

# PSC보의 긴장력이 고유진동수에 미치는 영향

최상현(한국철도대학 교수)

Effect of prestressing force on natural frequency of  
a prestressed concrete beam

Choi, Sanghyun

## Abstract

The research on the effect of the prestressing force on the frequency of PSC(Prestressed Concrete beam) has been conducted theoretically and experimentally, and a few theory has been presented. However, the presented theories show no agreement in predicting the effect of the prestressing force. In this paper, the theories on the effect of the prestressing force on the frequency of PSC beam are presented and evaluated using the experimental result. To obtain the experimental result, two PSC beam specimens were manufactured, and the modal test and analysis were performed. The modal analysis results revealed that the prestressing force increased the natural frequency of the PSC beam. Comparing predicted results using existing theories show that Kim's model, which substitutes the prestressing tendon with the equivalent beam, gives the best prediction result.

## I. 서론

구조물에 사용되는 콘크리트는 내압축성은 우수하나 인장에 취약하므로 일반적으로 철근을 추가하거나 프리스트레싱 (prestressing) 기법을 적용하여 내인장력을 보강하고 있다. 프리스트레싱 텐던에 도입된 긴장력은 콘크리트에 발생하는 인장력을 감소시킬 뿐 아니라 구조물의 정적 및 동적 응답 특성도 변화시킬 수 있다. 텐던의 긴장력이 고유진동수 등 구조물의 동적응답특성에 미치는 영향에 대한 연구는 1990년대 중반 Saiidi 등(1994)의 연구 이후 몇몇 연구자에 의해 수행된 바 있다.

1994년 Saiidi 등은 현장실험 및 실내실험을 통하여 PSC보의 긴장력이 고유진동수에 미치는 영향을 조사하였으며, 긴장력이 증가할수록 고유진동수도 증가함을 발견하였다. 또한 실험 결과를 이용하여 선형회귀분석을 통한 긴장력과 고유진동수 간의 관계식을 제안한 바 있다. Saiidi 등(1994)의 모델에 대하여 Dall'Asta 와 Dezi(1996)는 변분법(variational method)을 이용하여 편심이 없는 PS단순보에 대한 모델 식을 제안한 바 있다. Miyamoto 등(2000)은 외부 프리스트레싱 보의 양단과 분기기(deviators)에서 텐던의 긴장력이 전달되는 수학적 모델을 기초로 하여 모델 식을 제안하였으며, 긴장력이 증가할수록 고유진동수가 감소하는 것으로 예측하였다. Kim 등(2003)은 Saiidi 등(1994)의 실험 결과를 기초로 긴장된 텐던을 등가의 보로 치환하여 편심이 없는 PS 단순보의 고유진동수에 대한 수학적모델을 제안하였다. Lu와 Law(2006)는 PS보에서 민감도기법을 바탕으로 계측된 가속도 및 변형률데이터를 이용

하여 텐던의 긴장력을 역해석하는 기법을 제안하고 이를 검증하기 위한 실험을 수행했으며, 긴장력이 증가할수록 고유진동수가 증가하는 것을 발견하였다. Hamed와 Frostig(2006)는 Hamilton의 원리를 이용하여 긴장력 변화가 PS보의 고유진동수에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 연구 결과 긴장력의 변화는 고유진동수에 영향을 미치지 않는 것으로 제시하였다.

이 논문에서는 프리스트레싱 시스템의 텐던에 작용하는 긴장력이 구조물의 고유진동수에 미치는 영향에 관한 기존의 주요 연구결과 및 해석 모델을 정리하고, 모달실험을 통해 검증하였다. 대부분의 PSC보에 대한 해석모델에서 동적해석 시 긴장력에 대한 영향이 무시되고 있는 상황을 감안할 때, 이 연구는 PSC보가 적용된 구조물의 진동특성 산정 시의 정확성을 제고할 수 있으며, 나아가 구조물의 진동특성을 이용한 손상탐지를 통한 구조물의 건전성 평가에 적용 시에도 유용하게 사용될 수 있다.

