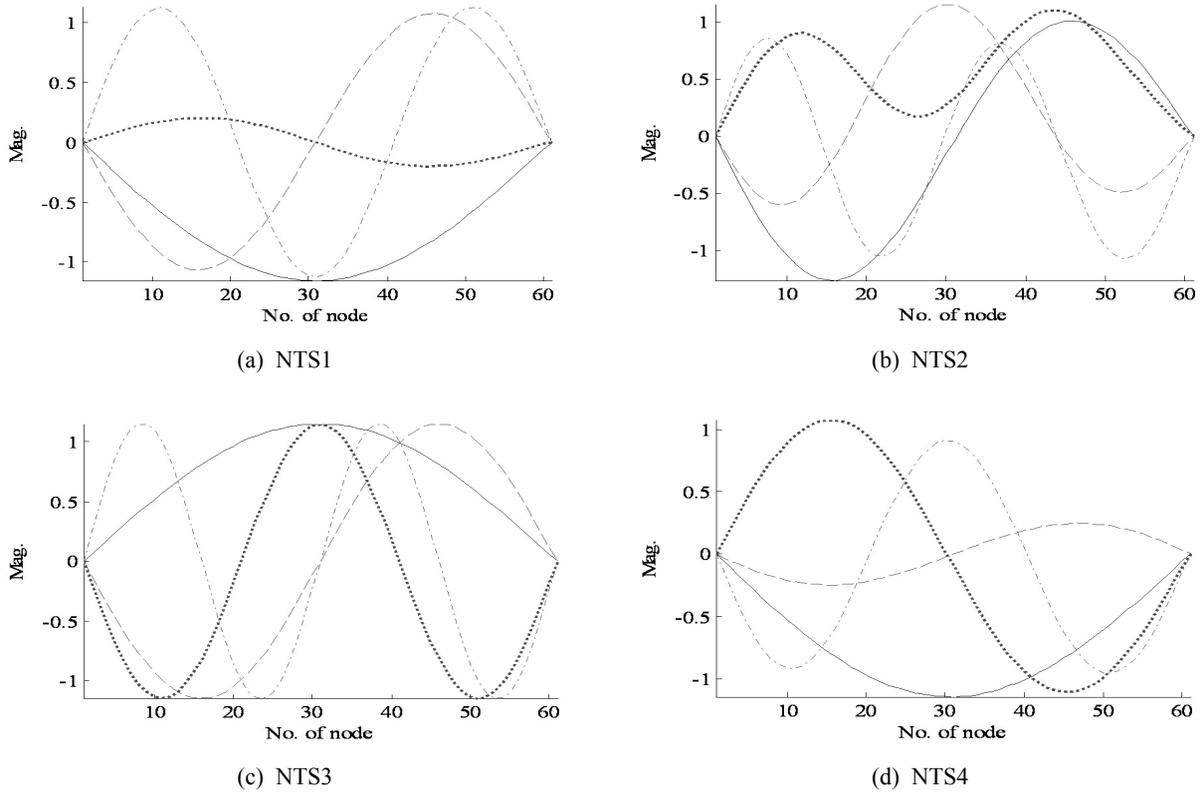


Fig. 3 Transversal component mode shapes(1st~4th)for the sagged cable

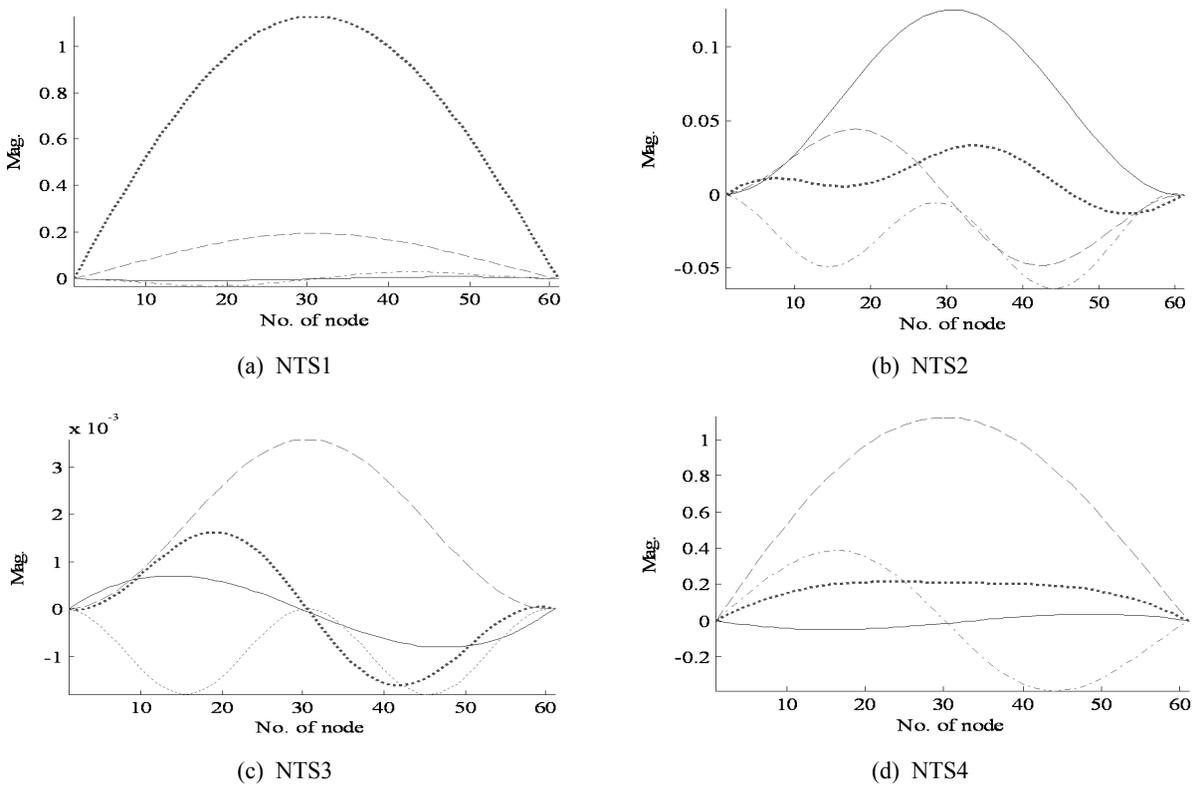


Fig. 4 Longitudinal component mode shapes(1st~4th)for the sagged cable

Table 3. Line pattern for the each mode

| No. of mode | 1 st | 2 nd | 3 rd | 4 th |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Line pattern | ————— | ————— | - - - - - | ————— |

Fig. 3~4는 케이블 직각방향과 길이방향에 대하여 각 실험별 모드형상을 보여준다. Table 3에서는 각 모드에 따른 선 양식을 나타낸다. Fig. 3(b)와 같이 케이블의 새그가 큰 경우, 대칭형 진동 모드에서 비대칭형 진동 모드로의 전이가 발생하는 복합모드 형상이 발견된다(Triantafyllou, 1984). 또한 Fig. 3(a,d)에서 큰 휨강성을 갖는 NTS1, 4의 경우, 축방향 모드의 영향으로 종축 모드형상이 혼합됨이 확인된다.

3. 수학적 모델의 특성방정식에 의한 장력추정

3.1 현이론을 이용한 장력추정

새그와 휨강성 모두를 고려하지 않은 방법인 현이론에 의한 수치실험의 고유진동수를 이용하여 추정된 장력이 각 모드에 대하여 Table 4와 같이 계산되었다.

