엑스트라도즈교 케이블 장력 평가방법 개선 연구

Improvement of the Tension Estimation Method for Extradosed Bridge Cables

최동호* · 박완순**

Choi, Dong-Ho · Park, Wan-Soon

Abstract

Estimating the exact tension force of cables is very important to the construction and maintenance of the cable bridges. The cable tension changes continually from the first installation to the final construction stage. Moreover, in service status, this changes continuously as the vehicle loads change. Recently, many extradosed bridges are constructed and these bridges have the heavy and thick cables. But the existing formulas do not give the reliable estimations for these bridges because these formulas do not consider the tension force induced by self-weight (gravity effect). In this study, the gravity effect on the extradosed bridge cables is investigated and an improved estimation method considering the gravity effect is proposed. The relationship among the gravity effect, the natural frequency and the slenderness ratio is also clearly explained. The field test results show that the new method has the acceptable reliability compared with the existing methods for the extradosed bridge cables.

Key words : Cable Bridge, Extradosed Bridge, Cable Tension, Self-weight, Natural Frequency

요 지

케이블 장력을 정확히 평가하는 것은 케이블 교량의 건설과 유지관리에 매우 중요 작업이다. 케이블 장력은 케이블을 처음 설치할 때부터 교량을 완공할 때 까지 계속해서 변화되며, 공용중에는 차량하중의 변동에 따라 지속적으로 변화된다. 최근 다수의 엑스트라도즈 교량이 건설되고 있으며 이들 교량 케이블은 두껍고 무겁다는 특징을 가지고 있다. 기존 장력추정 공식들은 자중에 의해 유발되는 장력을 고려하지 않기 때문에 엑스트라도즈교 케이블에 대해 기존 공식들을 적용할 경우 장력 추정값의 신뢰성이 떨어진다. 본 연구에서는 엑스트라도즈교 케이블에서 케이블 자중이 장력에 미치는 영향을 분석하였으며, 자중효과를 반영할 수 있는 새로운 장력 평가 방법이 제안되었다. 그리고, 케이블 자중, 고유주파수, 세장비의 상관관계에 대해서도 명확히 설명되었다. 현장실험 결과 새로운 방법은 기존 방법들과 비교하여 엑스트라도즈교 케이블 장력평가에 있어 보다 높은 신뢰성을 제공하는 것이 확인되었다.

핵심용어 : 케이블 교량, 엑스트라도즈교, 케이블 장력, 케이블 자중, 고유주파수

1. 서 론

교량의 기능적 측면, 심미적 측면이 강조되면서 사장교, 현수교, 넨슨아치교, 엑스트라도즈교 등 다양한 형식의 케이블 교량들이 국내에 건설되고 있다. 이들 교량은 케이블 부재를 주요 부재로 하기 때문에 적절한 케이블 장력의 도입 및 관리가 매우 중요하다. 케이블 장력은 로드셀이나 가속도계를 이용하여 측정된다.

로드셀을 이용한 측정법은 로드셀에 케이블을 삽입하여, 케이블로부터 로드셀에 전달되는 하중을 측정하는 직접 측정방법으로서 케이블 장력을 신속히 확인할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 케이블이 정착구에 정착되기 전에 로드셀을 설치해야 한다는 문제와 케이블 직경이 커지면 케이블을

구성하는 스트랜드에 삽입하고, 삽입된 로드셀로부터 측정된 계측값을 이용하여 케이블 전체 장력을 간접적으로 추정해야 한다는 문제를 가지고 있다.

가속도계를 이용한 측정법은 케이블의 진동방정식에 기초하여 측정된 진동주파수를 통해 케이블의 장력을 추정하는 간접적인 방법이다. 가속도계를 이용한 측정방법은 측정이 편리하고, 상당한 수준의 신뢰성을 제공하기 때문에 보편적으로 사용된다.

가속도계를 이용한 측정방법에 있어서 중요한 전제조건은 장력 추정 공식이 측정하고자 하는 대상 케이블의 구조적인 특성을 정확히 반영하고 있는지는 것이다. 새그스팬비가 1:8 이하의 신장(伸長)이 가능한 케이블의 진동특성은 Irvine 등(1974)에 의해 최초로 규명되었다. Irvine 등(1974)의 연구를

*정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 (E-mail : samga@hanyang.ac.kr)

**한양대학교 건설환경공학과 박사과정 (교신저자)

바탕으로, 다수의 학자들이 추가적인 연구를 진행하였으며, 국내에서는 안상섭 등 (1998)이 지중의 영향을 고려한 경사 케이블의 진동특성에 대한 연구를 하였고, 이해성 등(2007)은 가정조건을 최소화하고, 가상일의 원리를 적용한 케이블 고유주파수 계산방법을 제시하였다. 그리고, 김현겸 등(2008)은 변분법을 이용한 1차 고유주파수 산정방법을 제시하였다.

