

실시간 하이브리드 실험법을 이용한 동조액체댐퍼가 설치된 건물의 진동제어

Vibration Control of a Building Structure with a Tuned Liquid Damper Using Real-Time Hybrid Experimental Method

이성경* · 이상현** · 민경원*** · 박은천**** · 우성식***** · 정관*****

Lee, Sung-Kyung · Lee, Sang-Hyun · Min, Kyung-Won · Park, Eun Churn · Woo, Sung-Sik · Chung, Lan

ABSTRACT

In this paper, an experimental 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. At the moment, the control force acting between their interface is measured from the experimental TLD with shear-type load-cell which is mounted on shaking table. 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. 서론

동조 액체 감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)는 수동 또는 준능동 구조물 제어장치로 폭넓은 분야에 적용되어져 왔고 실험 및 수치해석 모델로 많은 연구가 수행되었다. TLD는 기본적으로 비선형거동을 하며 일반적으로 선형 TMD의 근사이론(analogy)을 사용하여 해석한다. Y. H et al.¹ (1995)은 TLD를 질량을 분산

* 정회원 · 단국대학교 리모델링 연구소 연구전임강사

** 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사

*** 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수 E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

**** 단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정

***** 단국대학교 건축대학 건축공학과 박사과정

***** 정회원 · 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수

시킨 여러개의 TMD로 근사화하여 해석하였고 비선형 모델은 J-K, Yu et al.² (1999)은 TLD모델을 다양한 하중조건에 따른 비선형 스프링-감쇠 모델(Non-linear Stiffness and Damping, NSD)을 적용한 등가 TMD로 치환하여 해석하였다. 그러나 이러한 선행연구는 TLD의 정확한 거동을 묘사하지 못하며, 실제 구조물을 축소 제작한 실험체와 TLD의 정확한 상사법칙을 적용하여 실험하기엔 많은 어려움과 근사화에 따른 오차가 많이 따른다. 따라서 이러한 어려움을 해결하기 위해 본 논문에서는 하이브리드 실험법을 제안하며 실험 방법은 그림1의 개념도에 나타나있다. 질량-스프링-감쇠로 이루어진 구조물에서 상부에 설치된 TLD만 실험체로 제작되어 본 논문에서 제안되는 하이브리드(hybrid) 실험 또는 부분구조 실험법에 의해 실험적으로 검증된다. 이러한 하이브리드 실험방법은 건축물의 상층부에 설치되어 응답중 비선형성이 다수 포함되어 수학적 으로 정확히 모델링하기 힘든 질량형 제어기(tuned mass damper, tuned liquid damper 및 active mass damper 등)의 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.

2. 실험 방법

이 장에서는 일반적으로 본 논문에서 제안한 실험법의 유효성을 수학적 및 물리적 의미로 고찰한다. 하이브리드 실험 방법의 전개는 그림1과 같이 TLD와 연계된 전체구조물을 TLD와 구조물의 경계면에서 분리하면, TLD 실험부와 구조물 수치해석부로 나뉘지고 진동대에 설치된 TLD에 전단형 로드셀을 장착하여 가진 되는 동안 로드셀의 경계면 하중응답은 제어컴퓨터에 피드백되면서 수치해석부분인 구조물의 상부층의 하중으로 실시간 가진하게 된다. 여기서 수치해석부의 구조물은 TLD에서 계측한 제어력으로 제어된다.

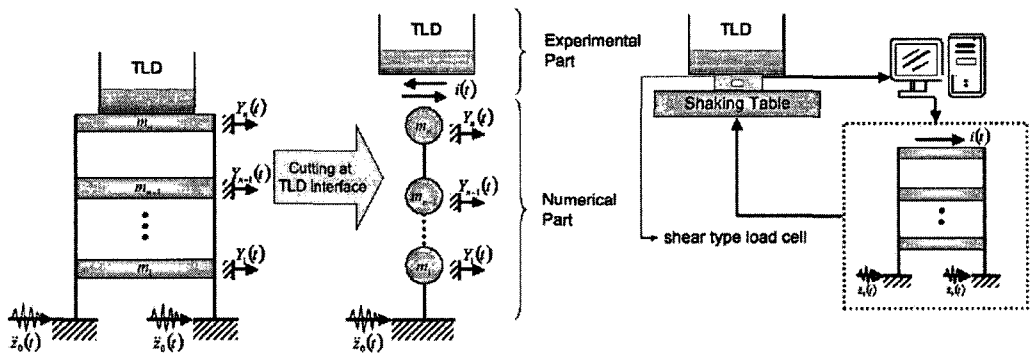


그림 1 실험부분 TLD를 이용한 하이브리드 실험의 개념도

그림1의 수치해석부 구조물의 상부층에 작용하는 질량형 감쇠기 TLD의 제어력, $\alpha(t)$, 과 기초에 작용하는 지반가속도, $\ddot{z}_0(t)$ 의 가진을 받고 n개의 자유도를 갖는 전단형 구조물의 운동방정식을 구성하면 식(1)과 같다.

