

힘-제어 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동

이상호*

¹단국대학교 토목환경공학과

Harmonic Excitation of Shear Building with Force-Controlled Shaking Table

Sang Ho Lee^{1*}

¹Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dankook University

요약 진동대 실험 시 진동대와 구조물 사이에 발생하는 상호작용을 파악하기 위하여 1자유도 전단건물의 조화진동 실험을 전자기력으로 구동되는 힘-제어 진동대를 이용하여 수행하였다. 실험에서는 진동대와 전단건물의 수평방향 가속도를 측정하였으며, 실험 결과를 이해하기 위한 방법으로 전단건물의 진동대 실험을 조화하중이 작용하는 비구속 2자유도계로 이상화하였다. 이상화 된 이론모델의 운동방정식으로부터 전단건물과 진동대의 가속도를 구하였으며, 이들 가속도를 가진력에 대한 비로 나타난 증폭계수와 진동대의 가속도 진폭에 대한 전단건물의 가속도 진폭의 비인 전달계수를 구하였으며, 이들 결과를 실험결과와 비교하여 진동대와 전단건물 사이에 발생하는 상호작용을 파악하였다.

Abstract 1-DOF shear building was designed, built and tested to investigate the interactions between the shear building and the shaking table excited harmonically by the electro-magnetic forces. In the experiments horizontal accelerations of the shaking table and the shear building were measured. To understand the experimental results experimental setting was modeled as an unconstrained 2-DOF system under the harmonic forces. The responses of the shear building and the shaking table of the unconstrained 2-DOF system were found with the equations of motions. The magnification factors of the table and the shear building with respect to the amplitude of the harmonic forces and the transmission of the shear building with respect to the table excitations were found and compared with the experimental results.

Key Words : Force-control shaking table, Interaction, Shear building, Harmonic excitation.

1. 서론

발전소의 터빈-발전기와 같은 회전기계가 설치된 건물이나 시설에는 기계의 편심으로 인한 조화진동이 발생되며 이러한 진동은 기초의 침하를 유발 시키거나 진동에 예민한 주변의 기기나 장치의 파손을 유발 시키어 이로 인한 오작동이 발생 될 수 있다.

이와 같이 조화진동은 회전기계 기초의 설계 시 혹은 진동에 예민한 기기나 장치의 설계 시 대두되며, 풍력발전기와 같은 회전기계가 설치된 구조물이 증가함에 따라

조화진동으로 인한 구조적인 안전성 또한 중요한 문제로 제기되고 있어, 조화진동에 대한 구조물과 기초 사이의 상호작용을 파악하기 위한 연구가 수행되고 있다[1-3].

진동대는 구조물의 동적특성을 파악하거나, 다양한 종류의 지진에 대한 구조물의 거동 파악을 위한 실험에 사용되어 왔으며, 근래 고층건물이나 장대교량 등 구조물의 대형화 및 경량화에 따른 새로운 형태와 특성을 갖는 구조물이 증가함에 따라 구조물의 특성 파악과 함께 이들 구조물의 해석기법을 검증하기 위한 방법으로도 사용되고 있으며[4,5], 또한 이와 함께 구조물의 실제 거동을

*Corresponding Author : Sang-Ho Lee(Dankook Univ.)

Tel: +82-41-550-3525 email: shlee@dankook.ac.kr

Received November 19, 20

Revised (1st December 24, 2014, 2nd December 31, 2014)

Accepted January 8, 2015

정확히 구현하기 위한 진동대의 제어방법에 대한 연구도 이루어지고 있다[6].

진동대를 이용한 실험 시 진동대와 구조물 사이에는 구조물의 진동으로 인한 상호작용이 발생되며, 구조물의 올바른 거동을 파악하기 위해서는 이러한 상호작용을 파악하여야 한다. 이에 본 연구에서는 이를 파악하기 위한 방법으로 힘-제어 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동 실험을 수행하였으며, 수행된 전단건물의 진동대 실험을 2 자유도 비구속 모델로 이상화하여 운동방정식을 유도하고 유도된 운동방정식의 특성을 이용하여 해석을 수행하였으며, 수행된 해석결과와 실험결과를 비교분석함으로써 구조물과 진동대 사이에 발생하는 상호작용을 파악 하고자 한다.