Irvine 등(1974)의 연구를 포함하여 상기 연구들은 케이블의 휨강성을 고려하지 않기 때문에 케이블 도입장력이 증가할수록, 산정된 1차 고유주파수가 현(弦)의 주파수와 일치하게 된다는 특징을 가지고 있다. 그리고, 케이블의 고유주파수를 산정하기 위해서는 다소 복잡한 과정이 필요하기 때문에 국내 유지관리 현장에서는 보다 간편한 방법인 고베제강 Utsuno 등(1998)의 기법을 많이 사용하고 있는 형편이다. 이 기법은 케이블 진동을 케이블 휨강성이 반영된 현(弦)의 진동으로 보고, 단순화된 경계조건을 전제로 빔과 현(弦)의 진동방정식을 등가로 결합한 새로운 진동방정식을 사용하는 특징을 가지고 있다. Utsuno 등(1998)의 기법을 이용하여 국내에서는 김남식 등(2002)과 박연수 등(2008)이 케이블 장력 추정에 대한 실험연구를 진행하였다. 그리고, 안상섭 등(2001)은 오차요인 반영을 통한 케이블 장력 보정 기법을 제시하였다.

케이블 진동에 케이블 휨강성 효과를 고려하는 연구는 Shinke 등(1980)에 의해 처음 시작되었다. Shinke 등(1980)은 케이블 1차, 2차 진동수를 이용하여 케이블 장력을 추정하는 실용공식을 제안하였다. 이 실용공식은 Zui 등(1996)에 의해 보다 발전된 형태로 다시 제시되었다. Zui 등(1996)의 실용공식은 케이블 1차, 2차 진동수 뿐만 아니라 고차 진동수에 대해서도 케이블 장력을 추정할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 고차 진동수를 이용한 케이블 장력 추정의 필요성에 대해서는 Shimada (1994)에 의해 제기되었으며, 이러한 문제제기와 함께 Shimada (1994)는 반복계산에 의해 고차 진동수로부터 케이블 장력을 추정하는 기법을 제안하였다. 그러나, Shimda (1994) 기법은 복잡한 반복계산이 필요하기 때문에 실무에서는 많이 사용되지 않고 있다.

일본 학자들의 연구와 별도로 Robert 등(1991)은 케이블의 휨강성을 고려한 간단한 장력추정공식을 제안하였으며, Mehrabi 등(1998)은 Irvine 등(1974)이 제시한 케이블 처짐-신장과 관련된 무차원 파라미터 k^2 를 이용하여 Robert 등(1991)의 공식을 수정한 새로운 장력 추정 공식을 제안하였다.

기존 장력 추정 공식들은 케이블 진동을 팽팽하게 긴장된 현(弦)의 진동으로 보고, 여기에 케이블 휨강성이 진동에 미치는 효과를 반영해주고 있기 때문에 사장교 케이블과 같이 새그비가 작고, 세장비가 큰 케이블의 장력평가 시 특히 유용하다. 그러나, 현수교 메인 케이블과 엑스트라도즈교 케이블과 같이 새그비가 커지거나, 널센 아치교 케이블과 같이 세장비가 작으면 기존 장력 추정 공식의 신뢰성이 떨어지게 된다. 이러한 이유로 현수교에서는 메인 케이블의 장력을 직접 측정하는 대신, 행어의 장력을 측정하여 간접적으로 메인 케이블의 장력 변화 여부를 확인하는 방법이 선호되고 있다. 널센 아치교 케이블의 경우 장력추정에 로드셀이나 변형률계를 이용할 수 있기 때문에 진동법 사용에 따른 문제를 회피

할 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 SI 기법을 이용한 케이블 장력 추정방법도 활발히 연구되고 있는 실정이다 (김병화 등, 2005; 박대효 등, 2007). SI 기법은 장력 추정의 신뢰도를 높일 수 있는 장점을 가지고 있지만 유한요소해석을 전제로 하고 있어 케이블 장력을 신속히 결정할 수 없다는 제약을 가지고 있다. 따라서, 엑스트라도즈교 케이블의 경우 진동법을 사용하여 장력을 추정하는 것이 현실적으로 가장 유용한 방법이기 때문에 신뢰성 높은 장력 추정 기법의 적용이 필수적이다.

본 연구에서는 케이블 자중에 의해 발생하는 장력을 검토하고, 케이블의 정적 처짐이 고려된 진동 주파수에 대한 분석을 통해 엑스트라도즈교 케이블에 적합한 장력 추정기법을 제시하고자 한다.

2. 케이블 장력과 공진 주파수

2.1 자중효과에 의한 케이블 장력

전술한바와 같이 기존 장력 추정 공식들은 케이블을 휨강성이 고려된 현(弦)의 진동으로 보고 있으며, 이것은 결국 지배방정식으로 축방향력을 받는 빔의 진동방정식을 이용하고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 자중효과에 의한 케이블 장력을 결정하기 위해 축방향력을 받는 빔의 진동방정식 중 시간에 의한 변동항을 제거하면 다음과 같은 정적 미분방정식을 얻을 수 있다 (Shih 등, 1986)

$$E_c I_c \frac{d^4 w_{cs}(x)}{dx^4} - T_s \frac{d^2 w_{cs}(x)}{dx^2} = \rho g A_c \quad (1)$$

여기서, w_{cs} 는 케이블의 정적처짐, $E_c I_c$ 는 케이블의 휨강성, T_s 는 케이블 자중에 의해 발생하는 장력(정적 축방향력), ρ 는 케이블의 단위질량, g 는 중력가속도, 그리고 A_c 는 케이블의 단면적이다. 엄밀하게 따지면, 케이블 자중에 의해 발생하는 장력은 길이방향에 따라 달라지지만 변동폭이 작기 때문에 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\frac{dT_s}{dx} = 0 \quad (2)$$