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

여기서, $\{Y_i(t)\}$ 는 i 번째 층의 절대변위이고, $\{f_1(t)\} = \langle -\ddot{x}(t), 0, \dots, 0, c_1 \ddot{z}_0(t) + k z_0(t) \rangle^T$ 는 길이 n 의 외력 하중벡터이며, $\ddot{x}(t)$ 는 TLD에서 예측한 전단력이다. 구조물의 질량, 감쇠 및 강성행렬은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 [m] &= \begin{bmatrix} m_n & & & & \\ & m_{n-1} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_2 & \\ & & & & m_1 \end{bmatrix}, \quad [c] = \begin{bmatrix} c_n & -c_n & & & & \\ -c_n & c_n + c_{n-1} & -c_{n-1} & & & \\ & \ddots & \ddots & & & \\ & & & c_3 + c_2 & -c_2 & \\ & & & -c_2 & c_2 + c_1 & \\ & & & & & \end{bmatrix}, \\
 [k] &= \begin{bmatrix} k_n & -k_n & & & & \\ -k_n & k_n + k_{n-1} & -k_{n-1} & & & \\ & \ddots & \ddots & & & \\ & & & k_3 + k_2 & -k_2 & \\ & & & -k_2 & k_2 + k_1 & \\ & & & & & \end{bmatrix} \quad (2)
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \dot{z}(t) &= [A]z(t) + [B]u(t) \\
 O(t) &= [C]z(t) + [D]u(t) \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서, $i = 1 \sim n$ 일 때, 길이 $2 \times n$ 의 상태변수벡터는, $\{z(t)\} = \langle \{y_i(t)\}, \{\dot{y}_i(t)\} \rangle^T$, $y_i(t) = Y_i(t) - z_0(t)$, 길이 2×1 의 입력벡터는 $\{u(t)\} = \langle \ddot{x}(t), \ddot{z}_0(t) \rangle^T$ 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 구성되어 있다. $\{b\}$ 는 길이 $n \times 1$ 의 벡터이며 $\langle 1 \ 0 \dots \ 0 \ 0 \rangle^T$ 과 같다.

3. 실험적 검증

이 장에서는 그림1의 제어컴퓨터에 반영된 알고리즘의 설계와 실험적 검증을 다룬다. 예제 구조물은 단자유도로 구성하였고 실험시스템은 그림2와 같다. 실험시스템은 단국대학교 서울캠퍼스 부설 리모델링 연구소에 설치되어있고, TLD실험체의 규격은 직육면체 31cm×14cm×20cm이며 예제 구조물 1차모드 주기 (1.23Hz)에 선형과동이론 (Lamb⁴, 1932)을 사용하여 동조하였다. 단자유도 예제 구조물은 스틸프레임으로 폭과 높이는 0.6m, 1.0m이며 슬래브의 질량은 16.97kg로 측정되었고, 4개의 지진파를 사용하여 시스템 식별을 수행하고 이를 평균하여 기둥의 강성은 1011.66 kgf/m 감쇠상수는 1.49 kgf·sec/m로 식별되었다. 실험체는 일축 진동대에 의해 가진되며, 전단형 로드셀이 진동대에 장착되어있고, 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 변환(AD convert)하는 기능과 LabVIEW와 같은 제어용 프로그램에 의해 계산된 명령신호를 디지털-아날로그 변환(DA convert)하는 기능을 수행한다. 8채널 데이터 수집 시스템은 NI SC-2345 BNC케이블 커넥터가 연결된 NI PCI-6052E으로 이루어져있다.