## II. 해석이론 및 모델

### 1. Saiidi 모델

Saiidi 등(1994)은 텐던의 긴장력이 구조물의 강성에 미치는 영향의 정량화에 대한 연구를 수행하였다. 균질한(homogeneous) 보에 축력이 작용할 경우 Compression Softening 효과(Craig, 1981)에 의해 고유진동수는 다음과 같이 변화한다.

$$\omega_n^2 = -\left(\frac{N}{L}\right)^2 \frac{N}{m} + \left(\frac{N}{L}\right)^4 \frac{EI}{m} \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 모드수;  $L$ 은 보의 길이;  $N$ 은 축력(압축 +);  $m$ 은 단위 길이 당 질량;  $E$ 는 탄성계수;  $I$ 는 보의 단면2차 모멘트이다.

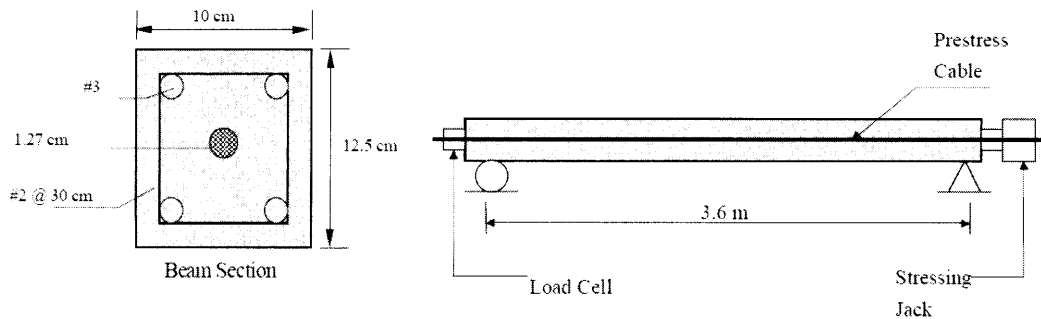
식 (1)에 의하면 보의 고유진동수는 압축력이 증가할수록 작아지며 고차모드로 갈수록 축력의 영향이 작아짐을 알 수 있다. 식 (1)의 모델을 검증하기 위해 Saiidi 등은 Golden Valley Bridge의 텐던 긴장 시 장착된 장비를 이용하여 긴장력을 계측하고 3회에 걸친 동적 실험을 통해 고유진동수를 구하였다. 실험 결과는 식 (1) 모델의 예측 값과 반대로 긴장력이 감소할수록 고유진동수도 감소하는 추세를 보이고 있어, Saiidi 등은 그림 1의 시험 체 및 장치를 이용하여 실내 실험을 수행하였다. 실내 실험 결과(표 1) 또한 긴장력 증가에 따라 고유진동수도 증가하는 것으로 나타났으며, Saiidi 등은 이 원인을 건조수축 등에 의한 미세 균열이 긴장력에 의해 닫힘으로써 보의 강성이 증가하는 것으로 추정하였다. Saiidi 등은 측정된 데이터를 이용한 선형회귀 분석을 통하여 유효강성에 대한 다음 식을 제안하였다.

$$(EI)_{eq} = \left(1 + 1.75 \frac{N}{f_c'}\right) EI_g \quad (2)$$

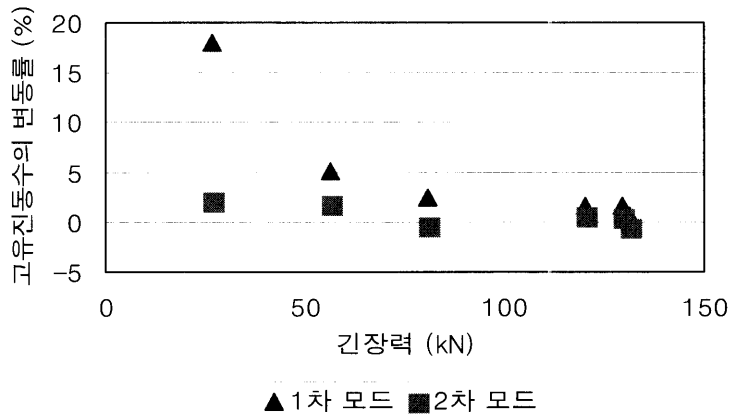
여기서  $N$ 은 텐던의 긴장력,  $f_c'$ 는 콘크리트의 압축강도,  $EI_g$ 는 철근콘크리트 단면의 강성을 나타낸다. 긴장력의 변화에 따른 고유진동수 변화를 살펴보면(그림 2) Saiidi 등이 제시한 것과 같이 진동수의 차수가 높아질수록 민감도가 떨어지는 것으로 나타났다.

