

모우드 해석법을 이용한 캔틸레버 곡선보의 동적해석

Dynamic Analysis of Cantilevered Curved Beam using Modal Analysis Method

김 영 문*
Kim, Young-Moon

유 기 표**
You, Ki-Pyo

요 약

곡선보의 고유진동수를 측정하기 위하여 이론적인 해석과 실험 및 유한요소법해석을 실시하였다. 본 논문에서는 모우드해석을 위한 실험에서 얻어지는 결과로부터 곡선보의 동특성의 하나인 고유진동수를 구하였다. 먼저, 이론식을 통해 구조물의 동특성을 파악하고, 유한요소해석과 실험에 의한 결과를 비교·검토하여 구조물의 동적해석에 있어서 모우드해석법의 적용성을 보였다.

Abstract

The Paper presents three methods for calculating the natural frequencies of cantilevered curved Beams.

A summary is given of the development of two techniques: theoretic value and the result of the experiment. Theoretic value of curved beam vibration analysis are derived from complementary variational principles assuming as unknown stress-displacement result fields. In order to perform free vibration analysis of curved beam, Aluminum-made cantilevered curved beam is used in experiment. Experimental input and output signals are derived from the impact hammer and the an accelemerter are amplified by an amplifier. The validity of the modal analysis method

키워드 : 곡선보, 모우드 해석, 고유진동수, 경계조건

Keywords : Curved Beam, Modal Analysis, Natural Frequency, Boundary Condition

1. 서 론

국내에서도 최근에 건설되는 다양한 형태의 특수 구조물(경기장, 관람장, 전시장 등)들이 많이 건설되고 있다. 그러나 이러한 대공간구조물의 경우 가벼운 재료적인 특성 때문에 특히 바람에 의해 파괴가 많이 발생되고 있다. 특히 국내에서 발생하는 태풍에 의해 대공간구조물의 파괴 및 손상이 빈번하게 발생하고 있어 경제적, 사회적으로 많은 문제를 유발 시키고 있다. 현재 국내에서 건설되고 있는 대부분의 대공간구조물은 정적특성만을 고려하는 풍압 실험을 중심으로 이루어 지고 있다. 그러나 대공간

구조물의 파괴 양상은 대부분이 동적효과가 원인이지만 이들에 대한 국내 연구는 매우 미약하다. 그리고 이러한 대공간 구조물들은 대부분이 직선형태보다는 곡선형태로 구성되어 있다. 이러한 곡선보에 대한 구조물의 분석과 실험적인 연구는 많이 이루어져 왔으나, 정적인 하중에 의한 곡선보의 거동에만 국한되었으며, 곡선보의 진동응답에 대한 연구는 미비한 실정이다. 곡선보의 자유진동에 대한 연구는 Charles와 Culver(1967)³⁾의 논문으로부터 최근에 다양한 형태 구조물의 동적해석에 대한 연구가 계속되고 있다. 곡선보의 연구중에서 ring과 arch에 대한 진동해석은 기존의 이론이 바탕이 되었으나, 이 외의 단면이 직사각형인 곡선보의 동적해석에 있어서는 더 많은 연구가 필요하다⁴⁾.

본 연구는 곡선보의 동적특성인 고유진동수를 규명함으로써 곡선보의 거동을 예측하고자 한다. 곡선

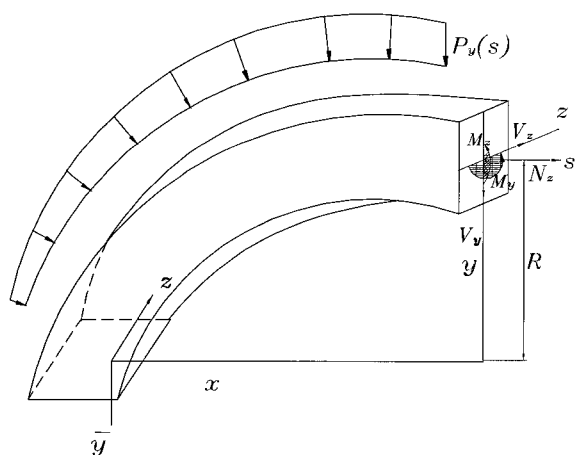
* 정희원, 전북대학교 건축도시공학과 교수, 공업기술연구센터
** 정희원, 전북대학교 건축도시공학과 전임강사, 공업기술연구센터
Tel : 063-270-40574, Fax : 063-270-2285
E-mail : youkp@chonbuk.ac.kr

