

# 백색잡음 하중 크기에 따른 TLD의 비선형 특성 평가

## Nonlinear Characteristics Evaluation of Tuned Liquid Damper with White Noise Amplitude

우 성 식\*    이 상 현†    최 기 영\*\*    정    란\*\*\*    박 태 원\*\*\*\*  
Woo, Sung-Sik    Lee, Sang-Hyun    Choi, Ki-Young    Chung, Lan    Park, Tae-Won  
(논문접수일 : 2007년 10월 5일 ; 심사종료일 : 2008년 4월 13일)

### 요 지

본 연구에서는 진동대 실험을 통해 얻은 동적 데이터를 이용하여 TLD의 동적 비선형 특성에 대한 연구를 수행하였다. 현재까지 TLD의 설계는 액체의 비선형 거동이 나타남에도 불구하고 TMD 근사이론이나 선형과동이론과 같은 선형 거동을 가정으로 설계 되어 지는 한계를 가지고 있다. 또한 조화하중과 같은 특정진동수에 지배되는 하중형태에 대한 TLD의 동적 비선형 특성이 규명되었지만 백색잡음과 같은 특정진동수 성분에 지배되지 않은 하중형태에 대한 TLD의 동적 비선형 특성은 아직까지 검증된 바가 없다. 본 논문은 백색잡음을 이용하여 가진 하중 크기에 따른 TLD의 동적 비선형 특성을 검토하여 설계 시 필요한 동조액체감쇠기의 감쇠비, 고유진동수비 및 유효질량비를 평가할 수 있는 산정식을 제안하였다.

**핵심용어** : 동조액체감쇠기, 진동대 실험, 곡선맞춤, 비선형 특성

### Abstract

In this study, it was investigated for dynamic nonlinear characteristics using dynamic data obtained by shaking table test. The design of Tuned Liquid Damper(TLD) has limitation to plan based on Tuned Mass Damper(TMD) analogy and linear wave theory. Also, while there are many studies regarding properties of TLD under harmonic load, there are not estimated for dynamic non-linear characteristics of TLD under the load that is not governed by particular frequency like a white noise. This paper investigated dynamic non-linear characteristics of TLD varied with load amplitude using a white noise and suggested equations that can estimate damping ratio, natural frequency ratio and effective mass ratio of TLD.

**Keywords** : tuned liquid damper, shaking table test, curve fitting, non-linear characteristics

### 1. 서    론

최근 부산 하이페리온에 설치된 동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)는 최상층에 간단한 유체탱크를 설치하여 진동제어효과를 도모하는 감쇠장치이다. TLD는 Den Hartog(1956)에 의해 선박 저면의 넘실거리는 진동수에 동조된 두 개의 탱크를 적용시킴으로써 선박의 출렁임을 줄이는 용도로 처음 사용되었다. 그 이후, Kareem, Sun(1987) 그리고 Modi(1987)와 Fujino(1988) 등은 TLD를 건축물

에 적용하여 그 성능을 평가하였으며, 특히 Sun과 Fujino(1992)에 의해 사각형 물탱크를 이용한 TLD의 비선형 이론적 모델이 연구되어졌다. Chen(1995)은 TLD가 설치된 고층 건물의 장주기 거동의 해석 및 자유진동과 조화진동에 의한 실험을 수행하여 TLD의 성능을 검토하였고, Yu(1998)는 TLD의 비선형 특성에 대하여 동조질량감쇠기가 등가의 비선형 강성과 감쇠를 가지는 것으로 모델링한 Non-linear Stiffness and Damping Model(NSD)에 대한 연구를 수행하였다. Banerji(2000)는 지진하중에 대한 최적 진동수비, 최적 물-

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축공학과 조교수  
Tel: 031-8005-3735 ; Fax: 031-8005-2643  
E-mail: lshyun00@dankook.ac.kr

\* 단국대학교 대학원 건축공학과 박사과정

\*\* CS구조엔지니어링 사원

\*\*\* 단국대학교 건축공학과 교수

\*\*\*\* 단국대학교 부설 리모델링연구소 박사 후 연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

깊이비, 최적 질량비를 검토하였으며, Yalla(2001)는 액체의 출렁임과 부딪힘으로 인해 실제 제어력에 참여하는 유효질량의 변화를 해석 모델을 통해 고찰하였다. 국내에서 홍갑표(1999) 등은 다중 동조질량감쇠기의 고찰을 통한 칸막이형 동조액체감쇠기의 적용성에 관한 해석적 연구를 수행하였고, 유기표(2004) 등은 동조액체댐퍼를 이용한 고층건물의 풍하중 제어성능에 관한 실험적 평가를 하였다. 이후 유기표(2006) 등은 동조액체감쇠기의 감쇠율 증가를 위한 여러 방안과 풍동 실험을 통한 풍응답 제어에 관한 연구를 활발히 진행 중이다. TLD 자체성능에 관한 연구는 주영규(1998)에 의해 고유진동수와 감쇠계수 등이 실험적으로 평가되었다. 하지만 이 연구는 깊은 수심(Deep Tank) TLD에 대한 연구인 것과 하중 형태가 조화하중인 경우만을 고려한 한계를 가지고 있다.