실험에 사용된 진동대는 스마트제어계측의 ST-E-1 모델로 입력신호를 생성하는 구동 프로그램과 컨트롤 박스 그리고 리니어 서보모터로 구성되어 있으며, 구동 프로그램에서 생성된 제어신호는 컨트롤 박스에 전송되고, 전송된 제어신호에 의해 진동대에 장착된 리니어 서보모터의 전자기력을 제어하여 구동되는 힘-제어 진동대이다[7].

2. 실험

실험에서는 진동대의 특성을 파악하기 위한 실험과 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동 실험을 수행하였으며, 일관성을 유지하기 위하여 모든 실험에서 진동대에 내장된 동일한 제어기준을 적용하였다.

2.1 실험모델

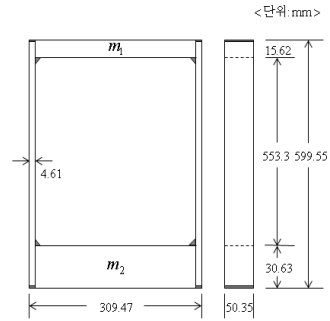
실험모델로 사용하기 위한 일자유도 전단건물을 일반 구조용 압연강재(SS400)를 이용하여 제작하였다. 아래의 [Fig. 1]은 제작된 전단건물의 상세도이며 전단건물의 전체 질량은 7.37kg 그리고 고유진동수는 9.78 Hz로 측정되었다.

2.2 진동대 특성파악실험

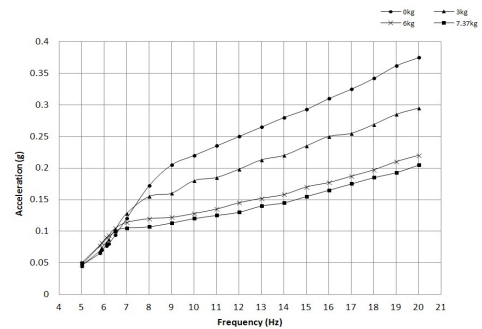
진동대의 특성파악을 위한 조화진동 실험을 수행하였다. 실험에서는 3kg, 6kg의 추와 전단건물의 질량을 이용한 실험을 수행하였으며 전단건물의 질량을 이용한 실험에서는 전단건물의 진동을 방지하기 위하여 전단건물을

높힌 후 진동대에 고정하여 실시하였다.

[Fig. 2]에는 질량별로 진동수를 변화시키어 측정된 진동대의 가속도 진폭이 나타나있다.



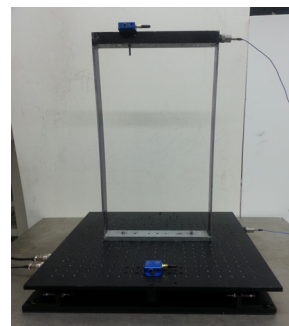
[Fig. 1] Model



[Fig. 2] Table Acc.

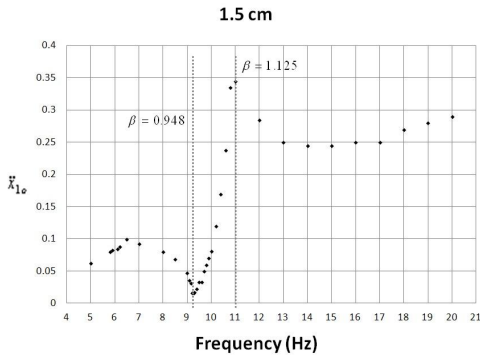
2.3 전단건물 실험

전단건물 실험에서는 전단건물의 하부를 진동대에 고정하고 진동대와 전단건물에 가속도계를 부착하여 가속도를 측정하였다. 아래의 [Fig. 3]에는 전단건물의 진동대 실험이 나타나 있다.



