

실시간 하이브리드 진동대 실험법에 의한 양방향 TLMD의 풍응답 제어성능평가

Wind Response Control Performance of a Two-way Tuned Liquid Mass Damper Using Real-Time Hybrid Shaking Table Testing Method

허재성* ·이성경** ·이상현** ·박은천* ·김홍진*** ·조봉호**** ·조지성***** ·김동영***** ·민경원†
Jae-Sung Heo, Sung-Kyung Lee, Sang-Hyun Lee, Eun Churn Park, HongJin Kim, Bong-Ho Jo, Ji-Seong Jo, Dong-Young Kim and Kyung-Won Min

Key Words : Real-Time Hybrid Shaking Table Test(실시간 하이브리드 진동대 실험법), Two-way Tuned Liquid Mass Damper(TLMD)(2방향 동조액체질량 감쇠기)

ABSTRACT

An experimental real-time hybrid method, which implements the wind response control of a building structure with only a two-way TLMD, is proposed and verified through a shaking table test. The building structure is divided into the upper experimental TLMD and the lower numerical structural part. The shaking table vibrates the TLMD 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 a wind-load input at its base. The results show that the conventional method can be replaced by the proposed methodology with a simple installation and accuracy for evaluating the control performance of a TLMD

1. 서론

진동대의 로드셀을 이용한 주기별 TLMD의 제어성능 실험은 실제 구조물과의 동조 또는 비동조시의 거동의 특성 및 성능을 정확히 파악하기엔 많은 난점이 있으며, 실제 축소건물모델에 설치하여 제어성능을 평가하는 실험은 모델제작에 있어 상사법칙의 적용과 많은 비용이 수반하는 어려움이 있다. 따라서 이러한 난점을 해결하기 위해 본 실험에서는 구조물을 제작하지 않는 수치해석부 구조물에 TLMD를 설치하는 하이브리드 실험법을 제안한다.

하이브리드 실험은 실험체의 크기와 무게제한, 그리고 경제성으로 인한 실험크기 구조물의 동적 실험의 어려움을 해결하기 위한 방법으로 실시간 부분구조(real-time

substructure) 실험법을 응용한 실험법이다. 실시간 부분구조 실험방법이 Nakashima 등(1992)에 의해 처음으로 개발된 후, 많은 연구자들은 부분구조기법을 이용한 제어 기술에 대한 연구들을 수행하여 왔으며, 실시간 부분구조 실험을 수행하여 구조물의 특성을 파악하는 경우가 증가하는 추세이다. 본 연구에서 제안하는 실시간 하이브리드 실험 설계시스템은 Fig. 1의 흐름도에 나타나 있다.

최근에는, 전체구조물 중 여러가지 실험적 및 수치해석적 부분구조를 분리하여 실험하는 관련연구가 수행되었다. 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 연구의 하부부분이 수치해석 나머지 상부부분이 실험부일 경우를 이용한 부분구조법의 실험에 역점을 두어 풍하중이 가해졌을 때 비선형 거동을 하는 TLMD를 실험체로 제작하여 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다.

† 교신저자 ; 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (031)8005-3734, Fax: (031)8005-3741
* 단국대학교 대학원 건축공학과
** 단국대학교 건축대학 건축공학과
*** 경북대학교 건설공학부 건축공학과
**** 포항산업과학연구원
***** 포스코건설 기술연구소 건설기술연구팀
***** 동일고무벨트 면진제진 사업팀