보는 복잡한 기하학적 형상으로 인해 정확한 이론식을 유도하기가 어려우므로 이상적인 해석모델을 설정하여 기본방정식을 유도하였다. 또한, 곡선보의 임의의 지점을 가진하는 진동실험을 통해 모우드 해석법을 적용하여 고유진동수를 구하였다. 캔틸레버 곡선보의 동적인 해석을 통하여 이론값과 실험결과를 비교검증함으로써 곡선보의 동적해석에 있어서 모우드 해석법의 타당성과 효율성을 입증한다.

2. 곡선보의 이론식

2.1 곡선보의 해석모델

본 논문의 곡선보는 반경이 R 인 캔틸레버 곡선보의 자유단에서 거리 s 만큼 떨어진 단면에서의 곡선부재의 형태 및 단면 모양, 좌표계 및 작용하중을 표현하면 다음 <그림 1>과 같다. <그림 1>에서 단면의 수직, 수평방향의 좌표축을 x, y 로 표시하고 부재축 방향을 s 로, x, y, s 의 변위를 u, v, w 로 표현하였다.

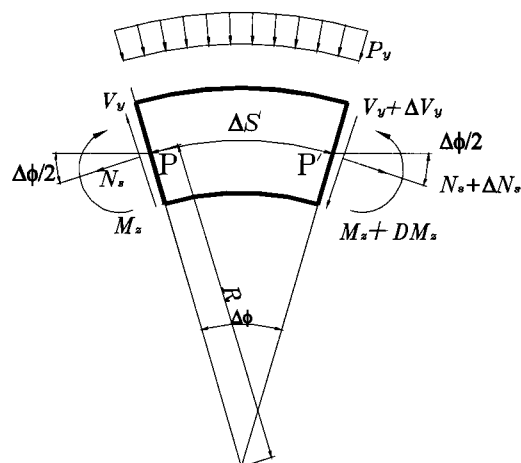


<그림 1> 곡선보의 좌표계

2.2 곡선보의 평형조건식

미소요소 Δs 에 대한 부재력 성분인 축력은 N_z , z 축에 대한 휨모멘트는 M_x, y 축의 전단력은 V_y 로 표시하면 <그림 2>와 같다.

곡선보의 평형조건식으로부터 다음의 (1) ~ (3)식을 얻을 수 있다.



<그림 2> 곡선보의 부재력

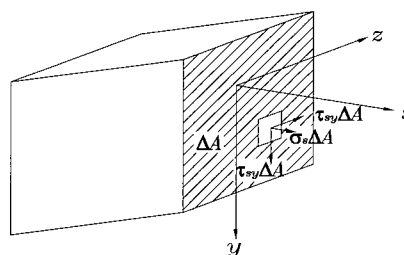
$$\frac{dV_y}{ds} = -P_y - \frac{N_z}{R} \tag{1}$$

$$\frac{dN_z}{ds} = \frac{V_y}{R} \tag{2}$$

$$\frac{dM_x}{ds} = V_y \tag{3}$$

(3)식을 ds 에 대해 두 번 미분하고, (1)식을 ds 에 대해 두 번 미분하여 대입하면 (4)식이 된다.

$$\frac{d^3 M_x}{ds^3} + \frac{1}{R^2} \frac{dM_x}{ds} + \frac{dP_y}{ds} = 0 \tag{4}$$



<그림 3> 곡선보의 단면응력

<그림 3>에서와 같이 normal stress σ_s 와 ϵ_s 와의 관계는 다음 (5)식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = E\epsilon_s = \frac{E}{1 - y/R} (a + by + cz) \tag{5}$$

곡선보 단면의 힘과 응력과의 관계를 (5)식으로

나타내면 다음 (6)식이 된다.

$$\begin{aligned} N_s &= \int_A \sigma_s dA \\ M_z &= \int_A \sigma_s y dA \\ M_y &= \int_A \sigma_s z dA \end{aligned} \quad (6)$$

