

실시간 하이브리드 진동대 실험법을 이용한 TLD 제어성능의 실험적 검증

Experimental Verification for the Control Performance of a TLD by Using Real-Time Hybrid Shaking Table Testing Method

이 성 경* 박 은 천** 민 경 원† 이 상 현*** 정 란**** 우 성 식*****
Lee, Sung-Kyung Park, Eun Churn Min, Kyung-Won Lee, Sang-Hyun Chun, Lan Woo, Sung-Sik
(논문접수일 : 2006년 4월 28일 ; 심사종료일 : 2006년 9월 23일)

요 지

본 논문에서는, 동조액체감쇠기(이하 TLD)만을 실험적 부분구조로 이용하여 TLD가 설치된 건축구조물의 지진 응답 제어효과를 평가하기 위한 실시간 하이브리드 실험법을 제안하고 진동대 실험을 통해 실험적으로 규명한다. 제안된 실험법에서, TLD가 설치된 전체구조물은 상부의 TLD와 하부의 구조물 부분으로 각각 실험적 그리고 수치해석적 부분구조로 나누어진다. 이때 부분구조 사이의 경계면에서 작용하는 하중 또는, TLD에 의한 제어력은 진동대에 설치된 전단형 로드셀에 의해 측정되며 진동대는, 측정된 경계면에서의 제어력이 상부에 작용하고 또한 동시에 기초에 지진하중이 작용하는 수치해석적 부분구조로부터 계산된 응답으로, 상부에 설치된 TLD를 가진하게 된다. 제안된 실험법에 의한 결과와 TLD와 건물모델 모두를 제작하여 실험하는 기존의 방법에 의한 실험 결과들은 서로 잘 일치하며, 이로써 본 논문에서 제안된 실험법을 이용하여 TLD의 제어성능을 손쉽게 평가 할 수 있음을 알 수 있다.

핵심용어 : 실시간 실험, 하이브리드 실험법, 동조액체감쇠기, 진동대 실험

Abstract

In this paper, an experimental real-time hybrid method, which implements the earthquake response control of a building structure with a TLD(Tuned Liquid Damper) by using only a TLD as an experimental part, is proposed and is experimentally verified through a shaking table test. In the proposed methodology, the whole building structure with a TLD is divided into the upper TLD and the lower structural parts as experimental and numerical substructures, respectively. The control force acting between their interface is measured with a shear-type load-cell which is mounted on the shaking table. The shaking table vibrates the upper experimental TLD with the response calculated from the numerical substructure, which is subjected to the excitations of the measured interface control force at its top story and an earthquake input at its base. The experimental results show that the conventional method, in which both a TLD and a building structure model are physically manufactured and are tested, can be replaced by the proposed methodology with a simple experimental installation and a good accuracy for evaluating the control performance of a TLD.

Keywords : real-time experiment, hybrid experimental method, tuned liquid damper, shaking table test

1. 서 론

동조 액체 감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)는 수

동 또는 준능동 구조물 제어장치로 초고층 건물의 풍응답 제어 분야에 적용되어져 왔고, 실험 및 수치해석 모델로 많은 연구가 수행되었다. TLD는 기본적으로 비선형거동을 하며 일반적

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수
Tel: 02-709-2731 ; Fax: 02-799-1154
E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

* 단국대학교 건축대학 건축공학과 연구전임강사

** 단국대학교 대학원 건축공학과 석사과정

*** 단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사

**** 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수

***** 단국대학교 대학원 건축공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

으로 선형 TMD의 근사이론을 사용하여 해석한다. Y. H. Chen 등(1995)은 TLD를 질량을 분산시킨 여러개의 TMD로 근사화 하여 해석하였고, J-K, Yu 등(1999)은 TLD모형을 다양한 하중조건에 따른 비선형 스프링-감쇠 모델을 적용한 등가 TMD로 치환하여 해석하였다. 이상현 등(2006)은 TLD를 사용한 구조물의 지진응답 제어성능을 평가하는데 있어 비선형 모델과 선형 모델을 비교하였고, L. M. Sun 등과 유기표(2005)는 로드셀을 장착한 진동대를 이용하여 각 주기별 성능실험을 수행하였으며, Y-K, Yu(2004), 이상현(2005)등은 실제 축소건물 모델들에 TLD를 설치하여 제어성능을 실험적으로 검토하였다 그러나 이러한 선행연구 중 근사이론을 통한 수치해석은 TLD의 감쇠비등 많은 근사화로 인해 구조물에 설치한 TLD의 정확한 거동을 묘사하지 못하며 이러한 특성상 실험을 통해 검증해야한다. 진동대의 로드셀을 이용한 주기별 TLD의 제어성능 실험은 실제 구조물과의 동조 또는 비동조시의 거동의 특성을 정확히 파악하고 성능을 파악하기엔 많은 난점이 존재하고, 실제 축소건물 모델에 설치하여 제어성능을 평가하는 실험은 모델제작에 있어 상사법칙의 적용과 많은 비용이 수반한다는 어려움이 있다. 따라서 이러한 어려움을 해결하기 위해 본 논문에서는 구조물을 제작하지 않는 수치해석부 구조물에 TLD를 설치하는 하이브리드 실험법을 제안한다.

하이브리드 실험은 실험체의 크기와 무게의 제한, 그리고 경제성으로 인한 실험물기 구조물의 동적 실험을 수행하기 어려움을 해결하기 위한 방법으로 실시간 부분구조(real-time substructure) 실험법을 응용한 실험법이다. 실시간 부분구조 실험방법이 Nakashima 등(1992)에 의해 처음으로 개발되어진 후, 많은 연구자들은 부분구조기법을 이용한 제어기술의 개발에 대한 연구들을 수행하여 왔으며, 실시간 부분구조

실험을 수행하여 구조물의 특성을 파악하는 경우가 증가하는 추세이다. 최근에는, 전체구조물 중 여러 가지 실험적 및 수치해석적 부분구조를 분리하여 실험하는 관련연구가 수행되었다. Blakeborough 등(2001)은 수치해석적 부분구조의 비선형성을 고려하여 수평변위와 회전의 2자유도를 가진 1층 라멘에 대한 부분구조 실험을 수행하였다. Neild 등(2005)은 전체 질량중의 일부만을 실험적 부분구조로 하고 나머지 질량부, 스프링 그리고 감쇠를 수치해석적 부분구조로 구성된 단자유도계 질량-스프링-감쇠 시스템에 대하여 부분구조기법을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 그러나 이러한 연구들은 실험적 부분구조로서 전체 구조물 중의 상부부분을 수치해석적 부분구조로 부분구조실험을 수행하였다. 본 논문은 하부부분이 수치해석 나머지 상부부분이 실험부일 경우를 이용한 부분구조법의 실험에 역점을 두어 지진하중이 가해졌을 때 비선형 거동을 하는 TLD를 실험체로 제작하여 실시간 하이브리드(hybrid) 실험을 수행하였다.

