Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 18, No. 3, May 2014, pp.084-092
http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.3.084

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

진동 측정법을 이용한 PC교량 외부텐던의 장력 추정

Tension Estimation of External Tendons in PC Bridges Using Vibration Measurement Method

박 성 우[1)*] 정 하 태[2)] 정 수 형[3)]
Park, Sung Woo Jung, Ha Tae Jung, Soo Hyung

Abstract

In this study, vibrational tendon tension measurement methods are applied to estimate tension of external tendons used in segmental post-tensioned bridges. The acceleration of various length type of tendons is measured and natural frequencies are obtained using FFT (Fast Fourier Transform). The obtained natural frequencies are within 1% error regardless of sensor direction and location. On the basis of natural frequency of tendon, estimation of the tendon tension is performed by using many types of solutions such as string theory equation, multi mode estimation, practical formula estimation and stiff string with clamped-clamped boundary conditions. The results are compared with each other and have shown that the flexural stiffness is not negligible in tendons of this type causing the vibration mode to be inharmonically related. The results have shown that the method using stiff string equation with clamped-clamped boundary conditions is more accurate than the other methods. Application example of in-service bridges has shown that force distribution effects from friction at deviation blocks can be effectively detected.

Keywords : Tendon tension, Vibrational measurement method, Natural frequency, Flexural stiffness, String equation

1. 서 론

일반적인 PSC교량은 PC 텐던의 안전성이 핵심적인 사항이나 현재까지는 정밀안전진단 시의 현실적인 적용성의 한계로 인하여 긴장재의 장력 및 부식 여부를 직접적으로 파악하지 못하는 경우가 대부분이었다. 그러나, 교량이 노후화되면서 PC 텐던의 장력이나 부식여부를 파악하는 것이 중요한 문제로 대두되면서 PC 강선의 상태를 파악할 수 있는 진단기술의 도입이 시급한 실정이다.

PC 텐던의 장력을 파악하는 것은 시간 경과에 따른 PC 텐던의 거동을 파악할 수 있고 장력 손실을 평가하면서 강연선 일부의 파단 등을 파악할 수 있으므로 PC 텐던의 진단에 매우 유용한 도구로 활용될 수 있다. 대표적인 텐던의 장력 평가 방법으로는 가속도센서를 활용하여 텐던의 진동을 측정하고 고유진동수를 분석하여 장력을 추정하는 방법, EM (elasto-magnetic)센서를 활용하여 평가하는 방법 및 유도초음파를 이용하여 평가하는 방법 등이 있다.

내부 텐던의 경우 덕트 외부가 콘크리트로 둘러싸여 있어 간접적인 방법으로도 내부텐던의 상태 파악하기 어려운 측면이 있으며 전체구조계의 가속도 응답으로부터 긴장재의 장력을 평가하는 연구 등이 진행 중이나 현장에 적용하기에는 아직까지 많은 연구가 필요한 상태이다 (Lee et al., 2009).

외부 텐던의 경우 덕트가 외부에 노출되어 간접적인 측정방법의 적용이 가능하다. 가속도 센서를 이용하여 장력을 추정하는 방법은 케이블교량 (Zui et al., 1996; Kim et al., 2002; Fang et al., 2012)과 대형 텐던 건축물 (Chang, 2009)에 대해서 지속적인 연구가 이루어지고 있으나 PC 텐던의 장력 측정에 관련된 연구는 많지 않은 실정이다. 미국의 플로리다 주에서는 외부텐던에 대해서 가속도 센서를 활용한 사례가 있다 (Sagűes, et al., 2006). 국내에서도 PC의 외부텐던에 대하여 가속도 센서를 활용하여 장력 및 손상을 추정하는 기법을 연구한 사례가 있으나 (Jang et al., 2009), 해당

1) 정회원, 한국시설안전공단 차장, 교신저자
2) 정회원, 한국시설안전공단 과장
3) 정회원, 한국시설안전공단 실장

* Corresponding author : sungwoo@kistec.or.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright ⓒ 2014 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구는 모드형상을 확인하여 양쪽 경계조건의 상태를 결정하므로 최소 4개 이상의 센서를 부착하여 모드분석을 수행하여야 하는 번거로운 과정을 수반하고, 경계조건이 고정조건일 때의 적용성이 검증되지 않아 실제 현장에서의 적용성이 다소 부족한 측면이 존재한다. 가속도 측정법 이외에도 EM 센서를 사용하여 PC 외부텐던의 장력 및 건전도를 평가하는 연구가 수행되고 있다 (Changdoga et al., 2008; Park et al., 2009). EM 센서의 경우 가속도 센서에 비하여 정확도가 높은 것으로 알려져 있으나 (Cho et al., 2013) PC텐던의 수가 많은 교량을 진단하기에는 경제적인 한계가 있으므로 실무에 적용하기에는 어려운 점이 있다. 유도초음파를 이용하여 평가하는 방법은 (Park et al., 2007) 실험실에서는 그 적용 가능성을 확인할 수 있지만 실제로 공용중인 교량에 적용하기 위해서는 강선 및 정착부가 그라우팅이나 무수축 모르타르로 둘러싸여 있는 부분을 어떻게 적용할 것인지에 대한 뚜렷한 해법을 제시하고 있지는 않기 때문에 공용중인 교량에 적용하기에는 무리가 따른다.

따라서, 본 논문에서는 신속하고 경제적이며 안전진단 현장에서의 적용성이 뛰어난 가속도 센서를 이용한 장력추정법의 적용 가능성을 확인하고 기존의 연구에서 적용된 다양한 장력 추정방법을 현장에 적용하고 분석하여 장력 추정방법 중 현장에 적용 가능한 유용한 방법을 비교 평가하고자 한다. 이 때 기존의 PC 텐선 장력 추정 연구 중 일부 (Jang et al., 2009)는 하나의 텐던에 4개 이상의 센서를 설치하여야 하고 유효길이 L에 대한 적용이 모호하여 평가에서 제외하였다.

