

능동 제어장치를 이용한 건물의 진동제어 (Ⅱ): 진동대 실험

Vibration Control for Building Structures using Active Mass Driver (Ⅱ): Shaking-Table Test

민 경 원* 김 두 훈** 이 성 경*** 황 재 승****
Min, Kyung Won Kim, Doo Hoon Lee, Sung Kyung Hwang, Jae Seung

국문요약

본 연구의 목적은 능동 질량 장치를 이용하여 지진하중을 받는 건물모델의 응답을 제어하는 것으로서, 실험에 사용된 능동 질량 장치는 교류형 서보 모터에 의해 관성력이 건물모델의 응답에 반작용하여 제어를 하게 되는 원리를 이용한 것이다. 소형 진동대에 의한 외부하중 묘사, 신호처리와 제어력 발생을 위한 장비들이 구축된 실험 모델로써, 능동 질량 추진기가 1층 전단형 건물모델 상부에 설치된 해석 모델을 실현하였으며, 제어력 산정을 위한 선형 2차 제어 알고리즘은 LabVIEW 프로그램을 사용해서 구현하였다. 건물의 응답과 제어력을 고려해서 제어성능을 검증하였으며, 능동 질량 장치를 설치함으로써, 공진하중과 지진하중에 대한 건물의 응답이 감소하고 또한, 속도피드백 알고리즘이 그 외의 피드백 알고리즘 보다 제어력이 가장 적게 소요되면서 건물의 응답을 감소시키는 것을 실험적으로 파악하였다.

주요어 : 능동 질량 추진기, 교류형 서보 모터, 관성력, 선형 2차 제어 알고리즘, 속도피드백

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the vibration control for building structures using active mass driver (AMD) under the earthquake loading. The AMD is a mass-typed active device, which exerts the inertia control force on the building by AC servo motor. An analytical model of one-story shear building model with AMD, was realized through experimental model which contains a series of processes of external disturbance generation[~] by small-sized shaking table, equipment for signal process and control force generation. Also the LQR algorithm was embodied by LabVIEW S/W. The control performance is experimentally analyzed considering the building response and the control force. It is found that the building response is greatly reduced by installing AMD under the resonant and earthquake loadings. Also, the experimental results show that the velocity feedback reduces the building responses with the smallest amount of control force than any other feedback variable.

Key words : active mass driver, AC servo motor, inertia, LQR algorithm, velocity feedback

1. 서 론

건물의 능동제어는 질량체나 텐던(tendon)을 이용한 제어장치로 제어력을 건물에 가해주어 진동을 감소시켜주는 방법이다. 제어력을 산정하기 위한 제어 알고리즘으로는 일반적으로

건물의 응답과 제어력에 관계된 2차 목적함수를 최소화하여 응답의 제어 이득(control gain)을 구하는 선형 2차 조정기(linear quadratic regulator, 이하 LQR이라 함.) 알고리즘을 이용한다. 이와 같은 LQR 알고리즘을 응용하여 Chung⁽¹⁾ 및 Soong^{(2),(3)}이 각각 텐던 및 가새형 제어기를 이용한 능동제어 실험을 수행하여 성능을 입증하였으며, Kobori^{(4),(5)}는 능동형 질량 제어장치(Active Mass Driver, 이하 AMD라 함.)의 내진 성능에 실험 연구를 수행하여 해석 모

* 정희원 · 인천대학교 건축공학과 교수
** 정희원 · 유니스산업㈜ 기술연구소 소장
*** 인천대학교 건축공학과 대학원 석사과정
**** 현대건설 기술연구소 주임연구원