<표 1> 긴장력과 고유진동수 계측 값 (Saiidi 등, 1994)

Prestress Force (kN)	First Mode Frequency (Hz)	Second Mode Frequency (Hz)
0	11.41	43.99
26.73	13.47	44.89
56.58	14.15	45.71
80.87	14.49	45.57
120.06	14.72	45.86
129.40	14.97	46.10
131.27	15.07	45.87
129.89	14.78	45.86
90.21	14.72	46.20
85.54	14.95	46.32
72.93	14.72	46.05
56.59	13.63	45.42
36.07	12.89	44.69
15.53	12.09	44.11



<그림 1> Saiidi 등(1994)의 실험장치



<그림 2> 긴장력 변화에 따른 고유진동수의 변동

## 2. Dall'Asta-Dezi 모델

Saiidi 등(1994)의 모델에 대하여 Dall'Asta 와 Dezi(1996)는 변분법(variational method)을 이용하여 편심이 없는 PS단순보에 대하여 다음 모델을 제안하였다.

$$\omega_n^2 = \frac{n^4 \pi^4}{mL^4} \left[ \left( E_b - \frac{N}{A_b} \right) I_b + \left( E_c - \frac{N}{A_c} \right) I_c \right] \quad (3)$$

여기서, 아래첨자  $b$ 는 보의 전체 단면에 대한 변수를 아래첨자  $c$ 는 텐던에 대한 변수를 의미한다. 식 (3)에서  $E_b$ 와  $E_c$ 에 비해  $N/A_b$  및  $N/A_c$ 가 훨씬 작고  $I_c$ 가  $I_b$ 에 비하여 무시할 정도로 작으므로 Dall'Asta 와 Dezi의 모델은 고유진동수에 대한 긴장력의 영향이 매우 작음을 알 수 있다.

## 3. Miyamoto 모델

Miyamoto 등(2000)은 외부에서 프리스트레싱 된 콘크리트보의 고유진동수에 대하여 다음의 모델 식을 제안하였다.

$$\omega_n = a_v \left( \frac{\pi n}{l} \right)^2 \xi \quad (4)$$

여기서

$$\xi = \sqrt{\left\{ 1 - \left( \frac{l}{\pi n} \right)^2 \frac{P_{tc}^0}{E_s J_{is}} + \frac{2A}{(\pi n)^2} \frac{v}{\mu + 4\lambda \cos \Theta} \right\}} \quad (5)$$

$$a_v^2 = (E_s J_{is} / \sum \gamma_i A_i) g \quad (6)$$

$$v = (e \cos \Theta + a \sin \Theta)^2 \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{I_{is}}{A_{is}} + \frac{E J_{is}}{E_t A_t} \frac{l_t}{l}, \quad \mu = (4 \cos \Theta - 3)(e \cos \Theta + a \sin \Theta) \quad (8)$$

여기서  $l$  : 보의 길이,  $q_v$  : 분포질량,  $E_s J_{is}$  : 거더의 휨강성

$A_{is}$  : 강단면으로 환산한 단면적,  $P_t^0$  : 초기 긴장력,  $l_t$  : 텐던의 길이

$P_{tc}$  :  $P_t \cos \Theta = (P_t^0 + \Delta P_t) \cos \Theta = P_{tc}^0 + \Delta P_{tc}$ ,  $E_t$  : 텐던의 탄성계수

$P_{ts}$  :  $P_t \sin \Theta = (P_t^0 + \Delta P_t) \sin \Theta = P_{ts}^0 + \Delta P_{ts}$ ,  $A_t$  : 텐던의 단면적

$\Delta P_{tc}$  : 휨진동에 의해 증가되는 긴장력의 수평분력,  $\gamma_i$  : 거더의 단위중량

$\Delta P_{ts}$  : 휨진동에 의해 증가되는 긴장력의 수직분력,  $A_i$  : 거더의 단면적

$y$  : 진동에 의한 변위,  $M_t = M_{tc} + M_{ts} = P_{tc} e + P_{ts} a$

식 (4)에 제시된 Miyamoto 모델은 외부 프리스트레싱 보의 양단과 분기기(deviators)에서 텐던의 긴장력이 전달되는 수학모델을 기초로 하고 있으며, 긴장력이 증가할수록 고유진동수가 감소하는 것으로 예측하고 있다.