2. 가속도 센서를 활용한 텐던의 장력 추정기법

케이블 또는 텐던과 같은 현의 거동을 하는 부재는 케이블의 휨강성과 처짐 (Sag), 케이블 양쪽 끝단의 경계조건에 따라 거동 특성이 달라진다. 이러한 조건의 변화에 따라 케이블 및 텐던의 장력을 구하는 이론적인 방법을 분석하였다.

2.1 현의 공식을 이용한 장력 추정

텐던의 휨강성과 새그효과를 무시할 수 있는 경우 현의 운동방정식 (equation of motion of a string)으로부터 다음과 같은 식 (1)을 적용하여 텐던의 장력을 추정할 수 있다 (Kim et al., 2002).

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

여기서 T는 텐던의 장력, f_n은 측정된 n차고유진동수, m은 단위길이당 텐던의 질량, L은 텐던의 길이를 나타낸다. 이 방법은 텐던의 휨강성을 무시하였기 때문에 지지하는 양쪽 끝단의 경계조건이 힌지로 거동함을 의미한다

2.2 다중모드를 이용한 장력추정 방법

텐던의 휨강성을 고려하여 장력을 추정하는 방법 중 텐던의 다중진동모드를 이용하는 방법은 고유진동수 차수의 제곱과 고유진동수를 차수로 나눈 값은 비례관계에 있다는 것에 착안하여 장력을 구하는 방법으로 다음 식으로부터 구할 수 있다 (Cho et al., 2013; Park et al., 2005).

$$T = \left(\frac{2f_n}{n}\right)^2 mL^2 - \frac{S\pi^2}{L^2}n^2 \tag{2}$$

여기서 S는 텐던의 휨강성을 나타낸다. 윗 식에서 비례관계에 있는 $(f_n/n)^2$과 n^2의 함수로 나타내어 정리하면 다음 식과 같다.

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{S\pi^2}{4mL^4}n^2 + \frac{T}{4mL^2} = a \cdot n^2 + b \tag{3}$$

측정된 n차 모드의 고유진동수로 반복계산을 수행하여 a와 b값을 구할 수 있으며, 결정된 a와 b를 식 (3)에 대입하면 장력 T와 휨강성 S를 구할 수 있다.

2.3 저차모드의 실용적 공식을 이용한 장력 추정

휨강성의 진동모드에 영향을 미치는 정도를 나타내는 무차원 변수와 텐던의 새그효과 (Sag effect) 여부를 고려하여 케이블 장력을 추정할 수 있다 (Zui et al., 1996).

새그 효과가 거의 없는 경우 장력은 식 (4)~(6)과 같다.

$$T = m(2f_1L)^2\left[1 - 2.20\frac{C}{f_1} - 0.550\left(\frac{C}{f_1}\right)^2\right]; (17 \le \xi) \tag{4}$$

$$T = m(2f_1L)^2\left[0.865 - 11.6\left(\frac{C}{f_1}\right)^2\right];(6 \le \xi \le 17) \quad (5)$$

$$T = m(2f_1L)^2\left[0.828 - 10.5\left(\frac{C}{f_1}\right)^2\right];(0 \le \xi \le 6) \quad (6)$$

여기서, f_1은 1차모드의 고유진동수, $C = \sqrt{S/(mL^4)}$ 이고, 무차원 변수ξ는 값이 증가할수록 텐던의 휨강성의 영향은 감소하여 현의 거동에 근접하는 것을 의미하며 $\xi = \sqrt{T/S} \times L$로 표현된다.

2.4 양단고정 경계조건의 휨강성을 고려한 현의 공식 장력 추정 방법

미국 플로리다의 세그멘탈 PSC 교량에 대해서 외부텐던에 가속도 센서를 부착하고 장력을 추정한 방법은 (Sagüès et al., 2006) 텐던의 양 끝단이 세그멘탈의 방향전환블록 (Deviation block)이나 다이아프램으로 인하여 회전이 발생하지 않는 것으로 보고 이에 따른 경계조건을 부여하여 현의 방정식의 해를 도출하였다. 이 방법은 텐던의 휨강성에 대한 장력의 비를 나타내는 무차원 휨강성 (σ)의 개념을 도입하여 무차원 진동수 (v_n)와 진동모드와의 관계를 분석하는 단계를 거치며 반복계산을 통하여 텐던의 휨강성과 장력을 추정하는 방법이다. 무차원 휨강성 (σ) 및 무차원 진동수 (v_n)는 식 (7), (8)과 같다.

$$\sigma = S/(TL^2) \quad (7)$$

$$v_n = 2\pi u_n[\sigma u_n^2 + 1/(4\pi^2)]^{1/2} \quad (8)$$

여기서, u_n은 n차 모드에 대한 초월함수로서 홀수차 모드 ($n = 1, 3, 5, \ldots.$) 및 짝수차 모드 ($n = 2, 4, 6, \ldots.$)에 대한 값은 각각 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$\tan(\pi u_n) = -[1 + 1/(4\pi^2 u_n^2 \sigma)]^{1/2} \times \tanh\pi[u_n^2 + 1/(4\pi^2\sigma)]^{1/2} \quad (9)$$

$$[1 + 1/(4\pi^2 u_n^2 \sigma)]^{1/2} \tan(\pi u_n) = \times \tanh\pi[u_n^2 + 1/(4\pi^2\sigma)]^{1/2} \quad (10)$$

반복계산을 수행하여 위의 공식에 대한 해를 얻을 수 있다. 무차원 휨강성에 대한 무차원 진동수 및 모드에 대한 관계를 그래프로 나타내면 Fig. 1과 같다.