델을 제시하였다. 이러한 연구 성과인 능동 제어 장치를 이용한 제어 기법이 실제 적용 단계에 이르러 대표적인 예로 랜드마크 타워(일본, 요코하마)에 능동-수동 겸용인 복합형 질량 제어장치(Hybrid Mass Damper)를 설치하였다. 한편, 국내에서는 능동제어에 관한 실험 연구가 매우 한정적이어서 텐던을 이용하여 능동제어의 효과를 실험으로 검증한 고 현무⁽⁶⁾와 질량형 제어장치를 이용한 황 재승⁽⁷⁾이 있다. 고현무의 실험은 설계제한 조건과 시간 지연 효과를 고려한 실험을 해석적인 결과와 비교하여 제어 성능을 입증하였으며 황 재승⁽⁷⁾의 실험에서는 지진에 대한 AMD의 제어 성능을 파악하였으며 제어 시스템의 시간 지연에 관한 영향을 분석하였다. 본 실험에서는 민 경원⁽⁸⁾의 연구에서 구축한 실험 시스템을 이용하여 LQR 알고리즘을 적용한 AMD의 제어 성능 실험을 수행하여 황 재승⁽⁷⁾에서 다루지 못하였던 되먹임되는 건물 응답의 변화에 따른 응답의 제어율과 요구되는 제어력을 분석하여 되먹임 변수의 효율을 검증하고자 한다.

되먹임에 따른 제어 이득은 실험 모형 및 측정 장비에 따라 다르므로 본 실험에서는 이득 변화에 따른 실험을 반복 시행하여 최적의 이득을 구하기로 한다. 건물의 상대속도 혹은 상대변위 그리고, 상대속도와 상대변위의 되먹임에 적합한 최적의 제어이득을 곱하여 모터를 구동시켜서, 지진하중 및 조화하중에 관하여 제어효율인 제어율과 제어력을 비교하였다.

2. 해석모델

민경원⁽⁸⁾이 구축한 시스템은 3개의 기초 시스템으로 이루어진다. 첫째로 제어 대상이 되는 건물 모형, 둘째, 제어력을 전달하는 AMD, 마지막으로 지진하중을 건물에 가진하는 진동대 시스템이 통합화되어 제어 시스템을 구성한다. 다음 그림 1은 제어 시스템의 수학적 모델로 m 과 m_d 는 각각 건물모형 슬래브와 AMD의 질량을 나타내며, X_g , X , X_d 는 각각 지반,

건물, AMD의 절대변위를 나타내며 u 는 건물의 응답을 되먹임하여 산정되어 건물에 가해지는 제어력을 말한다. 제어 모델의 수학적 전개를 간단히 하기 위하여 건물과 지반과의 상호작용과 제어장치와 진동대의 동적특성은 무시한다고 가정한다.

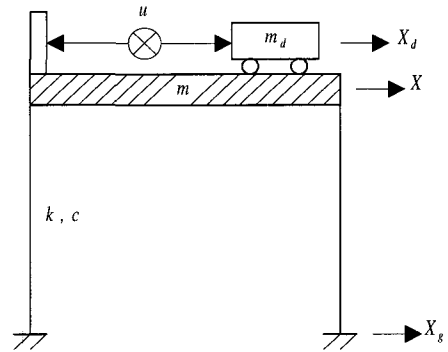


그림 1 수학적 제어모델

위와 같은 AMD를 이용한 제어 모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{X}_g - u \quad (1)$$

위 식 (1)에서 $x = X - X_g$ 즉, 건물과 지반의 상대변위를 나타내며 제어력과 지진에 의한 외력이 건물에 가해지는 것을 확인할 수 있으며, c 와 k 는 각각 건물의 감쇠상수와 기동강성이다.

(1)식에서, 상태변수 $z = [x, \dot{x}]^T$ 를 정의하면, (1)식의 미분방정식은 (2)식과 같은 상태방정식으로 변환된다.

$$\dot{z} = Az + Bu + E\ddot{X}_g \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/m \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

위에서 A, B, E 는 각각 시스템 행렬, 제어 위치행렬, 외란 위치행렬을 의미한다.

3. 제어 알고리즘

능동제어의 LQR 알고리즘은 다음 (5)식과 같이 외란을 배제한 시스템 방정식을 기준으로 하여 (6)식과 같은 2차 목적지수를 최소화하여 제어 이득을 구하는 방법이다.

$$\dot{z} = Az + Bu \quad (5)$$

$$J = \int_0^{\infty} (z^T Q z + u^T R u) dt \quad (6)$$

위에서 Q 와 R 은 각각 제어장치의 설계 변수가 되는 가중행렬이다.

