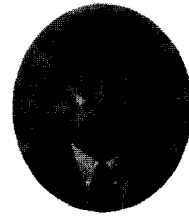


실크기구조물의 제진실험을 위한 가진시스템의 개발



배 기 환*

1. 서 론

최근 건축구조분야에 있어서, 지진시 건축물의 진동을 억제하는 능동형제어시스템에 대한 연구, 개발, 적용 등이 커다란 관심을 불러일으키고 있으며 이미 일본에서는 30여개의 건물에 능동형제어시스템이 탑재되어 그 유용성을 보이고 있다.

건축물의 진동을 제어하기 위해서는 효율적인 제어알고리즘의 연구, 개발이 이루어져야 하는 것과 동시에 알고리즘의 성능평가를 위한 실험적 연구가 함께 병행되어야 한다. 건축물의 진동제어를 위한 기존의 실험적 연구는 진동대를 이용한 축소모델의 제진실험이 주를 이루고 있으나 실제 건축물의 특성을 고려한 제진알고리즘의 실질적 성능평가를 위해서는 실크기 구조물의 제진실험이 수반될 필요성이 있다. 그러나 진동대를 이용한 진동실험에서는, 진동대의 규모상 실크기 구조물의 실험이 거의 불가능하다고 할 수 있다. 이에 대한 방편으로 가진기를 이용한 실크기 구조물의 정현파 진동실험이 행하여졌으나¹⁾ 지진파를 재현하는 실험은 그 예를 찾아보기가 힘들다.

일본京都大學방재연구소의 鈴木 등은 실크기 구조물에 대한 제진실험을 수행하기 위하여 5층의 강구조시험체에 지진파가진시스템을 설치하여 지진응답을 재현할 수 있도록 하였다. 지진파 가진시스템은 2개의 AMD로 구성되어 있으며 모드제어를 행함으로써 가진기를 움직이고 있다.

본 논고에서는 지진파가진알고리즘 및 지진응답 재현 실험결과 등을 보임으로 이러한 가진시스템이 진동대를 사용할 수 없는 신타형시험체의 진동 실험 및 제진실험에 유용하게 쓰일 수 있음을 보인다.

2. 지진파가진시스템의 실험장비

지진파가진시스템을 장착한 실크기 시험체²⁾는 京都大學방재연구소에 있는 3.75×15×17m, 총중량 150tonf의 5층 강구조건물로 그림 1에 그 외관을 보인다. 시험체는 H형강의 기둥과 보 그리고 12cm두께의 콘크리트슬라브로 이루어져 있으며, 단면방향은 브레이스로 보강되어 있다. 시험체의 5층에는 가진기로서 중량 5tonf의 부가질량을 갖는

* 경동대학교 건축공학부, 전임강사

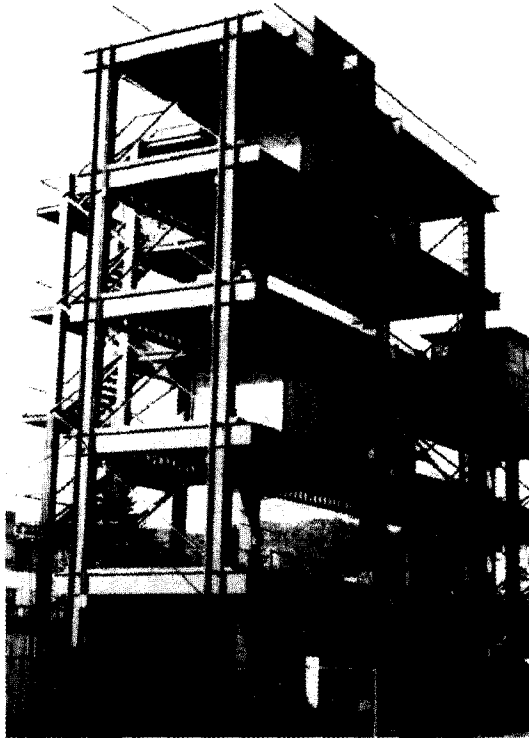


그림 1 강구조시험체

AMD(Active Mass Damper)가, 3층에는 2tonf의 부가질량을 갖는 AMD가 설치되어 있다. AMD는 볼스큐루를 AC Servo Motor로 돌려 부가질량이 리니어 가이드 위를 움직이도록 하는 능동형제어기이다.

