

# 능동 제어장치를 이용한 건물의 진동제어 (I): 시스템 설계

## Vibration Control for Building Structures using Active Mass Driver (I): System Design

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

현대의 고층건물들은 점차 유연해지고 경량화 됨으로 인하여, 지진이나 바람과 같은 하중에 대하여 취약하다. 그러므로, 이러한 하중에 대한 진동수준을 감소시키기 위하여 진동제어 시스템의 성능을 더욱 향상시킬 필요가 있으며, 능동제어장치를 이용한 방법이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 소형 진동대, 건물모델, 건물모델의 응답을 측정하는 센서, 신호처리 보드 그리고, 능동 질량 추진기로 구성된 능동 진동제어 시스템을 구축하였으며, 이러한 개별 시스템들의 동적특성을 실험적인 방법으로 조사하였다. 또한, 건물모델에 El Centro 지진을 가하여, 능동 진동제어 시스템의 성능을 검증하였다.

**주요어** : 진동대, 능동 질량 추진기, 능동 진동제어 시스템, 개별 시스템, El Centro 지진

### ABSTRACT

Increasing flexibility and lightness of recently built high-rise buildings make the structures susceptible to loads such as earthquakes and winds. Therefore, higher performance vibration control systems to reduce the vibration levels are demanded more than any time in the past. One of the typical active vibration control systems is the active mass driver (AMD). In this paper, an active vibration control system consisting of small shaking table, building model, sensors, signal processing board and AMD is constructed. The dynamic characteristics of these individual systems are investigated through the experimental study. The performance of the active vibration control system is verified through the El Centro earthquake(1940,NS) on the building model.

**Key words** : shaking table, active mass driver, active vibration control system, individual system, El Centro earthquake

## 1. 서 론

능동제어는 별도의 제어장치를 건물에 설치하여 외부의 진동에 대한 건물의 응답을 억제하는 방법이다. 건물의 응답을 예측하고 이것을 제어 알고리즘에 따라 되먹임(feedback)하여 산정되는 제어력에 따라 제어장치가 구동하게 되며, 이때 제어력의 구현을 위하여 작동기(actuator)가 요구된다. 이러한 능동제어를 위하여 일련의

건물 응답의 예측, 제어력 산정, 제어력 구현 등을 위하여 신호의 폐루프 시스템(closed-loop system)을 구성하여야 하며, 신호처리에 따른 각종 진동장비의 정확한 작동이 필수적이다. 따라서 능동제어 실험을 수행하기 위해서는 제어력 구현을 위한 제어장치와 작동기, 진동계측 및 신호처리를 위한 장비 등에 관한 세부 시스템의 특성과 문제점을 파악하여야 하며 이러한 각각의 시스템을 통합화하여 시간지연(time delay)없이 건물에 적합한 제어력을 가하여 진동을 제어하여야 한다.<sup>(1)</sup>

수동제어와는 달리 능동제어는 별도의 작동기가 필요하다. 동력의 작용방식에 따라 능동

\* 정회원 · 인천대학교 건축공학과 교수  
\*\* 정회원 · 유니슨산업(주) 기술연구소 소장  
\*\*\* 인천대학교 건축공학과 대학원 석사과정  
\*\*\*\* 현대건설 기술연구소 주임연구원

형 질량 추진기(Active Mass Driver, 이하 AMD라 함.), 텐돈(tendon)형 제어장치 등이 있고, 동력의 발생 방식에 따라 유압식, 공기압식, 전자기식, 모터를 이용한 볼-스크류(ball-screw)형식 등이 있다. 또한 지진과 같이 지반을 통하여 가해지는 외부하중을 묘사할 수 있는 진동대(shaking table)가 있어야 하며, 제어의 대상이 되는 건물 모형, 건물의 응답을 측정하는 센서, 그리고 이들 상호간에 신호를 주고 받는 신호처리 장비 등이 필요하다. 이와 같은 개별적인 시스템의 특성이 결정되면 신호의 흐름을 관련시켜 주는 폐루프 시스템을 구성하여야 하며, 적합한 제어력을 산정하기 위한 제어 알고리즘의 적용, 그리고 이러한 과정을 통합하는 신호 처리 프로그램을 만들어야 한다.