(6)식의 적분상수를 단면함수로 나타내어 식을 정리하면 응력 σ_s 는 (7)식이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \frac{N_s}{s} - \frac{M_z}{RA} + \frac{M_z J_y - M_y J_{yz}}{J_y J_z^2} \frac{y}{1-y/R} \\ &+ \frac{M_y J_z - M_z J_{yz}}{J_y J_z - J_{yz}^2} \frac{z}{1-y/R} \end{aligned} \quad (7)$$

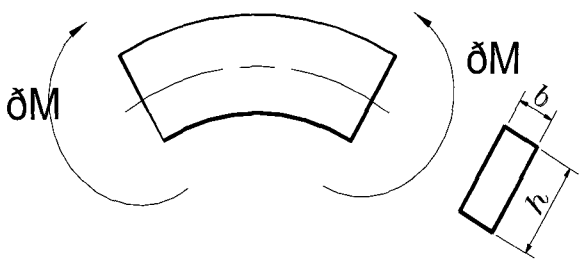
본 해석모델에서는 순수 휨의 경우 $N_s=0$ 이며 xy 평면에 대해 대칭인 곡선보이므로 M_y 와 J_{yz} 값은 0이 되므로 σ_s 는 (8)식이 된다.

$$\sigma_s = -\frac{M_z}{RA} + \frac{M_z}{J_z} \frac{y}{1-y/R} \quad (8)$$

여기서, J_z 단면상수로서 치환적분을 통해 다음 (9)식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} J_z &= \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{y^2 b dy}{1-y/R} \\ &= -R^2 b h - R^3 b \ln \frac{2R-h}{2R+h} \end{aligned} \quad (9)$$

(9)식의 b, h 는 곡선보 단면의 폭과 춤으로서 <그림 4>에 나타낸 바와 같다.



<그림 4> 곡선보의 단면

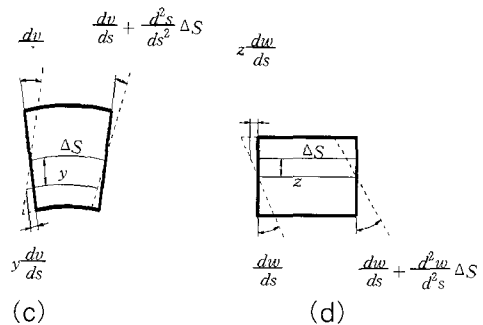
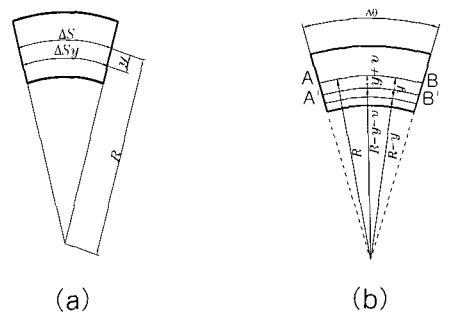
2.3. 곡선보의 탄성곡선

<그림 5>는 곡선보의 끝단에서 s 만큼 떨어진 Δs 는 보 단면의 Arc의 증분으로 x, y, z 의 미소변형을 u, v, w 로 표시하였다. <그림 5(a)>에서와 같이 중립축으로부터 y 만큼 떨어진 거리에서의 Δs_y 와의 관계 $\Delta s_y = \Delta s_y / (1-y/R)$ 이며, <그림 5(b)>에서 도심축이 A-B($R-y$)에서 원호 A'-B'($R-y-v$)로 이동하므로 원호길이에 대한 변형률은 다음 (10)식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (\epsilon_s)_1 &= \frac{(R-y-v)\Delta\theta - (R-y)\Delta\theta}{(R-y)\Delta\theta} \\ &= \frac{-v}{r-y} \\ &= \frac{-yv}{(1-y/R)r^2} - \frac{v}{R} \end{aligned} \quad (10)$$

<그림 5(b)>에서는 도심축의 변형률을 도시하였고 고 같은 방법으로 (11)식으로 나타내었다. <그림 5(c)와 (d)>는 각각 y, z 축에 대한 회전각의 미소변형률을 도시한 것으로 (2-12)식과 같다.