현이론의 경우, 케이블의 축강성, 휨강성이 모두 무시되고, 장력과 고유진동수와의 관계만 고려되었으므로, Table 4의 추정된 평균 장력값은 실제 평균 장력값과 큰 차이를 보인다. 비교적 큰 새그를 갖는 NTS2의 경우 상대비교 오차가 컸으며, 큰 휨강성을 갖는 NTS3에서도 큰 오차를 보였다. 새그비가 상대적으로 작은 NTS1, 4의 경우 1%이내의 오차를 보였다. NTS2의 *는 100% 이상의 RPE를 표시한다. 여기서 RPE는 비율 오차(Relative Percentage Error)를 의미하며 식(1)과 같다. Eq. (1)에서 x_i 는 추정된 i 번째 인식변수의 추정값을 x_i^e 는 실제값을 각각 의미한다.

$$RPE = \frac{|x_i - x_i^e|}{|x_i^e|} \times 100 \tag{1}$$

Table 4. Estimated tensile force using Taut string theory for the each mode

| No. of mode | Estimated horizontal force(MN) | | | |
|----------------|--------------------------------|----------|---------|--------|
| | NTS1 | NTS2 | NTS3 | NTS4 |
| 1 | 3.3606 | 15.0203 | 31.5574 | 0.8516 |
| 2 | 3.3335 | 14.4993 | 30.5809 | 0.8530 |
| 3 | 3.3504 | 17.3644 | 31.1022 | 0.8126 |
| 4 | 3.3515 | 13.1704 | 31.7961 | 0.8299 |
| 5 | 3.3518 | 20.2219 | 32.7092 | 0.8331 |
| 6 | 3.3516 | 28.3251 | 33.8220 | 0.8342 |
| 7 | 3.3520 | 38.3317 | 35.1392 | 0.8353 |
| 8 | 3.3522 | 49.7300 | 36.6588 | 0.8299 |
| 9 | 3.3525 | 62.7665 | 38.3811 | 0.8360 |
| 10 | 3.3526 | 77.2479 | 40.3062 | 0.8368 |
| 11 | 3.3528 | 93.3465 | 42.4346 | 0.8375 |
| 12 | 3.3529 | 111.0199 | 44.7655 | 0.8383 |
| 13 | 3.3531 | 130.0842 | 47.2997 | 0.8393 |
| 14 | 3.3534 | 150.7647 | 50.0378 | 0.8397 |
| 15 | 3.3536 | 172.9506 | 52.9794 | 0.8406 |
| 16 | 3.3538 | 196.7055 | 56.1256 | 0.8415 |
| 17 | 3.3542 | 222.0261 | 59.4760 | 0.8425 |
| 18 | 3.3544 | 248.8527 | 63.0316 | 0.8435 |
| 19 | 3.3548 | 277.2562 | 66.7933 | 0.8445 |
| 20 | 3.3551 | 307.2462 | 70.7617 | 0.8456 |
| $T_{mean}(MN)$ | 3.3523 | 112.3465 | 44.7879 | 0.8383 |
| RPE(%) | 0.0477 | * | 48.4272 | 0.5221 |