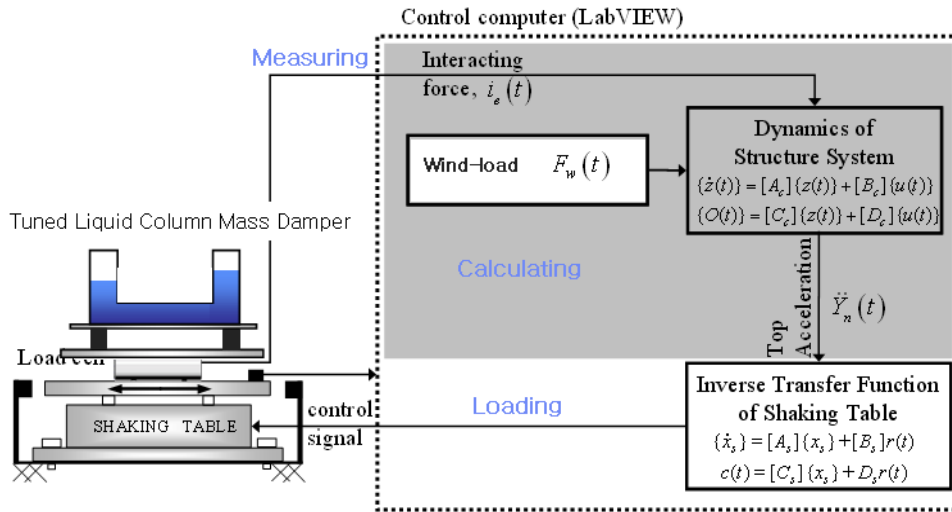


Fig. 1 하이브리드 진동대 실험을 위한 제어기 설계 흐름도

2. 수치해석부 구조물 및 진동대 동적특성 보상

수치해석부 구조물은 1/20 스케일의 단자유도 구조물 로써 4,269kg의 질량과 x방향 강성은 86,641 N/m y방향 강성은 121,765 N/m이며, x방향과 y방향 동일하게 감쇠비 2%를 적용하여 각각 x방향 감쇠계수는 769.28 N*sec/m, y방향 감쇠계수는 911.98 N*sec/m 으로 하였다.

설계된 질량 600ton의 TMD를 축소모델의 질량비로 나누면 다음과 같이 $m=75\text{kg}$, $k=1952.24(\text{N/m})$ 가 된다. 그러나 시제품으로 나와있는 면진고무의 스펙 ($G=4.5\text{kgf/cm}^2$)을 사용하여 계산하게 되면 면진고무의 강성은 22,183(N/m)으로 요구강성의 10배 이상이 나오게 된다. 그래서 요구강성(개당 480(N/m))을 얻기위해 DRB업체에 고무제작을 의뢰하였다.

$$m = 600,000\text{kg}/8000 = 75\text{kg}$$

$$k = m(2\pi f_1)^2 = 75\text{kg} \times (2\pi \times 0.812\text{Hz})^2 = 1952.24 (\text{N/m})$$

$$L = \frac{2g}{(2\pi f_1)^2} = \frac{0.4970}{f_1^2} = 0.98\text{m}$$

Table 1 축소모델 TLMD의 설계변수

TLMD 초기설계 고무강성	1952.24(N/m)
TLCD L의 길이	0.98m
TMD 초기 설계 질량	75kg

그러나 초기 설계와는 달리 TMD의 질량비는 85kg/600,000kg=1/7060, TLCD의 물의 질량비는 57.3kg/600,000kg =1/10470으로 계산되었다.

TLMD 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 제어용 프로그램에 의해 계산된 명령신호를 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 8채널 BNC-2110 BNC케이블 커넥터가 연결된 AD/DA보드인 NI DAQcard-6036E로 수집되는 시스템으로 이루어져있다.

진동대는 제어컴퓨터의 디지털-아날로그 변환 채널을 통한 제어신호에 따라 움직이며, 이때 제어컴퓨터 내부의 명령신호와 진동대에서 측정된 신호는 서로 상이한 증폭과 위상을 갖는다. 따라서 Fig. 2의 진동대 전달함수 정의를 통해 Fig. 3의 동적특성 보상을 위한 역전달함수를 설계하고 진동대와 명령신호와의 동적특성을 상쇄시키기 위해서 진동대의 백색잡음실험을 수행하였다. Fig. 4의 점선과 같이 진동대에서 측정된 가속도신호를 입력으로 하고 명령신호를 출력으로 하는 진동대의 역전달함수를 측정하였고, Fig. 4의 실선과 같이 제어컴퓨터에 반영하기 위해 이를 필터화 하였다. 결과적으로 필터화한 5차의 진동대 역전달함수는 식(1)과 같고 이는 진동대와 명령신호간의 동적특성을 보정하는 역할을 한다.