케이블 경계조건이 단순지인 경우 식(1)과 (2)로부터 케이블의 정적처짐을 구할 수 있다.

$$w_{cs}(x) = \frac{\rho g A_c}{T_s} \left\{ \frac{E_c I_c}{T_s} \left[\frac{\cosh\left(\eta_s \left(1 - \frac{2x}{L_c}\right)\right)}{\cosh(\eta_s)} - 1 \right] + \frac{L_c^2}{2} \left[\frac{x}{L_c} \left(1 - \frac{x}{L_c}\right) \right] \right\} \quad (3)$$

그림 1. 정적 평형상태에서의 케이블의 처짐

그림 2. 세장비, 자중에 따른 장력 변화

여기서, $\eta_s = (L_c/2)\sqrt{T_s/(E_c I_c)}$, L_c 는 케이블의 변형 전 길이이다. 케이블 자중에 의한 장력 T_s 는 다음과 같이 T_s 에 의한 케이블의 신장량 Δ_{T_s} 과 케이블 처짐에 따른 신장량 $\Delta_{w_{cs}}$ 가 동일하다는 관계식을 통해 결정될 수 있다.

$$\Delta_{T_s} = \Delta_{w_{cs}}$$

$$\Delta_{T_s} = \int_0^{L_c} \frac{1}{E_c} \sigma_{T_s} dx, \quad \Delta_{w_{cs}} = \int_0^{L_c} \frac{1}{2} \theta_x^2 dx \quad (4)$$

$$\sigma_{T_s} = \frac{T_s}{A_c}, \quad \theta_x = \frac{dw_{cs}(x)}{dx}$$

장력 T_s 는 그림 1에서 확인할 수 있듯이 케이블 무게가 무거울수록, 케이블 세장비가 커질수록 증가된다. 흥미로운 점은 케이블 세장비가 매우 작은 경우 자중에 의한 장력이 발생되지 않는다는 점이다. 이러한 사실을 통해 케이블의 세장비가 작아지면 케이블 부재가 아닌 빔 부재로 거동한다는 것을 알 수 있다. 케이블 부재는 세장비가 매우 크고, 인장력을 받는 빔 부재라는 식(1)의 가정은 케이블의 진동해석에 있어 중요한 출발점을 제공한다.

2.2 처짐이 고려된 케이블 공진주파수

케이블의 진동을 축방향력을 받는 빔의 진동으로 볼 경우 진동방정식은 다음과 같이 된다 (Nayfeh 등, 1979).

$$E_c I_c \frac{d^4 w_c(x, t)}{dx^4} - \left[T_a + \frac{E_c A_c \Delta_{w_c}}{L_c} \right] \frac{d^2 w_c(x, t)}{dx^2} + \rho A_c \frac{\partial^2 w_c(x, t)}{\partial t^2} = \rho g A_c \quad (5)$$

여기서, w_c 는 시간변화에 따른 케이블의 처짐, T_a 는 케이블에

그림 3. 진동상태에서의 케이블의 처짐

도입된 장력이다. 참고로 T_a 에는 케이블 자중에 의한 장력은 포함되지 않는다. 그리고, Δ_{w_c} 는 시간에 따라 변화되는 케이블의 신장량으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta_{w_c} = \int_0^{L_c} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w_c(x, t)}{\partial x} \right)^2 dx \quad (6)$$

식 (5)는 비선형 미분방정식으로서 근사적인 방법을 통한 접근이 필요하다. 근사적인 방법을 사용하기에 앞서 w_c 를 다음과 같이 정적처짐 w_{cs} 와 동적처짐 w_{cd} 의 합으로 가정한다 (Shih 등, 1986).

$$w_c(x, t) = w_{cs}(x) + w_{cd}(x, t) \quad (7)$$

식 (6), (7)을 식 (5)에 대입해보면, 케이블의 진동방정식 수립단계에서 정적평형 상태를 기술하는 식(1)이 제거되는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 식(5)는 케이블 자중에 의한 장력 T_s 를 제외한 순수한 도입장력 T_a 만을 고려한 미분방정식이 된다. 비록 식 (5)에서는 T_s 가 고려되지 않지만, 케이블 자중에 의한 장력 T_s 는 그대로 남아있기 때문에 전체 장력계산에서는 T_s 와 T_a 를 함께 고려해주어야 한다. 그리고, 식 (7)은 다수의 진동모드들이 결합된 형태로 볼 수 있다. 1차 모드는 케이블의 정적처짐 곡선과 유사한 형상을 가지며, 휨강성의 영향을 가장 크게 받는 진동모드이다. 따라서, 식 (7)의 1차 모드만을 고려해도 케이블 장력 추정에 필요한 진동주파수를 결정할 수 있다. w_{cs} 의 1차 모드는 아래와 같이 Fourier 사인 공식을 이용하면 손쉽게 구할 수 있다 (Hughes 등, 1992)

$$w_{cs1}(x) = \left[\frac{2}{L_c} \int_0^{L_c} w_{cs}(x) \sin\left(\frac{\pi x}{L_c}\right) dx \right] \sin\left(\frac{\pi x}{L_c}\right)$$

$$= \frac{4\rho g A_c L_c^4}{\pi^3 (L_c^2 T_a + E_c I_c \pi^2)} \sin\left(\frac{\pi x}{L_c}\right) \quad (8)$$

w_{cd} 의 1차 모드는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$w_{cd1} = \xi_1(t) \sin\left(\frac{\pi x}{L_c}\right) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)를 정리하면 1차 모드에 대한 케이블의 처짐은 다음과 같이 정리된다.