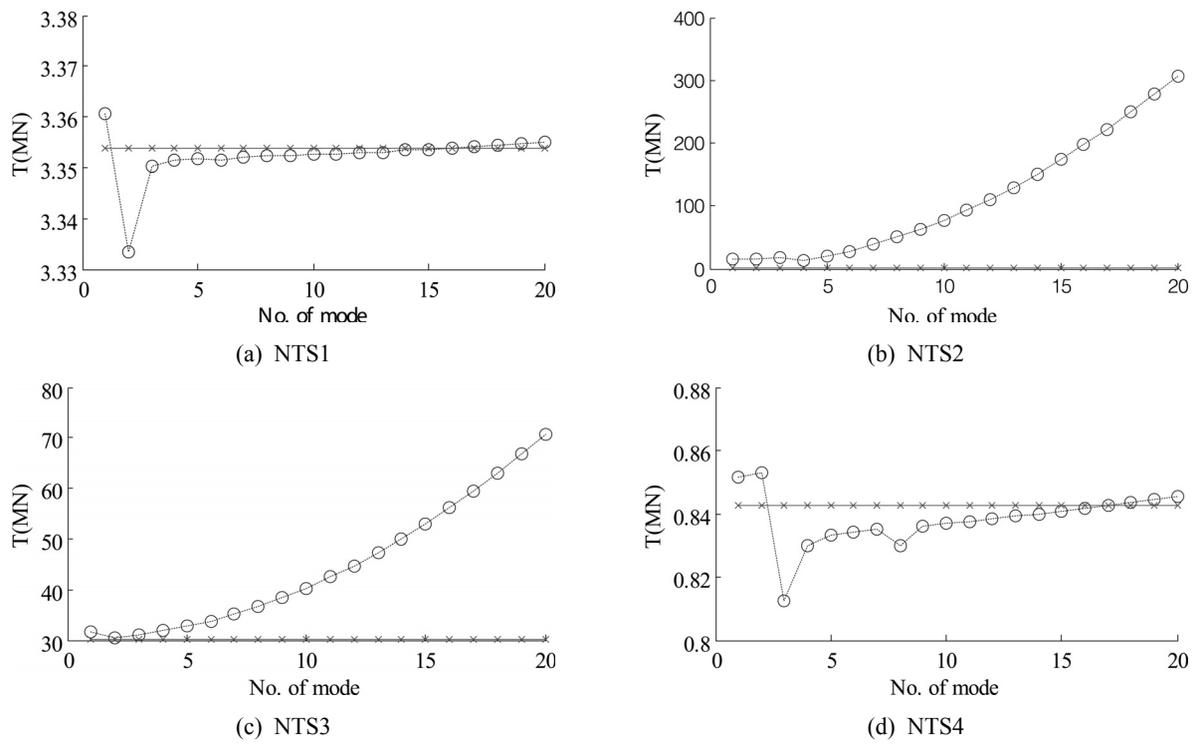


Fig. 5 Estimated tensile force using Taut string theory and exact average tensile force for the each mode