본 논문에서 제안하는 실시간 하이브리드 실험 방법은 그림 1의 개념도에 나타나 있다. 질량-스프링-감쇠로 이루어진 구조물에서 상부에 설치된 TLD만 실험체로 제작되어 본 논문에서 제안되는 하이브리드 실험 또는 부분구조 실험법에 의해 실험적으로 검증된다. 이러한 실시간 하이브리드 실험방법은 건축물의 상층부에 설치되어 응답 중 비선형성이 다수 포함되어 수학적으로 정확히 모델링하기 힘든 TLD, TMD(Tuned Mass Damper), AMD(Active Mass Damper)같은 질량형 제어기의 제어특성 및 제어성능을 확인하는 데 매우 유용하다. 본 논문에 의해 제안되는 하이브리드 실험법은 질량형 감쇠기인 동조 액체 감쇠기만을 실험체로 이용하여 TLD를 설치한 건물의 제어성능을 실험적으로 평가하는 데 적용할 수 있다.

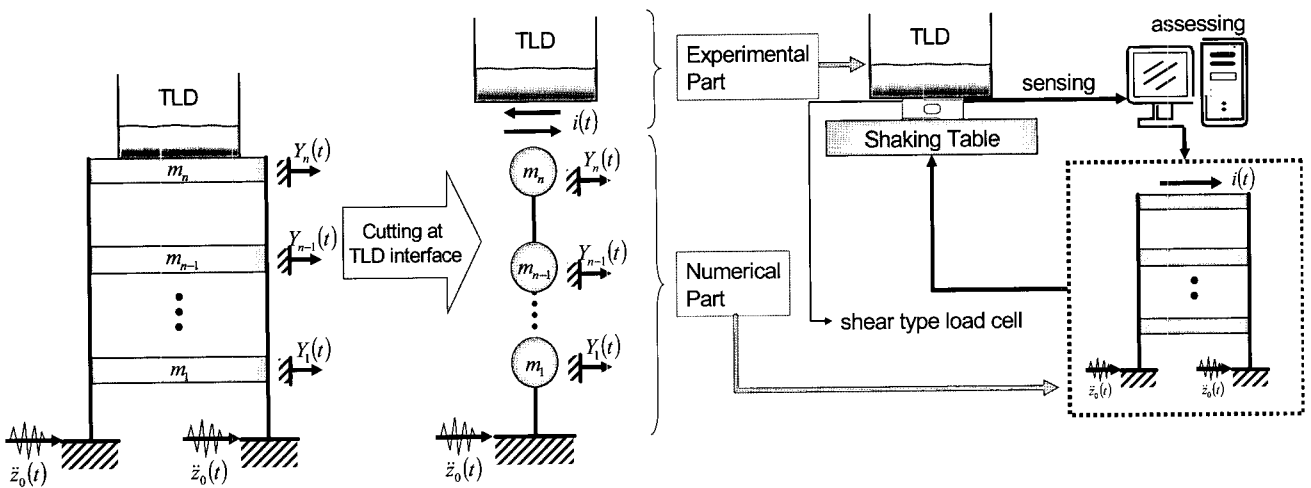


그림 1 실험부분 TLD를 이용한 실시간 하이브리드 실험의 개념도

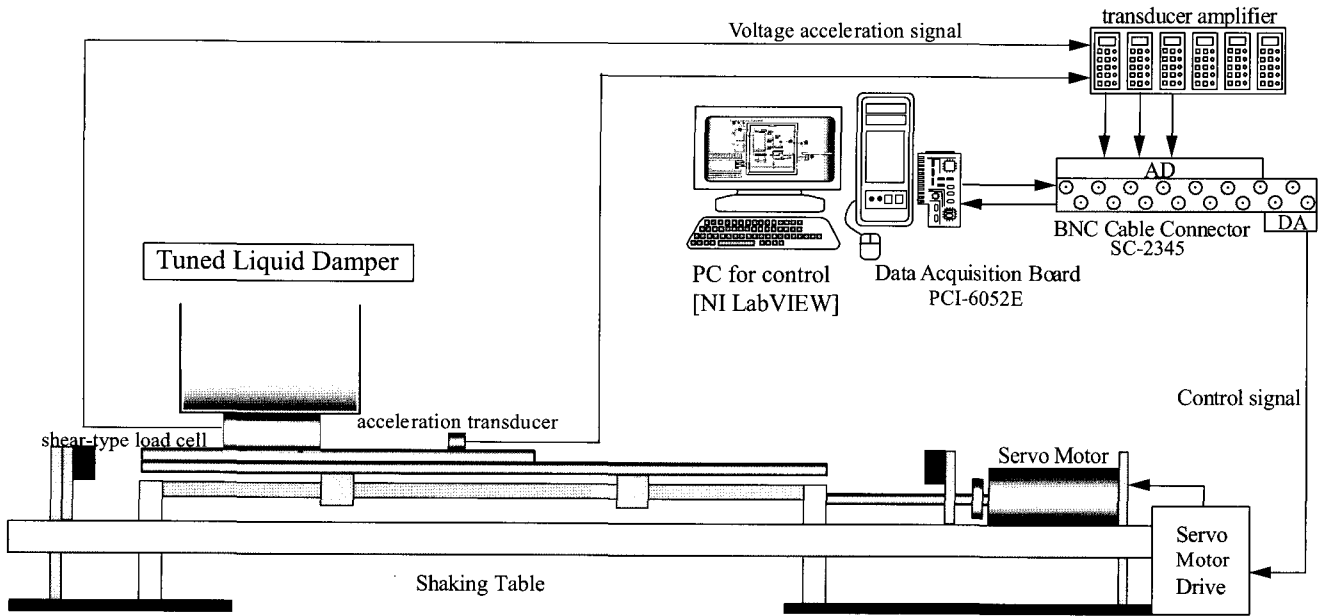


그림 2 실험부분 TLD를 이용한 실시간 하이브리드 실험시스템

2. 실시간 하이브리드 실험법의 개념

실시간 하이브리드 실험 방법의 전개는 그림 1과 같이 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 1의 수치해석부 구조물의 상부층에 작용하는 질량형 감쇠기 TLD의 제어력, $i(t)$ 과 기초에 작용하는 지반가속도, $\ddot{z}_0(t)$ 의 가진을 받고 n 개의 자유도를 갖는 전단형 구조물의 운동방정식을 구성하면 식 (1)과 같다.

$$[m]\{\ddot{Y}_i(t)\} + [c]\{\dot{Y}_i(t)\} + [k]\{Y_i(t)\} = \{p_1(t)\} \quad (1)$$

여기서, $\{Y_i(t)\}$ 는 i 번째 층의 절대변위이고, $\{p_1(t)\} = \langle -i(t), 0, \dots, 0, c_1 \dot{z}_0(t) + k_1 z_0(t) \rangle^T$ 는 길이 n 의 외력 하중벡터이며, $i(t)$ 는 TLD에서 계측한 전단력이다. 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬은 식 (2a)~(2c)와 같다.

$$[m] = \begin{bmatrix} m_n & & \\ & \ddots & \\ & & m_1 \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$[c] = \begin{bmatrix} c_n & -c_n & & & \\ -c_n & c_n + c_{n-1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & c_2 + c_1 \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_n & -k_n & & & \\ -k_n & k_n + k_{n-1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & k_2 + k_1 \end{bmatrix} \quad (2c)$$

수치해석부분인 하부구조물의 하부에 지반가속도 $\ddot{z}_0(t)$ 와 상부에 경계면 하중인 제어력 $i(t)$ 의 가진을 받는 운동방정식 식(1)을 실험시스템의 제어컴퓨터 제어가 설계에 반영하기 위해 전단형 로드셀과 지반가속도의 입력을 받는 상태공간 방정식으로 구성하면 식 (3)과 같다.

$$\{\dot{z}(t)\} = [A]\{z(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (3)$$