$$(\epsilon_s)_0 = (1 - \frac{y}{R}) \frac{du_0}{ds} \frac{ds}{ds_y} \quad (11)$$



<그림 5> 곡선보의 변형성분

$$u_2 = -y \frac{dv}{ds} - z \frac{dw}{ds}$$

$$(\epsilon_s)_2 = \frac{\partial u_2}{\partial s} = \frac{1}{(1-y/R)} \left(y \frac{dv^2}{ds^2} - z \frac{dw^2}{ds^2} \right) \quad (12)$$

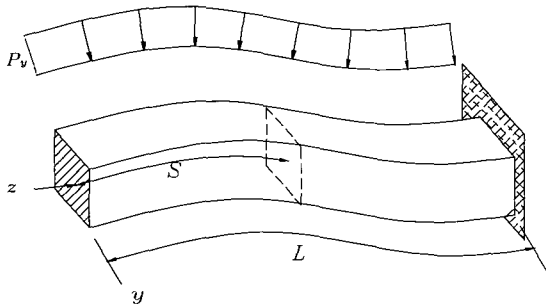
총 변형률 ϵ_s 은 $(\epsilon_s)_0 + (\epsilon_s)_1 + (\epsilon_s)_2$ 이므로

$$\epsilon_s = \frac{du_0}{ds} - \frac{v}{R} - \left(\frac{d^2v}{ds^2} + \frac{v}{R^2} \right) \frac{y}{1-y/R} - \frac{d^2w}{ds^2} \frac{z}{1-y/R} \quad (13)$$

(6)식과 (12)식으로부터 M_y, M_z, N_s 를 구하여 곡선보의 평형조건식인 (4)식에 대입하면 다음과 같은 곡선보의 탄성곡선식을 얻을 수 있다.

$$-EJ_z \left(\frac{d^5v}{ds^5} + \frac{1}{R^2} \frac{d^3v}{ds^3} + \frac{1}{R^4} \frac{dv}{ds} \right) + \frac{dP_v}{ds} = 0 \quad (14)$$

2.4 곡선보의 자유진동 해석



<그림 6> 캔틸레버 곡선보

<그림 2~6>과 같은 캔틸레버 곡선보의 자유진동에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$EJ_z \left(\frac{d^5v}{ds^5} + \frac{1}{R^2} \frac{d^3v}{ds^3} + \frac{1}{R^4} \frac{dv}{ds} \right) + m \frac{d^2v}{dt^2} = 0 \quad (15)$$

변수분리법에 의한 해를 구하기 위해 y 방향의 변위를 $v(s, t) = \Phi(s) T(s)$ 와 같이 거리와 시간의

함수로 가정하면 (16)식과 같다.

$$\frac{\Phi^{VI} + \frac{1}{R^2} \Phi^{IV} + \frac{1}{R^4} \Phi^{II}}{\Phi^{II}} = -\frac{m\ddot{T}}{EJ_z T} \quad (16)$$

$\Phi(s) = Ce^{st}$ 로 놓으면 (17)식이 된다.

$$s^4 - \frac{1}{R^2} S^2 + \frac{1}{R^4} - a^4 = 0 \quad (17)$$

여기서, $a^4 = \frac{m\omega^2}{EJ_z}$ 이다.

(17)식의 해는 다음 (18)식과 같다.

$$\begin{cases} s_1 = \alpha i = i \sqrt{\left(\frac{1}{2R^2}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{m\omega^2 4R^4}{EJ_z}}\right)} \\ s_2 = -s_1 \\ s_3 = \beta = \sqrt{\left(\frac{1}{2R^2}\right) \left(-1 + \sqrt{\frac{m\omega^2 4R^4}{EJ_z}}\right)} \\ s_4 = -s_3 \end{cases} \quad (18)$$

고정단과 타단이 자유단인 캔틸레버 곡선보의 모우드 함수 $\Phi(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$\Phi(s) = A \cos \alpha s + B \sinh \alpha s + C \cosh \beta s + D \sinh \beta s$
고정단에서 처짐과 처짐각이 0이므로

$$\Phi(s=0) = 0, \quad \Phi'(s=0) = 0 \quad (19)$$

자유단에서 M 과 V 는 0이므로

$$\Phi''(s=L) = 0, \quad \Phi'''(s=L) = 0 \quad (20)$$

(19)식과 (20)식으로부터 특성방정식의 해는 다음과 같다.