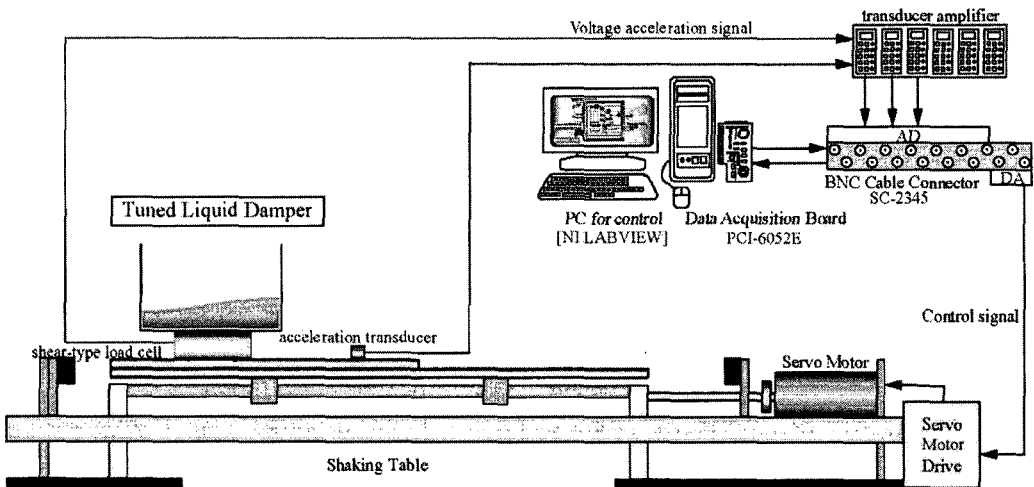


그림 2. TLD 하이브리드 실험시스템의 개념도

진동대는 제어컴퓨터의 DA채널을 통한 제어신호에 따라 움직이며, 이때 제어컴퓨터 내부의 명령신호와 진동대에서 측정된 신호는 서로 상이한 증폭과 위상을 갖는다. 따라서 진동대와 명령신호와의 동적특성을 상세히 하기 위해서 그림3 (점선)와 같이 진동대에서 측정된 가속도신호를 입력으로하고 명령신호를 출력으로 하는 진동대의 역전달함수를 측정하였고, 그림3 (실선)와 같이 제어컴퓨터에 반영하기 위해 이를 필터화 하였다. 결과적으로 필터화한 5차의 진동대 역전달함수는 식(8)과 같고 이는 진동대와 명령신호간의 동적특성을 보정하는 역할을 한다.

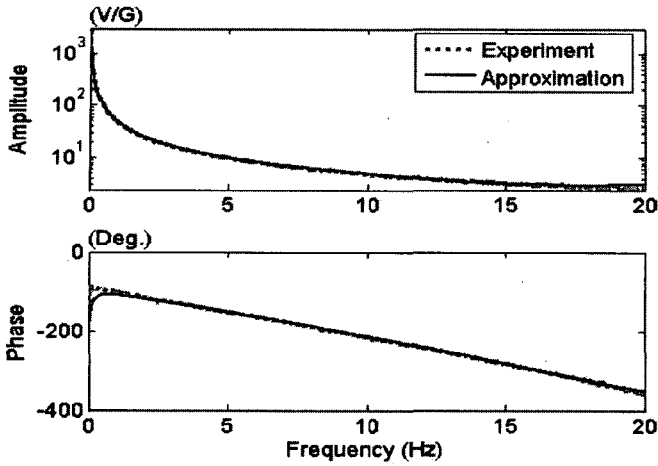


그림 3. 진동대 역 전달함수

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

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

진동대 제어기의 효과를 검증하기 위해 명령신호로 스케일을 줄인 El Centro 지진파를 사용하여 진동대에서 측정된 가속도 데이터와 비교하였으며, 그림 4.에서처럼 서로 잘 일치하는 것을 보여준다.

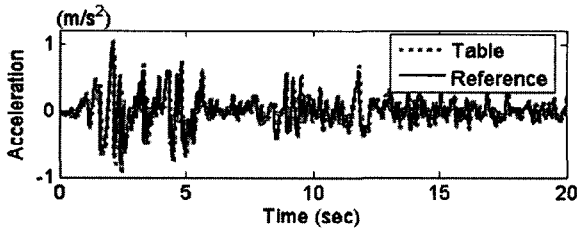


그림 4. 진동대 동적특성의 보정 결과

2장에서 소개한 하이브리드 실험법을 검증하기 위해 그림5. 와같이 제어기를 설계하였으며 제어기는 이산화 시켜 LabVIEW를 통해 코딩된다. 제어기의 구조는 단자유도 수치해석적 예제구조물이 TLD에서 발생하는 제어력은 로드셀에 의해 상호작용력 $\chi(t)$ 입력과 지반가속도 입력을 계산하여 예제구조물 1층의 절대가속도가 계산되며 이때 1층의 절대가속도는 명령신호가 되고 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 $1m/s^2$ 로 축소 스케일하여 실험하였다. 예제 구조물의 각각의 지진파 실험을 통해 시간이력 시스템 식별을 수행 하여 지진파에 따른 강성과 감쇠계수