$$\{O(t)\} = [C]\{z(t)\} + [D]\{u(t)\}$$

여기서, $i=1 \sim n$ 일 때, 길이 $2 \times n$ 의 상태변수 벡터는, $\{z(t)\} = \langle \{y_i(t)\}, \{\dot{y}_i(t)\} \rangle^T$, $y_i(t) = Y_i(t) - z_0(t)$, 길이 2×1 의 입력벡터는 $\{u(t)\} = \langle -i(t), \ddot{z}_0(t) \rangle^T$ 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 (4)~(7)로 구성된다.

$$[A] = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & [I]_{n \times n} \\ -[m]^{-1}[k] & -[m]^{-1}[c] \end{bmatrix} \quad (4)$$

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

$$[C] = [-[m]^{-1}\{k\} \quad -[m]^{-1}\{c\}] \quad (6)$$

$$[D] = [[m]^{-1}\{b\} \quad \{0\}_{n \times 1}] \quad (7)$$

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.

3. 실시간 하이브리드 실험법의 검증

3.1. 단자유도 구조물을 통한 실시간 하이브리드 실험법의 검증

본 절에서는 그림 1의 제어컴퓨터에 반영된 알고리즘의 설계와 실험적 검증을 다룬다. 예제 구조물은 단자유도로 구성하였고 실험시스템은 그림 2와 같다. 단자유도 구조물은 스틸프레임으로 폭과 높이는 0.6m, 1.0m이며 슬래브의 중량은 1.66kN로 측정되었고, 4개의 지진파를 사용하여 시스템 식별을 수행하고 이를 평균하여 기둥의 강성은 9.91kN/m, 감쇠상수는 14.6N·sec/m로 식별되었다. TLD실험체의 규격은 직육면체 310mm×140mm×200mm이며 구조물 1차모드 주파수 (1.23Hz)에 선형과동이론 (Lamb4, 1932)을 사용하여 동조하였고 질량비는 약 1.3%로 설계하였다. 실험체는 일축 진동대에 의해 가진되며, 전단형 로드셀이 진동대에 부착되어 있고, 진동대의 동적특성을 모니터링하기 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 LabVIEW (Robert H. Bishop, 2001)와 같은 제어용 프로그램에 의해 계산된 명령신호를 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 8채널 NI SC-2345 BNC케이블 커넥터가 연결된 25Hz 저주파수 통과 필터 모듈을 통해 AD/DA보드인 NI PCI-6052E로 수집되는 시스템으로 이루어져있다.

진동대는 제어컴퓨터의 디지털-아날로그 변환 채널을 통한 제어신호에 따라 움직이며, 이 때 제어컴퓨터 내부의 명령신호와 진동대에서 측정된 신호는 서로 상이한 증폭과 위상을 갖는다. 따라서 진동대와 명령신호와의 동적특성을 상쇄시키기 위해서 진동대의 백색잡음 실험을 수행하였으며 그림 3의 점선과 같이 진동대에서 측정된 가속도신호를 입력으로 하고 명령신호를 출력으로 하는 진동대의 역전달함수를 측정하였

고, 그림 3의 실선과 같이 제어컴퓨터에 반영하기 위해 이를 필터화 하였다. 결과적으로 필터화한 5차의 진동대 역전달함수는 식 (8)과 같고 이는 진동대와 명령신호간의 동적특성을 보정하는 역할을 한다.

