

# 동조액체감쇠기의 제진성능평가를 위한 하이브리드 진동대 실험법

이성경\*

(단국대학교 리모델링 연구소)

동조액체감쇠기는 설계방법이 비교적 단순하고, 설치가 용이하며 유지관리 비용이 다른 진동제어장치에 비해 적게 들고, 수조 내부의 물을 기능적으로 사용할 수 있다는 잇점이 있어서 구조물의 진동제어장치로서의 이용이 점차 증가하리라 기대된다.

## 1. 머리말

건축 및 토목 구조물에 주로 사용되는 구조용 재료는 콘크리트, 철골 그리고 콘크리트와 철골을 혼합한 복합 구조로서 이들 재료로 이루어진 단일부재에 대한 이론과 이를 규명하는 실험연구는 다른 분야에 비해서 충분히 진보되어 왔다. 하지만, 현대 구조물들이 대형화, 세장화 및 고층화 되어감에 따라 이들 구조용 재료로 이루어진 구조물의 전체적인 거동을 기존의 이론적인 접근만으로 예측하는 것은 구조물의 사용성 및 안정성 확보 측면에서 한계가 있으며, 실험적인 연구를 병행하여 그 거동을 분석하는 것이 요구되고 있다. 또한, 구조물에 작용하는 하중의 불확실성, 설계도면과 실제시공과의 오차 그리고, 구조물의 수치해석 이론과 실제거동사이의 괴리 등과 같이, 건축 및 토목산업은 구조물의 설계요인을 결정하는 잠재적인 위험요인이 큰 산업이라 할 수 있다. 이와 같이, 재료, 하중특성 및 설계결정요인

의 불확실성이 큰 토목 및 건축 구조물에 대해 이론적인 접근만으로 구조물을 건설한다는 것은 경우에 따라서 예기치 못한 문제를 발생시킬 수 있으며, 특히, 새로운 구조물의 건설, 구조적으로 여유도가 적은 구조물, 중요도가 큰 구조물 등에 대해서는 반드시 구조실험을 통해 그 거동을 입증해야 한다.

대형구조물에 대한 구조물의 실험을 수행할 경우, 대상 전체 구조물에 대해서 실험을 실시하는 것은 매우 어려우며 때로는 비용, 시간 및 실험을 수행할 수 있는 기기의 중량제한에 의해 실험이 불가능한 경우도 있어 축소모형 또는 전체 구조물 중 일부분 만에 대해서 수행하기도 한다. 1970년대 중반에 Takanashi 등은 전체 대상 구조물 중 비선형성이 예상되는 부분에 대해서만 실험을 실시하고 나머지 선형부분에 대해서는 수치해석을 수행하며, 실험부분에 대해서 지진과 같은 동적하중을 정적으로 가력하는 의사동적(pseudo-dynamic) 실험방법을 개발하였다<sup>(1)</sup>. 이러한 방법은 전체 구조물에 대해서 실험을 수행하지 않고 실험부분에 전체 구조물

\* E-mail : sungkyunglee@dankook.ac.kr / Tel : (02)795-7046

## 기초강좌

의 거동이 나타나도록 실험과 수치해석을 동시에 수행하는 방법으로서, 지진과 같은 불확실성이 높은 하중에 대해서 부재 자체만의 동적거동이 아닌 전체 구조물의 동적거동을 반영한 부재의 거동특성을 분석하는데 장점이 있다. 의사동적 실험법에서는 동적하중을 정적으로 가력하기 때문에 하중의 변위특성 구현과 구조물의 변위응답특성 분석에 적합한 실험방법이라 할 수 있으며, 근래에는 실험부분에 가력을 해주는 가력기의 성능 향상과 더불어 하중의 변위는 물론 속도 및 가속도 특성의 구현이 가능하게 되었다. 이와 더불어, 의사동적 실험법과 마찬가지로 실험과 수치해석을 동시에 수행하면서, 실험부분에 대하여 지진과 같은 시간변화에 민감한 동적하중을 정적이 아닌 실시간으로 가력하는 실시간 하이브리드 실험법이 개발되었다. 또한, 지진과 같은 동적하중에 취약성을 드러내고 있는 현대의 고층 및 세장한 구조물들에 대해서 사용성 및 안정성 등 구조물의 건전성 확보차원에서 동적응답을 감소시킬 필요가 있으며, 위와 같은 실험방법은 구조물의 동적응답 감소를 정량적으로 평가하는 데 적용할 수 있다. 가장 최근에 Nakashima는 지진과 같은 동적하중에 대한 건물의 응답을 줄이기 위하여 면진장치를 설치한 건물의 제진특성 분석에 실시간 하이브리드 실험법을 적용하여 면진장치만을 실험체로 제작하여 실험을 수행하였다<sup>(2)</sup>. 이와 같이 실시간 하이브리드 실험방법은 실험과 수치해석을 동시에 수행할 수 있다는 점 그리고, 하중의 동적특성을 원래 그대로 구현할 수 있다는 장점이 있어 최근에는 대형구조물의 내진성능 실험에 적용되고 있다.