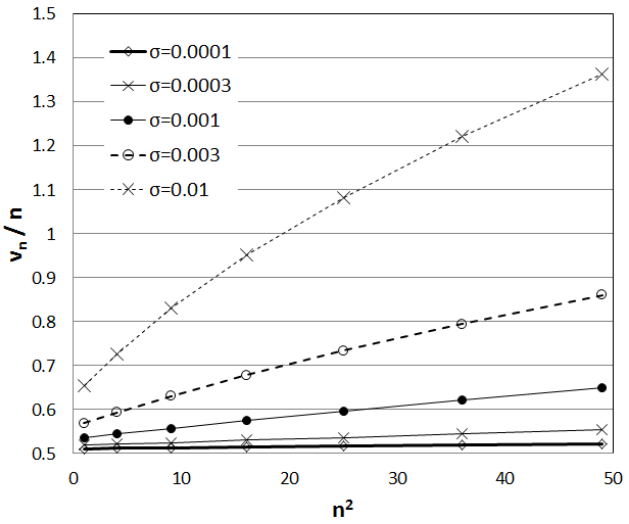


Fig. 1 Nondimensional frequency v_n (devided by n) as fuction of n^2 for cases with nondimensional stiffness(σ)

여기서, 무차원 휨강성 (σ)이 0에 가까울수록 v_n/n의 값이 모드차수 n과 관계없이 0.5의 값에 수렴되며 이는경계조건이 힌지인 현의방정식과 같은 결과를 나타내게 된다. 텐던의 강성이 증가하거나 텐던의 길이가 짧아지게 되면 고차모드로 진행할수록 고유진동수가 가파르게 증가하는 것을 알 수 있다. 고유진동수를 실제 측정하여 n차 모드를 추출하게 되면 식 (11)과 같은 주파수 비 (R)를 얻을 수 있다.

$$R = f_n / v_n \quad (11)$$

여기서 각 n차 모드에 대한 실측치인 f_n과 v_n이 일정한 값을 갖도록 무차원 강성 σ의 값을 변화시키며 반복계산을 수행하고 모드별 R값의 차이가 최소가 되는 무차원강성을 결정하고 모드별 R값의 평균치 (R_{avg})를 결정하면 추정된 장력 및 휨강성은 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$T = R_{avg}^2 L^2 m \quad (12)$$

$$S = \sigma_e TL^2 \quad (13)$$

여기서, σ_e는 반복계산을 통해 결정된 텐던의 무차원강성이다.

3. 가속도 센서 부착시험의 유효성 검증

3.1 개요

PC 텐던은 내부가 그라우팅되어 있고 외부는 PE관으로 둘러싸여 있다. 가속도 센서는 PE관 외부에 부착되므로 PC 강선과 그라우팅 및 PE관이 일체화 거동을 한다고 가정하였다. 시공 중에 충분히 세밀한 그라우팅을 실시하였고 각 재료간의 계면이 분리되지 않았다면 PE관, 그라우팅 및 강선이 일체화 거동을 한다고 볼 수 있으며 이를 확인하기 위하여 다양한 부착조건에 대한 실험을 실시하여 일정한 고유진동수가 얻어지는지 여부에 대한 분석을 수행하였다.

또한 텐던의 휨강성은 Fig. 2와 같이 강선의 배치가 일정치 않으므로 텐던의 진동 방향에 따라 고유진동수가 달라질 수 있으므로 타격방향과 센서의 부착방향에 대한 분석을 수행하였다.

가속도 측정을 통한 장력 추정법 적용의 유효성을 검증하기 위하여 시험에 적용된 텐던의 물성은 Table 1과 같다.

Table 1에서 그라우트의 밀도는 시공 당시의 배합설계 자료가 남아 있지 않고 강선 사이의 빈공간에 그라우팅이 채워지지 않을 가능성이 있어 정확한 추정이 어렵다. 이에 따라 기존의 연구에서 사용한 동등한 텐던에 적용된 그라우트의

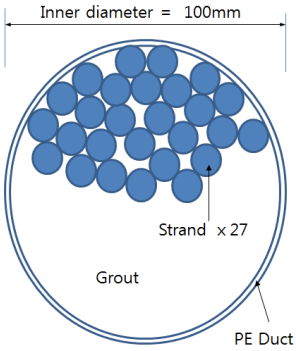


Fig. 2 Nonuniform strand arrangement due to inside curvature of tendon path at deviation block

Table 1 Tendon Parameters

Number of strands	27	strand diameter	12.7mm
strand Area	98.71mm^2	strand Weight per length	0.774kgf/m
Sheath outer diameter	110mm	Sheath inner diameter	100mm
estimated grout density	1,850kg/m^3	estimated tendon unit length weight	30kgf/m

Table 2 Length of Tendon from Diaphragm to the First Deviation Block

tendon ID	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
length(m)	23.14	17.62	12.12	6.68	4.48	4.44	4.44

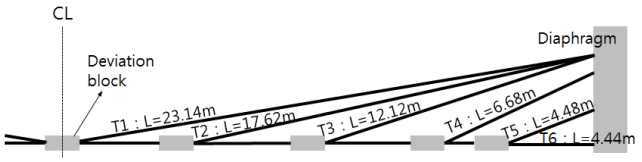


Fig. 3 Tendon location

유효단위중량 1,850kgf/m^{3}을 적용하였다 (Sagűès et al., 2006). 또한, 덕트PE관의 단위중량 1,000kgf/m^{3}을 반영하여 텐던의 단위 길이당 중량은 30kgf/m을 적용하였다.

시험을 실시한 PC텐던은 총 7개소로서 격벽으로부터 첫 번째 방향전환블록 (Deviation block)까지의 텐던 길이는 Table 2와 같다. Fig. 3과 같이 텐던의 배치는 경간 중심부의 Deviation Block을 중심으로 좌우 대칭으로 고정단과 긴장단이 배치되어 있다. Fig. 3의 그림이 좌우 대칭이므로 T1은 총 1개의 Deviation Block을 통과하고 T6 및 T7은 총 9개의 Deviation Block을 통과함을 의미한다.