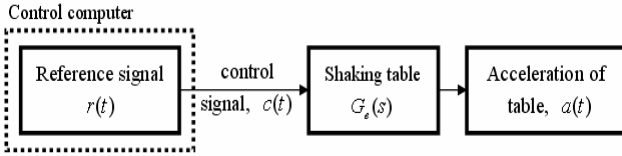


Fig. 2 진동대 전달함수의 정의

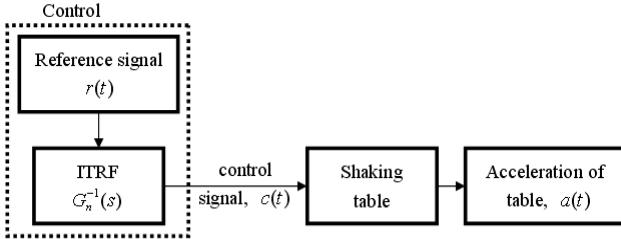


Fig. 3 진동대 역전달함수를 사용한 동적특성 보상

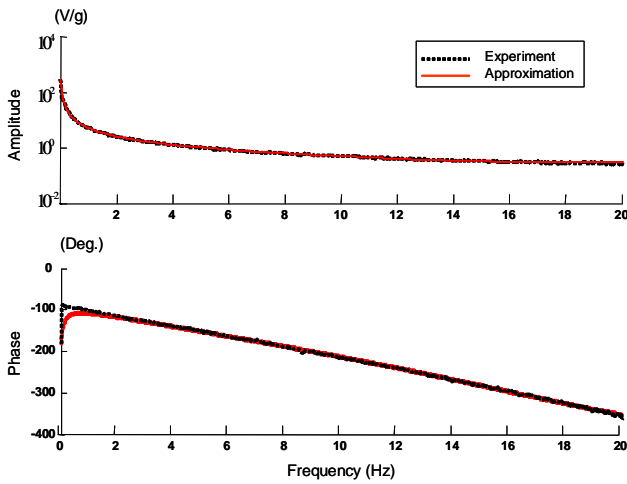


Fig. 4 진동대의 동적특성 보상을 위한 역전달함수

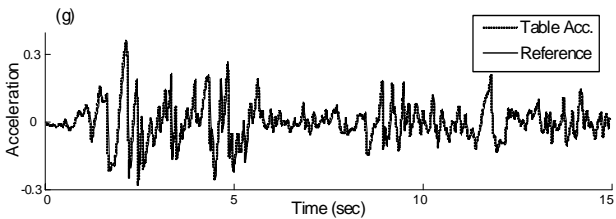


Fig. 5 진동대의 동적특성 보상결과

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

Fig. 5는 El Centro 지진파를 명령신호로 진동대를 가진 경우 실제 진동대에 부착된 센서를 통해 계측된 가속도 응답을 비교한 것이다. 합리적으로 진동대의 동적특성이 상쇄되었음을 보여준다.

3. 실험

3.1 실험 계획

실시간 하이브리드 실험에서의 구조물에 가진되는 입력은 임의 생성한 풍하중과 공진 조화하중 가진의 두가지의 경우로 실험을 수행하였다.

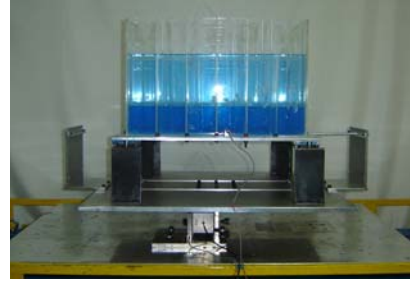


Fig. 6 실시간 하이브리드 실험체 설치 모습

풍하중은 축소 모델의 단자유도 구조물의 공진 주파수와 이의 0.5배 1.2배의 성분과 백색잡음 성분을 추가한 동적성분으로 임의 생성하였으며 최대 크기를 일정량으로 감소하는 게인값 G 를 적용하였다. 그리고, 공진가진의 경우 Y방향은 0.85Hz이며 X방향은 0.72Hz의 사인파로 생성하였다.

$$F_w(t) = 25\sin(2\pi \times 0.5t) + 5\sin(\omega t) + 10\sin(2\pi \times 1.2t) + 15\sin(2\pi \times 2t) + 3w \quad (2)$$

앞절에서의 단자유도 수치해석부 구조물의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) - i(t) \quad (3)$$

여기서, m 은 구조물의 질량, c 는 감쇠계수 그리고 k 는 강성이며 $F(t)$ 는 가진하중 $i(t)$ 는 로드셀에서 계측하는 TLCD 및 TMD의 제어력이다.

