

피드백 변화에 따른 건물의 능동제어 실험 Experimental Study on Active Control of Building Structures by Feedback Variables

민 경 원*
Min, Kyung-Won

이 성 경**
Lee, Sung-Kyung

김 두 훈***
Kim, Doo-Hoon

ABSTRACT

This paper presents an experimental study on the performance of the active damper device by feedback variables. The damper is a mass-typed active device, which exerts the inertia control force on the building by AC servo motor. 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 the mass-typed device under the resonant and earthquake loading. Also, the experimental results show that the velocity feedback reduces the building responses with the smallest amount of control force than any other feedback variables.

1. 서론

건물의 능동제어는 질량감쇠기(mass dampers)나 텐던(tendon)을 이용하여 피드백의 제어논리에 따라 제어력을 건물에 가해 주어 진동을 감소시켜주는 방법이다. 능동제어시 변위 피드백을 하면 구조체의 강성이, 속도 피드백을 하면 감쇠가, 가속도 피드백을 하면 질량이 변한 것과 같은 거동을 보여 진동을 제어할 수 있게 된다.

본 연구에서는 모터에서 발생한 동력으로 부가 질량체에 관성력을 발생시켜 건물의 진동을 제어하는 일종의 능동형 타입의 질량감쇠기(Active Mass Dampers)를 제어장치로 이용하기로 하며 건물 응답의 피드백의 변화를 통하여 제어 효과를 검증하기로 한다. 피드백에 따른 제어이득

* 인천대학교 건축공학과 교수

** 인천대학교 건축공학과 대학원 석사과정

*** 유니슨산업㈜ 기술연구소, 소장

(control gain)은 실험 모형 및 측정 장비에 따라 다르므로 본 실험에서는 이득 변화에 따른 실험을 거쳐 최적의 이득을 구하였다. 건물의 응답을 상대속도 혹은 상대변위 그리고, 상대속도와 상대변위의 되먹임에 적합한 최적의 제어이득을 곱하여 모터를 구동시켜서, 각각의 제어효율인 제어율과 제어력을 비교하였다.

2. 해석모델

본 실험에서 구축한 제어 시스템은 3 개의 기초 시스템으로 이루어진다. 첫째로 제어 대상이 되는 건물 모형, 둘째, 제어력을 전달하는 능동형 제어장치, 마지막으로 지진하중을 건물에 가진다는 진동대 시스템이 통합화되어 제어 시스템을 구성한다. 다음 그림 1은 제어 시스템의 수학적 모델로 m 과 m_d 는 각각 건물모형 슬래브와 제어장치의 부가 질량체의 질량을 나타내며, X_g , X , X_d 는 각각 지반, 건물모형, 제어장치의 절대변위를 나타내며, u 는 건물의 응답을 피드백하여 산정되어 건물에 가해지는 제어력을 말한다. 제어 모델의 수학적 전개를 간단히 하기 위하여 건물과 지반과의 상호작용과 제어장치의 진동대의 동적특성은 무시한다고 가정한다.

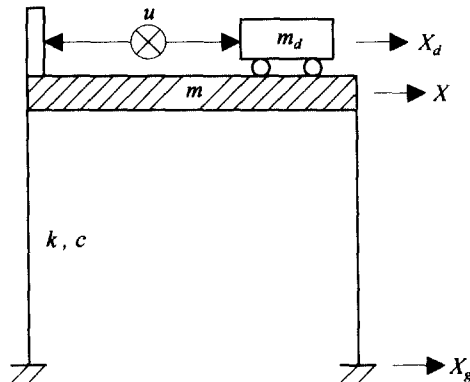


그림 1. 수학적 제어모델

위와 같은 제어 모델에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

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

$$m_d\ddot{X}_d = u \quad (2)$$

위 식에서 $x = X - X_g$ 즉, 건물모형과 지반의 상대변위를 나타내며 제어력과 지진에 의한 외력이 건물에 가해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 (2)식에서 제어력은 제어장치 부가질량체의 관성력으로 표현이 되는 것을 알 수 있다. 즉 부가질량체의 관성력이 (1)식의 건물모형에 제어력으로 작용하는 것을 알 수 있다.

(1)식에서, 상태변수 $z = [x, \dot{x}]^T$ 를 정의하면, (1)식의 미분방정식은 (3)식과 같은 상태방정식으로 변환된다.

$$\dot{z} = Az + Bu + E\ddot{X}_g \quad (3)$$

위 식에서, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/m \end{bmatrix}$, $E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$, $u = -kz$ 이다.