현재까지 TLD의 설계는 TMD 근사이론이나 선형과동이론에 근거하여 감쇠비, 고유진동수 및 질량을 산정하였다. Reed(1998) 등을 통해 TLD는 하중크기에 따라 감쇠비가 증가하거나 고유진동수가 변하는 비선형 특성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 TLD의 비선형성을 파악하여 실제 제어력을 발휘하는 감쇠비와 고유진동수, 그리고 유효질량을 평가하는 것은 매우 중요하다. 현재까지는 특정 진동수 성분에 지배되지 않는 하중 형태에 대한 TLD의 성능이 검증된 바 없으며, 이에 대해 본 논문에서는 백색잡음을 하중으로 사용하여 주파수 성분과 가진 하중 크기에 따른 TLD 자체의 동적 비선형 특성 파악을 위한 진동대 실험과 수치해석을 수행하였다.

## 2. TLD 모델링

TLD는 그림 1(a)와 같이 구조물 위에 감쇠기가 추가된 단자유도로 치환하여 모델링된다. 이 때 TLD의 유체 거동을 선형으로 가정할 경우(그림 1(b)) 선형 모델이라 하고, 비선형을 고려한 경우 비선형 모델이라고 한다.

여기서,  $M_s$ ,  $C_s$ ,  $K_s$ 는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성을 나타내고  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도를 나타낸다.

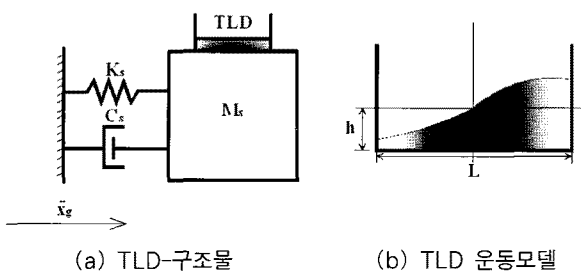


그림 1 TLD 모델링

## 2.1 선형 모델

외력을 받는 TLD의 1차 모드 고유진동수는 선형과동이론에 근거한 식 (1)에 의해 다음과 같이 산정한다.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh(\pi \epsilon)} \quad (1)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도(m/sec<sup>2</sup>)를 나타내며,  $L$ 은 외력이 작용하는 방향에 대한 수조길이고,  $\epsilon$ 는 TLD의 형상비 ( $h/L$ )로 0.15이하를 낮은 수심형, 0.15 초과를 깊은 수심형으로 분류한다.

TLD의 모드 질량은 다음과 같이 산정된다.

$$m_n = m_t \left( \frac{8 \tanh \left\{ \frac{(2n-1)\pi \epsilon}{3} \right\}}{\pi^3 \epsilon (2n-1)^3} \right); n = 1, 2, \dots \quad (2)$$

여기서,  $m_t$ 와  $m_n$ 는 각각 TLD 액체 총질량,  $n$ 차 모드에서의 유효질량이다.

이 식을 통해  $n$ 차 모드의 유효질량은 형상비( $\epsilon$ )에 지배를 받는 것을 알 수 있다. 다음 그림 2는 형상비에 따른 1차 모드 유효질량비이다.

## 2.2 비선형 모델

TLD는 기본적으로 유체의 운동을 이용하여 제어력을 발생시키기 때문에 비선형성이 존재한다. 특히 TLD가 조화하중을 받을 경우 가진 하중에 크기에 따라 감쇠비와 고유진동수가 변하는 현상은 선형연구(Reed, 1998)를 통해 이미 확인되었다. Yu(1999)는 비선형 강성과 감쇠를 가지는 NSD 모델(Nonlinear Stiffness-Damping model, NSD)을 제안하였다. 강성의 변화는 다음과 같이 강성경화비로 정의하

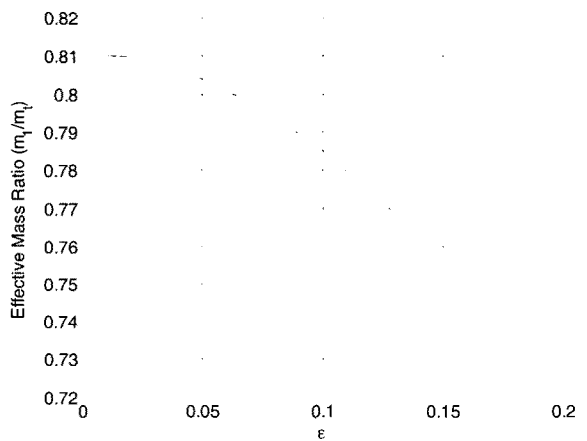


그림 2 형상비에 따른 1차 모드 유효질량비

여 표현하였다.

$$\alpha = \frac{k_d}{k_w} \quad (3)$$

여기서,  $k_d = m_d(2\pi f_d)^2$ ,  $k_w = m_t(2\pi f_w)^2$ ,  $m_d$ ,  $f_d$ 는 TLD의 질량과 고유진동수,  $f_w$ 는 식 (1)에 의해 산정된 TLD의 고유진동수를 나타낸다. 식 (3)은  $m_d = m_t$ 로 가정하였다.