#### 4. Kim 모델

Kim 등(2003)은 Saiidi 등(1994)의 실험 결과를 기초로 긴장된 텐던을 등가의 보로 치환하여 편심이 없는 PSC 단순보의 고유진동수에 대한 수학모델을 아래와 같이 제안하였다.

$$\omega_n = a_v \left( \frac{\pi n}{l} \right)^2 \xi \quad (9)$$

여기서,  $E_c I_c$ 는 콘크리트보의 휨강성을 나타낸다.

<표 2>는 Saiidi 등의 실험값과 Kim 모델 예측 값을 보이고 있다. Kim 등의 모델은 이전 다른 모델과 달리 Saiidi 등의 실험결과와 마찬가지로 고유진동수가 긴장력 증가에 따라 같이 증가하는 것을 알 수 있다.

<표 2> Saiidi 등의 실험값과 Kim 모델 예측 값 비교

Prestress Force (kN)	Saiidi 등의 실험값 (Hz)		Kim 모델 예측 값 (Hz)	
	Mode 1	Mode 2	Mode 1	Mode 2
0	11.41	43.99	11.41	45.63
26.73	13.47	44.89	12.13	46.37
80.87	14.49	45.57	13.47	47.83
120.06	14.72	45.86	14.36	48.85
129.40	14.97	46.10	14.56	49.10
131.27	15.07	45.87	14.61	49.14

### 5. Lu와 Law의 실험

Lu와 Law(2006)는 PSC보에서 민감도기법을 바탕으로 계측된 가속도 및 변형률데이터를 이용하여 텐던의 긴장력을 역해석하는 기법을 제안한 바 있다. 텐던의 긴장력을 산정하기 위한 최종 최적함수는 다음과 같다.

$$J(\delta T, \lambda) = \|S\delta T - \delta R\|^2 + \lambda \|\delta T\|^2 \tag{10}$$

여기서, S는 민감도행렬, T는 긴장력 벡터, R은 응답 벡터, λ는 Penalty Parameter를 나타낸다. Lu와 Law는 제안된 방법을 검증하기 위하여 PSC 단순보에 대한 동적 실험을 수행하였다. 실험 결과 Saiidi 등의 실험에서와 마찬가지로 텐던이 긴장되었을 때 고유진동수가 증가하는 것으로 나타났다. Lu와 Law는 이러한 원인을 긴장력의 작용으로 인한 보의 길이 축소 및 긴장된 강선으로 인한 단면의 굽힘 강성 증가 때문으로 추정하였다.

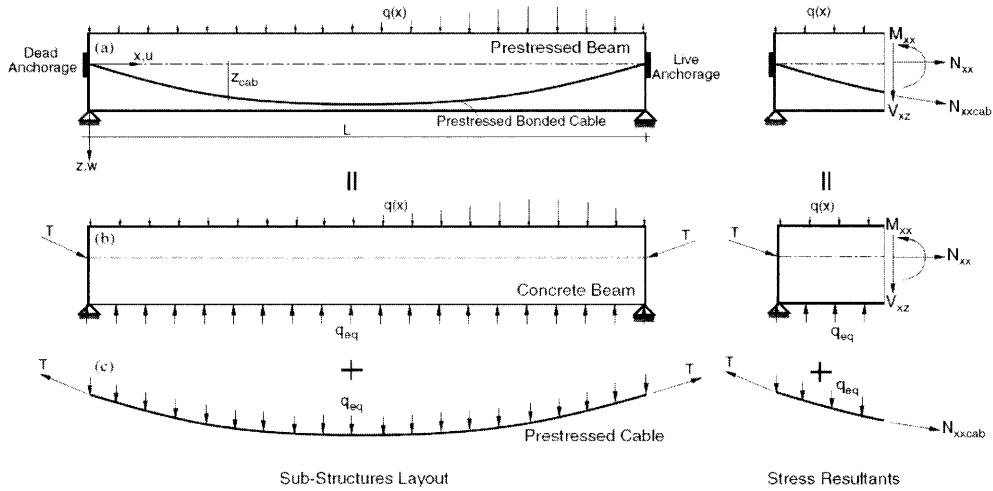
### 6. Hamed-Frostig 모델

Hamed와 Frostig(2006)는 Hamilton의 원리를 이용하여 긴장력 변화가 PS보의 고유진동수에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 제시하였다. <그림 3>의 수학적 모델을 이용하여 부착식 PSC보의 운동방정식을 구하면 다음 두 개의 비선형미분방정식으로 표현될 수 있다.