[Fig. 3] Experiment

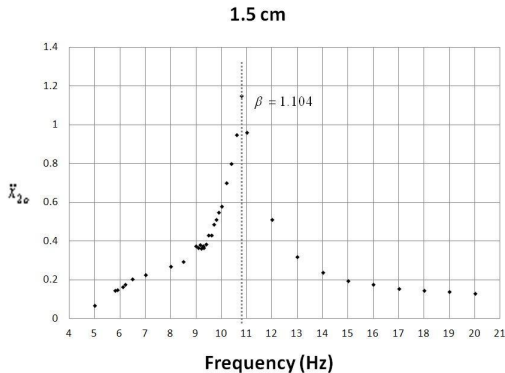
아래의 [Fig. 4]에는 전단건물 실험에서 측정된 진동대의 가속도 진폭이 진동수 별로 나타나 있으며, 그림에는 최소치와 최대치가 측정된 진동수가 전단건물의 고유진동수에 대한 비로 나타나 있다.



[Fig. 4] Acceleration(table)

[Fig. 4]에 나타나 있는 진동대의 가속도 분포를 보면 최소치는 전단건물의 고유진동수에 근접한 진동수에서 그리고 최대치는 1.125배인 진동수에서 발생된 것을 볼 수 있다. 또한 [Fig. 4]에 나타난 진동대 가속도의 분포를 [Fig. 2]의 가속도 분포와 비교하면 서로 다른 것을 볼 수 있으며 이러한 차이의 원인은 전단건물 실험 시 전단건물에 발생된 진동 때문이다.

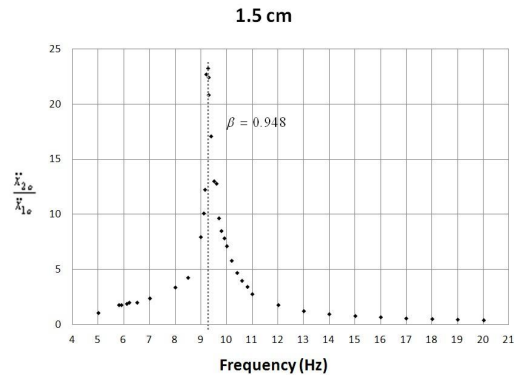
아래의 [Fig. 5]에는 진동대 실험 시 전단건물에서 측정된 가속도 진폭이 나타나 있으며, 그림에는 최대치가 발생된 진동수가 전단건물의 고유진동수에 대한 비로 나타나 있다.



[Fig. 5] Acceleration(model)

전단건물의 가속도 진폭이 나타나 있는 [Fig. 5]을 보면 전단건물의 최대 가속도는 전단건물 고유진동수의 1.1배인 진동수에서 측정된 것을 볼 수 있다.

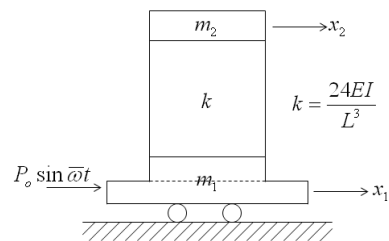
진동대의 진폭과 진동수가 전단건물의 거동에 미치는 영향은 전달계수로 나타낼 수 있으며, 아래의 [Fig. 6]에는 전단건물의 가속도 진폭을 진동대의 가속도 진폭으로 나누어 구한 전달계수가 나타나 있다. 그림을 보면 전달계수의 최대치는 전단건물의 고유진동수에 근접한 진동수에서 발생된 것을 볼 수 있으며, 전달계수의 최대치가 발생된 진동수에서 진동대 가속도의 크기는 최소가 되는 것을 [Fig. 4]에서 볼 수 있다.