3.2 가속도 측정 및 주파수분석

본 논문에서는 가속도 센서 부착시험에 신뢰성을 확인하기 위하여 실제 공용중인 교량의 외부텐던에 가속도 센서를 부착하고 부착방향, 부착 위치 등 다양한 변수에 따라 진동을 분석하였다.

텐던의 가속도 이력을 얻기 위하여 가속도 센서를 텐던의 피복에 부착하고 센서로부터 어느 정도 거리가 떨어지고 실험의 일관성 확보를 위하여 텐던의 3/4L 지점에 햄머로 가격하여 인위적인 진동을 발생시켜 시간이력 곡선을 획득하였다. 가속도 데이터는 고차의 진동모드를 확인하기 위하여 500Hz의 샘플링으로 시험을 실시하였다. T1 텐던의 1/8L, 1/4L, 3/8L, 1/2L 지점에 센서를 부착하고 가진하였을 때 가속도 이력곡선은 Fig. 4와 같으며 FFT (Fast Fourier Transform) 분석을 실시한 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5에서 텐던의 중심에서는 짝수모드의 피크가 두드러지지 않았고 3/8L위치의 신호분석에서는 8차모드가 피크가 발생하지 않았으며 1/4L 위치에서는 4차와 8차모드 피크가 두드러지지 않았다. 이는 중심부에서는 현의거동과 유사한

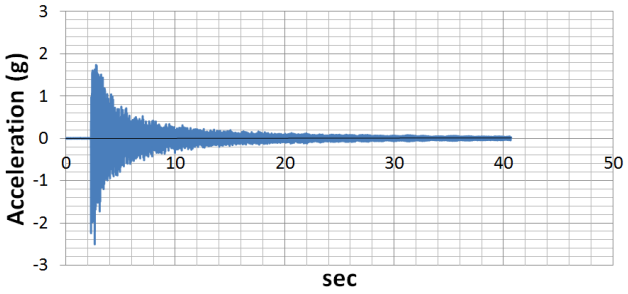


Fig. 4 Time domain signal for T1 (L=23.14m at 1/2L)

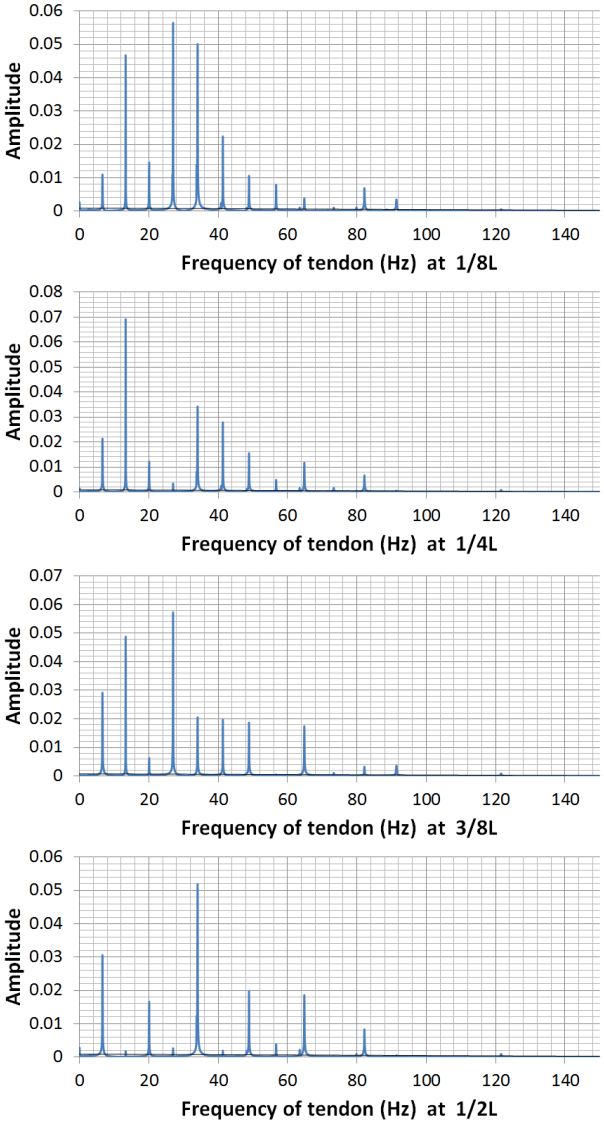
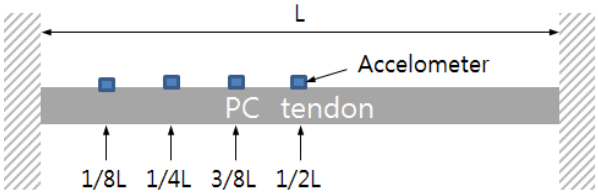
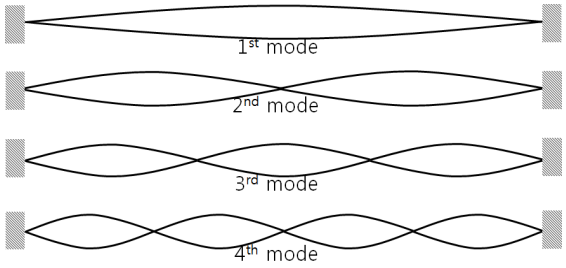


Fig. 5 Frequency domain spectrum for T1 (L=23.14m)