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

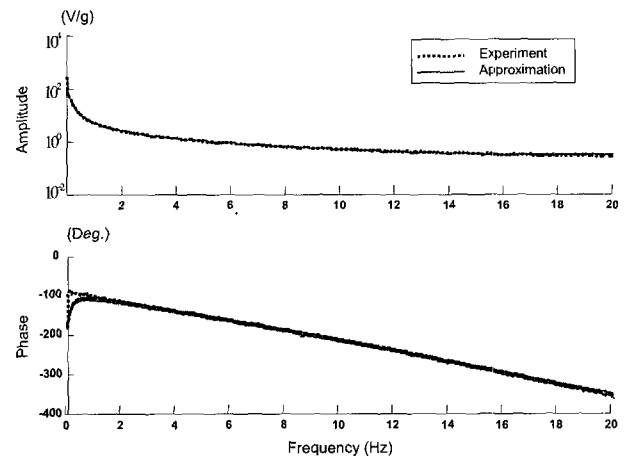


그림 3 진동대 역전달 함수

여기서, s 는 라플라스 변수 (iw)이고, i 는 복소수의 허수 단위이다.

진동대 제어기의 효과를 검증하기 위해 명령신호로 스케일을 줄인 El Centro지진파를 사용하여 진동대에서 측정된 가속도데이터와 비교하였으며, 그림 4에서처럼 서로 잘 일치하는 것을 보여준다.

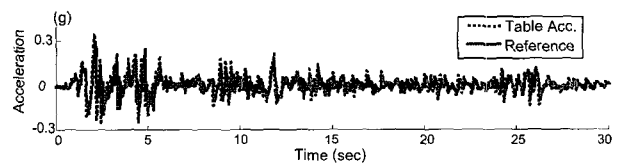


그림 4 진동대 동적특성의 보정 결과

2장에서 전개한 하이브리드 실험법을 검증하기 위해 그림 5와 같이 제어기를 설계하였으며 제어기는 0.01초 시간간격으로 이산화시켜 LabVIEW를 통해 설계된다. 제어기의 구조는 단자유도 수치해석적 예제구조물이 TLD에서 발생하는 제어력은 로드셀에 의해 상호작용력 $i(t)$ 입력과 지반가속도 입력을 계산하여 예제구조물 1층(TLD가 설치된 층)의 절대가속도가 계산되며 이때 1층의 절대가속도는 명령신호가 되

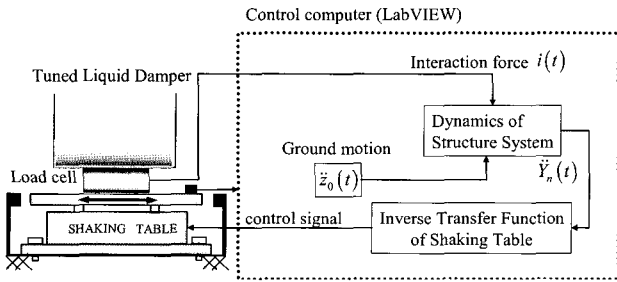


그림 5 하이브리드 진동대 실험을 위한 제어기 설계 흐름도

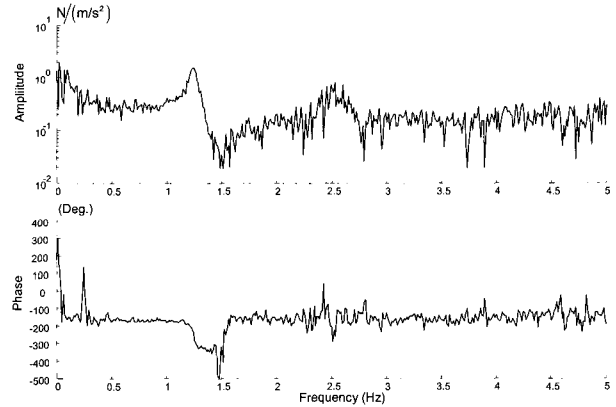
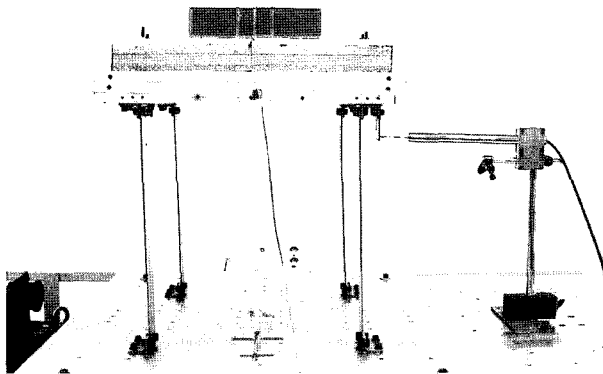
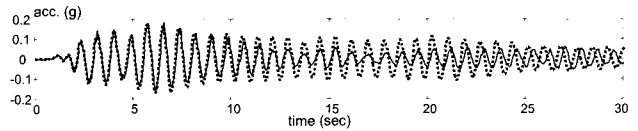


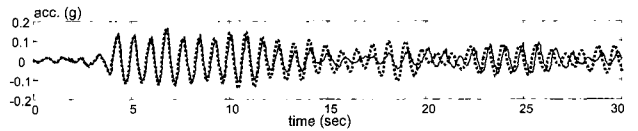
그림 7 TLD/진동대 전달함수 (백색잡음 실험결과)



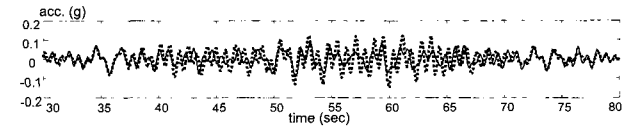
(a) 구조물에 설치된 TLD 실험체의 모습



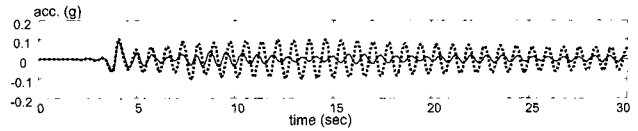
(a) El Centro 지진



(b) Hachinohe 지진



(c) Mexico City 지진



(d) Northridge 지진

그림 8 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진파 가진시 TLD-단자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 시간이력 응답 비교

계수를 식별하였으며, 이를 평균하여 제어기 설계에 반영하였다. 예제 구조물 주기에 동조시킨 TLD의 주기를 파악하기 위해 백색잡음 실험을 실시하였고 비교를 위해 TLD를 예제구조물에 설치한 일반 제어실험과 TLD-실시간 하이브리드 실험법을 이용한 하이브리드 실험으로 분리하여 실시하였다.