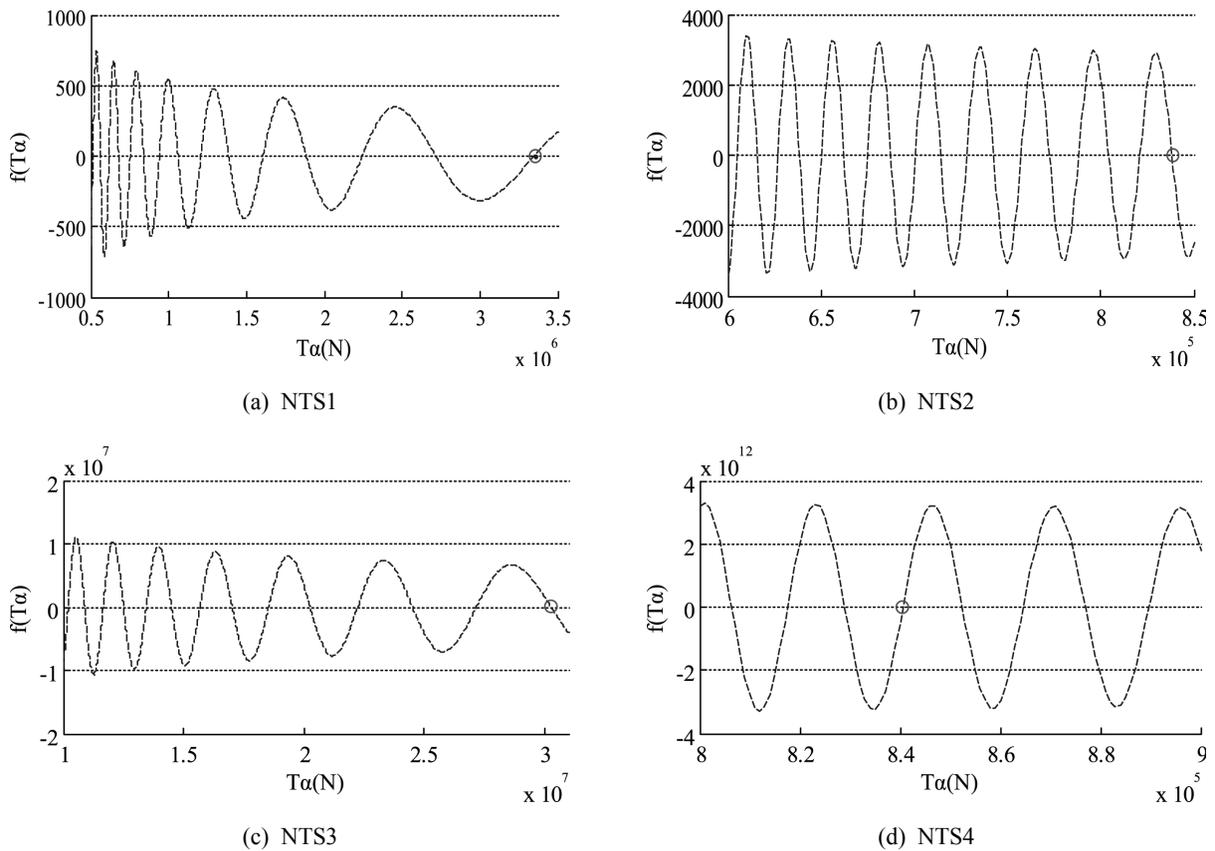


Fig. 6 Estimated tensile force using Triantafyllou and Grinfogel method

Table 5. Estimated tensile force using Triantafyllou and Grinfogel method

| No. of mode | Estimated horizontal force(MN) | | | |
|-----------------------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | NTS1 | NTS2 | NTS3 | NTS4 |
| 1 | 3.359 | 0.623 | 31.56 | 0.877 |
| 2 | 3.333 | 0.727 | 30.58 | 0.850 |
| 3 | 3.351 | 0.797 | 31.10 | 0.864 |
| 4 | 3.351 | 0.823 | 31.80 | 0.814 |
| 5 | 3.351 | 0.808 | 32.71 | 0.851 |
| 6 | 3.351 | 0.832 | 33.82 | 0.844 |
| 7 | 3.352 | 0.815 | 35.14 | 0.850 |
| 8 | 3.352 | 0.828 | 28.97 | 0.836 |
| 9 | 3.352 | 0.836 | 31.09 | 0.835 |
| 10 | 3.352 | 0.838 | 33.31 | 0.846 |
| 11 | 3.352 | 0.839 | 30.38 | 0.844 |
| 12 | 3.352 | 0.839 | 32.89 | 0.832 |
| 13 | 3.353 | 0.838 | 31.23 | 0.832 |
| 14 | 3.353 | 0.836 | 30.27 | 0.841 |
| 15 | 3.353 | 0.834 | 29.80 | 0.828 |
| 16 | 3.353 | 0.838 | 29.69 | 0.837 |
| 17 | 3.354 | 0.836 | 29.84 | 0.829 |
| 18 | 3.354 | 0.839 | 30.21 | 0.839 |
| 19 | 3.354 | 0.836 | 30.76 | 0.834 |
| 20 | 3.354 | 0.837 | 31.45 | 0.836 |
| T_{α} mean(MN) | 3.352 | 0.815 | 31.33 | 0.841 |
| RPE(%) | 0.057 | 3.287 | 3.827 | 0.202 |
| No. of Mode | 13 th | 13 th | 18 th | 18 th |

Fig. 5는 현 이론의 의해 추정된 장력과 실제 평균 장력이 각 실험별로 제시된다. 여기서 실선으로 표시된 것은 추정된 장력 값이며, 점선으로 표시된 것은 실제 평균장력을 의미한다. 상대적으로 적은 새그를 갖는 NTS1, 4는 실제값에 유사한 값이 계산되었으나, 상대적으로 큰 새그를 갖는 NTS2의 경우 실제값과 큰 차이를 보이고, NTS3의 경우 저차모드에서 유사한 값을 갖으나 고차모드로 갈수록 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

3.2 Triantafyllou과 Grinfogel의 제안식을 이용한 장력추정

새그를 고려한 경사케이블에 대한 분석적 비선형 특성방정식을 시산법을 이용하여 장력을 추정하는 Triantafyllou과 Grinfogel의 제안방법을 이용하여 Table 5와 같이 수치모델에 대한 장력이 각 모드별로 추정되었다. 여기서 T_{α} 는 경사각과 정적처짐에 의한 각이 동일한 지점의 장력을 의미한다(Triantafyllou and Grinfogel, 1986).