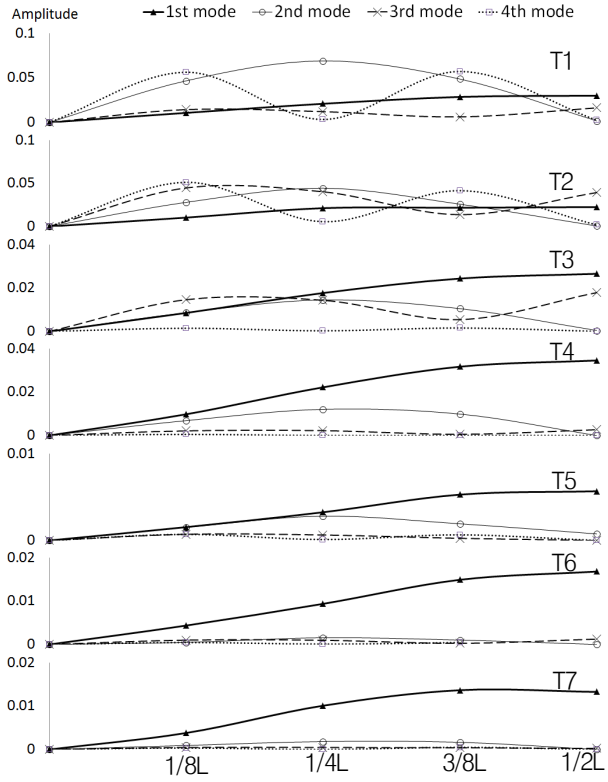
진동모드를 갖는다는 것을 의미한다. 1/8L 지점에서는 텐던의 양단이 힌지인 현의 거동을 한다면 8차모드의 피크가 발생하지 않아야 하나 10차모드의 피크가 발생하지 않아 경계



(a) location of sensors



(b) theoretical mode shape



(c)mode shape for the test results

Fig. 6 Peak amplitude of sensors

부로 갈수록 경계의 구속조건으로 인하여 진동모드가 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 5와 같이 센서의 부착 위치와 상관없이 각 모드 차수별로 일정한 고유진동수를 갖는다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 센서의 위치별로 FFT분석에 따른 각 모드별 피

크치를 추출하여 모드형상을 도시한 것이다. 텐던의 길이가 길수록 (T1) 이론적인 현의 모드형상과 일치하고 짧을수록 고차모드 진폭은 줄어들고 1차모드가 두드러짐을 알 수 있다. 특히 텐던의 길이가 짧은 T5~T7의 1차모드 형상의 경우 1/8L 지점의 피크치가 상대적으로 작아 양단의 고정된 경계조건을 반영한 모드형상이 도출되는 것을 알 수 있다.

3.3 텐던 고유진동수의 유효성

PC텐던은 강연선이 설치된 PE덕트 내부가 그라우트로 채워져 있고 횡단면상 강선의 배열이 일정치 않아 횡단면에 대한 휨강성이 일정하지 않은 특징이 있다. 이에 따라 센서 부착방향, 가진 시 타격 방향 등 다양한 조건에 대한 진동수 분석을 수행하여 결과의 일관성 여부를 검토하였다. 다양한 조건에 따른 분석결과는 Table 3과 같다.

Table 3의 결과에 따르면 센서부착 방향, 부착 위치 등에 대해서는 고유진동수에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있으나, T3의 경우 1%이내의 오차가 발생하였는데, 이는 2개월간의 측정 기간 동안 온도변화에 의한 장력의 미소 변형이 발생하였거나, 분해능의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 전반적으로 실험여건과 상관없이 텐던의 일관된 고유진동수를 추출할 수 있음을 알 수 있다.

부착방향에 따라 휨강성이 일정하지 않아 수평방향의 고유진동수와 수직방향의 고유진동수가 일치하지 않을 수 있는데 본 연구에서는 Table 3과 같이 이에 대한 영향이 크지 않은 것으로 분석되었으나 일부 선행피크 및 후행피크의 신호가 감지된 부분이 있어 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

3.4 고유진동수와 n차 모드수와의 상관관계

텐던이 완전한 현의 거동을 한다면 n차 고유진동수를 n으로 나눌 경우 일정한 값 (f_n/n=const)을 갖는다. 그러나 텐던의 휨강성이 고려될 경우 n차 고유진동수를 모드차수 (n)으로 나눈값과 모드차수의 제곱 (n^2)은 비례관계에 있다 (Sagűès et al., 2006; Cho et al., 2013). 실험치 고유진동수와 모드차수와의 관계에 대하여 텐던의 길이 변수별로 그래프를 도시하면 Fig. 7과 같다.