$$m\omega^2 w + M_{xx,xx} + ((N_{xxcab} + N_{xx})w_{,x})_{,x} + (N_{xxcab}z_{cab,x})_{,x} - (N_{xx,x}z_{cab})_{,x} = 0 \tag{11}$$

$$N_{xx,x} + N_{xxcab,x} = 0 \tag{12}$$

여기서, 아래첨자  $x$  및  $xx$ 는  $x$ 에 대한 1차 및 2차 미분;  $w$ 는 수직방향의 처짐;  $N_{xx}$ ,  $M_{xx}$ 는 텐던의 긴장력  $T$ 에 의하여 보에 발생하는 축 방향 및 모멘트 응력의 합(stress resultant);  $z_{cab}$ 는 텐던의 위치;  $N_{xxcab}$ 는 텐던에 발생하는 응력의 합을 나타낸다. 위 식에 경계조건을 고려하여 자유진동해석의 해를 구하면 진동 전 보에 존재하던 응력을 고려할 필요가 없게 된다. 결국 Hamed와 Frostig 모델에서 긴장력의 크기는 PSC보의 고유진동수,  $\omega$ 에 영향을 미치지 않게 된다. 비 부착식의 경우도 위 식과 마찬가지로 긴장력의 크기가 고유진동수에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.



<그림 3> Hamed-Frostig의 수학적모델

### III. 기존연구결과 분석 및 실내 실험

현재까지 제안된 PSC보의 긴장력 변화에 따른 고유진동수 산정 모델은 서로 매우 상이한 결과를 내는 것으로 나타났다. Hamed-Frostig 모델은 긴장력의 변화가 고유진동수에 영향을 주지 않으나, Dall'Asta-Dezi 모델과 Miyamoto 모델은 긴장력이 증가하면 고유진동수가 감소하며, Saiidi 모델과 Kim 모델은 긴장력이 증가함에 따라 고유진동수도 증가한다. 실험적 연구 결과를 살펴볼 때 Miyamoto 등이 수행한 외부 프리스트레싱의 경우를 제외하고 Saiidi 등 및 Lu와 Law에 의해 실험이 수행된 바 있으며, 실험 결과는 모두 긴장력의 증가에 따라 고유진동수가 증가하는 것으로 나타났다.

이상의 연구결과를 종합할 때 PSC보의 긴장력 변화와 고유진동수의 관계를 규명하기 위해서는 별도의 실험을 통한 기존 모델의 적절성에 대한 검토가 필요한 것으로 나타났다. 이 논문에서는 PS보의 긴장력 변화에 따른 고유진동수의 변화를 규명하기 위하여 PSC보 시험

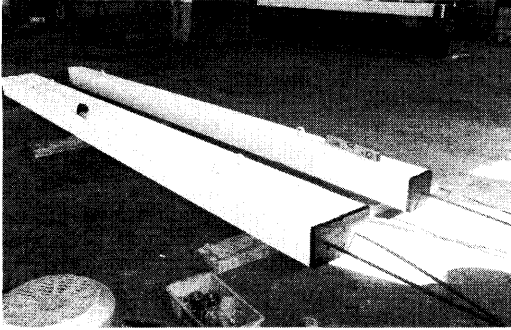


체를 제작하고 동적실험을 수행하였다. 시험체는 15cm×20cm의 사각형 단면을 갖는 PSC보로 총길이 4.20m, 1지간길이 4.0m이다. 시험체는 그림 3과 같이 텐던이 편심 없이 단면 중심부에 직선 배치된 경우와 시편 중앙부에 편심을 주어 곡선형으로 배치된 경우의 두 가지를 제작하였다. <그림 4>는 제작된 시험체이다. 시험체의 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 210 kg/cm<sup>2</sup>이다. 텐던은 피복재로 덮여있어 PSC보 제작 시 별도의 쉬스관을 매설하지 않았다. PSC보의 양단부는 긴장력 작용 시 응력집중으로 인한 균열을 방지하기 위하여 30mm 두께의 강관으로 보강하였다.