추정된 평균 T_{α} 는 모든 수치 실험에서 실제 평균 장력값과 4%이내의 오차를 보이며 비교적 정확한 장력이 추정되었음을 확인할 수 있다. 또한, 현이론과 비교하여 합리적인 결과가 도출되었음이 확인된다. 이는 현이론의 경우 새그를 무시하였으나, Triantafyllou and Grinfogel 방법의 경우 새그를 고려되었기 때문으

로 보인다. 그러나 시산법에 의해 해석되므로 상당한 분석시간이 소요된다. Figure 6에서는 Triantafyllou과 Grinfogel 방법에 의해 시산법을 적용할 때, 해를 찾는 위치가 제시된다. 시산법의 적용시 정확해에 대한 정보가 있어야 한다. 만약 해에 대한 정보가 부족할 경우, 장력 추정의 어려움이 따른다.

3.3 축하중을 받는 보

휨이 고려되고 새그가 무시된 장력 추정법으로 축하중을 받는 보에 대하여 고유진동수와 휨강성, 평균 장력과의 관계를 이용한 방법으로 수치실험에 대하여 Table 6과 같이 장력과 휨강성이 추정되었다. 저차모드를 포함한 경우는 1~20차까지의 고유진동수가 사용되었고, 저차모드를 포함하지 않은 경우는 6~20차까지 이용되었다.

큰 새그를 갖는 NTS2를 제외하고 추정된 장력은 실제 평균장력과의 상대오차가 1%이내로 정확히 추정되었음을 확인할 수 있다. 또한 고차모드(6~20차)를 이용할 경우 저차모드(1~20차)를 포함한 경우와 동일하게 NTS2를 제외한 추정장력은 1%내로 정확히 추정되었다. 또한 NTS2의 장력추정의 오차도 상대적으로 크게 줄었다. 저차모드를 포함한 경우에서, NTS1의 경우 휨강성에 대한 큰 추정오차를 보이나 고차모드를 이용한 경우, 상대적으로 적은 오차를 보이고 있

다(Park and Kim, 2005). 그러나 NTS4의 경우 고차모드만 이용할 경우 저차모드를 포함한 경우와 비교하여 추정오차가 늘어남이 확인되었다. 이는 Park and Kim(2005)의 선형회귀법의 고차모드의 많은 이용이 정확성을 높인다는 내용과 상반되고, 단순 많은 고차모드의 이용이 아닌 고차모드의 적절한 개수의 선정에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다.

또한 축하중을 받는 보의 특성방정식을 이용한 방법은 새그가 고려되지 않음으로 인한 NTS2에서 장력과 휨강성 모두 큰 추정오차가 발생되었다. 이는 새그를 갖는 케이블의 경우, 축하중을 받는 보의 특성방정식의 적용 시 모델의 상이함에서 오는 모델 오차로 보인다. Fig. 7에서는 고차모드(6~20차)를 이용할 경우, 선형회귀법에 의해 추정된 결과를 각 수치실험별로 제시된다.

3.4 저차모드법과 고차모드법

휨과 새그를 모두 고려한 Yen et al.(1997)의 저차모드법과 고차모드법을 적용하여 수치실험의 고유진동수를 이용하여, Table 7과 같은 결과가 도출되었다.

Table 7에서 Γ , ξ_i 는 Eq.(1)을 따르고, δ 는 새그비를 의미한다. 비교적 새그가 큰 NTS2의 경우, 실제 평균장력과의 오차가 큰 값으로 추정되었다. NTS2를 제외한 수치실험에서 8%이내의 오차를 보이며, 평균장력이 추정되었다. 그러나, Zui와 Yen이 제안한 저차모드법은 새그를 갖는 케이블의 경우, 저차 모드의 고유진동수의 추출이 어렵고, 또한 요구되는 물리량이 많다는 단점을 갖는다. 고차모드법의 경우, 케이블 길이에 비하여 축하중이 큰 경우인 NTS2,3의 경우는 제안식이 적용되지 못하였고, NTS1, 4에서는 실제 장력의 8%이내의 오차를 보이며 추정되었다.