$$w_c = \left[\frac{4\rho g A_c L_c^4}{\pi^3 (L_c^2 T_a + E_c I_c \pi^2)} + \xi_1(t) \right] \sin\left(\frac{\pi x}{L_c}\right) \quad (10)$$

식 (10)을 식 (5)에 대입하면 아래와 같은 식을 얻게 된다.

그림 4. 도입 장력, 세장비에 따른 주파수 변화

케이블 진동주파수는 변위와 가속도항의 계수들을 이용해서 결정할 수 있다.

$$\xi_1''(t) + d_1 \xi_1(t) + d_2 \xi_1^2(t) + d_3 \xi_1^3(t) = 0 \quad (11)$$

여기서, 식 (11)의 계수들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d_1 &= \left(\frac{E_c I_c}{\rho A_c} \right) \left(\frac{\pi}{L_c} \right)^4 \left(1 + \frac{T_a L_c^2}{\pi^2 E_c I_c} + \frac{3 A_c \gamma_1^2}{4 I_c} \right) \\ d_2 &= \left(\frac{E_c I_c}{\rho A_c} \right) \left(\frac{\pi}{L_c} \right)^4 \left(\frac{3 A_c \gamma_1}{4 I_c} \right) \\ d_3 &= \left(\frac{E_c I_c}{\rho A_c} \right) \left(\frac{\pi}{L_c} \right)^4 \left(\frac{A_c}{4 I_c} \right) \\ \gamma_1 &= \frac{4 \rho g A_c L_c^4}{\pi^3 (L_c^2 T_a + E_c I_c \pi^2)} \end{aligned} \quad (12)$$

초기처짐이 고려된 케이블 진동주파수는 다음과 같다.

$$w_1 = \sqrt{d_1}, \quad f_1 = \frac{w_1}{2\pi} \quad (13)$$

위의 그림에서처럼 케이블의 진동주파수는 세장비가 커질수록 대수적으로 감소한다. 그리고, 도입장력에 대한 진동주파수 곡선에는 변곡점이 존재한다. 도입장력이 변곡점보다 작으면 도입장력이 작아질수록 진동주파수가 증가하며, 도입장력이 변곡점보다 크면 도입장력이 증가할수록 진동주파수도 증가하게 된다. 진동주파수 곡선의 변곡점은 세장비와도 밀접한 관련을 가진다. 세장비가 작을수록 변곡점이 0으로 접근하면서 도입장력과 진동주파수는 선형적인 관계를 유지한다. 그러나 세장비가 커지게 되면 변곡점의 위치가 희박해지면서 도입장력과 진동주파수는 하이퍼볼릭 코시컨트 함수(Hyperbolic Cosecant Function)의 형태를 가진다.

식 (13)에서 제시된 케이블 진동주파수 곡선은 그림 3에서 확인할 수 있듯이 Mehrabi 등(1998)이 제시한 진동주파수 곡선과 유사한 형태를 가진다. 이들 두 개의 진동주파수 곡선은 하이퍼볼릭 코시컨트 함수(Hyperbolic Cosecant Function) 형태를 가진다. 두 개의 진동주파수 곡선과 달리 Zui 등(1996)이 제시한 진동주파수 곡선은 도입장력의 크기에 상관없이 현(弦)의 진동주파수 곡선과 유사한 형태를 가진다. Mehrabi 등(1998)의 진동주파수 곡선과 Zui 등(1996)의 진동주파수 곡선은 도입장력이 증가할수록 서로 가까워지며, 현(弦)의 진동주파수 곡선과는 일정한 주파수간격을 두고 평행하게 진행된다.

원론적으로 케이블 세장비가 매우 작으면 케이블은 진동은 빔과 동일한 진동특성을 보여야 하며, 세장비가 매우 크면 현(弦)과 동일한 진동특성을 보여야 한다. 식 (10)의 진동주

그림 5. 케이블 진동 주파수 공식 비교

파수 곡선은 이와같이 세장비에 따라 변화되는 케이블의 진동특성을 충실히 표현한다. 그러나, Mehrabi 등(1998)의 진동주파수 곡선과 Zui 등(1996)의 진동주파수 곡선은 세장비의 변화에 상관없이 항상 현(弦)의 진동주파수 곡선과 일정한 주파수 간격을 두고 평행하게 진행되기 때문에 케이블의 정확한 진동특성을 표현하기에는 어느 정도 한계가 있는 것이 사실이다.