[Fig. 6] Transmission

2. 이론모델 및 실험결과 분석

전단건물의 진동대 실험 결과를 이해하기 위하여 전단건물의 진동대 실험을 아래의 [Fig. 7]과 같이 조화하중이 작용하는 비 구속 2자유도계로 이상화하였다.



[Fig. 7] Mathematical Model

[Fig. 7]에는 진동대에 작용하는 리니어모터의 전자기력이 조화하중으로 나타나 있으며, 그림에서 x_1 , x_2 는 진

동대와 진단건물의 수평방향 자유도, k 는 진단건물의 강성 그리고 m_1 과 m_2 는 각각 진동대와 진단건물의 질량이다.

[Fig. 7]에 나타난 진단건물의 질량 m_2 와 강성 k 를 구하기 위한 자유진동실험을 수행하였다. 자유진동실험에서는 진단건물의 하부를 단단한 바닥에 고정된 후 고유진동수를 측정하였으며 이로부터 진단건물의 질량과 강성을 구하였다. 진동대의 질량 m_1 은 진동대 상판의 질량과 진단건물의 총질량을 합한 값에서 자유진동실험에서 구한 진단건물의 질량을 제외한 값을 사용하였다. 아래의 [Table 1]에는 해석에 사용된 진동대와 진단건물의 질량 그리고 진단건물의 강성과 고유진동수가 나타나있다.

[Table 1] Properties

m_1 (kg)	m_2 (kg)	k (N/m)	f_o (Hz)
14.32	2.55	9630	9.78

[Fig. 7]에 나타난 2자유도 비구속계인 구조물의 운동방정식은 아래의 식 (1)과 같으며

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_o \sin \bar{\omega} t \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)로부터 고유진동수를 구하면 다음과 같다.

$$\omega_1 = 0, \omega_2 = \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} k} \quad (2)$$

식 (1)에 나타난 운동방정식을 연립방정식의 형태로 풀어쓰면 아래의 식 (3), (4)와 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + kx_1 - kx_2 = P_o \sin \bar{\omega} t \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{x}_1 + kx_1 - kx_2 = 0 \quad (4)$$

[Fig. 7]에 나타난 진단건물의 변위를 진동대에 대한 상대변위로 표현하면 아래의 식 (5)와 같다.

$$x_r = x_2 - x_1 \quad (5)$$

운동방정식 중 하나인 식 (4)를 식 (5)의 관계를 이용하여 정리하면 아래의 식 (6)과 같으며,

$$m_2 \ddot{x}_r + kx_r = -m_2 \ddot{x}_1 \quad (6)$$

위의 식 (6)은 진동대의 진동으로 인한 진단건물의 거동을 상대 값으로 표현한 진단건물의 운동방정식이다.

[Fig. 7]에 나타난 진동대에 작용하는 조화하중에 의한 진동대의 정상상태거동은 진단건물에 감쇠가 없는 경우 진동대에 작용하는 하중과 동일한 위상각을 갖게 됨으로 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$x_1 = x_{1o} \sin \bar{\omega} t \quad (7)$$

식 (7)에서 x_{1o} 는 진동대의 변위진폭이며 $\bar{\omega}$ 는 조화하중의 진동수이다. 따라서 진동대의 진동으로 인한 진단건물의 정상상태 응답은 식 (7)을 식 (6)에 대입하여 상대변위로 구하면 아래의 식 (8)과 같다.

$$x_r = x_{1o} \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} \sin \bar{\omega} t \quad (8)$$

식 (8)에서 $\beta = \bar{\omega} / \omega_o$ 인 진동수 비이며, 진동수 비에서 $\omega_o = \sqrt{k/m_2}$ 로 진단건물의 고유진동수이다.