Olson(2001)은 이를 바탕으로 다음 식 (4)~(6)과 같이 무차원진폭비에 따른 감쇠비( $\zeta_d$ )와 강성 경화비( $\alpha$ )에 대한 산정식을 제안하였다.

$$\zeta_d = 0.456(A')^{0.489} \text{ for } 0.01 \leq A' \leq 0.30 \quad (4)$$

$$\alpha = 1.197(A')^{0.042} \text{ for } 0.01 \leq A' \leq 0.14 \quad (5)$$

$$\alpha = 2.160(A')^{0.352} \text{ for } 0.14 \leq A' \leq 0.30 \quad (6)$$

여기서, 무차원진폭비  $A' = A / \sqrt[3]{V_w}$ ,  $A$ 는 가진진폭 변위,  $V_w$ 는 액체의 부피이다.

TLD의 모드질량은 선형과동이론에 근거한 수치이므로, 실제 건축물에 적용 시 비선형성을 고려하여 제어력에 유효한 유효질량을 산정하는 것은 중요한 문제이다. 이에 대해 Yalla(2001)는 출렁임-부딪힘 모델(Sloshing-Slamming Model)을 제안하였다. 이 모델은 출렁임에 참여하는 질량( $m_1$ )은 선형으로 가정하고, 부딪힘에 참여하는 질량( $m_2$ )을 별도로 고려한 시스템이다(그림 3참조).

하지만 백색잡음과 같은 넓은 대역폭의 진동수를 가진 하중이 작용하는 TLD의 감쇠비 및 고유진동수, 유효질량 변화에 관한 실험적 연구는 아직까지 이루어지지 않고 있다.

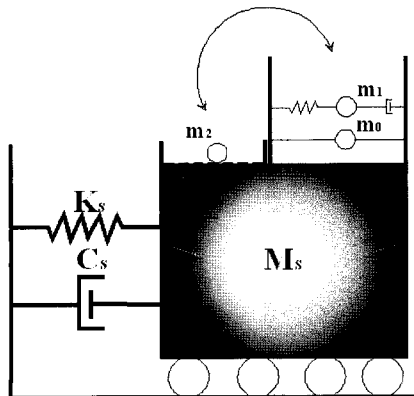


그림 3 Sloshing-Slamming 모델 개요

### 3. 진동대 실험

본 연구에서는 가진하중의 크기에 따른 형상비별 TLD의 성능을 평가하기 위해 실험체의 형상비를 0.08부터 0.19까지 산정하여, 낮은 수심과 깊은 수심을 모두 고려하여 실험을 수행하였다.

#### 3.1 실험개요

표 1과 사진 1은 각각 실험체 제원과 설치형상을 나타낸 것이다. 액체로 인해 발생하는 전단력을 측정하기 위해 TLD 밑면에 로드셀을 설치하였고, 파고를 측정하기 위해 파고계를 설치하였다. 그리고 진동대 바닥판의 가속도계를 설치하여 실제로 구현된 가속도를 측정하였다.

표 1 실험체 제원

실험체명	길이 (L,mm)	폭 (B,mm)	수심 (h,mm)	고유진동수 (Fd,Hz)	형상비 (h/L)
L300H24	300	200	24	0.80	0.08
L300H30	300	200	30	0.89	0.10
L300H36	300	200	36	0.97	0.12
L300H45	300	200	45	1.07	0.15
L300H51	300	200	51	1.23	0.17
L300H57	300	200	57	1.18	0.19
L400H32	400	260	32	0.62	0.08
L400H40	400	260	40	0.77	0.10
L400H48	400	260	48	0.84	0.12
L400H60	400	260	60	0.93	0.15
L400H68	400	260	68	0.98	0.17
L400H76	400	260	76	1.02	0.19
L450H36	450	185	36	0.65	0.08
L450H45	450	185	45	0.73	0.10
L450H54	450	185	54	0.79	0.12
L450H67.5	450	185	67.5	0.87	0.15
L450H76.5	450	185	76.5	0.92	0.17
L450H85.5	450	185	85.5	0.96	0.19