본 연구의 목적은 능동제어의 실험을 위한 시스템의 구성과 검증에 있으므로, 위에서 설명한 건물 모형, 진동대, 작동기, 제어장치, 신호계측장비 등에 대한 개별적인 시스템의 특성과 문제점을 분석하고, 제어 알고리즘과 통합용 프로그램을 이용하여 개별적인 시스템을 폐루프화하여 실험 시스템의 효과적인 운영을 검증하는 데 있다.

## 2. 개별 시스템

### 2.1 건물 모형

건물의 거동은 건물의 고유진동수나 감쇠비 등 동적 특성과 관계가 있으므로 건물 모형의 질량, 강성과 함께 동적 특성을 결정하는 고유진동수에 초점을 맞추어 다음 사진 1과 같이 모형을 제작하였으며 전단모드 거동을 하도록 설계하였다. 실제 건물의 1차 고유진동수는 10Hz 이내가 대부분이며, 지진하중의 진동수 성분도 10Hz 이내가 주류를 이루므로 건물 모형의 1차 고유진동수가 이러한 범위 내에 드는 5Hz 내외가 되도록 건물의 질량과 강성을 조절하였다. 또한, 본 연구에서는 실험의 편의상 가진시키는 방향으로의 진동만을 고려하기 위하여 가진 방향과 직각 방향으로의 기둥 강성을 크게

하여 가진 방향 이외의 진동을 억제하였다. 다음 표 1은 건물 모형의 동적 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 제어장치로 AMD를 이용하며 특히, AMD가 건물 모형 위에 설치되므로, 전체질량은 바닥판의 질량, AMD의 질량 및 부가 질량체까지 포함한 질량이다. 제어력 산정시 사용되는 질량은 왕복운동을 함으로써 관성력을 발생시키는 AMD의 부가질량체와 볼-스크류 너트를 합한 질량으로써 2.7kg이며, 전체질량의 8%에 해당한다

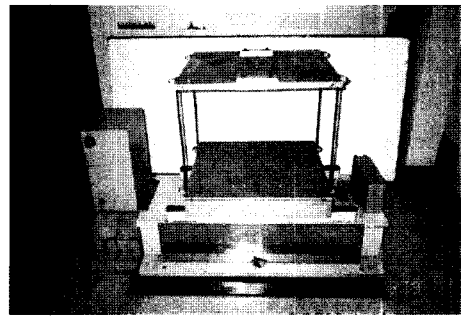


사진 1 건물 모형

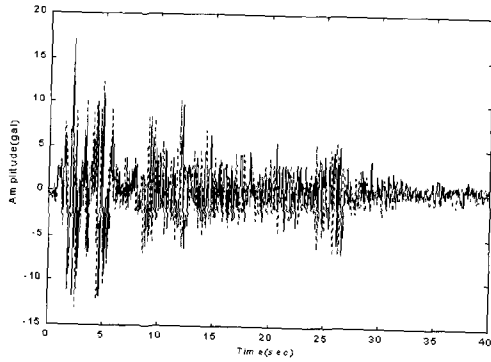
표 1 건물 모형의 동적특성

	질량(kg)	진동수(Hz)	강성(N/m)	감쇠비(%)
특성값	32.9	2.7588	98.882	0.35
	재 질		크 기(mm)	
바닥판	알루미늄		600×600×20	
기둥	SWS400		40×470×3.5	

### 2.2 진동대

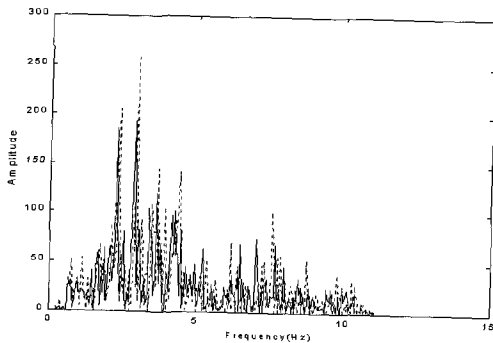
본 연구에 이용이 되는 진동대는 스텝핑 모터(steping motor)를 이용한 소형 진동대를 이용하기로 한다.<sup>(2)</sup> 스텝핑 모터는 지진과 같은 불규칙한 파를 구현하기 위하여 모터에 가해지는 신호의 수에 따라 모터의 회전을 제어하기 용이한 특징이 있다. 이러한 진동대의 검증을 위하여 1/20로 축소된 El Centro 지진을 입력으로 하여 진동대로 출력된 지진을 다음 그림 1과 2와 같이 비교하였다. 입력과 출력을 비교하였을 때 시간영역이나 진동수영역에서

매우 유사한 것을 알 수 있어 진동대의 정확도를 알 수 있다. 다음 사진 2와 표 2는 진동대의 전경과 진동대의 사양을 나타낸다.