2.3 자중, 처짐을 고려한 케이블 장력 산정

케이블 장력은 다음과 같이 자중에 의해 유발되는 장력과 도입장력으로 구성된다.

$$T_t = T_s + T_a \quad (14)$$

여기서, T_t 는 전체 장력, T_s 는 자중에 의한 장력, T_a 는 도입장력이다. 자중에 의한 장력 T_s 는 케이블 진동방정식에서는 고려가 되지 않기 때문에 별도로 산정해야 한다. 사장교 케이블의 경우 자중에 의한 장력이 전체 장력에 비해 상대적으로 작기 때문에 배제할 수 있다. 그러나, 엑스트라도즈교 케이블은 자중에 의한 장력이 크기 때문에 반드시 고려해야 한다.

도입장력 T_a 는 식 (13)에 의해 계산된다. 세장비가 크고, 도입장력이 큰 경우 식 (13)과 기존식들은 서로 유사한 계산값을 보여 준다. 그러나, 기존식들은 자중에 의한 장력 T_s 를 전제로 개발된 것이 아니기 때문에 T_s 를 추가하는 문제에 있어 논리적인 근거를 제공하지 못하는 한계가 있다.

3. 엑스트라도즈교 케이블 장력 실험

3.1 케이블 진동 실험결과

엑스트라도즈교 케이블 진동 실험은 시공중인 무영대교 케이블을 대상으로 진행되었다. 무영대교는 5 주탑 엑스트라도즈 PSC BOX 거더교로서 각 주탑에는 총 48개의 케이블이 설치되어 있다. 이들 케이블은 두 개씩 병렬로 설치되며, 종단면으로 보았을 때 24개의 케이블 라인이 팬 타입으로 배치되는 형상을 가진다.

케이블의 Strand는 엑스트라도즈교에 많이 사용되고 있는 Fully Epoxy Coated Strand가 사용되었으며, 케이블의 시공에는 MS (Multi Strand) 방법이 적용되었다.

주탑설치, FCM 공법을 이용한 PSC 박스 거더 세그먼트의 타설, 케이블 잭킹 작업이 포함된 상부 구조의 시공은 총 28의 시공단계(28 Stage)로 구분되어 있다. 설계원안은 PSC 박스 거더 세그먼트가 타설되면 해당 세그먼트에 정착되는 케이블을 시공하도록 되어 있으나 실제 시공은 시공성 향상을 위해 두 개의 세그먼트를 타설하고, 케이블 시공하는 형식으로 진행되었다. 주요 시공단계로는 주탑설치가 완료되는 Stage 1, 5번 주탑과 4번 주탑 사이의 PSC 박스 거더 세그먼트 폐합이 완료되는 Stage 22, 4번 주탑과 3번 주탑, 3번 주탑과 2번 주탑 사이의 폐합이 완료되는 Stage 25, 2번 주탑과 1번 주탑 사이의 폐합이 완료되는 Stage 28이 있다.

그림 6. 무영대교 시공사진

표 1. 케이블 물성치(19번~24번 케이블 공통)

단위질량 ρ (kg/m ³)	단면적 A_c (m ²)	축강성 $E_c A_c$ (kN)	휨강성 $E_c I_c$ (kN*m ²)
5759.795	0.0096	938,393	717.06

표 2. 케이블 주요 제원

Cable No	거더부 정착길이 L_1 (m)	케이블 노출길이 L_2 (m)	주탑부 정착길이 L_3 (m)	케이블 새그 f (m)
19左	4.168	58.346	1.660	0.093
19右				
20左	4.190	58.514	1.657	0.093
20右				
21左	4.300	62.199	1.669	0.105
21右				
22左	4.322	62.373	1.667	0.106
22右				
23左	4.424	66.062	1.681	0.118
23右				
24左	4.446	66.242	1.678	0.119
24右				

케이블 장력산정에 필요한 케이블의 주요제원은 표 1, 2와 같다. 케이블은 22개의 Strand와 Strand를 감싸고 있는 직경 151 mm의 그라우팅, 그리고 그라우팅 피복재료인 두께 14 mm의 HDPE 파이프를 구성된다. 22개 Strand의 단면적은 0.00305 m²이며, 그라우팅 단면적은 0.0149 m²이다. Strand 단면적 대비 그라우팅 단면적이 크고 주탑, 거더 정착구 모두 그라우팅이 주입되기 때문에 정착구 내부에서 케이블의 활동은 억제된다고 볼 수 있다. 따라서, 케이블 장력산정에는 주탑부 정착길이(L_3), 거더부 정착길이(L_1)를 제외한 순수한 노출길이(L_2)를 사용하였다.

진동 실험은 5번 주탑의 PSC 박스 거더 세그먼트 A18, A19(그림 7 참조) 타설이 완료된 Stage 18~19에서 5번 주탑 최외측에 위치한 19번부터 24번 케이블까지 총 12개 케이블들에 대해서 진행되었으며, 케이블 가진은 인력가진 방법이 사용되었다. 진동 측정에는 Kistler사 8310B2 가속도계, Kyowa사 PCD-320A 동적데이터로거, Kyowa사 DAS-100A

그림 7. 무영대교 종횡단면도 및 사재 배치도

표 3. 케이블 가속도 측정 결과

Cable No	측정 가속도(Hz)				
	1차	2차	3차	4차	5차
19左	1.953	3.906	5.884	-	9.875
19右	1.917	3.833	5.762	-	9.668
20左	1.941	3.894	5.847	7.813	9.814
20右	1.910	3.815	5.737	7.684	9.650
21左	1.807	3.638	5.444	7.312	9.155
21右	1.819	3.638	5.457	7.300	9.155
22左	1.782	3.564	5.359	7.166	8.997
22右	1.819	3.662	5.493	7.336	9.216
23左	1.697	3.381	5.090	6.812	8.533
23右	1.697	3.394	5.090	6.812	8.545
24左	1.697	3.394	5.090	6.812	8.545
24右	1.721	3.430	5.151	6.897	8.643