본 가진시스템은 진동제어실험을 하기 위해 설치된 것으로 가진실험과는 무관한 4tonf 중량의 제어기가 옥상층에 하나 더 설치되어 있다. 그림 2에 AMD의 기계적 구조를 보이고, 표 1에 각 AMD의 사양을 나타낸다. 제진실험^{4),5)}에 있어서는 3층과 5층의 AMD에 의해 시험체에 인위적 지진응답을 재현시키고 옥상의 AMD에 의해 그 지진응답을 억제시키도록 되어 있으나, 본 실험은 가진시스템에 대한 효율성을 판단하고자 하는 것이기에 지진응답 재현시 3층과 5층의 AMD만을 이용하고 옥상층의 AMD는 고정시켜 두었다. 인위적 지진응답의 실시간 관측기록을 위해 시험체 및 AMD에는 가속도계측기가 설치되어 있다. 그림 3은 지진파가진시스템의 전체구성을 보이고 있다.

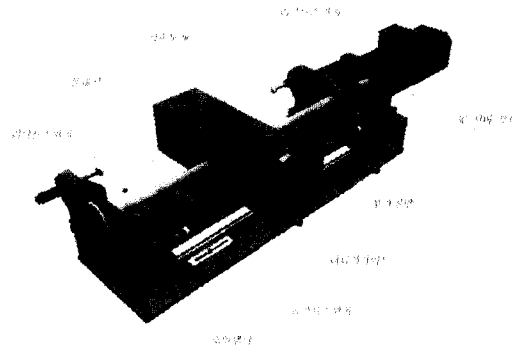


그림 2 AMD의 기계적 구조

표 1 AMD 사양

	2t-AMD	5t-AMD	4t-AMD
Installed Floor	3F	5F	RF
Mass Weight	2.0tonf	5.0tonf	4.0tonf
Max. Stroke	±50cm	±100cm	±25cm
Max. Force	1.6tonf	2.2tonf	5.0tonf
Motor Output	11kW	30kW	55kW

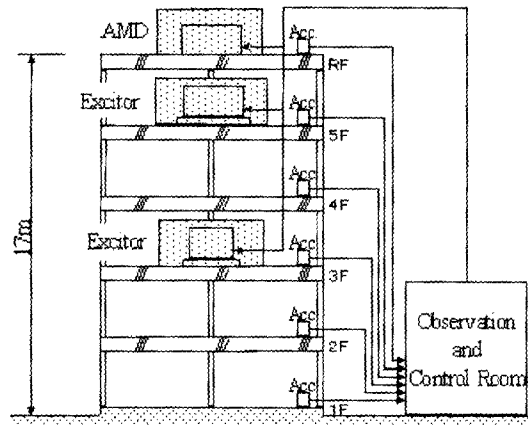


그림 3 실험시스템의 전체구성

3. 지진파가진시스템의 알고리즘

구조물이 지진하중을 받고 있는 것과 같은 지진응답을 재현하기 위하여 AMD를 이용한 지진파가진시스템의 알고리즘을 다음과 같이 개발하였다. 본 알고리즘의 설계개념은 다음과 같다.