$$\begin{vmatrix} \alpha^2 \cos \alpha L + \beta^2 \cosh \beta L & \alpha \beta \sin \alpha L + \beta^2 \sinh \beta L \\ -\alpha^3 \sin \alpha L + \beta^3 \sinh \beta L & \alpha^2 \beta \cos \alpha L + \beta^3 \cosh \beta L \end{vmatrix} = 0$$

따라서 캔틸레버 곡선보의 frequency Equation은 다음 (21)식이 된다.

$$\begin{aligned} & \alpha^4 + \beta^4 + 2\alpha^2\beta^2 \cos \alpha L \cosh \beta L \\ & + \alpha\beta \sin \alpha L \sinh \beta L (\alpha^2 - \beta^2) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

(18)식으로부터

$$\begin{cases} \alpha^4 + \beta^4 = \frac{1}{2R^4} + 2 \frac{m\omega^2}{EJ_z} \\ \alpha\beta = \frac{1}{R^2} \\ \alpha^2 - \beta^2 = \frac{1}{4R^2} \left(\frac{m\omega^2 4R^4}{EJ_z} - 1 \right) \end{cases} \quad (22)$$

(21)식에 (22)을 대입하면 (23)식과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2R^4} + 2 \frac{m\omega^2}{EJ_z} + \left(\frac{m\omega^2 4R^4}{EJ_z} - 1 \right) \cos \alpha L \cosh \beta L \\ & + \frac{1}{2R^2} \left(\frac{m\omega^2 4R^4}{EJ_z} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{R^2} \sin \alpha L \sinh \beta L = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, $\left(\frac{m\omega^2}{EJ_z} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{L}{\pi} \right)^2 = \bar{\omega}$, $\frac{1}{R} = k$ 로 하면

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} k^4 + 2 \bar{\omega}^2 + \frac{1}{2} k^4 \left(4 \frac{\bar{\omega}^2}{k^4} - 1 \right) \cos \alpha L \cosh \beta L \\ & + \frac{1}{2} k^4 \left(4 \frac{\bar{\omega}^2}{k^4} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} \sin \alpha L \sinh \beta L = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

다음은 αL 과 βL 을 $\bar{\omega}$ 와 k 의 관계로 나타냈다.

$$\begin{cases} \alpha L = \pi \sqrt{\left(\frac{k^2}{2} \right) \left(1 + \sqrt{4 \frac{\bar{\omega}^2}{k^4} - 3} \right)} \\ \beta L = \pi \sqrt{\left(\frac{k^2}{2} \right) \left(-1 + \sqrt{4 \frac{\bar{\omega}^2}{k^4} - 3} \right)} \\ \alpha L^2 = \beta L^2 + (\pi k)^2 \end{cases}$$

본 연구의 실험모델인 곡선보는 자유단의 처짐이 2cm, 8cm인 두 가지 모델로서 캔틸레버 곡선보의 이론식에 의한 고유진동수를 구하였다.

여기서, E 는 탄성계수로서 690000 kg/cm^2 , J_z 는 단면계수로서 0.008822 cm^4 , m 은 단위길이당 질량으로 $0.000002475 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{cm}^4$ 이다.

<표 1> 캔틸레버 곡선보의 고유진동수 이론값

| | Curved Beam Natural Frequency $\omega = \frac{\bar{\omega} \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EJ_z}{m}}$ | Normal Modes $\alpha^4 + \beta^4 + 2\alpha^2\beta^2 \cos \alpha L \cosh \beta L + \alpha\beta \sin \alpha L \sinh \beta L (\alpha^2 - \beta^2) = 0$ | | |
|-----|--|--|-------------|----------------|
| | | $\alpha_n L$ | $\beta_n L$ | $f(\text{Hz})$ |
| 1st | 곡선보($\delta = 2\text{cm}$) | 1.870 | 1.869 | 14.28 |
| | 곡선보($\delta = 8\text{cm}$) | 1.760 | 1.759 | 12.65 |
| 2nd | 곡선보($\delta = 2\text{cm}$) | 4.690 | 4.680 | 89.98 |
| | 곡선보($\delta = 8\text{cm}$) | 4.700 | 4.690 | 89.92 |
| 3rd | 곡선보($\delta = 2\text{cm}$) | 7.855 | 7.854 | 251.66 |
| | 곡선보($\delta = 8\text{cm}$) | 7.850 | 7.849 | 251.66 |