입력(---), 출력(—)

그림 1 El Centro 지진의 입출력 비교(시간영역)



입력(---), 출력(—)

그림 2 El Centro 지진의 입출력 비교(진동수영역)

표 2 진동대 사양

진동대 허용 구조체 질량	150kg
최대 발생 가속도	100cm/sec <sup>2</sup>
진동대 바닥판 크기	600×600mm
진동대 자체 질량	500kg
최대 이동변위	±200mm
볼스크류 피치	10mm
감속비 (볼스크류 기어수 / 모터 기어수)	40/14

### 2.3 작동기

제어력을 발생시켜주는 작동기로써 토크 성능이 뛰어나며 고속회전이 용이하고 제어성능이 좋은 영국 Parker Motion & Control사의 AC서보 모터를 이용하였다. 교류전원이 모터 드라이버에 연결되고, 드라이버에서 모터로 구동신호를 보내어 모터가 회전한다. 모터의 구성은 타코 신호를 다시 드라이버로 되먹임하여 제어 효율을 높이는 모터 구동부와 원하는 신호를 드라이버로 보내는 제어부로 이루어진다. 원하는 위치로 부가질량체가 이동하기 위해서는 모터가 원하는 정도로 회전하여야 하며, 이러한 회전을 신호발생기에서 모터 드라이버로 신호를 보내는 부분이 제어부이다.

다음 사진 3은 모터의 전경이며 최대 토크는 3.3Nm, 파워는 495W, 속도는 6000rpm, 그리고 질량은 1.95kg이다.

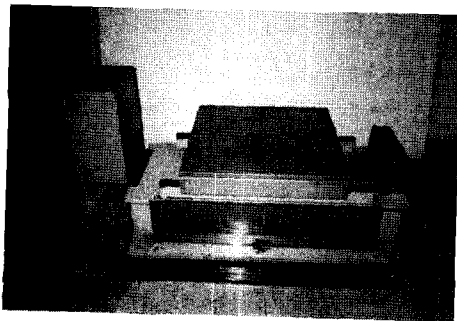


사진 2 진동대 전경



사진 3 AC 서보 모터와 드라이버

### 2.4 능동제어장치

본 연구에서 적용을 하는 능동제어장치는 부가 질량체를 모터로 구동시키고 이때 발생하는 관성력으로 건물에 인위적인 힘을 가하여 진동을 제어하는 AMD이다. AMD가 원하는 크기의 가속도를 얻기 위하여 모터의 회전운동을 볼-스크류를 이용하여 직선운동으로 바꾸도록 설계하였다. AMD와 연결된 볼-스크류의 총질량이 2.75kg가 되며 이러한 질량체에 요구되는 최대가속도는  $0.5m/sec^2$ 이다. 모터 기어와 볼-스크류 기어 사이의 증속비는 1.6이며 이를 기초로 하고 안전율을 고려하여 모터의 크기를 결정하였다. 다음 사진 4와 그림 3은 각각 AMD의 전경과 평면 및 입면을 나타낸 것이고 그림 4는 AMD의 입력과 출력을 비교한 것인데, 서로 비슷하여 입력에 의한 출력이 정확히 나타나는 것을 확인할 수 있다.