식(3)을 상태공간 방정식 형태로 표현하고 1층의 절대가속도를 출력하는 출력방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \mathbf{A}z + \mathbf{B}u \\ \bar{y}_1 &= \mathbf{C}z + \mathbf{D}u \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{z} 는 상태변수이며 $\mathbf{z} = [x, \dot{x}]^T$ 이고 \mathbf{u} 는 입력 벡터로 $\mathbf{u} = [i(t), F(t)]^T$ 이다. 그리고 \bar{y}_1 는 1층의 절대가속도이며 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 행렬은 각각 다음과 같다.

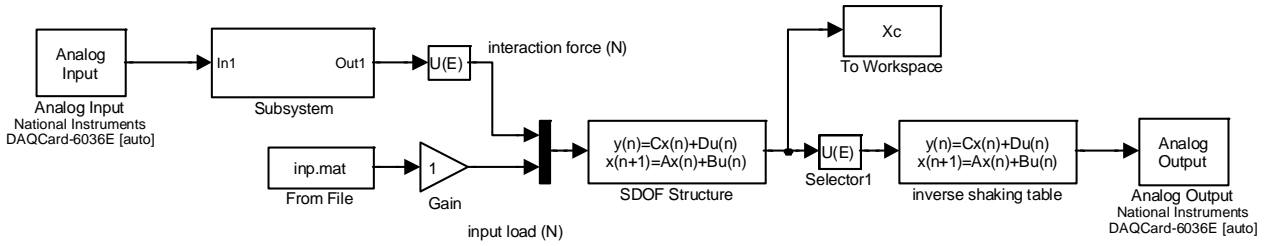


Fig. 7 실시간 하이브리드 실험 가진기

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/m & 1/m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -k/m & -c/m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1/m & 1/m \end{bmatrix}$$

수치해석부 구조물과 진동대 역전달함수를 포함하여 Fig. 7과 같이 실시간 하이브리드 실험 가진기를 설계하였으며 실시간 하이브리드 실험은 실험체에서 계속되는 응답을 실시간으로 계산되어 진동대를 구동하여 움직이므로 노이즈 및 위상오차에 치명적이다. 따라서 위상과 컴퓨터 계산오차를 최소화 하기 위하여 샘플링레이트를 1,000Hz 환경으로 MATLAB Simulink의 Real-Time Window Target을 이용하여 설계하고 실시간 하이브리드 실험을 진행하였다.

3. 결과 분석

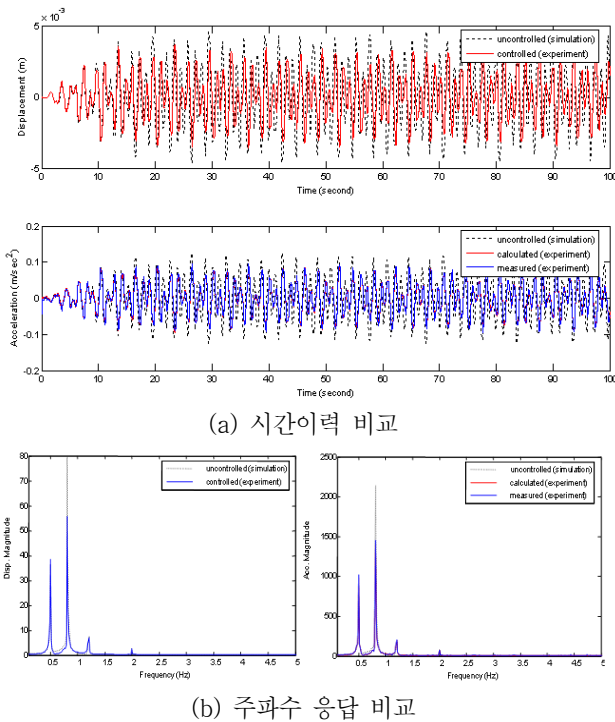


Fig. 8 TMD방향으로 풍하중 가진시 TLMD의 실시간 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 비교

Fig. 8은 TMD가 설치된 단자유도 구조물의 제어 및 비제어시의 시간영역과 주파수 영역의 결과를 보여주며 그림 Fig. 8(a)에서 calculated와 measured는 각각 1층의 가속도 응답의 컴퓨터 명령신호와 계측된 신호를 보여준다. 정상상태에서 TMD의 제어효과를 보여주며 Fig. 8(b)의 주파수 영역 결과에서 알수 있듯이 TMD의 동조된 주파수에서 구조물이 제어된 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다.