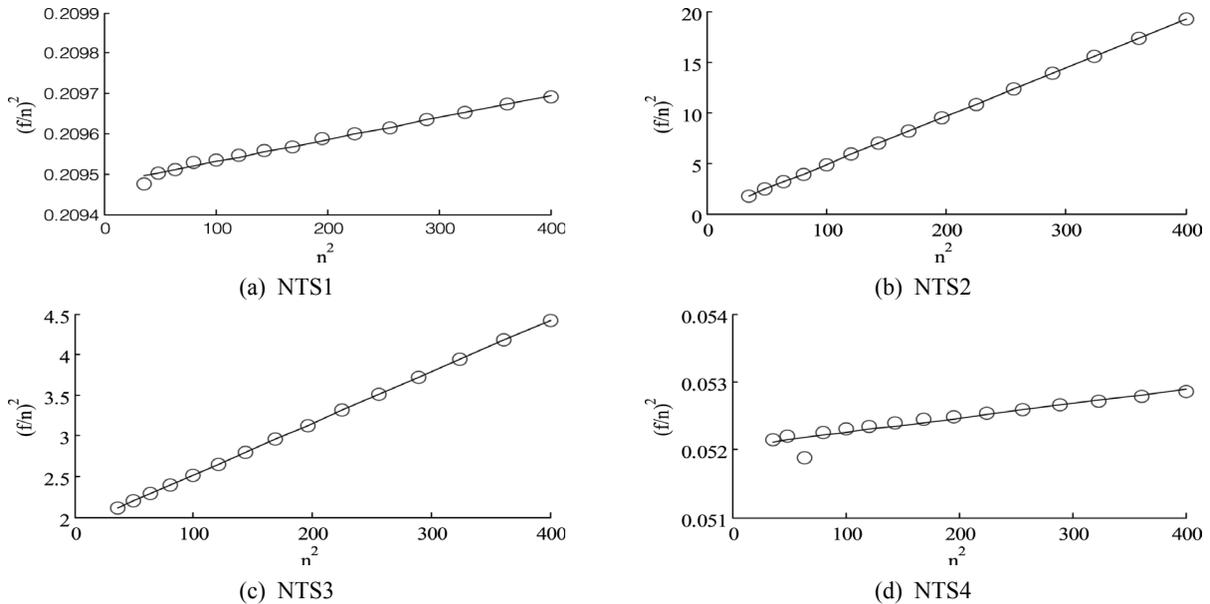


Fig. 7 Estimated tensile force using linear regression method

Table 6. Estimated tensile force using linear regression method

| Mode | No. of NTS | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [1 20] | T(MN) | 3.350 | 4.6508 | 30.3178 | 0.8345 |
| | RPE(%) | 0.0835 | * | 0.4722 | 0.4414 |
| | EI(10^9Nm^2) | 1.3632×10^4 | 7.6041×10^8 | 1.0217×10^8 | 2.6777×10^4 |
| | RPE(%) | 73.698 | 3.8563 | 0.4579 | 5.8838 |
| [6 20] | T(MN) | 3.3516 | 0.6904 | 30.1601 | 0.8326 |
| | RPE(%) | 0.0358 | 17.6330 | 0.0504 | 0.6681 |
| | EI(10^9Nm^2) | 8.8808×10^3 | 7.7612×10^8 | 1.0280×10^8 | 3.4350×10^4 |
| | RPE(%) | 13.159 | 1.870 | 0.1559 | 20.7339 |