3. 유한요소해석(FEM)

곡선보에 대한 유한요소해석은 구조해석 프로그램인 SAP90을 사용하였다. 본 곡선보 모델의 경계조건은 한단은 고정단이고 타단은 자유단이며, 모델의 재질은 알루미늄이다. 직선보에서 고정단으로부터 수직거리(내부중심각)의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 알아보기 위하여 캔틸레버 곡선보로서 고정단으로부터의 수직거리가 각각 2cm($\delta=2\text{cm}$), 8cm($\delta=8\text{cm}$)인 모델에 대한 폭과 길이에 대해 10×140 인 1400개의 Shell요소로 mesh를 생성하여 유한요소해석을 수행하였다. 알루미늄 모델에 대한 유한요소해석 프로그램에 대한 입력값은 표 2와 같다. <표 3>은 유한요소해석결과 두 모델에 대한 캔틸레버 곡선보의 고유진동수를 나타내고 있다.

<표 2> 유한요소해석 입력값

| | |
|---------|--|
| 탄성계수 | 690,000 kg/cm ² |
| 단위체적당질량 | 0.000002476 kg·s ² /cm ⁴ |
| 경계조건 | Clamped-Free |
| 단면두께 | 0.3cm |

<표 3> 캔틸레버 곡선보의 유한요소해석

| 모우드 수 (n) | | 고유진동수 (Hz) |
|-----------|------------------------------|------------|
| 1차 | 곡선보($\delta = 2\text{cm}$) | 14.61 |
| | 곡선보($\delta = 8\text{cm}$) | 14.60 |
| 2차 | 곡선보($\delta = 2\text{cm}$) | 91.378 |
| | 곡선보($\delta = 8\text{cm}$) | 89.72 |
| 3차 | 곡선보($\delta = 2\text{cm}$) | 255.91 |
| | 곡선보($\delta = 8\text{cm}$) | 253.58 |

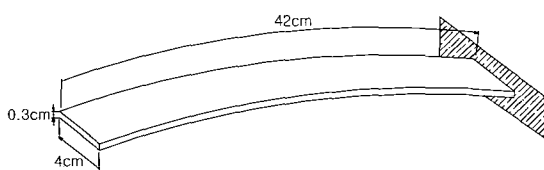
4. 모우드 실험

4. 1 실험방법

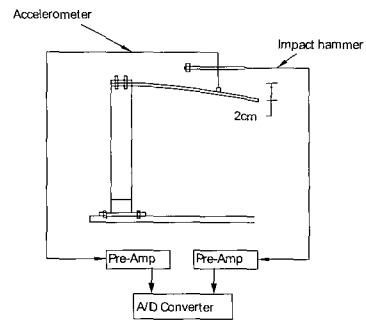
구조물의 각지점을 가진하여 입력에 대한 구조물의 진동응답을 구하여 동특성인 고유진동수를 얻기 위한 실험방법은 다음과 같다. 본 실험에서는 캔틸레버 곡선보 자유단부분에 한 개 속도계를 부착하고 여러 절점에 Impact Hammer로 충격가진을 하여 주파수 응답함수를 구하였다. 곡선보의 모우드 해석 실험에 사용된 제원 및 실험에 사용된 기기의 제원은 <표 4>에 나타내고 있다. <그림 7>은 실험체 모형그림이다. 한 단은 고정단이고, 타단은 자유단인 캔틸레버 곡선보의 고유진동수를 얻기위해 길이42cm, 너비 4cm, 두께 3mm인 알루미늄 모델의 자유단의 처짐이 각각 2cm, 8cm인 캔틸레버 곡선보를 제작하였다. 모우드 실험을 위한 보모델링은 보 전체길이에 대해 4cm 간격으로 9개의 지점을 모델링하였다. 임의의 한 지점에 가속도계를 부착시킨 후, 보의 모우드 형상을 잘 알수 있는 자유단쪽의 지점을 충격해머로 가진하여 그 응답을 얻을 수 있었다. 그림 8은 캔틸레버 곡선보의 자유단 처짐(δ)이 각각 2cm, 8cm인 경우의 실험방법을 표시한 것이다. <그림 8>에서와 같이 임의의 지점에 충격가진하면, 응답신호들은 A/D 변환기로 2048개의 출력 및 입력 신호데이터를 500 μ sec로 샘플링하여 컴퓨터 메모리에 입력된다. 충격해머