식 (6)의 목적지수를 최적화하는 제어이득 행렬 K 를 구하여 다음과 같이 제어력 u 를 산정한다.

$$u = -Kz \quad (7)$$

위의 제어력은 본 연구에서 설계, 제작하여 이용하는 AC 서보 모터를 동력원으로 하고 불 스크류를 이용하여 모터의 회전을 질량의 직진운동으로 변환시켜 주어 질량의 관성력을 발생시키는 AMD⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾를 적용하였을 때 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$u = m_d \ddot{X}_d \quad (8)$$

본 실험에 이용되는 AMD는 모터에서 발생한 동력으로 질량체에 관성력을 발생시키고 이 관성력을 작용과 반작용에 의하여 건물에 전달하는 시스템으로 이루어졌기 때문에, 실제 관성력을 발생시키는 것은 모터의 속도가 아니고 속도의 변화 즉, 가속도가 된다. 그러므

로, 제어력은 (8)식과 같은 관성력으로 표현이 되며, 제어 이득에 의하여 제어력이 산정되면 질량체에 발생되어야 할 가속도는 u/m_d 로 표현된다. AC 서보 모터는 속도입력 모터이기 때문에, 이러한 가속도를 모터가 구현하도록 하기 위해서는 적분하여 모터에 입력하여야 한다. 그러므로, 모터에 입력되는 속도는 다음 식 (9)와 같다.

$$v = \int_0^t \frac{u}{m_d} dt \quad (9)$$

여기서, 최적의 이득을 산정하여 제어력을 계산하는데 식 (6)의 목적지수는 상태변수에 관계된 것이므로 건물의 상대변위 및 속도에 관계된 이득이라 할 수 있다. 그러나, 건물의 능동 제어시 변위의 되먹임은 건물 강성의 변화를, 속도의 되먹임은 건물 감쇠의 변화를, 가속도 되먹임은 건물 질량의 변화를 통하여 건물의 진동을 제어한다. 제어력 산정에는 모든 상태변수 즉, 상대속도와 상대변위가 필요하지만 실제건물의 제어에서는 건물에 부착하는 센서의 수가 제한되고 제어의 효율성 때문에 순수한 속도 되먹임을 많이 사용하고 있다.⁽²⁾⁽³⁾ 특히, 최상층에 제어장치가 설치되어 있고 최상층의 상대 속도를 되먹임하는 속도 되먹임은 물리적으로 바닥과 최상층을 연결하는 댐퍼의 역할을 하는 것으로 볼 수 있으므로 매우 좋은 효과를 기대할 수 있다.⁽⁷⁾ 따라서, 상태 변수의 되먹임 이외에도 변위 및 속도에 관계된 되먹임에 의한 응답의 변화를 통하여 일반적으로 알려진 속도 되먹임의 우수한 제어 성능도 검증하여야 한다.

다음과 같이 순수한 속도 되먹임을 사용하는 경우, $u = -Kx$ 를 (9)식에 대입하면 다음식 (10)과 같이 건물의 상대변위 x 를 이용하여 모터의 입력속도를 구할 수 있다.

$$v = \frac{-Kx}{m_d} \quad (10)$$

여기서, K 는 속도 되먹임에 사용되는 제어 이득이며, x 는 건물의 상대변위를 나타낸다.

본 실험에서는 가속도 센서로 측정된 건물의 상대 가속도를 적분하여 상대 속도 혹은 상대 변위 그리고, 상태 변수인 상대 속도와 상대 변위 모두를 되먹임하여 최적의 이득을 곱하여 제어력을 산정하여 건물의 제어 응답을 구하였다. 그리고 제어된 응답의 크기와 모터의 제어력을 비교함으로써 되먹임되는 응답 변수에 따른 제어효율을 비교하였다.