Table 7. Estimated mean tensile force using Zui, Yen, and higher frequencies method

| No. of NTS | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------|----------|------------------|--------|--------|------------------|
| Zui(1996) | T(MN) | 3.3535 | 2.9402 | 29.031 | 0.68515 |
| Yen(1997) | RPE(%) | 0.0119 | * | 3.791 | 0.273 |
| | T(MN) | 3.339 | - | - | 0.830 |
| | RPE(%) | 0.4443 | - | - | 0.978 |
| Note | Γ | 12.671 | 0.145 | 3.173 | 4.930 |
| | ξ_1 | 2067.3 | 3.264 | 54.221 | 544.220 |
| | δ | 0.0146 | 0.0585 | 0.0016 | 0.0585 |
| | Mode | 10 th | - | - | 10 th |

4. 요약 및 결론

본 논문에서는 케이블 구조의 장력 추정을 위하여 다양한 수학적 특성방정식을 적용하였다. 새그와 휨강성에 영향으로 인한 해석 모델에서 각각의 기법 적용에 따른 오차가 발생되었다. 현이론의 경우, 새그와 휨강성이 모두 큰 NTS2와 작은 새그와 큰 휨강성을 갖는 NTS3에서 큰 오차를 보인다. 또한, Triantafyllou와 Griufogel의 특성방정식의 경우, NTS2, 3에서 4%이하의 비교적 정확한 값을 유도하였다. 그러나, Triantafyllou와 Griufogel이 제안한 방법은 기하학적, 재료 물리량등의 많은 사전정보를 필요로 한다. 축하중을 받는 보를 이용한 특성방정식에서 고차모드를 이용한 경우, NTS2를 제외하고 1%이하의 정확한 값으로 추정되었다. 이는 새그가 큰 NTS2에서는 큰 오차를 보이는 것은 당연한 결과이고, 또한 휨강성이 수평력에 비하여 상대적으로 작은 NTS1, 4의 경우, 추정된 휨강성은 큰 오차를 보인다. 이 또한 모델에 차이에서 오는 당연한 결과로 판단된다. 또한 고차 모드법의 경우, NTS2, 3은 적용이 불가능하였고, 저차모드법의 경우, NTS2, 3에서 큰 오차를 보였다. 본 연구는 해석적 방법에 국한하여 케이블 구조의 장력 추정을 수행한 것이므로 향후 본 연구결과를 토대로 수치해석 기법을 적용하여 정확성과 정밀성을 더욱 높일 수 있는 방법을 지속적으로 연구해야 할 것이다.

of bridges repaired by ACM from incomplete dynamic data.” *Korean Soc. Adv. Comp. Struc.*, 2(1), pp.1-11.

Ni, Y.Q., Ko, J.M., and Zheng, G. (2002). “Dynamic analysis of large-diameter sagged cables taking into account flexural rigidity.” *J Sound Vib.*, 257(2), pp.301-319.

Park, S., Choi, S., Oh, S.-T., and Stubbs, N. (2006). “Identification of the tensile force in high-tension bars using modal sensitivities.” *Int. J. Solids Struc.*, 43(10), pp. 3185-3196.

Park, T., Kim, B.H. (2005). “Estimation of Cable Tension Using System Identification Technique: I. Theory.” *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 25(4A), pp. 661-668.

Triantafyllou, M.S., and Gringfogel, L. (1986). “Natural frequencies and modes of inclined cables.” *J. Struc. Eng., ASCE*,112(1), pp.139-148.

Triantafyllou, M.S. (1984). “The dynamics of taut inclined cables.” *J. Mech. Applied Math.*, 37(3), pp.421-440.

Yen, W.H., Megrabi, A.B., and Tabatabai, H. (1997). “Evaluation of stay cable tension using a non-destructive vibration technique.” *Building to Last Structures Congress: Proc.15th Structures Congress, L. Kempner, Jr. and C.B. Brown(eds.), ASCE, New York, 1, pp.503-507.*

References

Irvine, H.M. (1981). *Cable Structures*, The MIT Press, Cambridge, MA, USA.

Irvine, H.M. and Caughey, T.K. (1974). “The linear theory of free vibrations of a suspended cable.” *Proc. of the Royal Soc. (London)*, A341, pp.299-315.

Lee, S. Y. and Noh M. H. (2010). “Performance assessment using the inverse analysis based a function approach