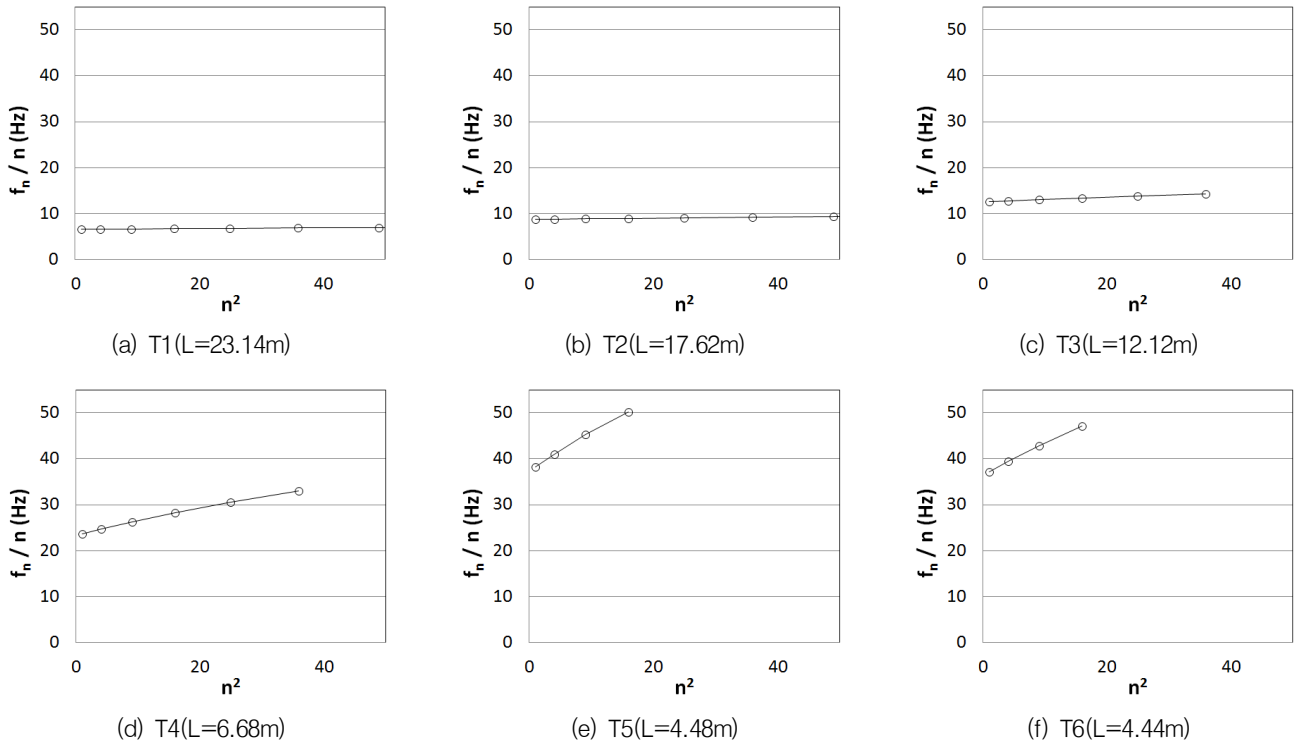
Fig. 7에서 텐던의 길이가 짧아질수록 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 기울기가 큰 만큼 휨강성이 텐던의 거동에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 분석으로부터 측정된 가속도 신호로부터 FFT 분석을 수행한 시험결과가 충분한 일관성이 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 텐던의 PE덕트에 가속도 센서를 부착하여 텐던의 고유진동수를 분석하는 방법은 충분히 신뢰성 있는 방법이 될 수 있다고 판단된다.

Table 3 Frequency of Tendon under Various Conditions

ID	sensor direction	impact direction	Sampling Rate	sensor location	Natural frequency		
					1st	2nd	3rd
T1	45°	0°	500	1/8L	6.592	13.301	20.081
				1/4L	6.592	13.306	20.081
				3/8L	6.592	13.306	N/A
				1/2L	6.592	N/A	20.081
T2	0°	0°	500	1/2L	8.728	N/A	26.55
	90°	0°	500	1/2L	8.728	N/A	26.672
	0°	90°	500	1/2L	8.728	N/A	26.52
	90°	90°	500	1/2L	8.759	N/A	26.703
	45°	0°	500	1/8L	8.728	17.578	26.581
				1/4L	8.728	17.578	26.581
				3/8L	8.728	17.578	26.581
				1/2L	8.728	N/A	26.581
T3	0°	no impact	2000	1/2L	12.604	N/A	38.91
				1/3L	12.604	25.482	N/A
				1/8L	12.603	25.482	38.849
				1/40L	12.604	25.482	38.91
	45°	0°	500	1/8L	12.665	25.665	39.185
				1/4L	12.665	25.665	39.185
				3/8L	12.665	25.665	39.185
				1/2L	12.665	N/A	39.185
T4	45°	0°	500	1/8L	23.651	49.377	78.827
				1/4L	23.651	49.377	78.827
				3/8L	23.651	49.377	N/A
				1/2L	23.651	N/A	78.827
T5	45°	0°	500	1/8L	38.208	82.031	135.895
				1/4L	38.208	82.031	135.772
				3/8L	38.208	82.031	135.742
				1/2L	38.208	N/A	135.772
T6	45°	0°	500	1/8L	37.170	83.130	128.479
				1/4L	37.170	83.130	N/A
				3/8L	37.170	N/A	N/A
				1/2L	37.170	N/A	128.448
T7	45°	0°	500	1/8L	38.513	83.496	137.634
				1/4L	38.513	83.496	137.634
				3/8L	38.513	83.496	137.634
				1/2L	38.513	N/A	137.634

※ direction : 0°− vertical, 90°−horizontal, no impact−ambient vibration



(a) T1(L=23.14m) (b) T2(L=17.62m) (c) T3(L=12.12m)

(d) T4(L=6.68m) (e) T5(L=4.48m) (f) T6(L=4.44m)

Fig. 7 Frequency f_n (devided by n) as fuction of n^2

4. 고유진동수에 의한 텐던의 장력추정

4.1 장력 추정방법의 적용

앞선 2장의 텐던의 장력 추정 방법을 이용하여 가속도 센서 부착시험을 통해 분석된 고유진동수를 활용하여 텐던의 장력 측정을 비교하였다. 각 방법에 따른 장력추정 결과는 Table 4와 같다.

현의방정식을 이용한 장력 추정방법은 T1과 같이 텐던의 길이가 충분히 긴 경우에는 다른 추정법과 큰 차이가 없으나

Table 4 Tension Estimation

tendon ID	1st mode (Hz)	tendon tension(kN)				
		string equation	multi mode	Zui et al(kN/m²)		Sagüès et al.
				S=200	S=300	
T1	6.592	2792	2820	2649	2617	2637
T2	8.728	2838	2834	2649	2606	2619
T3	12.665	2827	2815	2552	2487	2510
T4	23.651	2995	2945	2476	2356	2314
T5	38.208	3516	3365	2579	2348	2402
T6	37.170	3268	3151	2356	2121	2343
T7	38.513	3509	3340	2564	2329	2375