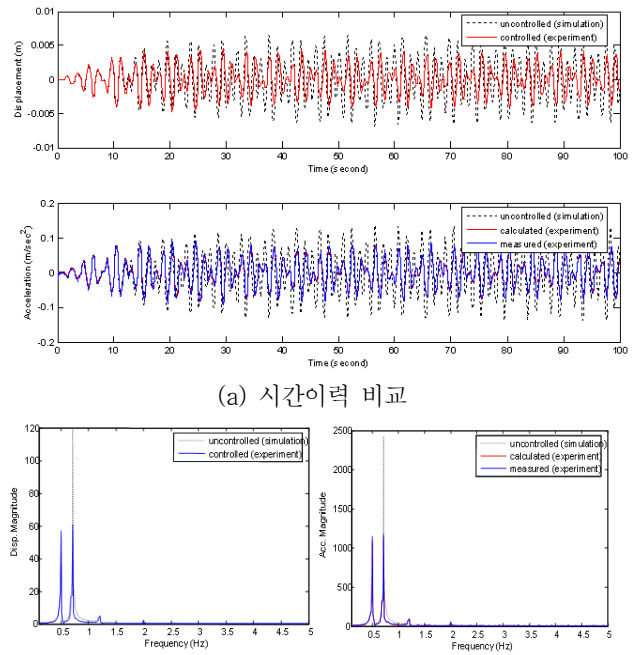
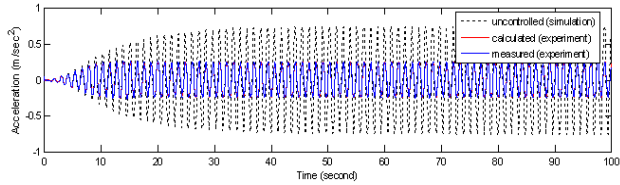
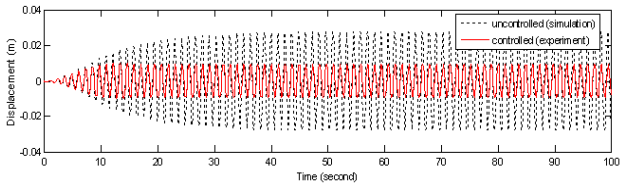
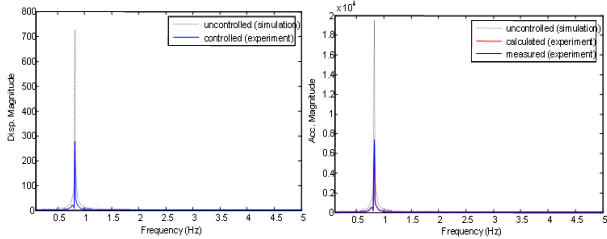


Fig. 9 TLCD방향으로 풍하중 가진시 TLMD의 실시간 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 비교

Fig. 9는 TLCD가 설치된 단자유도 구조물의 제어 및 비제어시의 시간영역과 주파수 영역의 결과를 보여주며 Fig. 9(b)에서 TMD의 경우와 같이 동조된 주파수에서 구조물의 제어효과가 있음을 알 수 있다.



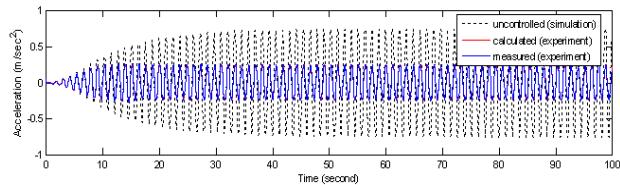
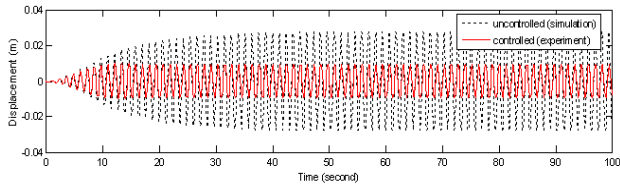
(a) 시간이력 비교