이 글에서는 먼저, 구조물의 상부에 설치되어 동적응답을 감소시키기 위한 동조액체감쇠기(tuned liquid damper, 이하 이 글에서는 TLD라 함)의 진동제어 특성에 대해서 알아보고, 다음으로 진동대를 이용한 실시간 하이브리드 실험시스템의 구성에 대해서 설명하고, 마지막으로 동조액체 감쇠기가 설치된 구조물의 진동감소를 정량적으로 평가하기 위한 실시간 하이브리드 진동대 실험에 대해서 살펴본다.

## 2. 동조액체감쇠기의 진동제어 특성

## 2.1 TLD의 설치형상 및 적용현황

TLD는 원형 또는 상자형 수조내부의 액체의 출렁임을 이용하여 건물에 감쇠를 추가하여 진동에너지를 소산시키는 진동제어장치로서, 물탱크의 수평면을 기준으로 수직방향으로 발생한 변위에 해당하는 액체의 질량부분을 원래의 기준위치로 복원하려는 중력과 액체 질량의 조합에 따라 일정한 출렁임 주기를 갖는다. 이러한 출렁임 주기는 수조 내부의 액체의 깊이와 너비를 변화시켜 출렁임 주기를 조정하게 된다. 일반적인 형태는 그림 1과 같이 물과 같은 액체를 저장하는 수조를 건물의 최상부에 설치하여, 동조질량감쇠기(tuned mass damper)와 동일한 원리로 액체의 출렁임은 주기를 건물의 1차 모드 주기에 동조시켜 지진이나 풍하중과 같은 외력에 의해 유발되는 건물의 진동에너지를 흡수한다. 즉, 외력에 의해 건물에 입력되는 에너지를 수조 내의 유동에너지로 흡수하고 이것을 액체의 마찰, 액체 상호간 또는 수조 내의 벽면과의 충돌로 소산시킨다.

그림 2는 1988년에 일본의 Gold Tower(높이 136 m)에 설치된 동조액체감쇠기로서 구조물 질량의 1%에 해당하는 질량비를 갖는 물탱크가 옥상층에 설치되었으며, 그림과 같이 감쇠비 효율을 증가시키기 위해서 수조 내부에 철선망이 설치되었다.

다른 형태의 TLD로서 풍하중에 의한 진동을 저감시키기 위해서 그림 3과 같이 높이와 직경이 약 2 m인 원

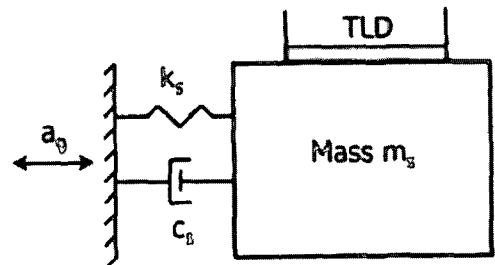


그림 1 TLD의 기본 설치 형상<sup>(3)</sup>

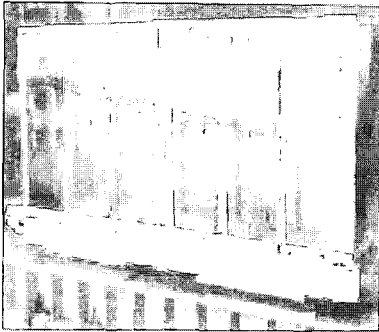


그림 2 직사각형 TLD(Gold Tower, 일본)

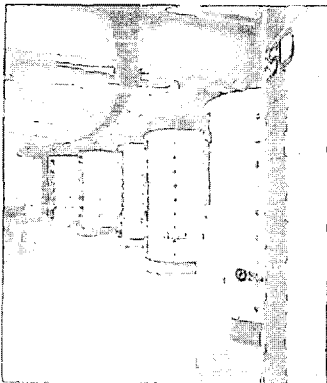


그림 3 원형 TLD(Shin Yokohama Prince Hotel)

형 형태의 수조가 1995년에 일본의 Shin Yokohama Prince Hotel(높이 150 m)에 설치되었다.