를 식별하였으며 이를 평균하여 제어기 설계에 반영하였다. 예제 구조물 주기에 동조시킨 TLD의 주기를 파악하기 위해 백색잡음 실험을 실시하였고 비교를 위해 TLD-예제구조물의 일반제어실험과 TLD-하이브리드 실험법을 이용한 하이브리드 실험으로 분리하여 실시하였다, 실험결과는 그림6~7에 나타나있다.

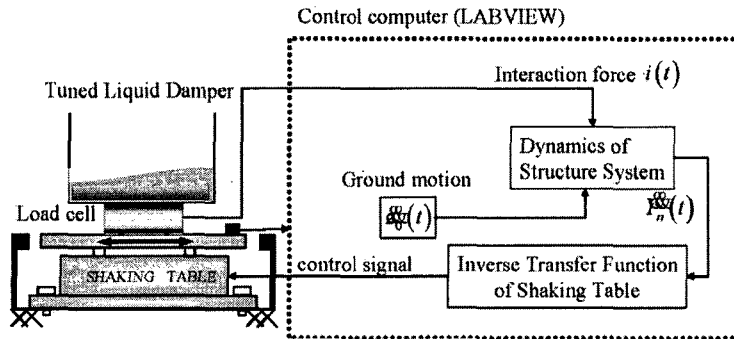


그림 5. 하이브리드 진동대 실험을 위한 제어기 설계

그림 6. 은 진동대에서 측정된 가속도에 대한 로드셀 계측데이터를 사용하여 그린 전달함수이다. TLD의 동조 주기는 구조물 주기인 1.23Hz와 거의 비슷한 1.25Hz로 계측되었고, 이는 선형과동이론에 근거한 TLD와 구조물의 주기가 동조되었음을 보여준다. 또한 불규칙한 피크점으로 미루어 가진주기에 따라 비선형 거동함을 알 수 있다. 그림 7. 은 TLD-하이브리드 제어 및 비제어 실험 결과를 시간영역 및 주파수영역으로 보여준다. 비제어시(점선) 보다 제어시(실선) 응답이 훨씬 줄어들어 수치해석부 구조물이 제어된 것을 알 수 있다. 그림 8.은 예제구조물에 설치된 TLD의 제어 실험과 하이브리드 기법에 의해 구현된 제어시 응답을 비교한 것이다. Mexico City, Northridge, El Centro, Hachinohe 지진파에 대해서 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 약간의 오차가 있는 것은 입력하중에 대한 시스템 식별시 감쇠비의 평가가 서로 다른점을 고려하지 못한 점과 평균화에 따른 감쇠비의 과대평가 및 응답대비 노이즈 성분이 강한 요소들에 의한 것으로 사료된다.

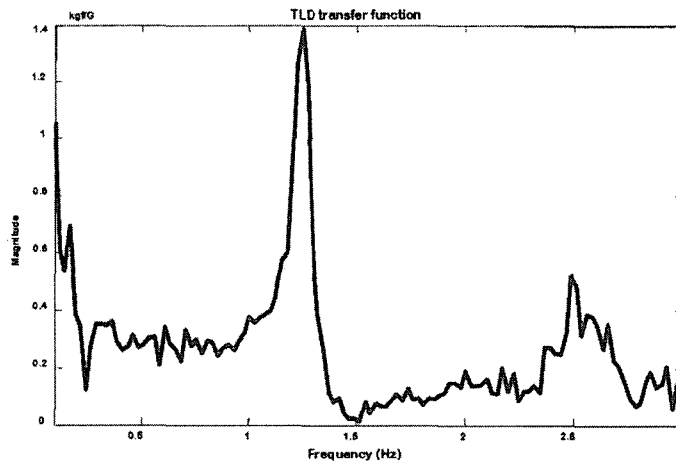


그림 6. TLD/진동대 전달함수 (백색잡음 실험결과)