표 4. Utsuno 등(1998)의 방법 장력 추정치

Cable No	회귀분석		장력 추정치 (kN)	추정치 평균 (kN)	설계 장력치 (kN)
	절편	기울기			
19左	3.812	0.003	2868	2809	3138
19右	3.656	0.003	2751		
20左	3.768	0.003	2851	2798	3193
20右	3.628	0.004	2745		
21左	3.288	0.003	2812	2813	3090
21右	3.291	0.003	2814		
22左	3.166	0.003	2722	2793	3118
22右	3.332	0.003	2865		
23左	2.860	0.002	2759	2763	3138
23右	2.868	0.002	2767		
24左	2.866	0.002	2779	2813	3146
24右	2.935	0.002	2846		

FFT 프로그램이 사용되었다. 가속도 측정에 사용된 샘플링 횟수는 100 Hz이다. 측정된 가속도 데이터는 표 3에서 확인할 수 있다.

기존 장력 추정공식들 중 고베제강 Utsuno 등 (1998)의 공식을 제외한 나머지 공식들은 측정된 가속도 데이터들 중 1차 모드 데이터만을 이용하여 장력을 추정한다. 식 (13)도 1차 모드 가속도 데이터만을 이용한다. 물론 Zui 등(1996)의 공식과 Mehrabi 등(1998)의 공식 모두 2차 모드를 포함한 다차 모드에 대해서도 적용할 수 있지만 1차 모드가 케이블의 휨강성에 가장 큰 영향을 받는 모드이기 때문에 장력 추정의 신뢰도 향상을 위해서 1차 모드 데이터를 사용하는 것이 바람직하다.

3.2 Utsuno 등(1998) 방법에 의한 장력평가

전술한 바와 같이 현재 국내 유지관리 현장에서는 고베제강 엔지니어들이 Utsuno 등(1998)이 제안한 방법을 주로 사

용하고 있다. Utsuno 등(1998)이 제안한 방법은 양단단순지지와 양단완전고정의 경계조건을 모두 검토할 수 있게 되어 있다. 구체적으로 본 방법은 모드별 주파수 데이터를 최소화승법을 이용하여 회귀분석하고, 회귀분석을 통해 얻어진 회귀곡선(또는 회귀직선)의 Y축상 절편값을 이용하여 케이블 장력을 결정하는 과정을 거치게 된다. 국내 유지관리 현장에서는 대부분의 경우 경계조건을 양단단순지지로 가정해서 사용하고 있다.

케이블 1차 진동 모드는 케이블의 휨강성과 밀접하게 연관되어 있기 때문에, 측정 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 충분한 진폭이 발생될 수 있도록 가진하는 것이 중요하다. Utsuno 등(1998)의 방법은 불완전한 가진을 통해 발생될 수 있는 1차 모드의 측정오류를 방지하기 위해 1차 모드를 제외한 나머지 모드들을 이용하여 장력을 추정한다는 데 있다. 본 논문에서는 케이블 장력산정의 신뢰성 확보를 위하여

식 (13)을 이용한 산정결과와 Utsuno 등(1998)의 방법에 따른 산정결과를 비교하였다.

표 4는 표 3의 측정데이터에 Utsuno 등(1998)의 방법을 적용하여 얻은 장력 추정치이다. 추정치평균은 좌, 우측 케이블의 장력추정치들 평균한 값으로서 무영대교 케이블의 경우 케이블이 두 개씩 병렬로 설치되기 때문에 설계장력치와 비교하기 위해서는 추정치평균이 필요하다.

3.3 Zui 및 Mehrabi 방법에 의한 장력평가

Utsuno 등(1998)의 방법과 더불어 Zui 등(1996)과 Mehrabi 등(1998)의 방법을 이용해서 5번 주탑 케이블에 대한 장력 추정이 진행되었다. 분석 결과 Zui 및 Mehrabi의 방법으로 얻어진 추정치는 Utsuno 등(1998)의 방법으로 얻어진 추정치보다 다소 적게 나타났다. 이러한 결과는 Utsuno 등(1998)의 방법이 케이블의 휨강성의 영향을 다소 크게 반영한다는 것을 보여주고 있다.

3.4 자중, 처짐을 고려한 장력평가

표 4, 5에서 확인할 수 있듯이 Utsuno, Zui, Mehrabi 방법 모두 장력 추정치와 실제 설계 장력치 사이에 상당한 차이가 발생하였다. 이들 방법은 케이블 자중에 의한 장력을 고려하지 않고 있기 때문에 자중에 의한 장력이 크게 발생하는 엑스트라도즈교 케이블에서는 오차가 발생할 수 밖에 없는 것으로 판단된다. 표 6는 식 (13)에 의한 장력 추정치를 보여주는 것으로 자중에 의한 장력 T_s , 도입장력 T_a 를 합산한 전체장력 T_t 의 평균값은 설계장력치와 수치해석치를 오차범위 안에서 만족시키고 있는 것이 확인된다. 표 6의 설계장력치는 Stage 18~19에서의 설계장력이다. Stage 18~19 이후에는 5번 주탑 PSC 거더 세그먼트와 4번 주탑의 세그먼트에 대한 폐합이 진행되었다. 폐합완료 후 진행된 측정에서는 시공단계 진척에 따라 케이블 장력의 규칙적인 변동이 확인되었다.