3. 실험모델

위의 2절에서 논한 수학적 제어모델의 실험을 위하여 다음 그림 2와 같이 제어시스템을 구축하였다.

외력발생은 컴퓨터에 저장되어 있는 지진이나 조화하중과 같은 외력의 데이터가 연산프로그램에 의해 펄스의 개수가 계산되어 펄스발생기에 보내지고, 펄스발생기는 외력의 펄스신호를 발생하여 스테핑모터를 구동하며, 스테핑모터가 구동함에 따라 진동대는 의도하는 외력을 발생한다.

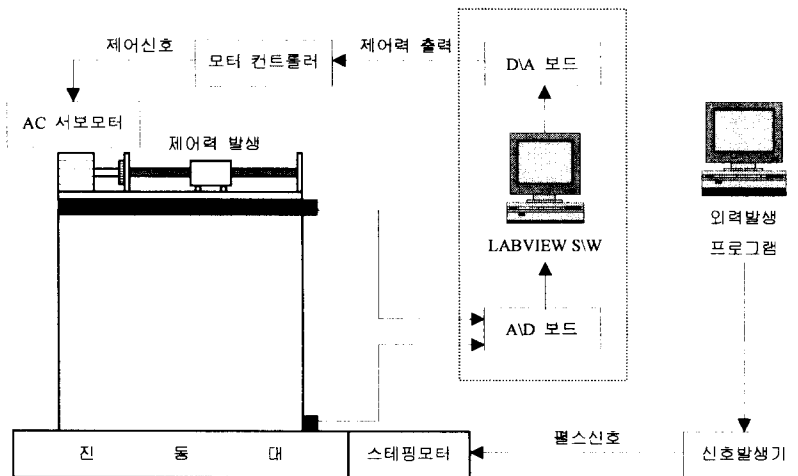


그림 2. 실험시스템 구성

또한, 진동대에 의하여 가진된 건물과 지반 가속도를 센서로 계측하여 A/D 보드에 입력되고, 제어용 컴퓨터는 제어 알고리즘에 따라 Labview S/W 에 의해 제어력을 산정한다. 이렇게 산정된 제어력은 D/A 보드를 통해 모터 컨트롤러에 보내진다. 모터컨트롤러는 제어신호를 발생하여 서보모터를 구동하며, 이는 다시 제어장치의 부가질량체가 왕복 운동함으로써 제어력이 발생한다.

다음 사진 1.은 본 연구팀이 구현한 능동제어 실험시스템을 나타낸 것이다.

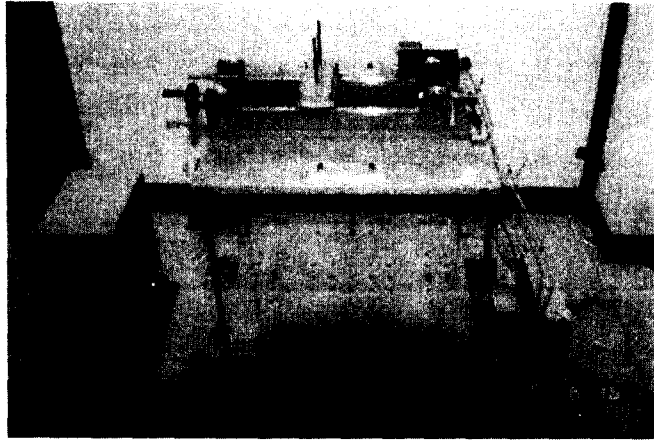


사진 1. 능동제어 실험시스템

4. 제어장치와 되먹임 특성

질량형 제어장치에 사용되는 동력원은 AC 서보 모터이다. 일반적으로 진동대 및 제어장치를 구동하는 동력원은 모터 외에 유압식, 공기압식 동력원이 시스템의 사양과 허용 용량, 요구되는 정밀도에 따라 사용되고 있다. 모터의 제어성능과 용량의 향상 뿐 만 아니라 유지 관리의 유리한 점 때문에 진동제어 시스템의 실제 응용에서도 모터를 사용하는 경우가 늘어나고 있는 추세이다.