식 (8)을 식 (7)을 이용하여 정리하면 다음과 같으며,

$$x_r = \frac{\beta^2}{1 - \beta^2} x_1 \quad (9)$$

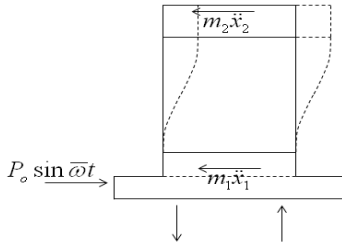
식 (9)는 진동대의 조화진동에 의한 진단건물의 변위를 상대 값으로 나타낸 식으로, 식 (9)를 식 (5)에 나타난 관계를 이용하여 절대 값으로 정리하고, 진단건물의 변위와 가속도를 진동대의 변위와 가속도에 대한 비로 구하면 다음과 같다.

$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{\ddot{x}_2}{\ddot{x}_1} = \frac{1}{1 - \beta^2} \quad (10)$$

위의 식 (10)은 진동대의 조화진동에 의한 진단건물의 응답을 절대 값으로 나타낸 전달계수이며, 최대치는 진동대의 진동수가 진단건물의 고유진동수와 일치하는 공명 시에 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 식 (10)의 최대치를 이용하면 [Fig. 6]에 나타난 전달계수의 최대치가 발생된 진동수 비에 대해 설명 할 수 있다.

진동대에 작용하는 조화하중에 의해 발생하는 진동대의 가속도는 다음과 같이 구할 수 있다. 아래의 [Fig. 8]

에는 동역학적 평형상태에 있는 전체 구조물의 자유물체도가 나타나있으며, 그림에는 진동대를 작동 시키는 리니어 모터의 전자기력과 함께 진동대와 전단건물의 관성력이 나타나 있다.



[Fig. 8] Dynamic equilibrium

[Fig. 8]에 나타난 동역학적 평형 상태에 있는 힘들에 대해 수평방향 평형방정식을 세우면 아래와 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = P_o \sin \bar{\omega} t \quad (11)$$

위의 식 (11)은 동역학적 평형상태에 있는 전체구조물의 동적 평형상태를 이용하여 구하였으나, 비 구속 2자유도계의 운동방정식중 하나인 식 (3)을 식(5)을 이용하여 상태변위로 치환하고 식(7)과 식(8)을 대입해 정리하여도 동일한 방정식을 유도할 수 있다.

[Fig. 7]에 나타난 진동대에 작용하는 조화하중에 의한 진동대의 가속도는 위의 식 (11)의 좌변 두 번째 항의 전단건물의 가속도를 식 (10)에 나타난 전단건물의 가속도로 치환하여 구하면 아래의 식 (12)와 같다.

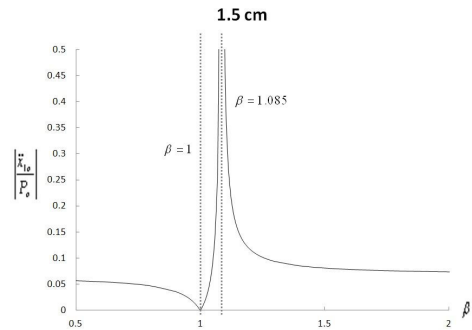
$$\ddot{x}_1 = \frac{P_o}{m_1 + \frac{m_2}{1 - \beta^2}} \sin \bar{\omega} t \quad (12)$$

위의 식 (12)를 보면 진동대의 가속도는 하중의 진폭 뿐 아니라 진동대와 전단건물의 질량 그리고 전단건물의 고유진동수에 대한 진동대의 진동수 비에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 진동대 가속도의 크기는 진동수비가 1 일 때 최소가 되며, 최대치는 분모의 값이 0이 되는 아래의 식 (13)의 진동수비에서 발생된다.

$$\beta_{\max} = \sqrt{1 + \frac{m_2}{m_1}} \quad (13)$$

식 (13)을 보면 진동대의 질량에 대한 전단건물의 질량비의 영향으로 진동대 가속도의 최대치는 전단건물의 고유진동수보다 큰 진동수에서 발생됨을 알 수 있다.