그림 6은 진동대위 구조물에 설치한 TLD와 실시간 하이브리드 실험을 위해 로드셀에 설치한 TLD의 사진을 보여준다.

TLD의 동조 주기를 찾는 전달함수를 구하는 과정에서 가우스 분포를 갖는 정상적 백색잡음을 가정하고 있으나, 가진 입력은 진동대 성능을 고려하여 필터 통과한 백색잡음을 사용하였고, 그림 7은 진동대에서 측정된 가속도에 대한 로드셀 계측데이터를 사용하여 그린 전달함수이다. TLD의 동조

(b) 실시간 하이브리드 실험의 실험체 설치 모습
그림 6 TLD를 설치한 구조물 및 TLD 실시간 하이브리드 실험 사진

고 진동대 역전달함수 필터를 통과한 제어신호를 통해 진동대를 가진하는 구조로 되어있다.

본 논문에서 제안하는 하이브리드 실험법의 검증을 위해 4개의, El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 가속도 지진파를 사용하였으며 진동대의 성능에 맞게 최대가속도를 0.5 m/s^2 로 축소 스케일하여 실험하였다. 예제 구조물의 각각의 지진파 실험을 통해 시간이력에서의 최소자승법을 통한 시스템 식별을 수행 하여 지진파에 따른 강성과 감쇠

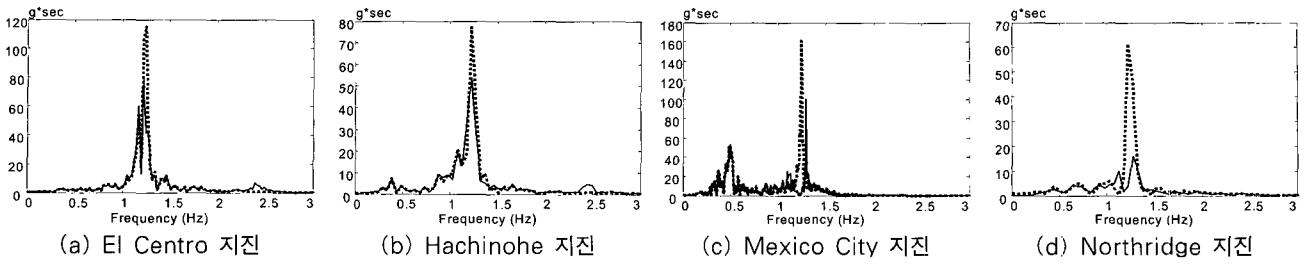


그림 9 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진과 가진시 TLD 실시간 단자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 주파수 응답 비교

주기는 구조물 주파수인 1.23Hz와 거의 비슷한 1.25Hz로 예측되었고, 이는 선형과동이론에 근거하여 TLD와 구조물의 주기가 동조되었음을 보여준다.

그림 8은 구조물의 질량에 대한 TLD의 질량비 1.3%로 설계한 TLD의 실시간 하이브리드 제어 및 비제어 실험 결과를 시간영역 가속도 응답으로 보여준다. 시간이력 가속도 응답에서 각 지진파에 대해 비제어시(점선) 보다 제어시(실선) 응답이 줄어들지만 TLD의 거동 특성상 후반부에 제어성능이 발휘함을 알 수 있다. 그림 8(c)의 Mexico City 지진응답은 TLD의 제어성능에 효과가 없는 것으로 나타나는데 이는 그림 9의 주파수영역 응답에서 알 수 있듯이 Mexico City 지진은 동조주기 이하인 저주파수영역의 성분이 강한 지진파이기 때문에 TLD는 과도응답 상태의 응답만을 제어하는 것을 알 수 있다.

그림 9는 TLD-하이브리드 제어 및 비제어 실험 결과를 주파수 영역 가속도 응답으로 보여준다. 그림 9(c)의 Mexico City 지진 응답은 동조주기에서는 제로 수준의 제어성능을 보이지만 동조주기보다 약간 높은 주기 지점에서 피크를 보이는데 이는 Jump Frequency영역의 응답으로 TLD의 에너지 소산능력이 급격히 저하되는 부분이며 가진크기가 증가할수록 증가하는 특성을 지닌다. 그림 9(a), (d)의 El Centro 및 Northridge 지진 응답은 TLD의 감쇠비가 크지 않기 때문에 더블 피크를 보이는 것을 알 수 있다.

그림 10은 구조물에 설치된 TLD의 제어 실험과 하이브리드 기법에 의해 구현된 제어시 시간이력 가속도 응답을 비교한 것이다. Mexico City, Northridge, El Centro, Hachinohe 지진파에 대해 제어시 응답이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 10(a)~(b)의 El Centro 와 Hachinohe 지진에서 약간의 오차를 보이는데 이것은 구조물의 시스템 식별할 때 입력하중에 대한 감쇠비의 평균화에 의해 발생한 오차에 의한 것으로 평가된다.

그림 11은 구조물에 설치된 TLD의 제어 실험과 하이브리드 기법에 의해 구현된 제어시 가속도 주파수 응답을 비교한 것이다. 그림 11(a)의 El Centro 지진응답의 경우 구조물 제