표 7의 수치해석치는 유한요소 프로그램을 이용하여 계산

한 결과이다. 케이블의 동특성 분석을 위해 우선 케이블 자중만이 작용하는 정적평형 상태에서 자중에 의해 유발되는 장력과 최대처짐을 계산하였다. 검토결과 수치해석에 의한 장력은 표 6의 자중에 의한 장력 계산치 T_s 를 만족시키는 것으로 확인되었다.

그리고, 설계장력치에 대한 고유주파수 분석은 선형 고유치 해석과 비선형 고유치 해석으로 구분하여 진행하였다. 선형 고유치 해석에서는 케이블을 직선으로 가정하고, 초기처짐을 고려하지 않은 상태에서 해석을 진행하였다. 비선형 고유치 해석에서는 케이블의 한쪽 끝이 주탑부에 거치된 후, 다른 한쪽 끝이 거더 정착구까지 견인되고 나서 책킹되는 시공과정이 고려되었다.

설계 장력치에 대해 선형 고유치 해석에서는 측정 주파수보다 높은 고유 주파수가 계산되었으며, 케이블의 시공조건을 고려한 비선형 고유치 해석에서는 측정 주파수와 경미한 차이를 보여주었다.

표 6. 식 (13)에 의한 장력 추정치

Cable No	T_s (kN)	T_a (kN)	T_t (kN)	T_t 평균 (kN)	설계 장력치 (kN)
19左	337.826	2856	3194	3141	3138
19右	337.826	2750	3088		
20左	338.492	2837	3176	3130	3193
20右	338.492	2746	3084		
21左	352.800	2776	3129	3147	3090
21右	352.800	2814	3166		
22左	353.466	2713	3067	3125	3118
22右	353.466	2829	3183		
23左	367.471	2759	3127	3127	3138
23右	367.471	2759	3127		
24左	368.147	2775	3143	3183	3146
24右	368.147	2855	3224		

표 5. Zui & Mehrabi 방법 장력 추정치

Cable No	Zui et al.		Mehrabi et al.		설계 장력치 (kN)
	장력 추정치 (kN)	추정치 평균 (kN)	장력 추정치 (kN)	추정치 평균 (kN)	
19左	2764	2712	2762	2710	3138
19右	2661		2658		
20左	2746	2701	2744	2699	3193
20右	2657		2654		
21左	2694	2712	2690	2708	3090
21右	2731		2727		
22左	2634	2690	2629	2686	3118
22右	2747		2743		
23左	2686	2686	2680	2680	3138
23右	2686		2680		
24左	2701	2740	2695	2735	3146
24右	2780		2774		

표 7. 수치해석 결과

Cable No	자중에 의한 평형상태		설계 장력치에 대한 고유치 해석결과	
	장력 (kN)	최대처짐 (m)	선형 (Hz)	비선형 (Hz)
19左	338.731	0.680	2.043	1.909
19右				
20左	339.162	0.682	2.055	1.913
20右				
21左	353.754	0.741	1.901	1.783
21右				
22左	354.426	0.743	1.905	1.787
22右				
23左	368.478	0.803	1.804	1.703
23右				
24左	369.159	0.805	1.801	1.701
24右				

4. 결 론

최근 국내에서도 엑스트라도즈교의 건설이 증가되고 있다. 기존 장력 추정공식들은 사장교 케이블에서는 효용성을 검증 받았으나, 엑스트라도즈교 케이블에 대해서는 신뢰성이 떨어 진다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 무게가 무겁고 새그비가 큰 엑스트라도즈교 케이블의 장력추정의 신뢰성을 향상시키기 위한 작업이 진행되었다. 기존 공식에서는 무시되 었던 케이블 자중에 의한 장력, 즉 케이블 자중에 의해 유발 되는 축방향력이 엑스트라도즈교에서는 반드시 고려되어야 함 을 해석적, 실험적 분석을 통해 입증하였다. 이와 함께 케이 블 처짐이 고려된 진동주파수식이 도입장력과 세장비의 변화 에 따른 케이블의 동특성을 기존 진동주파수식들보다 잘 설 명해준다는 사실도 확인되었다. 처짐을 고려한 진동주파수식 을 이용하고, 케이블 자중에 의한 장력을 전체장력 계산에 포함시켜 실제 시공중인 엑스트라도즈교 케이블에 대한 장력 추정을 추정한 결과 설계장력치를 충족시키는 것을 확인하였 다. 다른 추정공식들은 모두 설계장력치에 대해 상당한 오차 를 보였으며, 엑스트라도즈교 케이블에 적용 시 각별한 주의 가 필요하다는 것이 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원 된 국토해양부 건설기술혁신사업 (08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김남식, 정운 (2002) 진동법을 이용한 인장 케이블의 장력 추정 에 관한 연구, **한국소음진동공학회논문집**, 제12권, 제12호, pp. 956-963.
- 김현겸, 황재웅, 이명재 (2008) 에너지방정식에 기초한 사장 케이 블 기본 진동수 추출, **대한토목학회논문집**, pp. 125-133.
- 박대효, 김병화 (2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력 추정 : I. 이론, **대한토목학회논문집**, 제25권, 제4호, pp. 661-668.
- 김병화, 박대효 (2005) 시스템 인식기법을 이용한 케이블의 장력 추정 : II. 실험 및 적용, **대한토목학회논문집**, 제25권, 제4호, pp. 669-675.
- 박대효, 문석용, 주환중, 김병화 (2007) 진동기반의 SI 기법을 이 용한 현수교 행어의 장력 추정 : I. 이론, **대한토목학회논문집**, 제27권, 제24호, pp. 165- 172.
- 박연수, 최선민, 양원열, 홍혜진, 김운형 (2008) 댐퍼가 부착된 사장교의 케이블 장력에 관한 연구, **한국강구조학회 논문집**, 제20권, 제5호, pp. 609 -616.
- 박연수, 최선민, 이병근, 김민중 (2009) 현이론을 이용한 사장교 케이블 장력산정, **한국방재학회논문집**, 제9권, 제2호, pp. 17- 22.
- 안상섭, 장승필 (1998) 경사 케이블의 자유 진동 특성, **대한토목 학회논문집**, 제18권, 제I-5호, pp. 615-623.
- 안상섭, 김만호, 김인배 (2001) 상시진동 계측에 의한 서해대교 사장교 케이블의 장력산정, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 1-4.