모터는 입력전압과 전류를 속도와 토크로 변경하는 에너지 변환시스템으로 전기에너지를 기계에너지로 전환하는 에너지 변환장치이기도 하다. 모터는 입력 전압에 비례하여 속도를 발생시키기 때문에 모터를 이용하여 제어력을 건물에 가하기 위해서는 제어장치의 힘 전달 메커니즘에 따라 그 전달 방식이 달라지게 된다.

질량형 제어장치는 모터에서 발생한 동력으로 부가 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. 그러므로, 제어 알고리즘에 의하여 계산된 제어력은 (2)식과 같은 관성력에 의한 제어력으로 나타낼 수 있으며, 그러한 제어력으로부터 부가질량체에 발생되어야 할 가속도는 u/m_d 로 표현된다. AC 서보 모터는 속도입력 모터

이기 때문에, 이러한 가속도를 모터가 구현하도록 하기 위해서는 적분하여 모터에 입력하여야 한다. 그러므로, 모터에 입력되는 속도는 다음식 (4)와 같다.

$$v = \int_0^t \frac{u}{m_d} dt \quad (4)$$

여기서 v 는 모터에 입력되는 속도이며 u 는 제어 알고리즘에 의해 계산된 제어력, m_d 는 제어장치의 부가질량체 질량을 나타낸다. 여기서 제어력을 계산하는데 다음과 같이 순수한 속도피드백을 사용하는 경우, $u = G\dot{x}$ 를 (4)식에 대입하면 다음식 (5)와 같이, 건물의 상대변위 x 를 이용하여 모터의 입력속도를 구할 수 있다.

$$v = \frac{Gx}{m_d} \quad (5)$$

여기서, G 는 속도 피드백에 사용되는 제어이득, x 는 건물의 상대변위를 나타낸다. 이것은 속도 피드백의 경우에 적분과정 없이 변위로부터 바로 제어력을 모터를 통하여 구현할 수 있음을 보이는 것으로 질량형 제어장치의 경우에는 모터가 적분기 역할을 하는 것을 알 수 있다.

(3)식에서와 같이 제어력 산정에는 모든 상태변수 즉, 상대속도와 상대변위가 필요하지만 실제 건물의 제어에서는 건물에 부착하는 센서의 수가 제한되고 제어의 효율성 때문에 순수한 속도 피드백을 많이 사용하고 있다. 특히, 최상층에 제어장치가 설치되어 있고 최상층의 상대 속도를 피드백하는 속도 피드백은 물리적으로 바닥과 최상층을 연결하는 댐퍼의 역할을 하는 것으로 볼 수 있으므로 매우 좋은 효과를 기대할 수 있다.

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

5. 제어 실험

다음 표 1.은 피드백되는 변수변화에 따른 제어효율을 건물의 응답 평균을 통해 검증한 것이다. 피드백 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 하

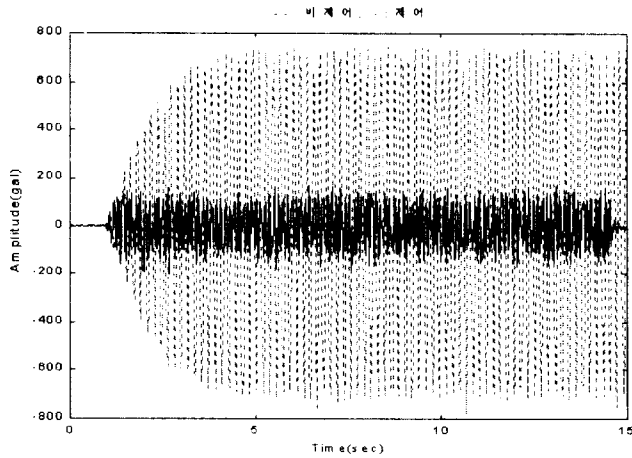
중과 크기를 1/20 로 축소한 El Centro 지진을 가하였고 건물의 상대변위, 상대 속도, 상대 가속도, 절대 가속도를 구하여 제어장치를 설치하였을 때의 제어 효율을 비교하였다. 본 실험에서는 제어 이득을 변경하면서 응답의 제어율을 구하였으며 이때의 제어장치의 부가질량계 가속도를 구하여 모터의 제어력을 추정하였다. 제어력 구현의 한계나 건물 응답의 허용범위 등에 관한 제한 조건을 고려하지 않고 단순히 건물의 응답을 선형으로 피드백하는 단순 알고리즘을 이용하였다.