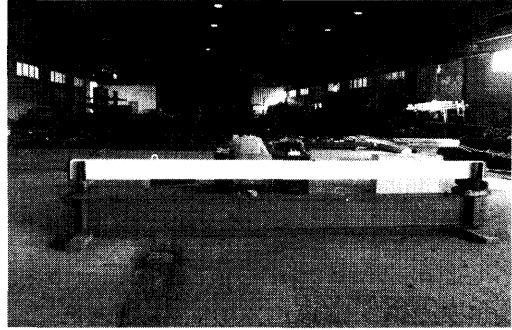
시험체의 단순지지 조건은 <그림 5>와 같이 강재로 제작된 지지대를 이용하여 조성하였다. 시험체에 가해진 동적하중은 <그림 6>의 가진망치를 이용하였으며, <그림 7>의 가속도계를 이용하여 시험체의 응답을 측정하였다. 시험체의 한 쪽 단은 <그림 8>과 같이 정착장치를 이용하여 텐던을 정착하였으며, 다른 한 쪽 단은 <그림 9>의 정착장치 및 유압잭을 이용하여 긴장력을 재하 하였다. 실험에 사용된 장비의 제원은 <표 3>에 제시하였다. 동적실험은 한 개의 가속도계를 고정하고 가진 위치를 이동시키는 방법으로 수행하였다. 가속도계 및 가진 위치는 <그림 10>에 도시하였다. 가속도계로부터 측정된 응답은 Signal Analyzer를 거쳐 컴퓨터로 수집되도록 하였다. 시험체 상부에 가진 위치를 표시하여 가진 위치를 일정하게 하였으며, 각 위치 별로 가속도 데이터를 5회 수집하였다.

그림 10의 각 위치별로 5번의 가진을 통해 얻은 가속도데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)하여 주파수응답함수를 구하고 평균하였다. 긴장력을 0 ton에서 18 ton까지 6 ton씩 증가시키며 수집된 전달함수(transfer function)를 모달해석하여 시험체에 대한 모달 파라미터(modal parameter)를 추출하였다 (Ewins, 1986). 구조물의 고유진동수(주파수 응답 함수에서의 피크) 및 모드형상을 추출할 수 있는 동적실험은 입력하중을 제어할 수 있는 강제 진동시험을 이용하였다. 임팩트 해머로 빔 구조물에 충격을 주어 진동을 유도하고, 가속도계를 측정하고자 하는 위치에 부착하여 가속도 응답을 계측하였다. 시간영역에서의 충격과(input)와 가속도 응답(output)을 계측한 후 FFT로 치환하여 주파수 영역에서 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)를 생성하였다.

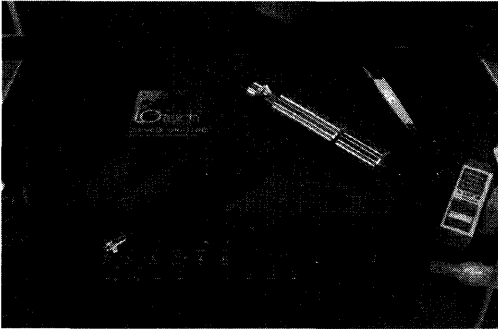
샘플링 데이터는 200Hz에 맞추어 16초 동안 계측하였으며 이때 스펙트럼의 해상도는 0.0625Hz이다. 계측 시 임팩트 해머 최대용량(Full Scale Voltage)의 1%의 신호가 감지되면 모든 채널에서 계측을 시작하도록 하였으며, FFT 시 누수오차를 줄이기 위하여 가속도계 채널은 지수 윈도우(exponential window), 해머 채널은 사각 윈도우(rectangular window)를 각각 적용하였다.