<표 4> 실험장비 및 제원

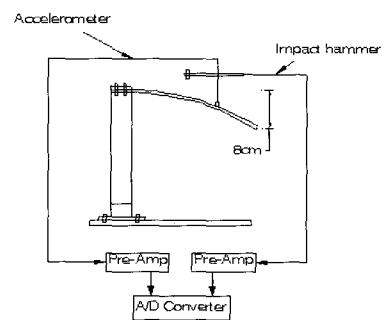
| 장 비 | 제 원 | |
|--------------------------------|-----------|--------------|
| Cantilevered Curved Beam | Size | 420mm × 40mm |
| | Thickness | 3 mm |
| | Material | Aluminum |
| Accelerometer | Model | PCB, 353B17 |
| Impact Hammer | Model | PCB, 086C03 |
| Amplifier | Model | PCB, 480E09 |
| A/D Converter | Model | rtd 2210 |



<그림 7> 실험에 사용된 캔틸레버보

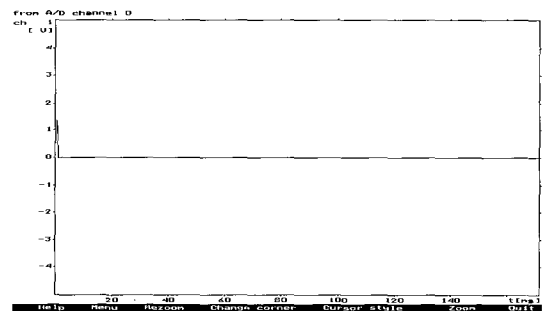


(a) 곡선보 $\delta = 2\text{cm}$

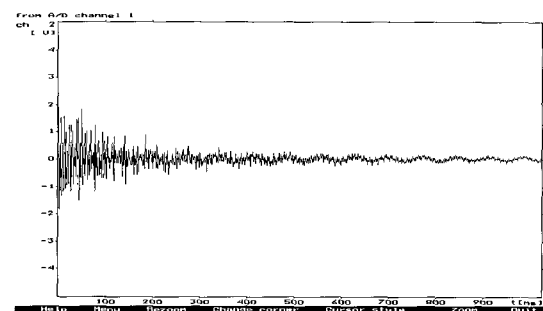


(b) 곡선보 $\delta = 8\text{cm}$

<그림 8> 곡선보의 모우드 실험방법



(a) 곡선보의 입력신호



(b) 곡선보의 출력신호

<그림 9> 곡선보의 입력및 출력신호

의 입력신호에 대한 출력신호를 컴퓨터에서 Fourier 변환하여 얻은 응답함수로부터 고유진동수를 얻었다. 본 실험의 진행과정은 가진햄머와 가속도계의 신호를 신호증폭기를 거친후 A/D변환기로 2048개의 출력 및 입력 신호데이터를 500 μ sec로 샘플링하여 컴퓨터 메모리에 입력된다. 각지점에 대한 샘플링 시간은 약 0.2초이다.

<그림 9>은 임팩트 햄머에 의한 입력신호와 출력신호를 나타내고 있다.

4.2 실험결과

임팩트 해머를 이용한 캔틸레버 곡선보의 진동응답에서 출력으로부터 고유진동수를 구하였다. 실험에서 얻어진 곡선보의 고유진동수는 다음 표 5에 나타나 있다. 곡선보의 고유진동수에 있어서 자유단에서의 처짐 δ 이 커질수록 고유진동수가 감소함을 알 수 있다. 이러한 고유진동수의 감소는 고유진동수 차수가 증가할수록 1차 고유진동수에서는 20%의 감소를 2차 고유진동수에서는 1% 3차 고유진동수에서는 0.3%로 감소하고 있었다.