국내에서는 부산 해운대 하이페리온(높이 140 m, 철근 콘크리트 구조)에 건물 중량의 1/300에 해당하는 유체를 채운 저장탱크를 갖는 동조액체감쇠기가 설치되었다.

### 2.2 TLD의 유효질량 및 고유진동수

수조 내의 액체의 폭에 대한 깊이의 비가 0.15 이하인 shallow-water TLD의 거동은 선형파동이론(linear wave theory)에 의하여 설명할 수 있으며, x와 z방향으로 조화 거동을 보이는 것으로 표현되어 특정진동수로 거동하는 특징이 있다(그림 4).

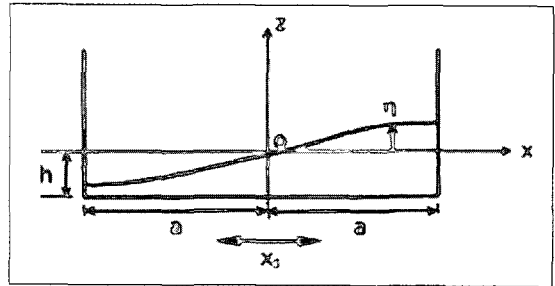


그림 4 Shallow-water TLD의 거동<sup>(3)</sup>

일반적으로 TLD의 해석에는 1차 모드만 고려되며, 수조 내부 액체의 출렁임에 참여하는 1차 모드의 유효질량  $m_1$ 과 고유진동수  $\omega_1$ 은 다음 식과 같이 표현할 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$m_1 = M_t \left( \frac{8 \tanh(\pi r)}{\pi^3 r} \right) \quad (1)$$

$$\omega_1^2 = \frac{g \pi \tanh(\pi r)}{2a} \quad (2)$$

여기서,  $M_t$ 는 수조 내부 액체의 총 질량이고,  $r$ 은  $h/2a$ 로서  $h$ 는 액체의 높이,  $2a$ 는 수조의 폭이며,  $g$ 는 중력가속도이다.

또한, 1차 모드의 고유진동수  $f_1$ 은 다음 식과 같다.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g \tanh(\pi r)}{2a}} \quad (3)$$

따라서, 구조물의 1차 고유주기에 동조시키기 위해서 TLD를 설계할 경우  $r$ 과  $a$ 는 가장 중요한 변수이며 동일한  $r$ 에 대해서도  $a$ 가 달라지면 진동수가 달라진다. 그림 5는 TLD 내부 액체의 수심과 폭에 따른 1차 고유진동수로서 동일한 진동수에 대해서 TLD의 길이와 깊이는 다수 존재함을 알 수 있다. 그러나, 폭이 작은 경우에는 높이의 변화에 따른 진동수의 변화가 상대적으로 크기 때문에 구조물의 주기에 동조시키기 어렵다.

기초공학

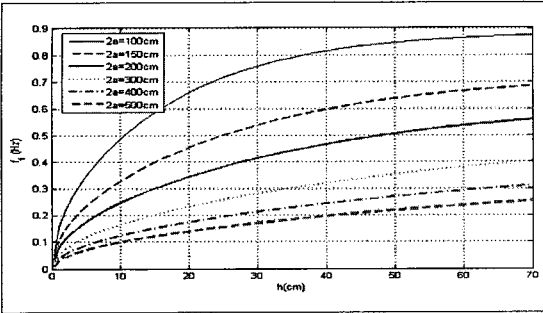


그림 5 TLD의 1차 고유진동수

### 3. 실시간 하이브리드 진동대 실험법

TLD는 기본적으로 외력의 가진크기에 의존하는 비선형성이 강하여 가진의 크기가 증가할수록 내부 액체의 출렁임 진동수도 증가한다. 또한, 폭-깊이비가 큰 deep-water TLD는 전절에서 서술한 선형의 TLD로 취급할 수 없다. 따라서, 여기에서는 TLD와 구조물이 연계된 시스템을 대상으로 비선형성이 큰 TLD에 대해서는 실험을 실시하고 상대적으로 선형화시키기 용이한 건물모델에 대해서는 수치계산을 수행하는 실시간 하이브리드 실험법의 개념에 대해서 서술하고자 한다.