- 1) 시험체가 지진시와 같은 거동을 할 수 있도록

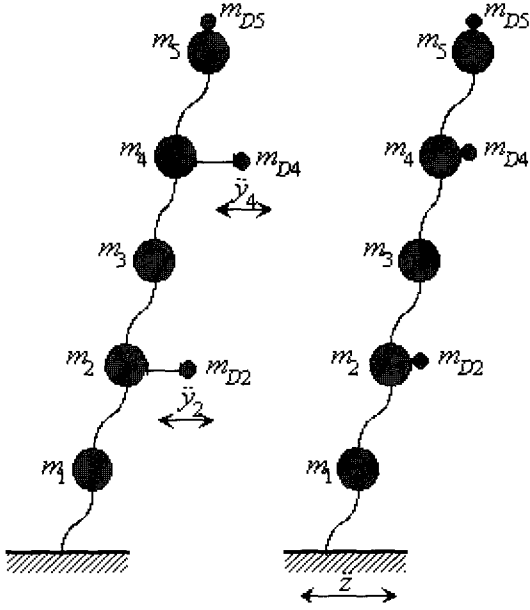


그림 4 시험체의 모델

각 AMD매스의 스트로크변위와 가속도를 시뮬레이션 한다.

- 2) 모든 실험에 있어서 가진력의 변화가 없도록 오픈루프제어를 행한다.
- 3) AMD가 시험체 바닥에 완전히 고정되어 있다고 가정하여 AMD매스를 시험체에 포함시킨다.

그림 4에서 보여지고 있는 것처럼 두가지 모델을 고려한다. 하나는 AMD에 의해 가진되는 시험체의 모델이고 운동방정식은 식(1)과 같이 표현할 수 있다. 다른 하나는 시험체가 직접 지진하중을 받을 때의 모델이며 운동방정식은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F_1 + F_2 \quad (1)$$

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F_0 \quad (2)$$

$$M = \text{diag}\{ m_5 + m_{D5} \quad m_4 + m_{D4} \\ m_3 \quad m_2 + m_{D2} \quad m_1 \}$$

$$F_1 = \{ 0 \quad -M_{D4} \quad \ddot{y}_4 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \}^T$$

$$F_2 = \{ 0 \quad 0 \quad 0 \quad -M_{D2} \quad \ddot{y}_2 \quad 0 \}^T$$

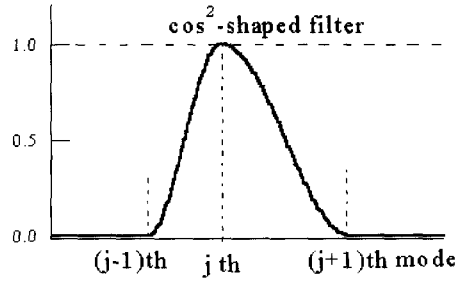


그림 5 필터의 형상

여기서, M, C, K, X 는 각각 매스매트릭스, 감쇠 매트릭스, 강성매트릭스, 변위벡터이며, \ddot{y}_4 와 \ddot{y}_2 는 각각 5t-AMD와 2t-AMD의 가속도를 나타낸다.

본 알고리즘의 기본 아이디어는 모드분해법³⁾을 사용하는 것에 의해 시험체의 각 모드에서 양모델의 외력이 같아지도록 하는 것이다. 그러므로 다른 모드에 대한 외력의 영향이 작아지도록, 대응하는 주파수 주변만의 성분이 통과되는 밴드패스필터 ($W_j(\omega)$)를 지진외란 \ddot{z} 에 곱하고 있다. 다음에 각 필터에 대한 수식을 보이며, 필터의 형상을 그림 5에 보인다.

$\omega \leq \omega_{j-1}$ 일 때

$$W_j(\omega) = 0 \quad (3)$$

$\omega_{j-1} \leq \omega \leq \omega_j$ 일 때

$$W_j(\omega) = \cos^2 \left(\frac{\omega_j - \omega}{\omega_j - \omega_{j-1}} \frac{\pi}{2} \right) \quad (4)$$

$(j=1, \dots, N)$

$\omega_j \leq \omega \leq \omega_{j+1}$ 일 때

$$W_j(\omega) = \cos^2 \left(\frac{\omega - \omega_j}{\omega_{j+1} - \omega_j} \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

$\omega_{j+1} \leq \omega$ 일 때

$$W_j(\omega) = 0, \quad W_N(\omega) = 1 \quad (6)$$

$(j=1, \dots, N-1)$

여기서, N 은 매스의 수를, ω_j ($\omega_0 = 0$)는 시험체의 j 번째 고유진동수를 나타낸다.