- 박연철, 이해성 (2005) 현 방향 진동의 영향을 고려한 경사케이 블의 자유 진동 특성에 관한 연구, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 2152- 2155.
- 정길제, 류근원, 윤상훈, 이해성 (2007) 케이블의 동적해석을 위 한 가상일 원리의 정식화, **대한토목학회 학술발표회 논문집**, pp. 329-332.
- Caetano, E. (2007) Cable Vibrations in Cable- Stayed Bridges, IABSE, Swiss
- Hughes, G.C. and Bert, C.W. (1992) Effect of Gravity on Nonlinear Oscillations of a Hori- zontal, Immovable-End Beam, *Nonlin- ear Dy- namics*, Vol. 3, pp. 365-373.
- Irvine, H.M. and Caughey, T.K. (1974) The Linear Theory of Free Vibration of a Suspended Cable, *Proceedings of the Royal Soci- ety of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 341, No. 1626, pp. 299-315.
- Irvine, H.M. (1978) Free Vibrations of Inclined Cables, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 104, No. ST2, pp. 343-347.
- Irvine, H.M. (1981) Cable Structures, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Mamandi, A., Kargarnovin, M.H. and Younesian, D. (2010) Nonlin- ear Dynamics of an Inclined Beam Subjected to a Moving Load, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 60, pp. 277-293.
- Mehrabi, A.B. and Tabatabai, H. (1998) Unified Finite Difference Formulation for Free Vibra- tion of Cables, *Journal of Struc- tural En- gineering*, Vol. 124, No. 11, pp. 1313-1322.
- Nayfeh, A.H. and Mook, D.T. (1979) Nonlinear Oscillations, *Wiley, New York*.
- Robert, J.L., Bruhat, D., Gervais, J.P. and Chatelain, J. (1991) The Measurement of Cable Tension by the Vibratory Method, *Bulle- tin de liaison des laboratoires des ponts et Chaussees, France*, Vol. 173, pp109-114 (in French).
- Shih, C.F., Chen, J.C. and Garba, J. (1986) Vibration of a Large Space Beam under Gra- vity Effect, *AIAA Journal*, Vol. 24, pp. 1213-1216.
- Shimada, T. and Nishimura, A. (1988) Effect of Flexural Rigidity on Cable Tension Estimated by Vibration Method, *Proc., JSCE*, Vol. 398, No. I-10, pp. 409-412 (in Japanese).
- Shimada, T. (1994) Estimating Method of Cable Tension from Nat- ural Frequency of High Mode, *Proc., JSCE*, Vol. 501, No. I-29, pp. 163-171 (in Japanese).
- Shinke, T., Hirokane, K., Zui, H. and Nishimura, H. (1980) Practi- cal Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method, *Proc., JSCE*, Vol. 294, pp. 25-34 (in Japanese).
- Utsuno, H., Yamagiwa, I., Endo, K. and Suguii, K. (1998) Identifi- cation of Flexural Rigidity and Tension of One-dimensional Structure Part 4: Transfer Function Method Applied to Rota- tional Stiffness Boundary, *JSME*, No. 98-9, pp. 308-311 (in Jap- anese).
- Yamagiwa, I., Utsuno, H., Sugii, K. and Honda, Y. (1999) Simulta- neous Identification of Te- nsion and Fleural Rigidity of Cables, *KOBE Steel Engineering Reports*, Vol. 49, No. 2, pp. 12-15 (in Japanese).
- Zui, H., Shinke T. and Namita Y. (1996) Practi- cal Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No. 6, pp. 651-656.

© 논문접수일 : 11년 06월 07일
 © 심사의뢰일 : 11년 06월 08일
 © 심사완료일 : 11년 07월 01일