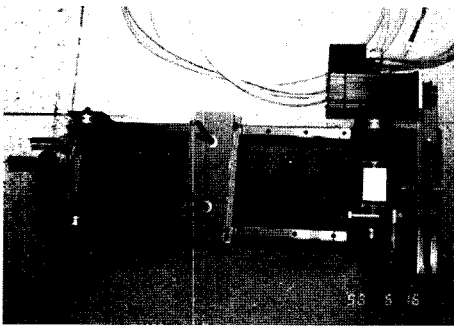


사진 4 진동제어장치 전경

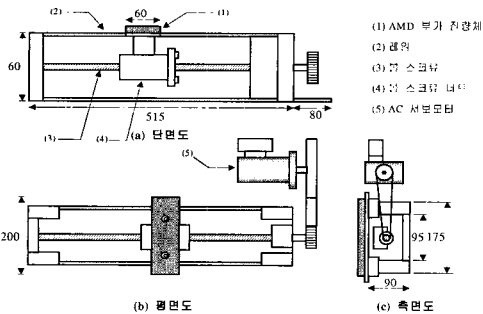
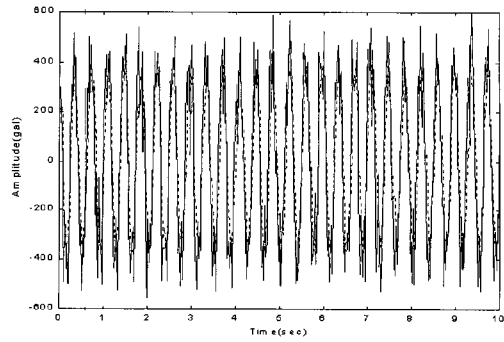


그림 3 진동제어장치의 평면 및 입면



입력(- - -), 출력(—)

그림 4 진동제어장치의 입출력 시간이력 비교

AMD의 동적특성을 파악하기 위하여, 모든 진동수 성분이 포함된 그림 5와 같은 무작위파를 입력하여 그림 6과 같은 AMD의 전달함수를 구하였다. 그림 6과 같이 AMD의 시스템 특성은 15~20Hz에 분포하며, 이는 건물의 고유진동수인 2.76Hz에서 크게 벗어나기 때문에, 건물의 특성을 증폭시키지 않으므로 본 실험에 적합하다고 판단된다.

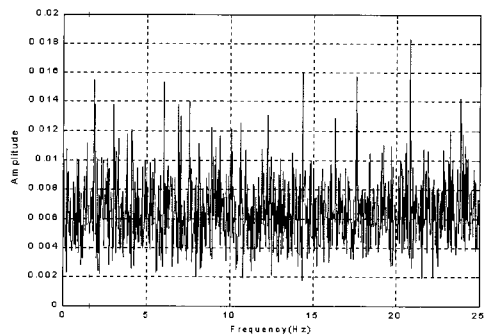


그림 5 무작위 입력전압의 진동수 특성

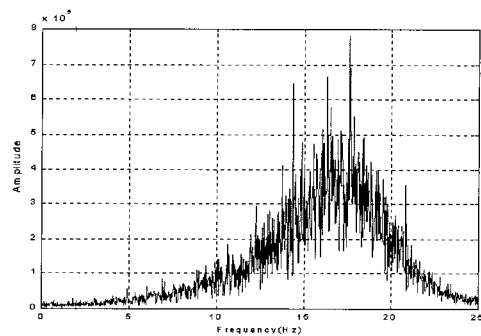


그림 6 진동제어장치의 전달함수

## 2.5 신호변환 보드

AMD를 구동시키기 위하여 모터 드라이버에 보내야 할 신호가 아날로그 신호이므로 컴퓨터에서 계산된 디지털 신호를 아날로그 신호로 바꾸기 위해 D/A보드를 사용하여야 하며, 이와 반대로 가속도계에서 측정된 건물 응답의 아날로그 신호를 컴퓨터가 처리할 수 있도록 A/D보드를 사용하여 신호를 이산화시켜야 한다. 본 연구에서 사용한 A/D 및 D/A 보드는 미국 NI사 제품이며 모델명은 AT-MIO-16-E2이다. 최대 샘플링 속도(sampling rate)는 100kHz이며 본 실험에서는 50Hz로 하였다.

A/D 및 D/A 보드는 외부의 연속적인 신호를 디지털화하는 일종의 샘플러의 기능과 디지털화된 신호를 연속적인 신호로 내보내는 홀더(holder)의 기능을 가지고 있기 때문에 신호를 변형하거나 누락하는 왜곡현상에 유의하여야 한다. 특히 전기적 신호에 항상 오염원이 되는 측정잡음은 제어효과에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에, 가능한 한 줄여야 한다. 출력 채널에 발생하는 편중출력의 크기 및 측정잡음의 특성을 알아보기 위하여, 출력 채널로 0V의 신호를 내보낸 후 바로 입력 채널로 신호를 취득한 결과를 비교한 것이 그림 7과 같이 5mV 내의 크기로 나타나 있다. 이는 본 실험에서 다루는 전압대역이 최소 100mV이상인 사실을 감안하면, 5mV의 크기는 5%로써 무시할 수 있는 크기이다. 또한 측정잡음의 동특성