실시간 하이브리드 진동대 실험방법은 그림 6과 같

이 TLD와 연계된 전체구조물을 TLD와 구조물의 경계면에서 분리하면, TLD 실험부와 구조물 수치해석부로 나뉘지고 진동대에 설치된 TLD에 전단형 로드셀을 장착하여 가진되는 동안 로드셀의 경계면 하중응답은 제어컴퓨터에 피드백되면서 수치해석부분인 구조물의 상부층의 하중으로 실시간 가진하게 된다. 여기서 수치해석부의 구조물은 TLD에서 계측한 제어력으로 제어된다. 그림 6의 수치해석부 구조물의 상부층에 설치된 TLD에 의한 제어력,  $i(t)$ 과 기초에 작용하는 지진가속도,  $\ddot{z}_0(t)$ 의 가진을 받고  $n$ 개의 자유도를 갖는 전단형 구조물의 운동방정식을 구성하면 다음 식과 같다.

$$[m]\{\ddot{Y}_i(t)\} + [c]\{\dot{Y}_i(t)\} + [k]\{Y_i(t)\} = \{p_i(t)\} \quad (4)$$

여기서,  $[m], [c], [k]$ 는 각각 전단형 건물모델의 질량, 감쇠 그리고 강성행렬이다.  $\{Y_i(t)\}$ 는  $i$ 번째 층의 절대변위이고,  $\{p_i(t)\} = \langle -i(t), 0, \dots, 0, c_i \dot{z}_0(t) + k_i z_0(t) \rangle^T$ 는 길이  $n$ 의 외력 하중벡터이며,  $i(t)$ 는 TLD에서 계측한 전단력이다.

수치해석부분인 하부구조물의 하부에 지반가속도  $\ddot{z}_0(t)$ 와 상부에 경계면 하중인 제어력  $i(t)$ 의 가진을

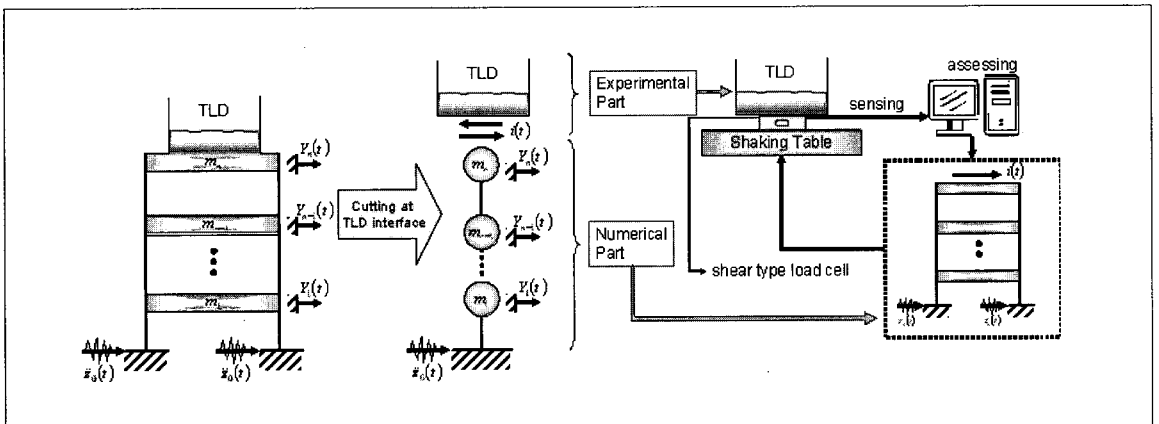


그림 6 TLD-구조물에 대한 하이브리드 진동대 실험의 개념

받는 운동방정식 식 (4)를 실험시스템의 제어컴퓨터 제어기 설계에 반영하기 위해 전단형 로드셀과 지반가속도의 입력을 받는 상태공간 방정식으로 구성하면 다음 식과 같다.