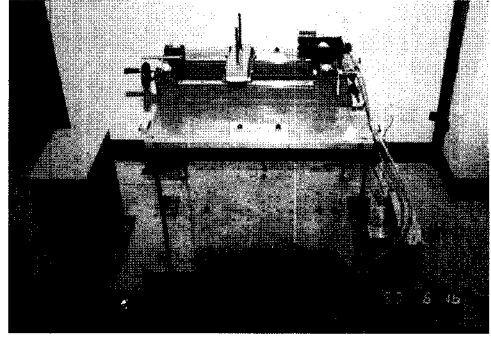


사진 1 능동제어 실험시스템

4. 실험모델

위에서 논한 AMD를 이용한 제어모델 실험을 위하여 사진 1과 같이 소형 진동대, 건물 모형, AMD, 각종 진동 계측장비 그리고 이러한 시스템을 통합하는 컴퓨터로 이루어진 제어 시스템을 구성하였다.⁽⁸⁾

진동대에 의한 지반 진동의 발생은 컴퓨터에 저장되어 있는 지진이나 조화하중과 같은 외력데이터가 연산프로그램에 의해 펄스의 개수가 계산되어 펄스발생기에 보내지고, 펄스발생기는 외력의 펄스신호를 발생하여 스테핑모터를 구동하며, 스테핑모터가 구동에 따라 진동대는 의도하는 외력을 발생한다.

또한, 진동대에 의하여 가진된 건물과 지반 가속도를 센서로 계측하여 A/D보드에 입력되고, 제어용 컴퓨터는 제어 알고리즘에 따라 LabVIEW S/W에 의해 제어력을 산정한다. 이렇게 산정된 제어력은 D/A보드를 통해 모터 컨트롤러에 보내진다. 모터컨트롤러는 제어 신호를 발생하여 서보 모터를 구동하며, 이는 다시 AMD의 질량체가 왕복 운동함으로써 제어력이 발생한다.

이상과 같이, 전체 시스템은 외력발생부분의 개회로시스템(open-loop system)과 건물의 응답을 측정하여 제어알고리즘에 따른 제어력을 발생해주는 제어부분의 폐회로시스템(closed-loop system)으로 구성된다.

5. 제어 실험

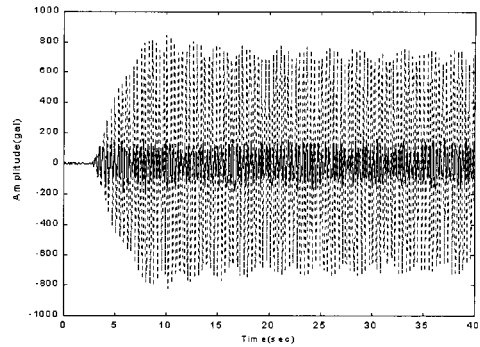
본 실험에서 다루는 AMD의 제어 성능을 분석하기 위하여 되먹임되는 건물응답에 따른 제어효율을 검증하였다. 되먹임 변수는 첫째, 건물의 상대 속도, 둘째, 건물의 상대 변위, 마지막으로 건물의 상태 변수인 상대 속도와 상대 변위를 택하였다. 하중으로는 건물의 고유주기와 같은 주기를 가지는 공진 하중과 크기를 1/20로 축소한 El Centro(1940, NS성분) 지진을 가하였고 건물의 상대변위, 상대 속도, 상대 가속도, 절대 가속도의 RMS응답을 구하여 AMD를 설치하였을 때의 제어 효율을 비교하였다. 실험 모델의 진동 특성을 구하여 상태방정식을 구성하고 목적지수의 가중행렬을 가정하여 최적의 제어이득을 구하는 대신, 본 연구에서는 제어 이득의 변화에 따른 실험을 통하여 최적의 제어이득을 구하였으며 이때의 AMD 가속도를 구하여 모터의 제어력을 추정하였다.