[Fig. 7]에 나타난 진동대에 작용하는 조화하중의 진폭과 진동수가 진동대의 거동에 미치는 영향을 나타내는 증폭계수는 진동대의 가속도 진폭을 조화하중의 진폭에 대한 비로 식 (12)을 이용하여 구할 수 있으며, 아래의 [Fig. 9]에는 [Table 1]에 나타난 질량 값을 대입하여 구한 증폭계수가 나타나 있다. 또한 그림에는 증폭계수의 최대치와 최소치가 발생된 진동수 비가 전단건물의 고유진동수에 대한 비로 나타나 있다.



[Fig. 9] Magnification (table)

[Fig. 9]에 나타난 증폭계수를 보면 최소치는 전단건물의 고유진동수와 같은 진동수에서 그리고 최대치는 식 (13)에 나타난 진동수비에서 발생된 것을 볼 수 있으며, 최소치와 최대치가 발생된 진동수 비를 실험 시 측정된 [Fig. 4]에 표시된 최소치와 최대치가 발생된 진동수 비와 비교하면 서로 근접한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

[Fig. 7]에 나타난 진동대에 작용하는 조화하중에 의한 전단건물의 거동은 식 (10)에 식 (12)을 대입한 후 전단건물의 가속도에 대하여 전개하면 다음과 같이 구할 수 있다.

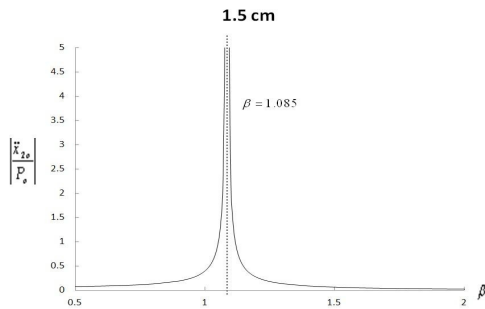
$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{m_1(1 - \beta^2) + m_2} P_o \sin \bar{\omega} t \quad (14)$$

위의 식 (14)를 보면 전단건물의 거동도 진동대의 거동과 같이 진동대와 전단건물의 질량 그리고 전단건물의 고유진동수에 대한 진동대의 진동수 비에 의해 결정됨을 알 수 있다. 또한 전단건물의 최대 가속도는 식 (14)의 분

모의 값이 0이 되는 진동수비에서 발생되며, 분모의 값이 0이 되는 진동수비는 식 (13)에 나타난 진동수비와 동일한 것을 알 수 있다.

식 (13)에 나타난 진동수비는 진동대에 최대가속도를 발생 시키는 진동수 비이며, 이러한 결과로부터 전단건물의 최대 가속도는 진동대의 가속도가 최대가 되는 진동수에서 발생 되는 것을 알 수 있다.

[Fig. 7]에 나타난 진동대에 작용하는 조화하중의 진폭과 진동수가 전단건물의 가속도에 미치는 증폭계수는 식 (14)에 나타난 전단건물의 가속도 진폭을 조화하중의 진폭으로 나눈 비로 구할 수 있으며, 아래의 [Fig. 10]에는 [Table 1]에 나타난 질량 값을 대입하여 구한 전단건물의 증폭계수가 나타나 있다. 또한 그림에는 최대치가 발생된 진동수가 전단건물의 고유진동수에 대한 비로 나타나 있다.



[Fig. 10] Magnification (model)

[Fig. 10]에 나타난 전단건물의 증폭계수를 보면 최대치는 진동대의 가속도가 최대치가 되는 진동수 비와 동일한 비에서 발생되는 것을 볼 수 있다.

그러한 이유는 힘-제어 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동 실험 시 전단건물의 거동은 식 (6)에서와 같이 진동대의 거동에 의해 결정되기 때문이며, 전단건물의 거동을 결정하는 진동대의 거동은 진동대와 전단건물의 질량의 크기 그리고 전단건물의 고유진동수에 대한 진동대의 진동수 비에 의해 결정되기 때문이다. 또한 [Fig. 10]의 최대치가 발생된 진동수 비와 실험 시 측정된 [Fig. 5]의 진동수 비를 비교하면 서로 근접한 값을 갖는 것을 볼 수 있다.