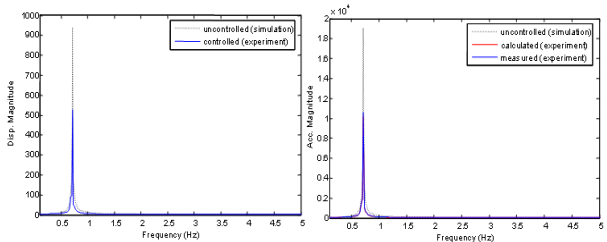
(b) 주파수 응답 비교

Fig. 10 TMD방향으로 공진시 TLMD의 실시간 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 비교

Fig. 10은 TMD가 설치된 구조물의 공진시 제어 및 비제어시 응답을 보여준다. 공진가진 경우 비제어시 최대응답의 60%이상 제어효과를 볼수 있음을 알 수 있다.



(a) 시간이력 비교



(b) 주파수 응답 비교

Fig. 11 TLCD방향으로 공진시 TLMD의 실시간 하이브리드 실험의 제어(실선) 및 비제어시(점선) 비교

Fig. 11은 TLCD가 설치된 구조물의 공진시 제어 및 비제어시 응답을 보여준다. 공진가진 경우 비제어시 최대응답의 40~50% 정도의 제어효과를 볼수 있음을 알 수 있다.

Table 2 성능평가 비교

분류		TMD	TLCD
풍하중 가진한 구조물의 성능비교	J1	0.783	0.676
	J2	0.754	0.649
	J3	0.727	0.625
	J4	0.684	0.583
조화하중 가진한 구조물의 성능비교	J1	0.348	0.528
	J2	0.334	0.505
	J3	0.354	0.524
	J4	0.338	0.499

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \frac{\max(x_c(t))}{\max(x_u(t))} & J_2 &= \frac{\max(\ddot{x}_c(t))}{\max(\ddot{x}_u(t))} & x_c &= \text{controlled displacement} \\
 J_3 &= \frac{\text{rms}(x_c(t))}{\text{rms}(x_u(t))} & J_4 &= \frac{\text{rms}(\ddot{x}_c(t))}{\text{rms}(\ddot{x}_u(t))} & x_u &= \text{uncontrolled displacement} \\
 & & & & \ddot{x}_c &= \text{controlled acceleration} \\
 & & & & \ddot{x}_u &= \text{uncontrolled acceleration}
 \end{aligned}$$

3. 결과 분석

실시간 하이브리드 실험을 통한 TLMD의 x방향 y방향의 풍하중에 의한 성능과 공진시의 성능을 검토하였다. 실험을 통해 최대 및 RMS응답의 성능지수를 얻었으며, 풍하중의 경우 TLCD가 TMD에 비해 좋은 성능을 나타냈으며 공진 가진의 경우 TMD가 TLCD에 비해 좋은 성능을 보였다. 이와 같은 결과가 도래된 이유로는 TMD의 모드가 단일모드인 반면 TLCD의 모드는 다중모드 때문이라 사려된다

후기

이 연구는 (주)포스코건설 및 (재)포항산업과학연구원 의 연구비 지원과 (주)동일고무벨트의 협조에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구에 참여한 연구자는 「2단계 BK21사업」의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- (1) 이성경, 박은찬, 민경원, 이상현, 정란, 우성식, 2006, “실시간 하이브리드 진동대 실험법을 이용한 TLD 제어성능의 실험적 검증”, 한국전산구조공학회 논문집, 제19권 제4호, pp.419-427.
- (2) 정란, 이정우, 박태원, 2006, “내진설계 되지 않은 공동주택의 진동대 실험에 의한 내진성능 평가”, 한국콘크리트학회 논문집, 제 18권 제6호, pp.721-728.
- (3) T. T. Soong, and G. F. Dargush, 1997, *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, New York, John Wiley & Sons.
- (4) M. Nakashima, H. Kato and E. Takaokas, 1992, “Development of real-time pseudo dynamic testing”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, pp.79-92.
- (5) S. A. Neild, D. P. Stoten, D. Drury and D. J. Wagg, 2005, “Control issues relating to real-time substructuring experiments using a shaking table”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 34, pp.1171-1192.