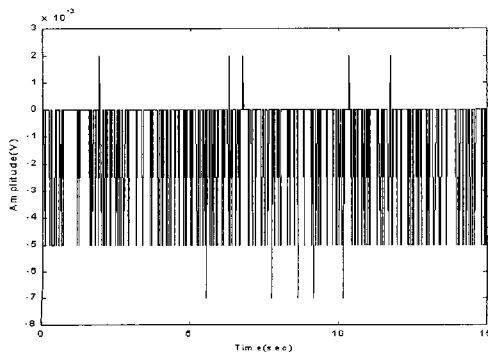


그림 7 신호변환 보드의 잡음

을 알 수 있는 자기상관 함수가 그림 8에 나타나 있다. 이는 약간의 시간변화에도 상관성이 없는 디랙델타(Dirac-delta) 함수의 특성을 보이므로, 백색잡음으로 간주할 수 있으며 실험에 사용되는 보드는 신뢰성이 있다고 판단된다.

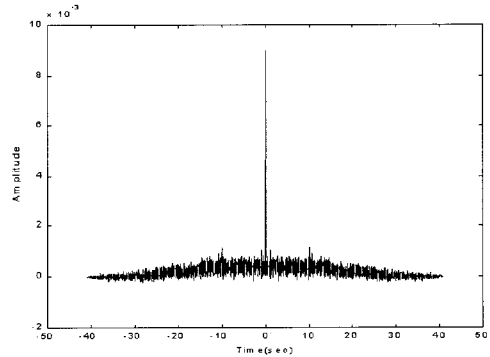


그림 8 측정잡음의 자기상관함수

## 3. 시스템 통합에 의한 능동제어

능동제어 실험은 2절에서 설명한 전기, 기계 장치로 이루어진 개개의 시스템들이 하나의 통합된 시스템을 구성함으로써 이루어진다. 이 통합된 시스템은 크게 진동제어 시스템과 외란을 발생시키는 진동발생 시스템으로 나눌 수 있다.

진동제어 시스템을 구성하는 요소로는 건물의 응답을 측정하는 계측 센서가 있으며 연속적으로 계측된 신호를 컴퓨터가 처리할 수 있도록 신호를 이산화하는 A/D변환기, 이산화된 신호를 제어력으로 계산하는 제어 알고리즘과 신호의 흐름을 관리하는 소프트웨어가 있다. 제어력으로 계산된 신호는 D/A변환기를 통하여 연속적인 신호로 치환되어 제어장치를 구동하게 된다. 건물의 능동제어는 건물의 지반과의 상대 가속도 응답을 센서로 측정하여 최적의 이득(gain)을 곱하여 작동기를 통하여 건물에 제어력을 가하여 응답을 제어하는 방식이다. 따라서 그림 9와 같이 건물의 응답이 건물에 제어력으로 되먹임되는 폐회로 시스템이 구성되게 된다.

진동발생 시스템은 이미 이산화 형태로 입력된 기존의 지진이나 인공지진, 조화하중을 진동발생기에 내보내는 역할을 한다. 진동발생 신호 또한 이산화되어 매순간마다 프로그램을 통하여 스테핑 모터로 보내진다.

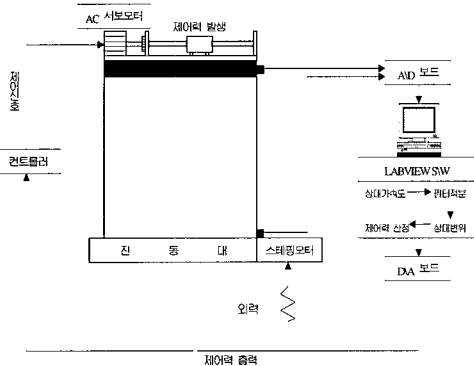


그림 9 폐회로 시스템

위 그림 9와 같이 위에서 살펴 본 각각의 시스템들이 서로 연결, 통합화되어 건물의 응답을 제어하게 되는데 있어 중요한 사항은 신호의 흐름을 관리하는 소프트웨어의 선정과 되먹임되는 신호의 선정 및 제어이득의 결정이며, 마지막으로 제어력 산정에 따른 시간지연에 관한 사항이다.