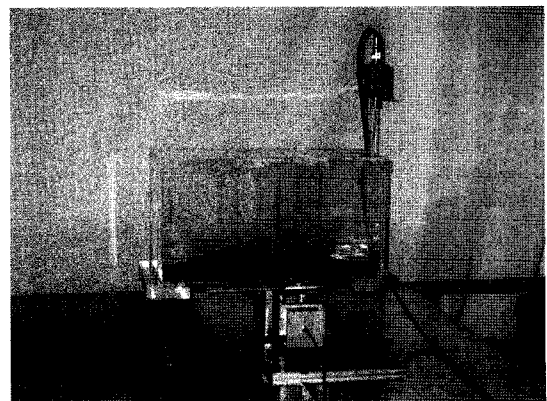


사진 1 TLD 및 계측센서 설치형상

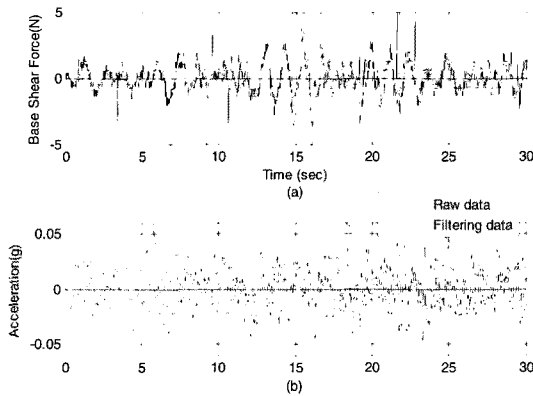


그림 4 필터링 후 응답시간이력

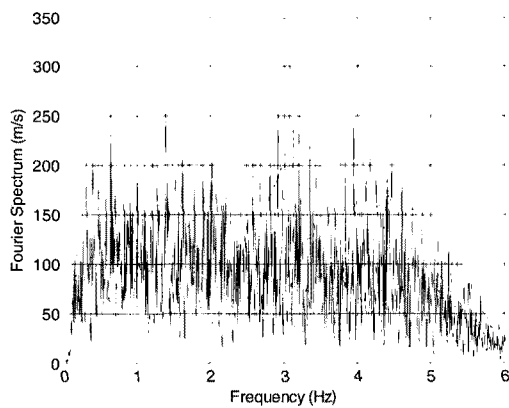


그림 5 가속도응답 FFT (최대 가속도 0.02g)

### 3.2 가진조건 및 데이터 처리

0~4Hz의 주파수 범위를 갖는 백색잡음을 최대가속도 0.02~0.12g까지 0.02g 간격으로 400초 동안 가진하였다.

그림 4는 최대가속도 0.02g로 가진하여 발생한 TLD의 밀면전단력 및 바닥판 가속도를 계측하여 얻은 응답시간이력을 나타낸 것이다. 전원 고주파에 의한 데이터 왜곡을 제거하기 위해 4Hz로 로우패스필터(Low Pass Filter) 처리를 하였다. 그림 5를 통해 구현된 백색잡음이 푸리에스펙트럼이 4Hz까지 일정한 것을 확인 할 수 있다.

#### 3.2.1 전단력전달함수 해석식

진동대 실험을 통해 계측된 TLD의 밀면전단력을 사용하여 감쇠비, 고유진동수 그리고 유효질량을 추출하기 위하여 TLD의 해석모델을 구성하였다. 지진하중을 받는 단자유도계 운동방정식은 식 (8)과 같다.

$$m_e \ddot{x} + c \dot{x} + kx = -m_e \ddot{x}_g \quad (8)$$

여기서,  $m_e$ 는 TLD의 유효질량,  $x$ ,  $\dot{x}$  그리고  $\ddot{x}$ 는 각각 TLD 변위, 속도 그리고 가속도,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도를 나

타낸다.

양변을 라플라스 변환하여 정리하면 식 (9)과 같다.

$$|\ddot{x}_g| = \sqrt{(\omega_d^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_d \omega_d \omega)^2} |X(s)| \quad (9)$$

여기서,  $\omega_d$ ,  $\zeta_d$ 는 각각 TLD의 고유각진동수 (rad/sec) 와 감쇠비,  $\omega$ 는 구조물의 고유진동수이다.

식 (8)을 변형하여 다시 정리하면,

$$c\dot{x} + kx = -m_e \ddot{x} - m_e \ddot{x}_g \quad (10)$$

식 (10)의 양변을 라플라스 변환하여 정리하면 식 (11)과 같다.

$$|x + \ddot{x}_g| = \sqrt{\omega_d^4 + (2\zeta_d \omega_d \omega)^2} |X(s)| \quad (11)$$

지반가속도에 대한 전단력 전달함수는 각각의 크기의 비로 정의할 수 있으며, 따라서 다음 식과 같이 표현된다.

$$\frac{m_e \times |(\ddot{x} + \ddot{x}_g)|}{|\ddot{x}_g|} = m_e \times \sqrt{\frac{\omega_d^4 + (2\zeta_d \omega_d \omega)^2}{(\omega_d^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta_d \omega_d \omega)^2}} \quad (12)$$

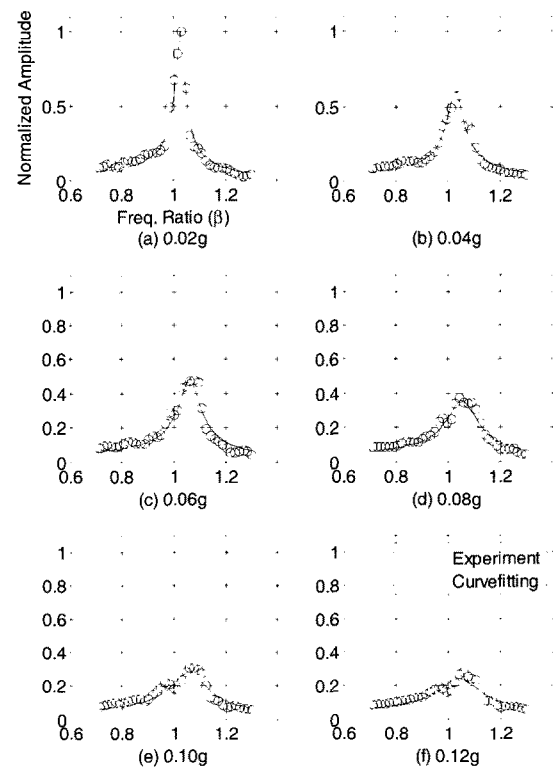


그림 6 입력하중 크기에 따른 실험값과 해석값의 곡선맞춤 ( $L=400$ ,  $\epsilon=0.10$ )

3.2.2 곡선맞춤을 통한 TLD 시스템식별

3.2.1항에서 유도한 해석식과 실험을 통해 측정된 값을 Matlab의 lsqcurvefit 함수를 사용하여 TLD의 감쇠비, 고유진동수 및 유효질량을 추출하였다. 곡선맞춤은 진동수비 0.7~1.3 범위의 데이터를 사용하였으며, 그림 6은  $L = 400$ ,

$\epsilon = 0.10$  실험체에 대한 실험값과 해석값을 비교한 것으로 X축은 고유진동수비이고, Y축은 0.02g 크기의 백색잡음을 받는 TLD의 밀면전단력 최대응답에 대하여 정규화한 값이다.