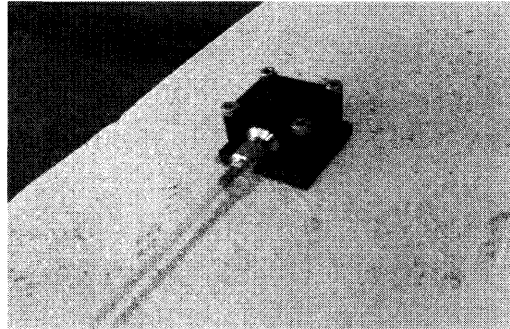
<그림 4> PS보 시험체



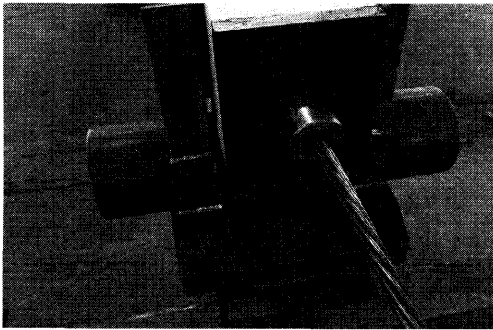
<그림 5> 시험체 및 강제지지대



<그림 6> Signal Analyzer와 가진망치



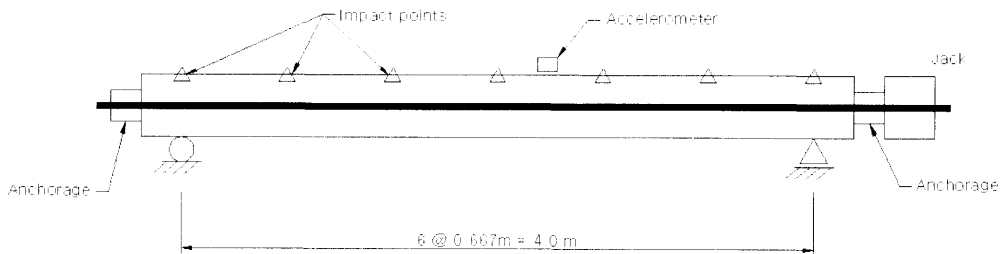
<그림 7> 가속도계



<그림 8> 텐던 정착장치



<그림 9> 유압잭



<그림 10> 가속도계 및 가진 위치

<표 3> 실험에 사용된 장비

장비명	제조사	비고
Accelerometer	Kistler	8330A2.5(±2.5g)
Hammer	Kistler	9726A5000(0~1000lbf)
Signal Analyzer	IOtech, Inc.	8채널
Oil Jack	VSL	용량 23 ton

## IV. 실험결과 및 분석

모달 해석을 통해 추출된 고유진동수는 <표 4>에 정리하였다. 표에서 긴장력의 증가에 따라 PS보의 고유진동수가 증가하는 것으로 나타났으며, 직선형으로 텐던이 배치된 경우가 곡선형으로 배치된 경우보다 변화량이 큰 것으로 나타났다. <표 5>는 검토된 모델 중 텐던의 긴장력 증가에 따라 고유진동수가 증가하는 Saiidi 모델과 Kim 모델의 예측 값과 직선형 텐던 PS보의 측정값을 비교한 결과이다. 고유진동수 비교는 첫 번째 모드로 제한하였다. Saiidi 모델과 Kim 모델 모두 직선형 텐던 PS보에 대한 모델이므로 직선형 텐던에 대한 측정값만을 비교하였다. 비교 결과 Saiidi 모델은 측정값을 최고 57.4%까지 과다 평가하고 있었으나, Kim 모델은 측정값과 거의 일치하고 있었다. 고차 모드에서 Kim 모델의 적용성을 검토하기 위하여, 표 2-10에서는 직선형 텐던에서 추출한 모든 모드의 고유진동수와 Kim 모델의 예측 값을 비교하여 보았다. 표에서 측정값과 예측 값의 상대오차는 고차 모드로 갈수록 커지나 최고 1.74%로 비교적 작음을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 PSC보에서 텐던의 긴장력이 증가함에 따라 고유진동수도 증가하는 것을 알 수 있었으며, 제안된 모델 중 Kim 모델이 텐던의 긴장력에 의한 고유진동수의 변화를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

## V. 결론

이 논문에서는 프리스트레싱 시스템의 텐던에 작용하는 긴장력이 구조물의 고유진동수에 미치는 영향에 관한 기존의 주요 연구결과 및 해석 모델을 정리하고, 모달 실험을 통해 기존 모델의 적절성을 검증하였다. 모달 해석을 통해 추출된 고유진동수를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