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = [A]\{z(t)\} + [B]\{u(t)\} \\ \{O(t)\} = [C]\{z(t)\} + [D]\{u(t)\} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $i = 1 \sim n$  일 때, 길이  $2 \times n$ 의 상태변수벡터는  $\{z(t)\} = \{\{y_i(t)\}, \{\dot{y}_i(t)\}\}^T$ ,  $y_i(t) = Y_i(t) - z_0(t)$ , 길이  $2 \times 1$ 의 입력벡터는  $\{u(t)\} = \{-i(t), \ddot{z}_0(t)\}^T$ 이고, 길이  $n$ 의 출력벡터는  $\{O(t)\} = \{\ddot{Y}_i(t)\}$ 이다. 시스템 행렬  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$ ,  $[D]$ 는 각각 길이  $2n \times 2n$ ,  $2n \times 2$ ,  $n \times 2n$ ,  $2n \times 2$ 를 갖고 다음과 같은 식 (5a)~(5d)로 구성된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ -[m]^{-1}[k] & -[m]^{-1}[c] \end{bmatrix} \quad (5a)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \{0\}_{n \times 1} & \{0\}_{n \times 1} \\ [m]^{-1}\{b\} & \{-1\} \end{bmatrix} \quad (5b)$$

$$[C] = [-[m]^{-1}[k] \quad -[m]^{-1}[c]] \quad (5c)$$

$$[D] = [[m]^{-1}\{b\} \quad \{0\}_{n \times 1}] \quad (5d)$$

여기서,  $[0]$ 과  $[I]$ 는 각각 길이  $n \times n$ 의 영행렬 및 단위행렬이고  $\{0\}$ 과  $\{-1\}$ 는 길이  $n \times 1$ 의 '0'과 '-1'의 값으로 구성된 벡터이다.  $\{b\}$ 는 길이  $n \times 1$ 의 벡터이며  $\{1 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0\}^T$ 과 같다.

#### 4. 진동대 실험에 의한 TLD의 제어성능 평가

##### 4.1 진동대 실험시스템

이 글에서 사용하는 진동대 실험 시스템은 실험시스템은 그림 7과 같다. TLD 실험체의 규격은 직육면체  $31 \text{ cm} \times 14 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 이며 구조물 1차모드 주파수(1.25

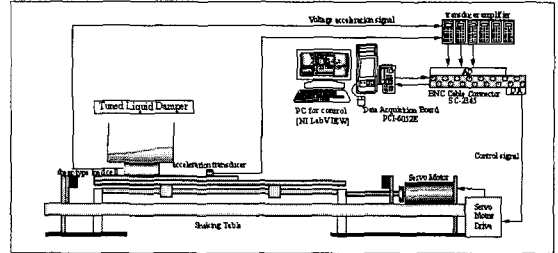


그림 7 진동대 실험시스템의 개략

Hz)에 동조하였다. 실험체는 일축 진동대에 의해 가진되며, 전단형 로드셀이 진동대에 부착되어있고, 진동대의 동적특성을 모니터하기 위해 진동대에 가속도 센서를 부착하였다. 데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호 처리기(DSP)를 통해 수행된다. 데이터 수집 보드의 주된 업무는 측정된 가속도 및 로드셀 데이터를 측정하여 아날로그-디지털 변환하는 기능과 LabVIEW와 같은 제어용 프로그램에 의해 계산된 명령 신호를 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 8채널 NI SC-2345 BNC케이블 커넥터가 연결된 25 Hz 저주파수 통과 필터 모듈을 통해 AD/DA 보드인 NI PCI-6052E로 수집되는 시스템으로 이루어져 있다.

##### 4.2 진동대의 동적특성 보정

진동대는 제어컴퓨터의 디지털-아날로그 변환 채널을 통한 제어신호에 따라 움직이며, 이때 제어컴퓨터 내부의 명령신호와 진동대에서 측정된 신호는 서로 상이한 증폭과 위상을 갖는다. 따라서 진동대와 명령신호와의 동적특성을 상쇄시키기 위해서 진동대의 백색잡음 실험을 수행하였으며 그림 8의 점선과 같이 진동대에서 측정된 가속도신호를 입력으로하고 명령신호를 출력으로 하는 진동대의 역전달함수를 측정하였고, 그림 8의 실선과 같이 제어컴퓨터에 반영하기 위해 이를 필터화 하였다. 결과적으로 필터화한 5차의 진동대 역전달함수는 그림 8과 같고 이는 진동대와 명령신호간의 동적특성을 보정하는 역할을 한다.