본 알고리즘을 일반화하기 위하여, 단지 하나의 가진기만이 시험체의 j 번째 매스에 설치되어 있다고 가정한다. 식(1)과 식(2)의 왼쪽 변에 j 번째 모드벡터의 전치를 곱함으로 두 모델에 대한 운동방정식이 j 번째 모드에 대응하는 일자유도 시스템의 형태로 나타난다. 두 방정식의 외력항을 같게 놓음으로써 i 번째 매스에 설치된 가진기의 가속도가 얻어진다.

$${}_j u^T \{0, \dots, m_{Di} \ddot{y}_i, \dots, 0\} = {}_j u^T M \{1, \dots, 1, \dots, 1\}^T {}_j \ddot{z} \quad (7)$$

$$\ddot{y}_i = \frac{{}_j u^T M \{1, \dots, 1, \dots, 1\}^T {}_j \ddot{z}}{m_{Di} u_i} \quad (8)$$

다수의 가진기를 갖는 경우에 있어서는, 같은 방법에 의해 각 매스의 가속도가 다음과 같은 식에 의하여 얻어진다.

$$\sum_j m_{Di} u_i \ddot{y}_i = {}_j u^T M \{1, \dots, 1, \dots, 1\}^T {}_j \ddot{z} \quad (9)$$

식(8)과 식(9)에서 알 수 있는 것처럼 임의의 가진기를 사용하는 것에 의해 모든 모드로 시험체를 가진하는 것이 가능하다. 그러나 다른 매스보다 \ddot{y}_i 의 계수값이 큰 매스의 가진기를 이용하는 것이 효과적이다. 본 지진파가진시스템에서는 2차모드를 3층의 AMD를 이용하여, 나머지 모드는 5층의 AMD를 이용하여 가진하도록 하였다.

$$\ddot{y}_1 = \sum_j {}_j \ddot{y}_1 \quad (j=1, 3, 4, 5) \quad (10)$$

$$\ddot{y}_2 = {}_2 \ddot{y}_2 \quad (11)$$

위의 지진파 가진 알고리즘에 포함되어 있는 질량, 강성, 감쇠매트릭스 등은 고전적 식별법에 의해 추정하였고, 그 때 이용된 데이터는 옥상에 설치되어 있는 AMD를 이용한 정현파 가진실험에 의해 얻어진 관측결과이다. 표 2에 시험체의 고유진동수 및 감쇠정수를 보인다.

표 2 시험체의 고유진동수 및 감쇠정수

Mode	Frequency (Hz)	Damp. Coeff.(%)
1 st	1.66	0.50
2 nd	5.22	0.30
3 rd	8.72	0.70
4 th	13.6	0.60
5 th	17.8	1.00

4. 실험결과 및 고찰

지진파가진시스템의 알고리즘에 대한 타당성을 검토하기 위하여, El Centro NS 25cm/sec²(최대 가속도가 25cm/sec²이 되도록 스케일 다운한 El Centro NS 파) 및 JMA Kobe NS 30cm/sec²을 대상으로 지진응답 수치해석과 지진파가진실험을 행하였다.

먼저 수치해석에 있어서, 지반으로부터의 지진력을 받는 시험체의 가속도 응답을 해석하여 지진파가진알고리즘에 의한 응답과 비교하였다. 그림 6은 El Centro NS 25cm/sec²을 입력대상으로 하였을 때의 4층과 옥상층 가속도응답에 대한 비교를 나타낸다. 그림 7은 JMA Kobe NS 30cm/sec²을 입력대상으로 하였을 때의 4층과 옥상층 가속도응답에 대한 비교를 나타낸다. 이러한 비교로부터 지진동에 의한 시험체의 응답과 지진파가진알고리즘에 의한 지진응답이 거의 일치함을 알 수 있으며, 이것은 지진파가진알고리즘이 타당함을 보여주고 있다.