표 1의 결과에 따르면 공진하중이나 지진하중의 경우 모두 제어율이 높아 제어를 하지 않았을 때보다 최대 83% 까지 응답이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 지진하중보다 공진하중에 의한 제어율이 높은 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 공진하중에 의한 건물 응답이 뚜렷한 주기의 특성을 지니기 때문에 단자유도계의 특성을 지니는 AMD로 건물의 주기를 구현하여 제어를 용이하게 할 수 있기 때문이다. 그러나 지진하중의 경우 광대역의 주파수 특성을

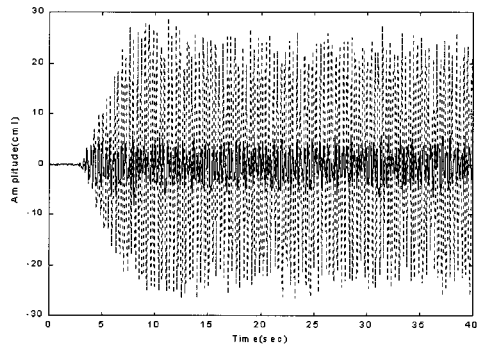
가지고 있기 때문에 공진하중 보다 제어율이 떨어진다. 또한 공진하중의 경우 상태변수 되먹임인 변위-속도 되먹임의 제어율이 제일 높은 것을 알 수 있으나, 제어력을 나타내는 제어장치의 가속도는 341gal 로써 속도 되먹임 보다 크기 때문에, 제어 효율인 제어율과 제어력을 동시에 고려할 때는 상태 되먹임보다 속도 되먹임이 우수하다는 것을 추론할 수 있다. 이러한 사실은 지진하중의 경우 더욱 뚜렷하여 속도 되먹임인 경우 제어 효율이 제일 우수한 것을 알 수 있어 일반적으로 알려진 속도 되먹임의 제어 성능을 확인할 수 있었다.^{(1),(2),(4),(5)}

앞의 3장에서 살펴본 바와 같이 순수 속도 되먹임의 경우, 제어력 $u = -K\dot{x}$ 로 표현된다. 이는 건물모델에 감쇠력을 제어력으로 가하는 효과와 동일하다. 즉, 건물에 AMD를 설치할 경우 인위적인 감쇠기를 설치하는 효과를 나타내게 된다.

다음 그림 2와 3은 각각 공진하중과 El Centro 지진하중을 가했을 때, 1층의 절대가속도와 상대변위를 비제어 및 제어 시 응답을 비교한 그림이다. 제어시 효율이 우수한 속도 되먹임을 사용하였으며 각 경우 모두 제어율이 높은 것을 시각적으로 알 수 있다.



(a) 1층 절대가속도



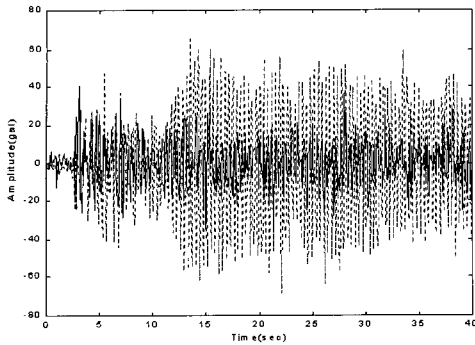
(b) 상대 변위

비제어(- - -), 제어(-)