그림 7~9는 각각 곡선 맞춤을 통해 얻은 무차원가속도에 따른 형상비별 감쇠비, 고유진동수비 및 유효질량비이다.

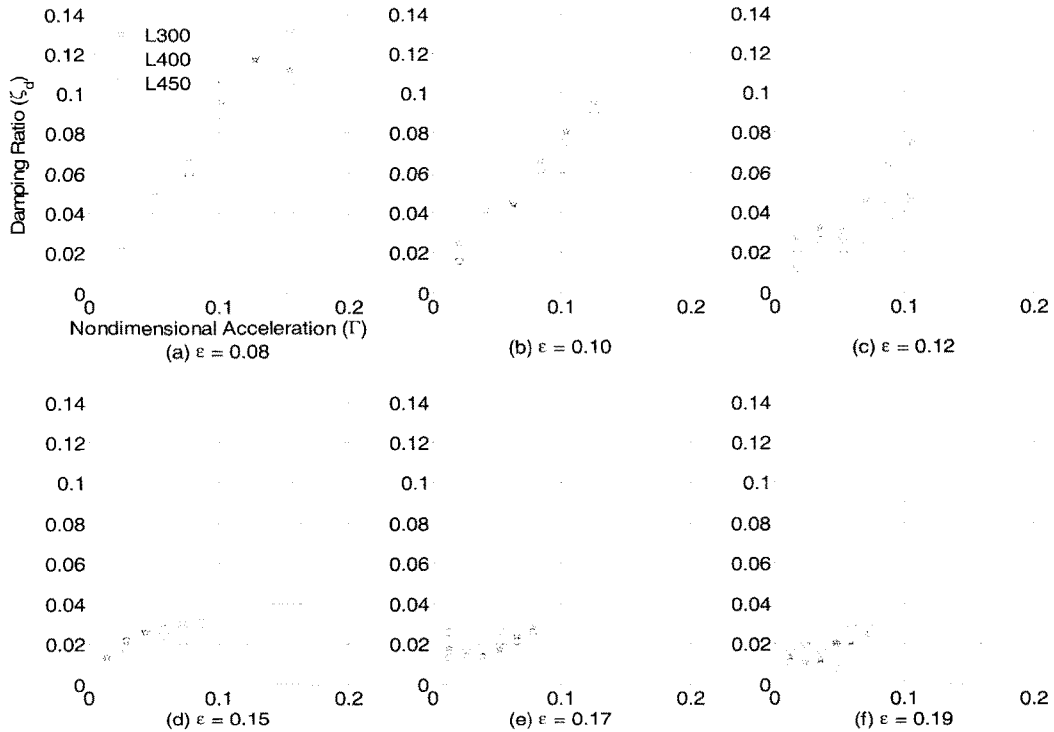


그림 7 형상비별 무차원가속도에 따른 감쇠비 변화

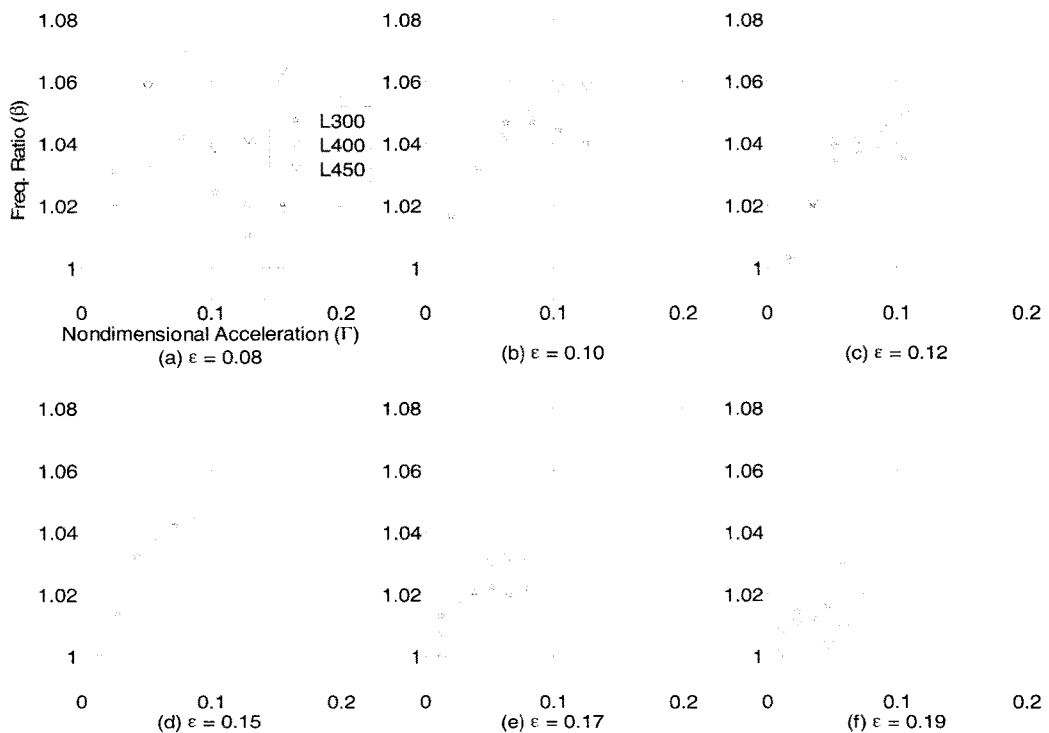


그림 8 형상비별 무차원가속도에 따른 고유진동수비 변화

무차원가속도  $\Gamma$ 는 다음과 같다.

$$\Gamma = \frac{\ddot{x}_g}{\omega_d^2 L} = \frac{\ddot{x}_g}{g\pi \tanh(\pi\epsilon)} \quad (13)$$

고유진동수비와 유효질량비는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{f_d}{f_w} \quad \mu = \frac{m_e}{m_t} \quad (14)$$

그림 7에서 보는 바와 같이 낮은 수심 TLD가 무차원가속도에 따른 감쇠비의 변화가 매우 큰 것으로 나타났다. 형상비 0.08일 때 감쇠비가 최소 2.38에서 최대 12.28까지 5배 이상 차이가 난다. 이는 설계 시 중요한 변수로 작용할 것으로 판단된다. 하지만 깊은 수심 TLD의 감쇠비 변화는 2~4% 내외로 매우 작게 평가되어 가진 하중 크기에 대한 의존성이 크지 않은 것을 알 수 있다.