### 3.1 신호처리 프로그램

신호의 흐름을 관리하는 소프트웨어는 전용 데이터 취득 프로그램인 LabVIEW를 사용하였다.<sup>(3)</sup> 이 프로그램은 컴퓨터에 접속된 A/D, D/A보드를 인식하여 이로부터 얻어진 전기적인 신호를 처리, 분석하고 필요에 따라 내보내는 역할을 한다. 제어력은 LabVIEW 프로그램 내에서 센서를 통하여 얻어진 신호를 제어법칙에 따라 결정된 후 모터드라이버에 보내게 되며, 외란은 이미 데이터로 저장된 신호를 진동대의 모터 드라이버에 내보낸다. 다음 그림 10은 LabVIEW 프로그램의 신호처리 화면으로써, 루프(loop)문 내에 3개의 시퀀스(sequence)문이

순차적으로 실행되는 것을 보여준다. 0번 시퀀스문은 건물모형과 지반의 가속도를 A/D보드를 통하여 측정 후, 상대가속도를 구하여 필터적분<sup>(4)</sup>하는 과정을 나타낸다. 390.7과 388.88은 센서에서 A/D보드를 통하여 들어오는 볼트값을 가속도값으로 바꾸기 위한 것이며, 6.0과 3.5는 센서의 편중신호를 보정하기 위한 것이다. 1번 시퀀스문은 적분된 상대변위에 계인을 곱해서 D/A보드를 통해 출력하는 과정이며, 2번 시퀀스문은 20msec대기시간을 나타낸다.

이상과 같은 루프문 내의 시퀀스문이 20msec 시간간격으로 순차적으로 실행된다.

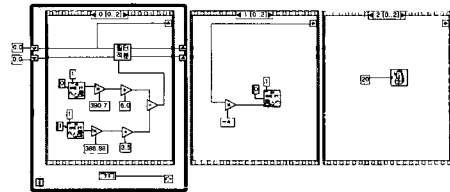


그림 10 LabVIEW에서 구현한 신호처리 화면

### 3.2 제어 알고리즘

본 실험에 사용된 능동제어장치인 AMD는 모터의 회전운동이 볼스크류에 전달되고, 볼스크류는 연결된 부가질량체의 직진 왕복운동으로 변화시키는 원리를 이용하였다. 이때 왕복운동하는 부가질량체에 관성력이 발생하게 되고, 이 관성력이 건물의 응답을 제어하는 제어력이 된다. 그러므로, 제어 알고리즘에 의해 계산된 제어력  $u$  로부터 부가질량체에 발생되어야 할 가속도  $u/m$  를 구하고, 이 가속도를 구현하기 위해서는 모터에 입력해야 할 속도  $v$  를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$v = \int_0^t \frac{u}{m} dt \quad (1)$$

윗 식에서  $v$ 는 모터에 입력되는 속도이며,  $u$ 는 제어 알고리즘에 의해 계산된 제어력,  $m$ 은 부가질량체와 볼스크류 너트 질량의 합을 의

미한다.

건물의 속도 응답을 되먹임하여 제어력을 산정하는 경우, 즉 속도 되먹임의 경우,  $u = -k\dot{x}$ 로 표현되므로, (1)식에 대입하면 다음과 같다.

$$v = \int_0^t \frac{-k\dot{x}}{m} dt = -\frac{k}{m}x \quad (2)$$

윗 식에서  $k$ 는 제어이득이며,  $x$ 는 건물의 상대변위를 나타낸다. 즉, 순수 속도 되먹임의 경우, 변위를 모터에 입력함으로써 제어력이 발생하며, 본 실험에 사용되는 AMD의 경우, 모터가 적분기 역할을 하는 것을 알 수 있다.

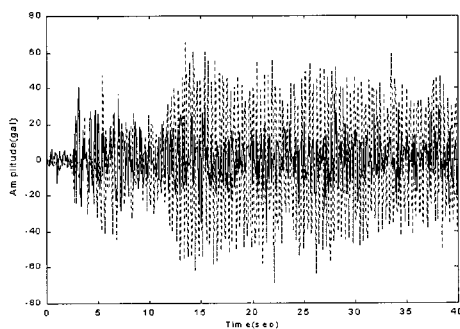
위와 같은 제어 알고리즘에 의해, 본 실험에서는 1층과 지반에 설치된 가속도계로부터 상대가속도를 측정하여, 적분하여 구한 상대변위를 모터의 입력으로 사용하였으며, 제어이득은 시행착오를 통하여 실험적인 방법으로 구하였다.