<표 4> 측정된 고유진동수

긴장력 (ton)	직선배치 텐던 (Hz)			곡선배치 텐던 (Hz)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
0	20.81	86.81	182.1	20.44	86.81	180.7
6	21.31	88.13	183.8	20.56	87.13	182.7
12	21.63	88.31	185.9	20.63	87.13	183.9
18	21.63	88.5	186.4	20.50	87.25	183.9

<표 5> 측정값과 모델 예측 값 비교

긴장력 (ton)	고유진동수 (Hz)				
	측정값	Saïidi 모델		Kim 모델	
0	20.81	20.81	0%*	20.81	0%
6	21.31	27.91	31.0%	21.13	0.85%
12	21.63	31.13	43.9%	21.45	0.85%
18	21.63	34.05	57.4%	21.76	0.58%

\* %상대오차 = |예측값 - 측정값|/측정값

<표 6> 직선형 PSC보의 고유진동수 측정값과 Kim모델 예측값 비교

긴장력 (ton)	직선배치 텐던 (Hz)			Kim 모델 예측값 (Hz) (%상대오차)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1	Mode 2	Mode 3
0	20.81	86.81	182.1	20.81	86.81	182.10
6	21.31	88.13	183.8	21.13 (0.85%)	87.13 (1.14%)	182.45 (0.73%)
12	21.63	88.31	185.9	21.45 (0.85%)	87.44 (0.98%)	182.80 (1.67%)
18	21.63	88.5	186.4	21.76 (0.58%)	87.76 (0.84%)	183.15 (1.74%)

- 긴장력의 증가에 따라 PSC보의 고유진동수가 증가하는 것으로 나타났으며, 직선형으로 텐던이 배치된 경우가 곡선형으로 배치된 경우보다 변화량이 큰 것으로 나타났다.
- 텐던의 긴장력 증가에 따라 고유진동수가 증가하는 Saïidi 모델과 Kim 모델의 예측 값과 직선형 텐던 PS보의 측정값을 비교한 결과 Saïidi 모델은 측정값을 최고 57.4%까지 과다 평가하고 있었으나, Kim 모델은 측정값과 거의 일치하는 것으로 나타났다.
- 직선형 텐던에서 추출한 모든 모드의 고유진동수와 Kim 모델의 예측값을 비교한 결과 측정값과 예측 값의 상대오차는 고차 모드로 갈수록 커지나 최고 1.74%로 비교적 작음

을 알 수 있었다.

- PSC보에서 텐던의 긴장력과 고유진동수 간의 관계에 대한 기존 모델 중 Kim 모델이 텐던의 긴장력에 의한 고유진동수의 변화를 가장 잘 예측하는 것으로 나타났다.

## [참고문헌]

1. Craig, R. R. (1981) Structural Dynamics: An Introduction to Computer Methods, John Wiley and Sons.
2. Saiidi, M., Douglas, B. and Feng, S. (1994) "Prestress Force Effect On Vibration Frequency Of Concrete Bridges", Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 7, pp. 2233-2241.
3. Dall'Asta, A. and Dezi, L. (1996) Discussion on "Prestress Force Effect On Vibration Frequency Of Concrete Bridges", Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 4, pp. 458.
4. Miyamoto, A. Tei, K. Nakamura, H. and Bull, J. W. (2000) "Behavior Of Prestressed Beam Strengthened With External Tendons", Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 9, pp. 1033-1044.
5. Kim, J. T., Ryu, J. S., and Yun, C. B. (2003) "Vibration-Based Method to Detect Prestress-Loss in Beam-Type Bridges," SPIE, Smart Structures and Materials, Vol. 5057, pp. 559-567.
6. Lu, Z. R. and Law, S. S. (2006) "Identification of Prestress Force From Measured Structural Responses" Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 20, pp. 2186-2199.
7. Hamed, E. and Frostig, Y. (2006) "Natural Frequencies of Bonded and Unbonded Prestressed Beams-Prestress Force Effects" Journal of Sound and Vibration, Vol. 295, pp.28-39.
8. Ewins, D. J. (1986). Modal Testing: Theory and Practice. Research Studies Press Ltd., Hertfordshire, England.

논문접수일 : 2009년 10월 14일

심사의뢰일 : 2009년 10월 19일

심사완료일 : 2009년 12월 11일