<표 5> 캔틸레버 곡선보의 고유진동수 실험값

| 구 분 | 1st(Hz) | 2nd(Hz) | 3rd(Hz) |
|---------------------|---------|---------|---------|
| 곡선보($\delta=2cm$) | 13.67 | 88.86 | 251.95 |
| 곡선보($\delta=8cm$) | 10.74 | 87.89 | 250.97 |

이와 같이 캔틸레버 곡선보의 이론식에 의해 유추된 값과 실험에 의한 모우드 해석법에 의한 고유진동수의 비교는 표 6과 같다. 유한요소해석결과>이론해석>실험해석순으로 고유진동수가 크게 나타나고 있었다. 캔틸레버보의 처짐각의 크기에서 2cm 처짐 보다는 8cm 처짐에서 분석방법별 고유진동수의 차이가 크게 나타나고 있었다. 처짐 2cm일때는 유한요소해석이 이론값대비 최대 2%정도 실험값 대비 6%정도 크게 나타나고 있었지만 처짐이 8cm로 증가하면서 유한요소해석에 대해 이론해석결과 13%정도 실험값 대비 26%정도 크게 나타나고 있었다. 실험해석값의 오차는 캔틸레버 자유단의 처짐을 정확하게 만들지 않은 오차라고 판단된다.

<표 6> 캔틸레버 곡선보의 고유진동수 비교

| 해 석 | 구 분 | n | | |
|-----|---------------------|---------|---------|---------|
| | | 1st(Hz) | 2nd(Hz) | 3rd(Hz) |
| 이론값 | 곡선보($\delta=2cm$) | 14.28 | 89.98 | 251.66 |
| | 곡선보($\delta=8cm$) | 12.65 | 89.92 | 251.66 |
| 실험값 | 곡선보($\delta=2cm$) | 13.67 | 88.86 | 251.95 |
| | 곡선보($\delta=8cm$) | 10.74 | 87.89 | 250.97 |
| FEM | 곡선보($\delta=2cm$) | 14.61 | 91.38 | 255.91 |
| | 곡선보($\delta=8cm$) | 14.60 | 89.72 | 253.58 |

5. 결 론

캔틸레버 곡선보의 이론값과 실험값을 비교하여 동적인 해석을 실시하여 고유진동수를 비교한 결과

- (1) 캔틸레버 곡선보에 대한 고유진동수 이론값과 실험값을 비교해 본 결과 대체로 잘 일치되므로 구조물의 동특성을 규명하는데 모우드 해석법의 적용성이 규명된다.
- (2) 곡선보의 자유단에서의 처짐이 클수록 고유진동수는 감소한다.
- (3) 곡선보의 동특성의 해석결과, 이론값과 실험값과의 비교에서 생기는 오차는 곡선보의 모델 제작시 오차라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호 #’06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Timoshenko and Gere."Theory of Elastic Stability" Second Edition, McGraw-Hill, Co., 1961
2. J. T. Oden, E. A. Ripperger. "Mechanics of Elastic Structures" Second Edition, Hemisphere Publishing Co.1981
3. Charles G. Culver, Natural Frequence of Horizontally Curved Beams., ASCE, Journal of the Structural Division, April, 1967, pp 189~203
3. Chai Hong Yoo, Flexural-Torsional Stability

- of Curved Beams., ASCE, Journal of the Engineerin Mechanics Division, December, 1982, pp1351~1368,
4. Young J. Kang and Chai H. Yoo, Thin-Walled Curved Beams- I :Fomulation of Nonlinear Equation., ASCE, April, 1989, pp 2072~2101
 5. Chai H. Yoo, Young J. Kang, and James S. Davidson, Buckling Analysis of Curved Beams by Finite-Element Discretization., ASCE, Journal of Engineering Mechanics, August, 1996., pp 762~776
 6. Sophia Hassiotis and Garrett D. Jeong, Identification of Stiffness Reductions Using Natural Frequencies., ASCE, Journal of Engineering Mechanics, October, 1995, pp 1106~1113
 7. Walter D. Pilkey, "Formulas for Stress, Strain and Structural Matrices", 1994.