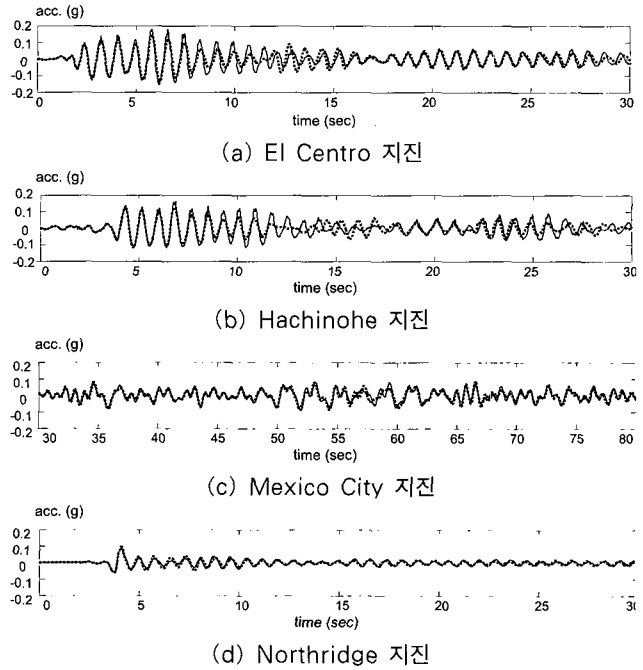


그림 10 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진과 가진시 TLD-하이브리드 실험 (실선)과 일반 TLD-구조물 제어실험(점선)의 제어시 시간이력 응답 비교

어실험에서는 싱글 피크를 보이는 반면 하이브리드 제어실험시 더블 피크를 보이는 점을 보아 TLD와 구조물의 감쇠비 변화에 따른 제어성능의 차이점을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 시스템 식별에 있어서 평균화에 따른 감쇠비의 과대평가된 요인에 의한 것으로 평가되며, 그림 11(c), (d)의 Mexico City와 Northridge 지진 응답의 경우 대체적으로 정확히 일치하나 약간의 오차를 보이는 것은 실제 구조물과 TLD 동조시 발생한 오차로 평가되며 정확한 모델의 구조물을 예제로 실험할 때, 잘 일치된 결과를 얻을 것으로 판단된다.

3.2 다자유도 구조물의 실시간 하이브리드 실험

본 절에서는 다자유도 구조물을 수치해석 구조물로 치환하여 하이브리드 실험을 수행하고 이에 따른 TLD의 제어성능

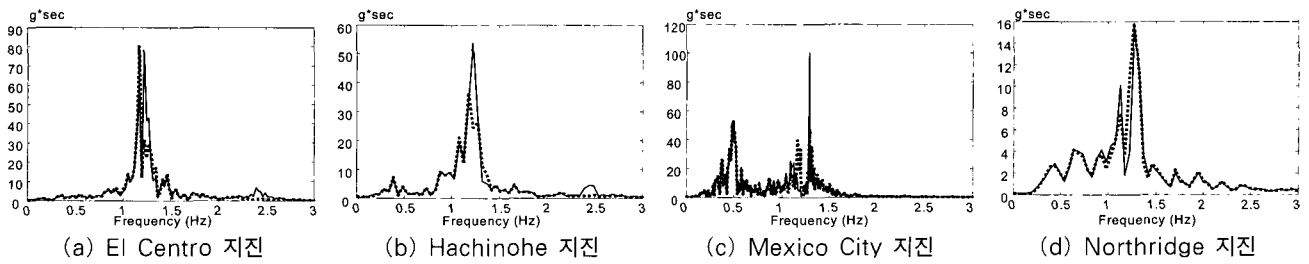


그림 11 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진파 가진시 TLD-하이브리드 실험 (실선)과 일반 TLD-구조물 제어실험(점선)의 제어시 주파수 응답 비교