다음으로, 지진파가진실험에 의해 얻어진 가속도응답을 수치해석결과와 비교하여 실질적인 유용성을 검토하였다. 그림 8은 El Centro NS 25cm/sec²과 입력시의 결과를, 그림 9는 JMA Kobe NS 30cm/sec²과 입력시의 결과를 4층의 가속도응답에 대하여 보인다. 가속도응답에 대한 실험결과와 수치해석 결과가 약간의 차이를 보이고 있으나 이는 3층의 가진기가 2차 모드를 재현하는데 있어서 시험체의 다른 모드응답에 영향을 받고 있기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 차이는 3층의 AMD매스의 중량을 크게 하든가 매스의 스트로크 길이를 길게 함으로 해결할 수 있으리라 판단되어 진다.

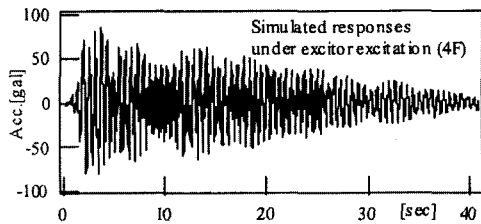
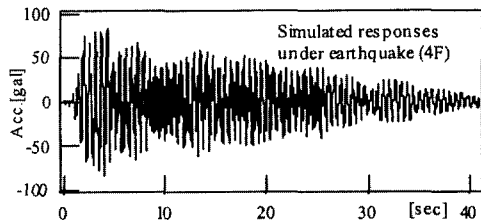
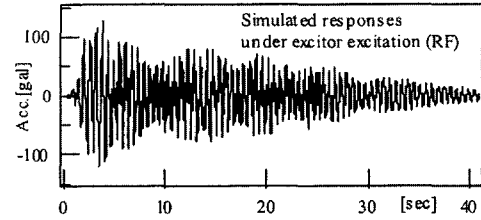
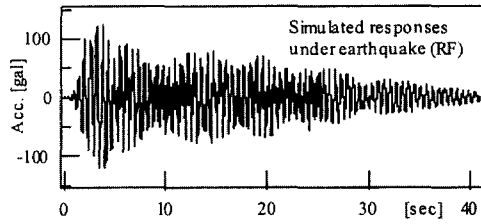


그림 6 EI Centro 25cm/sec²입력시의 수치해석 비교

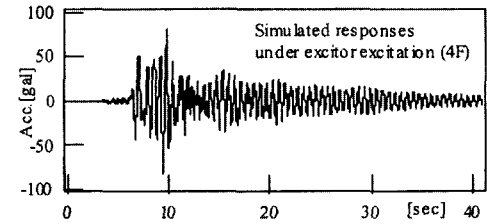
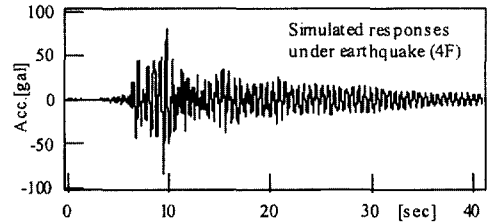
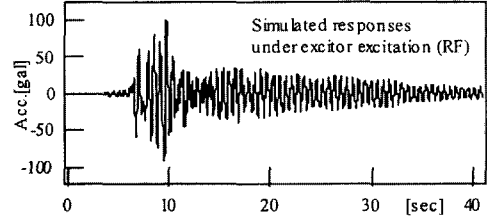
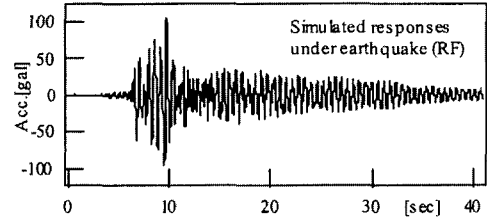