그림 8은 TLD 형상비별 고유진동수비의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8(a)~(c)에서와 같이 낮은 수심 TLD는 무차원가속도 증가에 따라 고유진동수비가 증가하여 최대 6%의 차이를 보이고 있으나, 그림 8(d)~(f)와 같이 형상비가 증가할수록 고유진동수비의 변화는 4%미만으로 작게 나타나 비선형 거동이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 그림 9의 유효질량비 변화경향은 전체적으로 선형과동이론에 근거한 유효질량 보다 매우 작게 나타났으며, 특히 낮은 수심에

서 가장 낮은 경우 전체질량의 약 55%만 제어력에 참여하는 것으로 나타났다. 이는 TLD의 비선형성으로 낮은 수심의 경우 가진 하중에 따라 파의 부서짐과 출렁임으로 인해 실제 거동하는 액체의 질량 변화가 불안정한 것으로 판단된다. 따라서 특정 진동수 성분을 갖지 않는 형태의 하중이 작용했을 때, TLD의 유효질량의 변화는 일정한 경향을 찾기 어려웠다. 하지만 낮은 수심 보다 깊은 수심의 경우 가진 하중이 증가할수록 유효질량이 감소하는 경향을 찾을 수 있다. 즉 백색잡음 형태의 하중이 작용할 때 깊은 수심 TLD는 가진 하중의 최대 가속도 크기가 증가할수록 유효 질량이 감소하는 것을 알 수 있다.

#### 4. TLD 설계변수 산정식

동적 데이터를 이용하여 TLD의 시스템 식별 결과로 도출된 감쇠비와 고유진동수 및 유효질량을 이용하여 백색잡음 형태의 특정 진동수에 지배되지 않는 하중에 대한 설계 변수를 산정하였다.

##### 4.1 감쇠비 산정

그림 7에서 보는 바와 같이 낮은 수심인 경우 감쇠비는 하중이 증가할수록 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다.