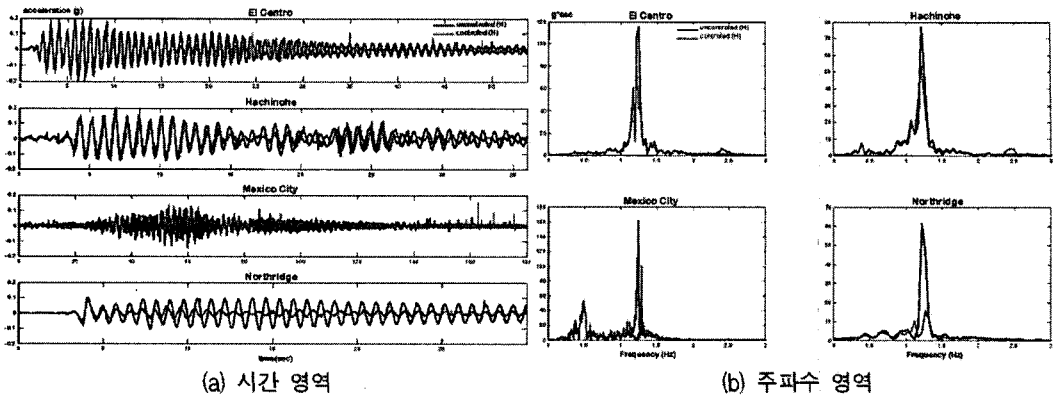


그림 7. TLD-하이브리드 제어 실험 결과 (비제어시-제어시 비교)

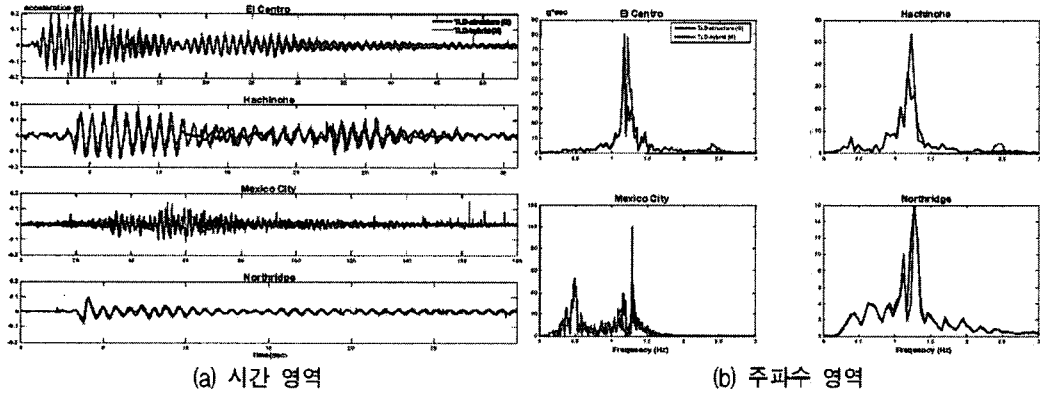


그림 8. 예제구조물 실험결과와 TLD-하이브리드 실험결과 (제어시 비교)

4. 결론

본 논문에서는 구조물을 수치해석부분으로 계산하고 TLD를 실시간 계측하여 TLD와 구조물이 연계된 실험을 제안하였다. 실제로 예제구조물과 진동대와 TLD만을 이용한 실험을 통해 TLD의 제어성능을 검증하였으며, 이는 TLD와 로드셀만을 사용하여 TLD만의 제어성능을 평가하는 실험과는 달리 TLD-구조물이 연계된 통합화된 실시간 온라인 실험으로 더 정확한 제어력을 예측할 수 있음을 보여주었다. 추후 TLCD, TMD와 같은 질량형 제어기의 제어성능을 본 논문에서 제안하는 하이브리드 실험법을 통해 검증하기 위해서 더 많은 지진파를 사용하여 하이브리드 실험법을 검증해야하고, 비교 검증을 위해 예제구조물의 정확한 시스템 식별과 노이즈대비 응답수준을 더 향상시키는 노력과, 구조물의 비선형응답을 함께 고려하는 비선형 하이브리드 실험법의 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업(R11-2002-101-03004-0)과 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (05산학연 C105A1050001-05A0505-00110)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Y. H. Chen, W. S. Hwang, L. T. Chiu and S. M. Sheu, (1995) Flexibility of TLD to High-Rise Building by Simple Experiment and Comparison, *Computers & Structures*. 57, 855-861
- J. K. Yu, T. Wakahara and D. A. Reed, (1999) A Non-linear Numerical Model of the Tuned Liquid Damper, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.* 28, 671-686
- S. K. Lee (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.*
- H. Lamb (1932) Hydrodynamics, 6th edn. *Cambridge University Press, London*, pp. 619-621