그림 7 JMA Kobe 30cm/sec²입력시의 수치해석 비교

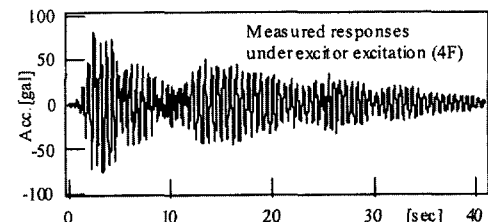
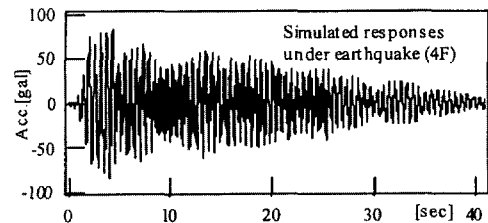


그림 8 EI Centro 25cm/sec²입력시의 실험관측치 비교

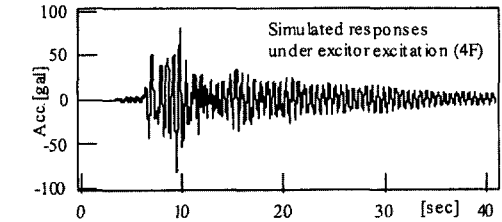
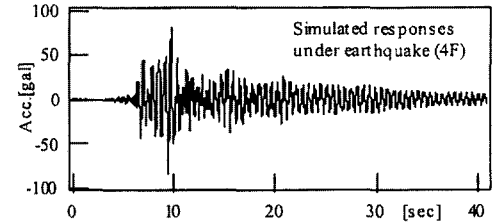


그림 9 JMA Kobe 30cm/sec²입력시의 실험관측치 비교

5. 결 론

본 연구에서는, 임의의 지진하중에 대한 지진응답을 재현할 수 있는 가진시스템을 개발하였고 그 타당성을 보임으로 실 크기 건축구조물을 대상으로 한 제진실험을 행할 수 있도록 하였다.

본문에서 알 수 있는 바와 같이, 수치해석에 있어서는 3층과 5층에 설치된 가진기에 의한 진동응답이 지반에 입력한 지진하중의 지진응답을 정확히 재현하고 있음을 보였고, 지진파가진실험에서는 관측기록이 수치해석결과를 잘 재현하고 있음을 보였다. 위의 결과로 지진파가진시스템이 실크기 건축구조물의 진동실험 및 제진실험에 매우 유용하게 쓰일 수 있음이 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 此上典文, 鈴木俊雄, 大垣聰 : 超高層建物の常時微動測定と入力加振試験, 日本建築學會梗概集, pp.993~994, 1996年, 9月
2. 裴起煥, 鈴木祥之 : 非線型近似Filterによる實大試験架構の地震應答推定, 日本建築學會近畿支部研究報告集, 第36号, 構造系, pp.265~268, 1995年7月4.
3. 柴田明德 : 最新耐震構解析, pp.55~96, 森北出版, 1994
4. Y. Suzuki, G.H. Bae, T. Araki, M. Yamamoto, T. Tamaki and H. Kagaya : Structural Control Experiments of Full-Scale Specimen Structure using LQ and LQG Control Systems, *Proceedings of the 7th International Conference of Computing in Civil and Building Engineering*, Vol. 2, pp.1323~1328, 1997
5. M. Yamamoto and Y. Suzuki : Full-Scale Structural Control with Earthquake Response Generator System and Pole Assignment Control Algorithm, *Proceedings of the 7th International Conference of Computing in Civil and Building Engineering*, Vol. 2, pp.1329~1334, 1997 