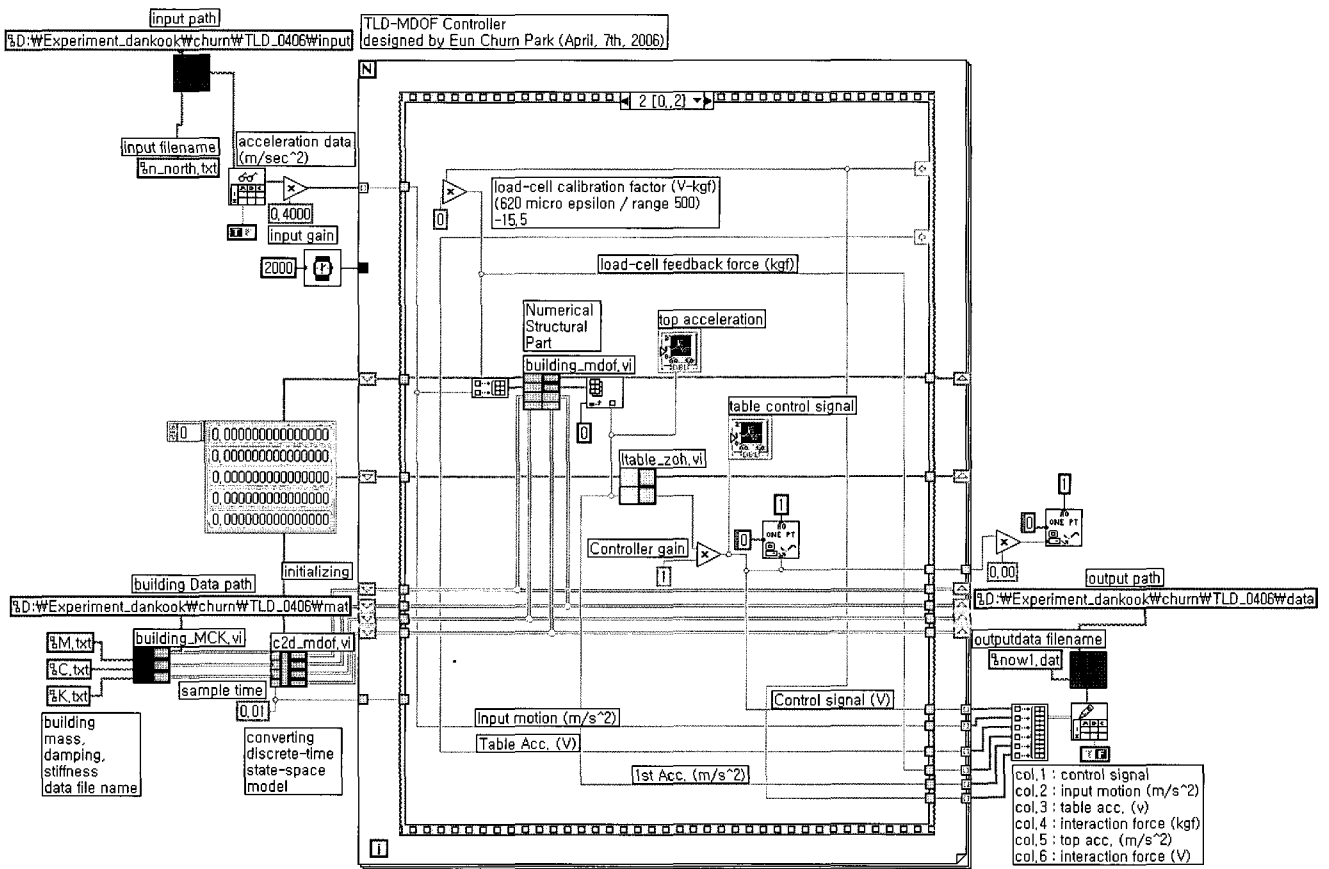


그림 12 LabVIEW를 통한 실시간 하이브리드 실험 제어기 설계

을 검증한다. 구조물은 3층 구조물로 구성되었으며, 각층질량은 128.77kg, 층강성은 33.91kN/m, 층감쇠계수는 13.52N·sec/m로 구성하였고, 고유치해석결과 1차모드 주파수는 1.15Hz, 2차모드 주파수는 3.22Hz, 3차모드 주파수는 4.65Hz인 구조물의 수치해석부 구조물 필터를 구성하였다. TLD의 제어원은 단자유도 하이브리드 실험시의 제어원과 같고, 구조물의 1차모드 주파수인 1.15Hz로 동조하였고 질량비는 2%로 설계하였다. 실시간 피드백 실험시 데이터 계속시 잡음 제거는 매우 중요하며 잡음을 제거하기 위해 30Hz 저주파 통과 필터를 통과해 수집되었다.

다자유도 구조물 하이브리드 실험에서의 제어기 설계는 단

자유도 하이브리드 실험과 유사하게 설계되며 LabVIEW를 사용하여 실험시스템을 설계하였다. 이 때 설계를 단순화하기 위해 수치해석부 구조물의 M, C, K행렬의 입력을 받고 이산시간 시스템으로 출력해주는 모듈을 설계하여 제어기에 반영하였다. 그림 12는 LabVIEW를 이용한 TLD-다자유도 구조물의 실시간 하이브리드 실험 제어기 설계모습이며, 반복구간마다 로드셀의 힘을 계측하여 수치해석부 구조물의 상부에 가진하며 다시 계산된 명령신호로 실시간으로 진동대의 거동을 묘사해 주는 제어기를 설계하였다.

단자유도 하이브리드 실험과 마찬가지로 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 총 4개의 지반가속도를

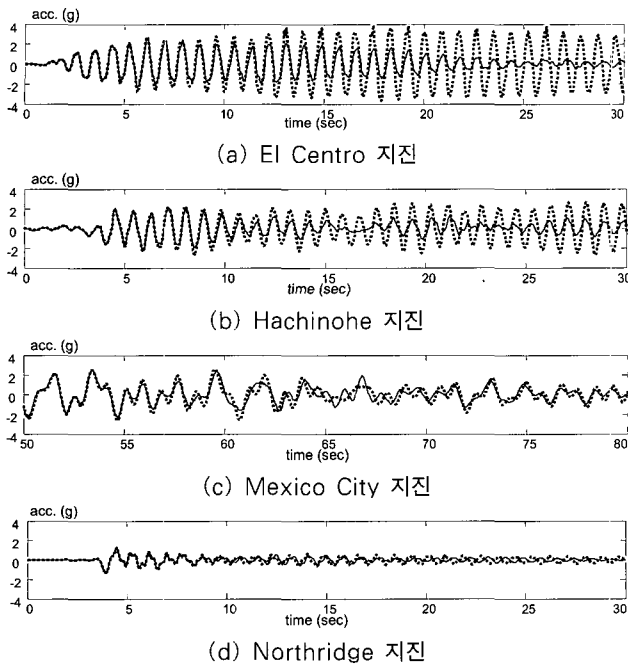


그림 13 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진과 가진시 TLD-다자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 시간이력 응답 비교

실험시스템 사양에 맞게 최대가속도를 0.4m/sec^2 로 스케일을 줄인 지진파로 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다.

그림 13은 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진과 가진시 TLD-다자유도 구조물의 실시간 하이브리드 실험의 제어 및 비제어시 시간이력 응답 비교한 것이다. 각 지진파에 대해 대체적으로 제어성능이 좋은 것을 알 수 있다. 단 그림 13(c)의 Mexico City지진은 단자유도 제어시와 마찬가지로 지진파의 주기성분예의해 과도응답의 제어성능만 나타냈고 그림 13(d)의 Northridge지진의 가속도 응답은 제어성능이 많이 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 TLD의 감쇠비가 낮은 이유라고 볼 수 있다.

그림 14는 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진과 가진시 TLD-다자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어 및 비제어시 주파수 응답 비교한 것이다. 주파수

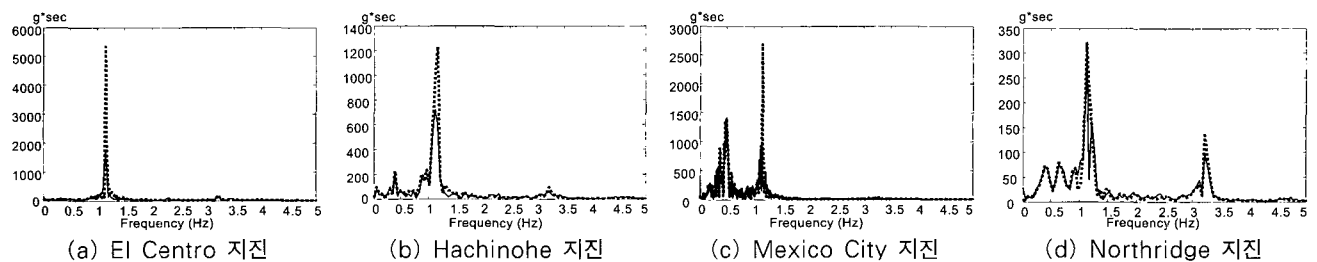


그림 14 El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 지진과 가진시 TLD-다자유도 구조물의 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 주파수 응답 비교