## 기초강좌

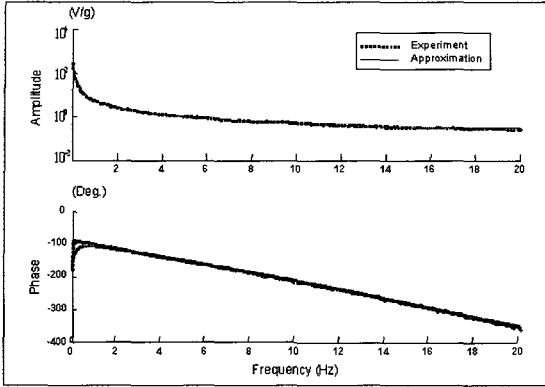


그림 8 진동대의 역전달 함수

$$G^{-1}(s) = \frac{0.6s^5 + 94s^4 + 10,746s^3 + 498,200s^2 + 167,124s + 108,216}{s^5 + 204s^4 + 15,900s^3 + 8,252s^2 + 4,676s + 405} \quad (6)$$

여기서,  $s$ 는 라플라스 변수 ( $iw$ ) 이고,  $i$ 는 복소수의 허수단위이다.

## 4.3 하이브리드 실험을 위한 진동대 제어기

3장에서 서술한 하이브리드 실험법을 검증하기 위해 그림 9와 같이 제어기를 설계하였으며 제어기는 0.01초 시간간격으로 이산화시켜 LabVIEW(참고문헌)를 통해 설계된다. 제어기의 구조로, 먼저 로드셀에 의해서 TLD에 의해 발생하는 제어력이 계측되고 이러한 TLD와 구조물 사이의 상호작용력과 사용자에 의해 주어지는 지반가속도를 입력으로 하여 그림 6과 같은 구조물의 최상층(TLD가 설치된 층)의 절대가속도가 식 (5)에 의해 계산된다. 이 때, 제어된 구조물의 최상층 절대가속도는 명령신호가 되고 식 (6)과 같은 진동대 역전달 함수 필터를 통과한 제어신호를 통해 진동대를 가진하는 구조로 되어있다.

## 4.4 실험결과

여기에서는 그림 6과 같은 수치해석적 다자유도 구조물을 대상으로 그림 9와 같은 하이브리드 실험에 의한 결과에 대해서 살펴본다. 구조물은 3층구조물로 구성

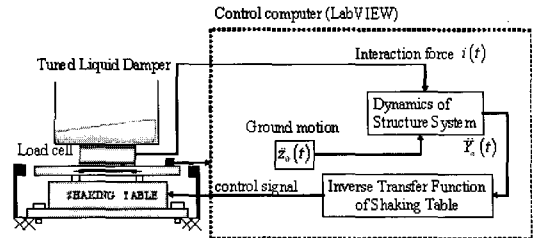


그림 9 하이브리드 진동대 실험을 위한 제어기의 신호흐름

되었으며, 각층질량은  $13.14 \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$ , 층강성은  $3,460 \text{ kgf/m}$ , 층감쇠계수는  $1.38 \text{ kgf} \cdot \text{sec/m}$ 로 구성하였고, 고유치해석결과 1차모드 주파수는  $1.15 \text{ Hz}$ , 2차모드 주파수는  $3.22 \text{ Hz}$ , 3차모드 주파수는  $4.65 \text{ Hz}$ 인 구조물의 수치해석부 구조물 필터를 구성하였다. 이로부터 구조물의  $M, C, K$ 행렬의 입력을 받고 이산시간 시스템으로 출력해주는 모듈을 설계하여 그림 9와 같은 제어기에 반영하였다. 진동대의 사양에 맞게 최대가속도를  $0.4 \text{ m/sec}^2$ 로 스케일을 줄인 4종류의 지진파로 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다.

그림 10과 11은 각각 지진파에 대한 TLD-다자유도 구조물의 실시간 하이브리드 실험의 제어 및 비제어시 응답을 시간과 주파수 영역에서 비교한 것이다. 각 지진파에 대해 대체적으로 제어성능이 좋은 것을 알 수 있으며, 그림 11 (d) Northridge 지진응답은 구조물의 2차모드 주파수인  $3.22 \text{ Hz}$ 에서도 TLD의 제어성능을 보이는 것을 알 수 있다.