표 1.의 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 질량형 제어장치로 건물의 주기를 구현하여 제어를 용이하게 할 수 있기 때문이다. 그러나 지진하중의 경우 광대역의 주파수 특성을 가지고 있기 때문에 공진하중보다 제어율이 떨어진다. 또한 공진하중의 경우 상태변수 피드백의 제어율이 제일 높은 것을 알 수 있으나 제어력을 나타내는 제어장치의 가속도는 341 gal 로써 속도 피드백 보다 높아 제어 효율인 제어율과 제어력을 동시에 고려할 때는 상태 피드백보다 속도 피드백이 우수하다는 것을 추론할 수 있다. 이러한 사실은 지진하중의 경우 더욱 뚜렷하여 변위 피드백인 경우 제어 효율이 제일 우수한 것을 알 수 있다.

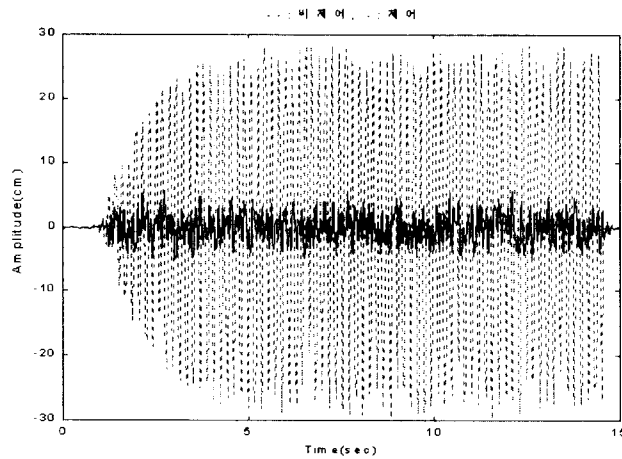
표 1. 피드백변수 변화에 따른 제어효율

| 가령 하중 | 측 정 응 답 | 비제어 | 가속도피드백 게인 = -0.0571 | | 속도 피드백 게인 = -4.0 | | 가속도-속도피드백 게인 = -0.0571, -4.0 | |
|-------|------------------|-------|------------------------|-------|---------------------|-------|---------------------------------|-------|
| 공진하중 | 상대변위 (cm) | 11.51 | 3.28 | 28.4% | 3.14 | 27.3% | 2.17 | 18.8% |
| | 상대속도 (cm/sec) | 83.81 | 23.45 | 28% | 22.04 | 26.3% | 14.78 | 17.6% |
| | 상대가속도 (gal) | 497.7 | 139 | 27.9% | 130 | 26.1% | 86.5 | 17.4% |
| | 1층가속도 (gal) | 504.4 | 134.2 | 26.6% | 138 | 27.3% | 87.5 | 17.3% |
| | AMD 가속도 (gal) | . | | 408 | | 271 | | 341 |
| 지진하중 | 계 인 | 비제어 | -0.0571 | | -4.0 | | -0.02, -3.0 | |
| | 상대변위 (cm) | 0.99 | 0.67 | 67.2% | 0.69 | 69.1% | 0.64 | 64.1% |
| | 상대속도 (cm/sec) | 6.27 | 35.92 | 57.3% | 36.02 | 57.4% | 34.35 | 54.8% |
| | 상대가속도 (gal) | 36.4 | 20.4 | 56% | 20 | 54.9% | 20 | 54.9% |
| | 1층가속도 (gal) | 30.1 | 11.5 | 38.2% | 11.3 | 37.5% | 11 | 36.5% |
| | AMD 가속도 (gal) | . | | 70 | | 65 | | 65.4 |

다음 그림 3.과 4.는 각각 공진하중과 El Centro 지진하중을 가했을 때, 1 층의 절대가속도와 상대 변위를 비제어 및 제어 시 응답을 비교한 그림이다. 제어 시 피드백은 속도피드백 즉, 상대 변위를 모터의 입력으로 사용하였다. 각 경우 모두 제어율이 높은 것을 알 수 있다.