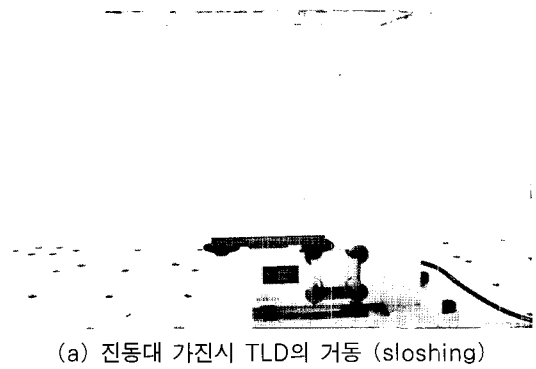


그림 15. 실시간 하이브리드 실험시 TLD의 거동 모습

영역에서 볼 때 각지진파에 대해 대체적으로 제어성능이 좋은 것으로 나타났으나, 그림 14(d) Northridge 지진 응답은 주파수영역에서 더블 피크를 보여 TLD의 감쇠비가 작아 제어성능이 급격히 저하된 것으로 판단된다. 또한 Northridge지진 응답에서 구조물의 2차 모드 주파수에서도 TLD의 제어성능을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 15는 실시간 하이브리드 실험 진행시의 사진이며 TLD의 가진크기가 작을 때 액체의 출렁임 현상인 슬러싱모드(sloshing)와 가진의 크기가 증가함에 따라 액체 질량의 일부가 한꺼번에 TLD벽면에 충격을 가하는 현상인 슬래밍모드(slamming)일 때의 TLD의 액체 거동 모습을 보여준다.

4. 결 론

하이브리드 실험기법 또는 부분구조 기법은 원래의 구조모델을 두 부분, 즉, 비선형성이 예상되는 실험적 부분구조와 선형으로 거동하는 수치해석적 부분구조로 나누어서, 실험적 부분구조만을 실험체로 제작하여 실험을 수행함으로써 원래의 구조모델의 동적특성을 구현하는 방법이다. 본 논문은 이러한 부분구조 기법의 특성을 적용한 진동대의 하이브리드 실험기법을 제안하고 실험적으로 검증하였다. 본 논문에서는 선형의 구조물을 수치해석부분으로 계산하고 TLD를 실시간 계측하여 TLD와 구조물이 연계된 실험을 제안하였고 실제로 진동대에 TLD를 설치한 구조물과 진동대에 설치한 TLD만을 이용한 실험을 통해 TLD의 제어성능을 검증하였다. 이는 기존의 TLD와 로드셀만을 사용하여 TLD만의 제어성능을 평가하는 실험과는 달리 TLD-구조물이 연계된 통합화된 실시간 온라인 실험으로 정확한 제어력을 예측할 수 있고, 실제 구조물을 제작하지 않고도 수치해석부 구조물에 TLD를 설치하여 실험하여 상사법칙 적용의 난점과 실험비용 절감의 효과를 볼 수 있다. 이와 같은 TLD의 하이브리드 실험법은 TLD의 정확한 비선형적 거동을 실험적으로 계측하고 실시간 피드백 하여 그대로 해석과 실험을 반영한 실험으로 추후 TLCD, TMD와 같은 질량형 제어기의 제어성능을 평가할 수 있다. 또한, 강진에 의해 빌딩 구조물이 비탄성 거동을 보이는 경우에는 전체 시스템을 물리적인 모델로 제작하여 실험을 수행하는 것이 가장 타당하지만, 차선책으로서 완전탄소성 및 bi-linear 모델 등과 같이 대상 비탄성 구조물의 이력거동에 대한 수학적 모델링이 가능하다면 이를 본 연구의 수치해석 부분에 반영한 하이브리드 실험법이 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업(05산학연C105A1050001-05A0505-00210)에 의한 것임 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원비를 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

우성식, 이상현, 정란(2005) 동조역체 감쇠기를 설치한 철근콘크리트 축소모델의 진동대 실험, 한국콘크리트학회

- 2005년도 가을 학술발표회 논문집, pp.519~526.
- 유기표(2005) TLD와 TLCD의 진동성능실험, 대한건축학회논문집 구조계 21(5), pp.19~26.
- 이상현, 우성식, 정란(2006) 선형 및 비선형 TLD의 지진 응답 제어성능 평가, 한국지진공학회 2006년도 학술대회 논문집, 10, pp.519~526.
- Blakeborough, A., Williams, M. S., Darby A. P., Williams D. M.(2001) The development of real-time substructure testing, *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical and engineering sciences*, 359(1786), pp.1869~1892.
- Chen, Y. H., Hwangm W. S., Chiu, L. T., Sheu, S. M.(1995) Flexibility of TLD to High-Rise Building by Simple Experiment and Comparison, *Computers & Structures*. 57, pp.855~861.
- Lamb, H. (1932) *Hydrodynamics*, 6th edn, Cambridge University Press, London, pp.619~621.
- Lee, S. K.(2004) Study on the Shaking Table Testing Method Based on the Substructure Method Considering Dynamics Soil-Structure Interaction, Ph.D. Thesis, Univ. of Tohoku, Sendai, Japan.
- Nakashima, M., Kato, H., Takaokas, E.(1992) Development of real-time pseudo dynamic testing, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 21, pp.79~92.
- Neild, S. A., Stoten, D. P., Drury, D., Wagg, D. J.(2005) Control issues relating to real-time substructuring experiments using a shaking table, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, pp.1171~1192.
- Robert H. Bishop(2001) *LabVIEW Student Edition 6i*, Prentice Hall.
- Sun, L. M., Fujino, Y., Chaiseri, P., Pacheco, B. M.(1995) The Properties of Tuned Liquid Dampers Using a TMD Analogy, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 24, pp.967-976.
- Young-Kyu Ju(2004) Structural behaviour of water sloshing damper with embossments subject to random excitation, *Can. J. Civ. Eng.* 31, pp.120~132.
- Yu, J. K., Wakahara, T., Reed, D. A.(1999) A Non-linear Numerical Model of the Tuned Liquid Damper, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 28, pp.671~686.