## 5. 맺음말

이 글에서는 최근에 고층건물의 진동제어장치로서 많이 이용되는 동조액체감쇠기에 거동특성과 제진성능 검증방법에 대해서 살펴보았다. 앞에서 살펴본 바와 같이 동조액체감쇠기는 설계방법이 비교적 단순하고, 설치가 용이하며 유지관리 비용이 다른 진동제어장치에 비해 적게 들고, 수조 내부의 물을 기능적으로 사용

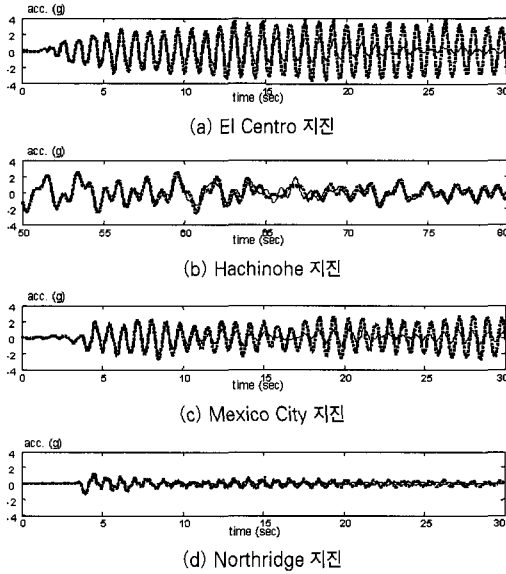


그림 10 TLD-다자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 시간이력 응답 비교

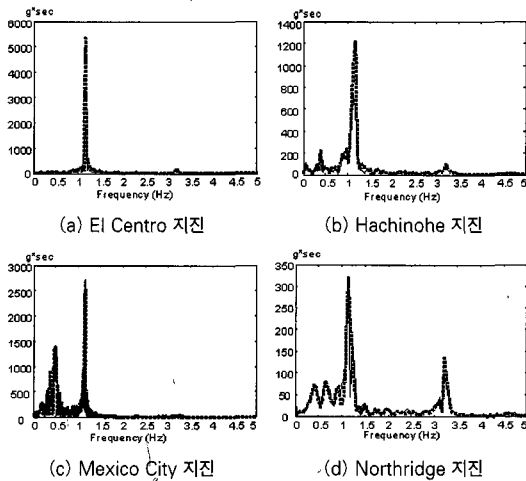



그림 11 TLD-다자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 주파수 응답 비교

할 수 있다는 잇점이 있어서 구조물의 진동제어장치로서의 이용이 점차 증가하리라 기대된다. 또한, 이러한

동조액체감쇠기의 제진특성을 정량적으로 평가 할 수 있는 하이브리드 진동대 실험방법에 대해서 알아보았다. 이 글에서는 동조액체감쇠기를 이용한 하이브리드 진동대 실험법에 대해서 검증은 수행하였지만, 이 방법은 동조질량감쇠 및 능동형 질량감쇠기(active mass damper)등의 진동제어장치에 대해서 실제 건물에 적용하기 전 단계에서 감쇠기 모형 만을 실험체로 제작하여 감쇠기가 설치된 구조물의 진동제어 특성을 실험적으로 평가할 수 있다는 장점이 있어 이 분야에 대한 연구가 더욱 더 활발해질 것으로 판단된다. 

### 참고문헌

- (1) Takanashi, K., Udagawa, M., Seki, M., Okada, T., Tanaka, H., 1975, "Nonlinear Earthquake Response Analysis of Structures by a Compute-actuator On-line System", Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, No. 8.
- (2) Pan, P., Nakashima, M. and Tomofuji, H., 2005, "Online Test Using Displacement-force Mixed Control", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 34, pp. 869~888.
- (3) Banerji, P., Murudi, M., Shah, A. H., Popplewell, N., 2000, "Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, pp. 587~602.
- (4) Swaroop K. Yalla, 2001, "Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response: Theoretical Development and Experimental Validation", Ph.D. Thesis, University of Notre Dame.
- (5) Robert H. Bishop, 2001, "LabVIEW Student Edition 6i", Prentice Hall.