합리적인 감쇠비 산정식을 제안하기 위해 낮은 수심과 높

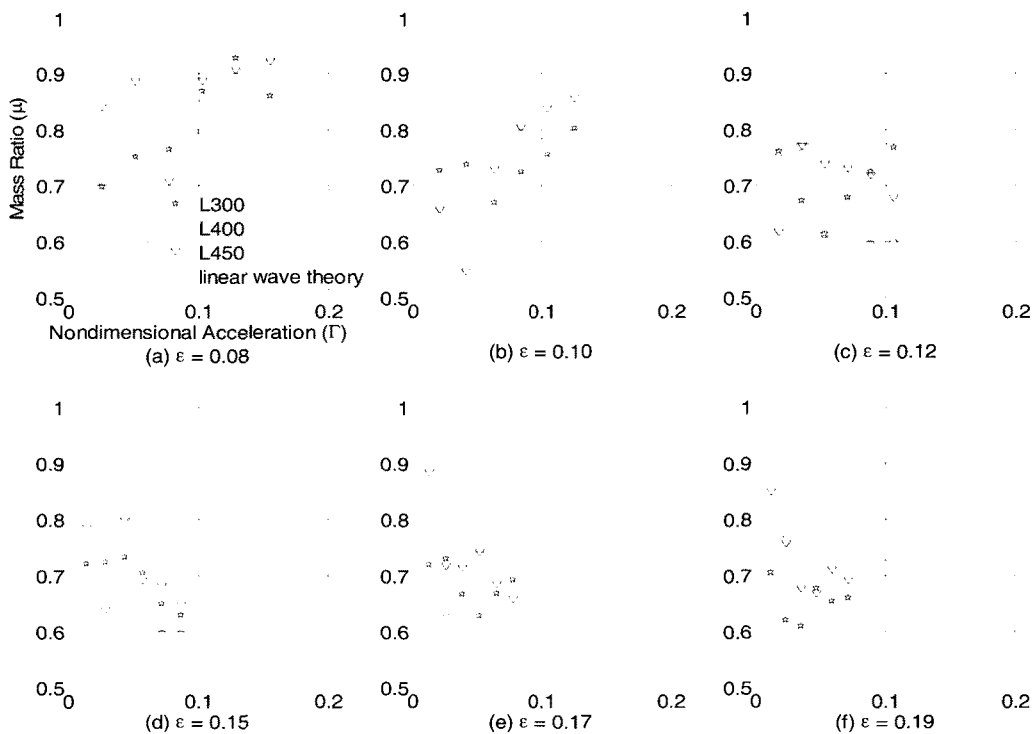


그림 9 형상비별 무차원가속도에 따른 유효질량비 변화

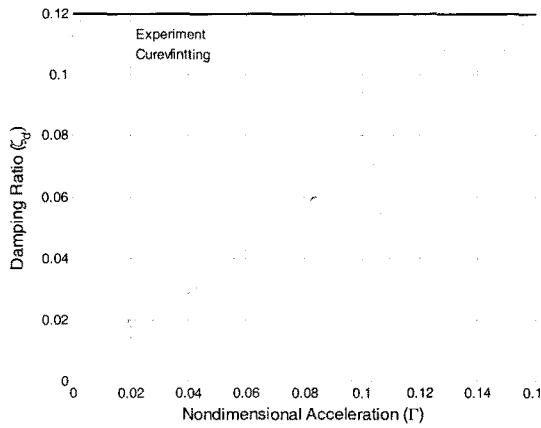


그림 10 감쇠비 곡선맞춤(낮은 수심)

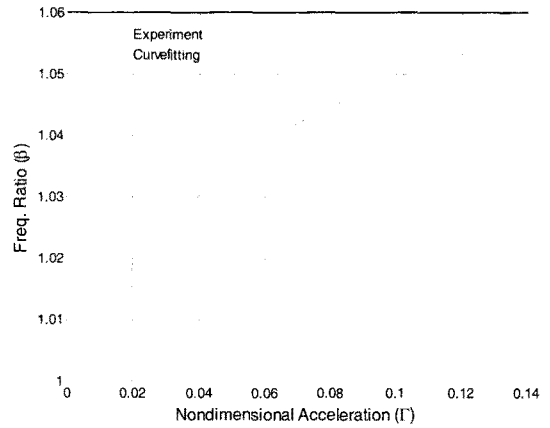


그림 12 고유진동수비 곡선맞춤(낮은 수심)

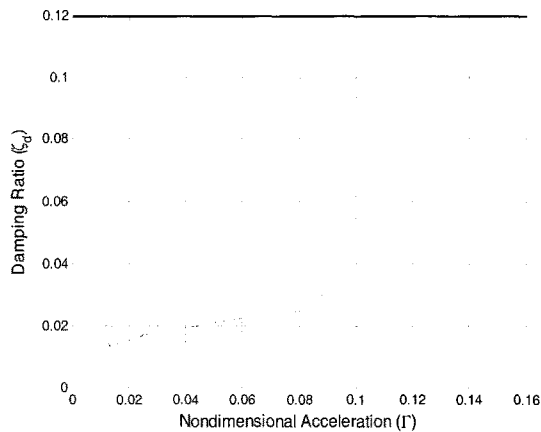


그림 11 감쇠비 곡선맞춤(깊은 수심)

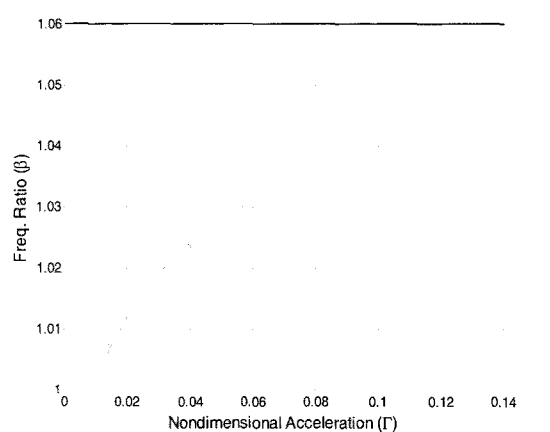


그림 13 고유진동수비 곡선맞춤(깊은 수심)

은 수심을 분류하여 각 무차원가속도에 해당하는 데이터의 평균값을 취해 곡선 맞춤을 하였다. 곡선 맞춤은 Matlab의 lsqcurvefit 함수를 사용하여 산정식과 실험값의 오차를 최소화하는 계수를 구하였다. 그림 10과 그림 11은 각각 실험값과 산정식에 의한 감쇠비 곡선의 비교를 보여준다.