3. 결론

힘-제어 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동 실험을 비구속 2 자유도 이론모델로 이상화한 해석을 수행하여 실험결과와 비교한 결과, 전단건물 가속도의 최대치가 발생된 진동수는 실험결과에 대해 2.7% 그리고 진동대의 가속도 최소치는 3.2% 오차를 보였다. 또한 진동수별로 구한 진동대와 전단건물의 가속도 진폭의 크기도 해석결과와 실험결과가 동일한 경향을 보였으며 이로 부터 이론모델의 정확성을 확인 할 수 있었다.

전단건물의 진동대 실험을 2 자유도 비구속 이론모델을 이용하여 해석을 수행한 결과 전단건물과 진동대의 거동은 전단건물과 진동대의 질량 그리고 전단건물의 고유진동수에 대한 진동대의 진동수 비에 의해 결정되었다.

진동대의 가속도 최소치는 진동대의 진동수가 전단건물의 고유진동수와 일치하는 진동수에서 발생되었으며 최대치는 진동대의 질량에 대한 전단건물의 질량비의 영향으로 고유진동수보다 큰 진동수에서 발생되었다.

전단건물의 최대가속도는 진동대의 가속도가 최대가 되는 진동수와 동일한 진동수에서 발생되었으며, 그러한 이유는 힘-제어 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동 실험 시 전단건물의 거동은 진동대의 거동에 의해 결정되기 때문이다

전단건물과 진동대의 가속도를 이용하여 작성된 전달계수의 최대치는 공명 시에 발생되었으며, 그러한 이유는 힘-제어 진동대를 이용한 실험 시 진동대 가속도의 크기는 공명 시에 0에 접근하기 때문이다. 공명 시에 전달계수의 크기가 최대가 되는 현상은 변위-제어 진동대를 이용한 결과와 동일한 결과이다.

힘-제어 진동대를 이용한 전단건물의 조화진동 실험과 해석을 수행한 결과, 진동대를 사용하여 구조물의 실제 거동을 구현하기 위해서는 구조물의 질량과 진동대의 질량 그리고 구조물의 고유진동수와 같은 동적특성이 고려된 제어기법이 사용되어야 한다.

References

- [1] S. prakash and V. K. Puri, "Foundations for Vibrating Machines". J. of Structural Engineering, SERC, Madras, India, 2006.
- [2] Nico Leso, Jari Puttonen, Esa Porkka, "The effect of

- foundation on fan vibration response”, J. Structural Mechanics, Vol. 44, No 1, pp. 1-20, 2011.
- [3] T. Ozurk, Z. Ozurk, “Vibration Absorption and Isolation in Dynamically Loaded Foundations”, *Proc. of 14th Earthquake Engr. Conference*. Beijing, China, Oct. 2008.
- [4] S. A. Nield, d. p. Stoten, D. Drury, D. J. Wagg, “Control issues relating to real-time Substructuring Experiments using a Shaking Table, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 1171-1192 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.473>
- [5] Xiaodong Ji, Kouichi Kajiwara, “A substructure shaking table test for reproduction of earthquake responses of high-rise buildings”, J. Earthquake Engr. and Structural Dynamics, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.907>
- [6] A. Pan, M. Nakashima, H. Tomofuji, “Online test using displacement-force mixed control”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 869-888 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/eqe.457>
- [7] Shaking Tables user’s manual. Smart control and sensing, Daejeon, Korea, 2010.

이 상 호(Sang Ho Lee)

[정회원]



- 1983년 5월 : North Carolina State Univ. 토목공학과 (공학석사)
- 1988년 5월 : North Carolina State Univ. 토목공학과 (공학박사)
- 1990년 9월 ~ 현재 : 단국대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>

내진 및 충돌해석