※ Zui et al. : assume flexural stiffness as 200kN/m² ~ 300kN/m²

텐던이 길이가 짧아질수록 장력을 과대평가하는 결과를 도출하였다. 이는 길이가 짧을수록 경계조건의 영향을 더 많이 받고 휨강성으로 인하여 고유진동수가 증가하나 이를 반영하지 못하기 때문으로 분석된다. 다중모드법의 경우도 현의 방정식과 유사하게 짧은 길이의 텐던의 장력을 과대평가한 결과가 도출되었다. 저차모드의 실용적 공식을 이용한 장력 추정방법 (Zue et al., 1996)은 장력을 추정하기 위해서는 케이블의 휨강성을 도출하여야 하는데, 휨강성을 크게 가정할수록 장력이 줄어든다. 본 논문에서는 200~300kN/m²을 적용하였다. 휨강성을 최대 300kN/m²으로 가정하였을 경우 T6의 장력은 2121kN으로서 다소 과소평가 된다. 양단고정 경계조건에 의한 휨강성을 고려한 현의공식 장력추정방법 (Sagűès et al., 2006)은 다중모드를 활용함으로서 휨강성을 입력하지 않아도 반복계산을 통해 장력과 이에 따른 휨강성을 추정할 수 있는 방법으로 Table 4의 장력 추정치가 비교적 고른 분포를 보이고 있음을 알 수 있다.

조사 대상 텐던은 준공 후 10년 이상 경과한 구조물에 장착된 텐던으로서 장력의 이력 측정이 이루어지고 있지 않고, 정착부는 무수축모르터로 채워져 있어 직접적으로 텐던의 장력을 확인할 수 없는 상태이다. 시공당시의 기록에 따르면 프리스트레스의 손실이 수렴한 시점에서 2600kN~2880kN의

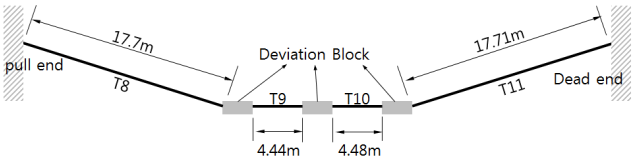


Fig. 8 PC tendon with deviation block

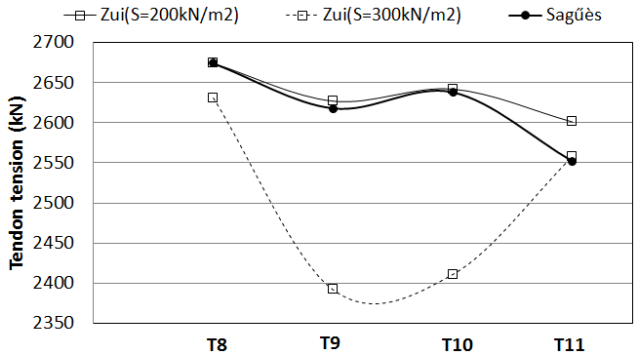


Fig. 9 Tendon tension for pull end and dead end

긴장력을 갖는 것으로 추정되었다. 정착직후의 긴장단에서의 긴장력은 최대 3136kN으로서 이 값을 초과하는 현의방정식이나 다중모드법은 길이가 짧은 텐던의 장력 추정방법으로 적합하지 않음을 의미한다. 그러나, 휨강성을 고려한 나머지 2가지의 방법 (Zue et al., 1996; Sagűès et al., 2006) 또한 길이가 짧은 텐던의 장력값이 길이가 긴 텐던의 장력값보다 작아 장력을 과소평가할 가능성이 있으므로 이에 대한 추가 검토가 필요하다고 판단된다.

4.2 휨강성을 고려한 장력추정방법의 검증

외부텐던은 편심을 가하기 위하여 Fig. 8과 같이 방향전환블록 (Deviation Block)을 시공한다. 긴장단에서 동일한 힘으로 긴장이 이루어지지만 PE 덕트와 강연선과의 마찰등으로 인하여 긴장단의 긴장력이 고정단까지 모두 전달되는 것이 아니므로 긴장단 (T8), 고정단 (T11) 및 중앙단 (T9, T10)의 장력이 다르게 된다. 일반적으로 긴장단의 장력이 고정단의 장력보다 크다 (Sagűès et al., 2006). 방향전환블록과 다이아프램은 텐던을 구속하는 효과가 있으므로 Fig. 8의 텐던은 각 단부 다이아프램과 방향전환블록을 경계로 4구간의 텐던 (T8~T11)이 각각 다른 고유진동수를 갖는다.

Fig. 8의 PC tendon에 대해 휨강성을 고려한 장력을 추정한 결과는 Fig. 9와 같다.

Fig. 9의 그림에서 휨강성을 300kN/m^{2}으로 가정할 경우, Deviation block 사이의 텐던의 장력이 고정단의 텐던 장력보다 낮아 저평가됨을 알 수 있다. 200kN/m^{2}으로 가정할 경우, Sagűès et al.의 방법과 유사한 결과값이 도출되며 고정단과 긴장단 사이의 장력이 범위를 벗어나지 않아 비교적 합리적인 결과가 도출됨을 알 수 있다. 긴장 시 방향전환블록에서 PE덕트와 강연선의 마찰로 인하여 긴장단의 긴장력의 일부가 고정단까지 전달할 수 없는 경우가 발생하며 이에 따라 Fig. 9와 같이 고정단으로 갈수록 프리스트레스 힘이 줄어들게 된다. 본 연구에서 적용한 장력 추정방법은 PC 텐던의 이러한 거동 특성을 양호하게 반영하고 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 일부 텐던에 대해서 연구를 수행한 결과이므로 추후 연구에서는 보다 많은 실험을 수행하여 PC 텐던 장력 측정의 유효성을 보다 세밀하게 검토하는 것이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 PC교량의 외부텐던에 가속도센서를 부착하여 고유진동수를 획득하여 다양한 조건에 대한 분석을 실시하였고 이에 따라 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가속도 센서 유효성을 검증하기 위하여 다양한 조건에 대한 시험을 실시하였고 분석결과 일관된 도출이 가능한 것으로 판단되어 PC교량 외부텐던에 가속도센서를 부착하여 장력을 평가하는 방법은 충분한 현장 적용성이 있음을 알 수 있었다.