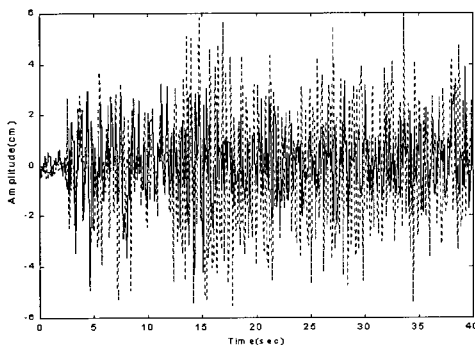
그림 2 공진하중 가력시 제어효과

표 1 되먹임 변수 변화에 따른 제어효율

가력 하중	측 정 응 답	비제어	변위되먹임 게인 = -0.0571		속도되먹임 게인 = -4.0		변위-속도되먹임 게인 = -0.0571, -4.0	
			제어율(%)	제어율(%)	제어율(%)	제어율(%)		
공진하중	상대변위(cm)	11.51	3.28	72	3.14	73	2.17	81
	상대속도(cm/sec)	83.81	23.45	72	22.04	74	14.78	82
	상대가속도(gal)	497.7	139	72	130	74	86.5	83
	1층가속도(gal)	504.4	134.2	73	138	73	87.5	83
	AMD가속도(gal)	·	408		271		341	
지진하중	게 인	비제어	-0.0571		-4.0		-0.02, -3.0	
	상대변위(cm)	0.99	0.67	제어율(%) 32.2	0.69	제어율(%) 30.3	0.64	제어율(%) 35.4
	상대속도(cm/sec)	6.27	35.92	42.7	36.02	42.5	34.35	45.2
	상대가속도(gal)	36.4	20.4	44	20	45	20	45.1
	1층가속도(gal)	30.1	11.5	61.8	11.3	62.5	11	63.5
	AMD가속도(gal)	·	70		65		65.4	



(a) 1층 절대가속도



(b) 상대 변위

비제어(- - -), 제어(—)

그림 3 3층 Centro지진하중 가력시 제어효과

6. 결 론

본 연구에서는 서보 모터에서 발생한 동력으로 질량체에 관성력을 발생시켜 건물의 진동을 제어하는 AMD를 건물에 설치하여 제어 효과를 실험으로 검증하였다. 되먹임되는 건물 응답에 따라 건물응답의 제어효과와 이에 따른 제어력을 구하여 제어 효율을 분석하였다. 제어력 구현의 한계나 건물 응답의 허용범위 등에 관한 제한 조건을 고려하지 않고 단순히 건물의 응답을 선형으로 되먹임하는 알고리즘을 이용하여 제어 이득을 변경하면서 선형 되먹임으로 제어력을 구하였다. 공진하중이나 지진하중의 경우 모두 제어율이 높아 제어를 하지 않았을 때보다 최대 83% 까지 응답이 줄어드는 것을 확인할

수 있으며, 지진하중보다 공진하중에 의한 제어율이 높은 것을 알 수 있다. 또한 제어 효율인 제어율과 제어력을 동시에 고려할 때는 상태 변수의 되먹임보다 속도 되먹임이 우수하다는 것을 알 수 있었으며 이러한 사실은 지진하중의 경우 더욱 뚜렷하여 속도 되먹임인 경우 제어 효율이 제일 우수한 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 STEPI의 지진대응기술개발과제의 소과제 일부로 수행되었으며, 과학기술부 및 유니스산업(주)의 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Chung, L.L., Lin, R.C., Soong, T.T., and Reinhorn, A.M., "Experimental study of active control of mdof structures under seismic excitations," *Technical Report NCEER-88-0025*, July 10, 1988.
2. Soong, T.T., Reinhorn, A.M., Wang, Y.P., and Lin, R.C., "Full-scale implementation of active control : design and simulation," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 11, November, 1991, pp. 3516~3536.
3. Reinhorn, A.M., Soong, T.T., Riley, M.A., Lin, R.C., Aizawa, S., and Higashino, M., "Full-scale implementation of active control II: Installation and performance," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 119, No. 6, June, 1993, pp. 1935~1960.
4. Kabori, T., Koshika, N., Yamada, K., and Ikida, Y., "Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part I: Design," *Earthquake eng. & struct. dyn.*, Vol. 20, 1991, pp. 133~149.

5. Kobori, T., Koshika, N., Yamada, K., and Ikida, Y., "Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part II: Verification," *Earthquake eng. & struct. dyn.*, Vol. 20, 1991, pp. 151~166.
6. 고현무, 박관순, 박원석, "설계제한 조건이 고려된 출력 되먹임 최적제어에 의한 구조물 진동의 능동제어", 대한토목학회논문집, 제15권, 제6호, 1995년 11월, pp. 1535~1544.
7. 황재승, "건축구조물의 능동제어에 관한 실험적 연구", 공학박사학위논문, 서울대학교, 1998, 2.
8. 민경원, 이성경, 황재승, 김두훈 "능동제어장치를 이용한 건물의 진동제어 (I) : 시스템 설계", 지진공학회 논문 제출.