### 3.3 시간지연

가장 이상적인 능동제어에서는 신호의 계측, 제어력의 계산, 제어장치의 가동과 제어력의 전달이 실시간으로 일어나 시간지연의 문제가 발생하지 않지만, 실제로는 계측, 계산, 신호처리 과정에서 시간을 소모하기 때문에 시간지연은 불가피한 문제로 대두된다.<sup>(5),(6)</sup> 시간지연은 시스템의 불안정을 초래하기 때문에 시간지연이 커질수록 위상 차이에 의하여 제어력이 의도와는 반대방향으로 힘을 전달하여 오히려 시스템을 가진하여 불안하게 만드는 역할을 하기 때문이다.<sup>(7)</sup> 본 실험에서 시간지연은 모터의 시정수에서 가장 크게 발생한 것으로 크기 4msec, 계측과 제어력 계산에 2msec 이내로 총 6msec 정도의 시간 지연이 발생하였다. 이러한 정도의 시간지연은 제어용 컴퓨터로 사용하고 있는 CPU 133MHz PC의 빠른 속도와 건물의 고유진동수인 2.78Hz의 매우 낮은 주기, 그리고 10Hz 이내로 낮은 주기를 가지는 하중 성분 등을 고려하면 제어력의 위상차이를 일으킬 만큼 크지 않아 무시할 정도이다.

### 4. 진동제어 검증

위와 같이 통합된 능동제어 시스템을 검증하기 위하여 지반에 El Centro(1940, NS성분) 지진을 가진하였을 때의 제어성능을 분석하였다. 다음 그림 11은 제어와 비 제어시의 건물 응답을 비교한 것인데, 제어효율이 매우 좋은 것을 알 수 있다.



비제어(- - -), 제어(-)

그림 11 El Centro 지진 가진 시 제어효과

### 5. 결 론

능동제어는 별도의 제어장치를 건물에 설치하여 외부의 진동에 대한 건물의 응답을 억제하는 방법이다. 건물의 응답을 계측하고 이것을 제어 알고리즘에 따라 되먹임하여 산정되는 제어력에 따라 제어장치가 구동하게 되며, 이때 제어력의 구현을 위하여 작동기가 요구된다. 이러한 능동제어를 위하여 일련의 건물 응답의 계측, 제어력 산정, 제어력 구현 등을 위하여 신호의 페루프 시스템을 구성하여야 하며, 신호처리에 따른 각종 진동장비의 정확한 작동이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 능동제어장치인 AMD의 성능을 분석하기 위한 실험 시스템을 구성하기 위하여 첫째, 제어력 구현을 위한 제어장치와 작동기, 진동계측 및 신호처리를 위한 장비 등에 관한 세부 시스템의 특성과 문제점을 분석하였으며 둘째, 이러한 각각의 시스템을 통합화하여 시간지연

없이 건물에 적합한 제어력을 가하여 진동을 제어할 수 있음을 검증하였다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

1. 황재승, "건축구조물의 능동제어에 관한 실험적 연구", 서울대학교 대학원 건축학과 공학박사학위논문, 1998년 2월.
2. 민경원, 안원수, "스테핑 모터를 이용한 진동대 설계 및 검증실험", 인천대학교 대학논문집, 1996년.
3. Wells, L.K., *LabVIEW-Student Edition User's Guide*, Prentice Hall, 1995.
4. 홍성목, "건축구조물의 진동제어 기술개발에 관한 연구", 건설교통부연구개발사업 2차년도 연구개발 보고서, 1997년 10월.
5. 문석준, "대형건물 진동의 능동제어 방법에 관한 연구", 서울대학교 대학원 조선해양공학과 공학박사학위논문, 1995년 8월.
6. Reinhorn, A.M., Soong, T.T., Lin, R.C., Yang, Y.P., Fukao, Y., Abe H., and Nakai, M., "1:4 scale model studies of active tendon systems and active mass dampers for aseismic protection," *Technical Report NCEER-89-0026*, August 14, 1992.
7. Soong, T.T., *Active Structural Control : Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, 1990.