(2) 장력추정 기법 중 현의 방정식 및 다중모드법은 짧은 길이의 텐던에 대하여 장력을 과대평가하는 경향이 있으므로 PC텐던에 적용하기에는 적절하지 않은 것으로 판단된다.

(3) 양단고정 경계조건의 휨강성을 고려한 현의 공식 장력추정 방법 (Sagűès et al., 2006)은 텐던의 불확실한 물성치 중 하나인 휨강성을 고려하지 않더라도 장력을 추정할 수 있는 방법으로 실무 적용에 적절하며, 방향전환블록으로 분리된 단일 긴장 텐던에 대하여 그 적용성을 평가한 결과 다른 방법보다 결과의 신뢰가 높은 것으로 분석되었다. 보다 다양한 조건에 대한 검증은 추후 추가적인 연구와 현장 적용이 필요한 것으로 판단된다.

(4) 장력추정 방법에 따라 도출된 장력은 다소간의 오차를

내포하고 있으나 텐던의 고유진동수는 센서의 위치, 측정 방법 등과 상관없이 비교적 일정한 측정값을 얻을 수 있으므로 장기적인 분석이 이루어진다면 안전진단 시에 활용도가 높을 것으로 기대된다.

References

1. Chang, K. K. (2009), Application of Vibration Method for Estimation of Tension Force of Stay Cables in World-Cup Stadiums, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(6), 156-165 (in Korean).
2. Changdoga, M., Jarosevic, A. (2008), Health Monitoring of the Prestressing Steel Using the Elasto-Magnetic Method, The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA, 910-917.
3. Cho, S., Shin, S. W., Jung, H. J., Yun, C. B., Wang, M. L. (2013), Comparative Field Study of Cable Tension Measurement for a Cable-Stayed Bridge, *Journal of Bridge Engineering*, 18(8), 748-757.
4. Fang, Z., Wang, J. (2012), Practical Formula for Cable Tension Estimation by Vibration Method, *Journal of Bridge Enigneering*, 17(1), 161-164.
5. Jang, H. T., Noh, M. H., Park, K. S., Park, T. (2009), Evaluation on the Lost Prestressing Force of an External Tendon Using the Combination of FEM and HGA: II. Experimental Verification and Field Application, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(5), 121-132 (in Korean).
6. Kim, N. S., Jeong, W., Seo, J. W. (2002), Estimation of Tension Forces of Stay Cables, *Journal of Spring Conference on the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, 121-126 (in Korean).
7. Lee, J. M., Kim, J. T. (2009), Flexural Vibration Characteristics of Prestressed Concrete Girders due to Changes in Prestress Forces, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(4), 137-147 (in Korean).
8. Morse, P. M. (1948), Vibration and Sound, McGraw-Hill, NY, 151-169.
9. Park, H. W., Ahn, B. Y., Lee, S. S., Park, J. H. (2009), A Study on Temperature Properties Analysis for Tension Measurement of Steel Cables Using Magnetic Sensor, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 13(2), 181-188 (in Korean).
10. Park, S. B., Hong, S. S., Yoo, S. W. (2007), Development of Evaluation Method of External Tendon Force by Using the Deriving Ultrasonic Pulse, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 11(6), 181-192 (in Korean).
11. Park, Y. S., Cheon, D. H., Cheon, Y. B., Kang, K. K. (2005) Cable Tension Force Management Using Vibration Method at Cable Stayed Bridge Construction Stages, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 9(4), 127-134 (in Korean).
12. Sagűes, A. A., Kranc, S. C., Eason, T. G. (2006), Vibrational Tension Measurement of External Tendons in Segmental Posttensioned Bridges, *Journal of Bridge Engineering*, 11(5), 582-589.
13. Zui, H., Shinke, T., Namita, Y. (1996), Practical Formulas for Estimation of Cable Tension Vibration Method, *Journal of Structural Engineering*, 18(8), 651-656.

Received : 11/26/2013
Revised : 12/13/2013
Accepted : 12/18/2013

요 지

본 연구에서는 PC교량의 외부텐던의 장력을 평가하기 위하여 신속하고 경제적으로 적용할 수 있는 텐던의 진동을 이용한 고유진동수 측정 방법의 적용성을 검토하였다. 길이별로 다양한 여러 종류의 외부텐던 덕트 표면에 가속도 센서를 부착하고 고유진동수를 측정하였다. 센서의 방향과 위치변경 등 여러 종류의 다양한 진동시험을 실시한 결과 고유진동수의 차이는 1% 이내로서 충분한 정확성을 확보하고 있음을 보였다. 측정된 고유진동수로부터 장력을 추정하기 위해서는 현의공식, 다중모드법, 저차 모드의 실용적 공식을 활용한 방법 (Zui et al., 1996), 양단고정 경계조건에 의한 휨강성을 고려한 현의공식 (Sagűès et al., 2006) 등의 장력 추정법을 적용하였고 그 결과값을 비교하였다. 휨강성을 반영하지 못한 현의 공식이나, 다중모드법은 길이가 짧은 텐던에 대해 장력을 과대평가하는 결과가 도출되어 텐던의 장력 평가에 적절하지 않음을 알 수 있었다. 텐던의 장력 추정에 적절한 방법은 양단고정 경계조건과 휨강성을 고려한 단단한 현의 공식에 의한 방법임을 알 수 있었으며, 이 방법을 실제 공용중인 PC 교량의 외부텐던에 적용한 결과 방향전환블록에 의한 마찰력으로 긴장단과 고정단에 텐던의 장력 차이가 발생한다는 것을 알 수 있었다.

핵심 용어 : 텐던의 긴장력, 진동측정방법, 고유진동수, 휨강성, 현의 공식