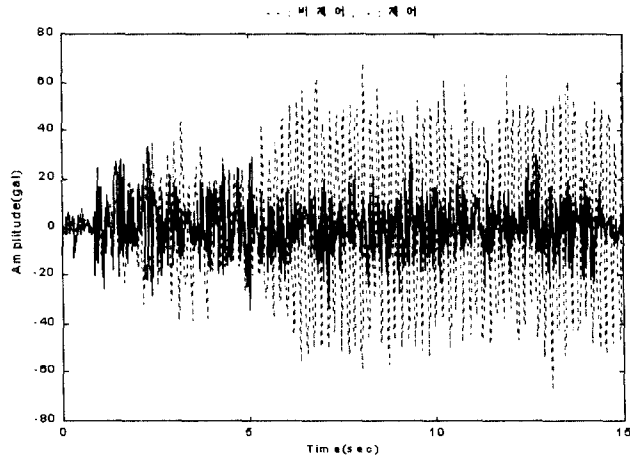


(a) 1 층 절대가속도

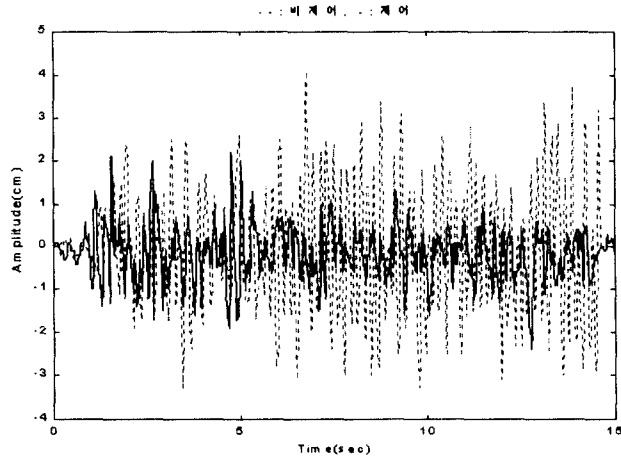


(b) 상대 변위

그림 3. 공진하중 가력시 제어효과



(a) 1층 절대가속도



(b) 상대변위

그림 4. El Centro 지진하중 가력시 제어효과

6. 결론

본 연구에서는 AC 서보 모터에서 발생한 동력으로 질량체에 관성력을 발생시켜 건물의 진동을 제어하는 능동형 제어장치를 건물에 설치하여 제어 효과를 실험으로 검증하였다. 피드백되는 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 피드백하는 단순 알고리즘을 이용하여 제어 이득을 변경하면서 선형 피드백으로 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 상대 피드백보다 속도 피드백이 우수하다는 것을 알 수 있었으며 이러한 사실은 지진하중의 경우 더욱 뚜렷하여 속도 피드백인 경우 제어 효율이 제일 우수한 것을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술처의 특정연구기술개발사업 및 유니슨산업(주)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 대해 감사의 뜻을 전합니다.

7. 참 고 문 헌

- (1) 황재승, “건축구조물의 능동제어에 관한 실험적 연구”, 서울대학교 대학원 건축학과 공학박사학위논문, 1998년 2월
- (2) 홍성목, “건축구조물의 진동제어 기술개발에 관한 연구”, 건설교통부연구개발사업 2차년도 연구개발 보고서, 1997년 10월
- (3) 이상현, “변환강성 시스템을 이용한 건축구조물의 진동제어”, 서울대학교 대학원 건축학과 공학석사학위논문, 1998년 2월
- (4) 고현부, 박관순, 박원석, “설계제한 조건이 고려된 출력 되먹임 최적제어에 의한 구조물 진동의 능동제어”, 대한토목학회논문집, 제 15 권 제 6 호, 1995년 11월, pp. 1535~1544
- (5) 김수중 외 3인, “자동제어”, 청문각, 1998년 1월
- (6) T.T. Soong, “Active Structural Control : Theory and Practice”, Longman Scientific & Technical, 1990
- (7) T.T. Soong, A.M. Reinhorn, Y.P. Wang and R.C. Lin, “Full-Scale Implementation of Active Control I : Design and Simulation”, Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, November, 1991, pp. 3516~3536
- (8) A.M. Reinhorn, T.T. Soong, M.A. Riley, R.C. Lin, S. Aizawa and M. Higashino, “Full-Scale Implementation of Active Control II: Installation and Performance”, Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 6, June, 1993, pp. 1935~1960
- (9) C.C. Chang and Henry T.Y. Yang, “Control of Buildings Using Active Tuned Mass Dampers”, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 121, No. 3, March, 1995, pp. 355~366
- (10) Seshasayee Ankireddi and Henry T.Y. Yang, “Simple ATMD Control Methodology for Tall Buildings Subject to Wind Loads”, Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 1, January, 1996, pp. 83~91