이 때 결정계수는 각각  $R^2=0.8517$ 과  $R^2=0.6054$ 을 가진다. 하중 형태가 특정진동수에 지배를 받지 않을 경우 무차원가속도에 의해 TLD의 감쇠비가 결정된다. 백색잡음을 받는 TLD의 감쇠비 산정식은 다음과 같다.

$$\text{낮은 수심 } \xi_d = 0.738 \Gamma^{1.012} \quad (15)$$

$$\text{깊은 수심 } \xi_d = 0.057 \Gamma^{0.333} \quad (16)$$

#### 4.2 고유진동수비 산정

감쇠비와 동일하게 합리적인 고유진동수비 산정을 위해 각 낮은 수심과 높은 수심의 TLD 고유진동수비를 분류하여 각 무차원가속도에 해당하는 고유진동수비의 평균값을 곡선

맞춤 하였다. 단, 낮은 수심의 경우 실험 오차로 판단된 고유진동수비 1.0222, 1.0298을 제외하였다. 다음 그림 12와 그림 13은 각각 곡선 맞춤 나타낸다. 이 때 결정계수는 각각  $R^2=0.7463$ 과  $R^2=0.7261$ 을 가진다. 따라서, 백색잡음을 받는 TLD의 고유진동수비 산정식은 다음과 같다.

$$\text{낮은 수심 } \beta = 1.10 \Gamma^{0.020} \quad (17)$$

$$\text{깊은 수심 } \beta = 1.08 \Gamma^{0.017} \quad (18)$$

동조액체감쇠기의 고유진동수는 낮은 수심인 경우 백색잡음 형태의 가진 하중 크기가 증가할수록 최대 5% 정도 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 4.3 유효질량비 산정

그림 14와 그림 15에서 보는 바와 같이 유효질량비는 각 각형상비에 따른 선형과동이론에 의한 1차 모드 유효질량보다 매우 적게 평가되었다.

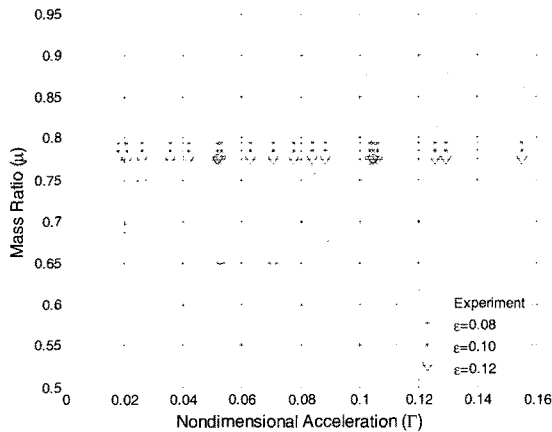


그림 14 유효질량비(낮은 수심)

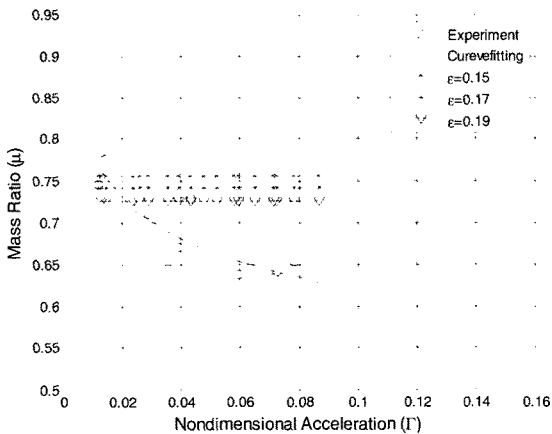


그림 15 유효질량비 곡선맞춤(깊은 수심)

TLD 낮은 수심의 경우 유체의 출렁임과 부딪힘 현상과 같은 비선형 현상이 강하게 나타나, 유효질량이 매우 불안정한 경향을 보였다. 따라서 설계를 위해 백색잡음을 받는 낮은 수심 TLD의 경우 고려되는 하중 크기가 무차원가속도 0.1이하일 때 유효질량은 전체질량의 65%정도로 평가하고 그 이상의 하중 크기를 받는 TLD의 경우 전체질량의 85%로 평가해야 할 것으로 판단된다. 깊은 수심의 TLD는 비교적 안정적인 거동을 보이고 있다. 하지만 기존 연구에서 조화하중을 받는 TLD와 다르게 가진 하중의 크기가 증가할수록 유효질량이 감소하는 현상을 보였다. 유효질량비 산정식은 깊은 수심 TLD에 대해서만 다음과 같이 산정할 수 있다. 이때의 결정계수  $R^2 = 0.7851$ 을 가진다.

$$\text{깊은 수심 } \mu = 0.492 \Gamma^{-0.101} \quad (19)$$

### 5. 결 론

동적 데이터를 이용한 TLD의 시스템 식별에 관한 연구를

통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) TLD가 백색잡음 형태의 하중을 받을 경우, 낮은 수심은 최대 약 12%까지 급격한 감쇠비의 증가와 함께 가진 하중의 크기가 증가할수록 최대 응답을 보이는 진동수가 6%까지 증가한다. 또한 실제 제어력에 참여하는 유효질량은 가장 작은 경우 평균적으로 전체 질량의 65%정도로 이는 선형파동이론에 근거한 1차 모드 질량보다 매우 작게 평가된 값이다.
- 2) 깊은 수심의 경우 감쇠비 변화는 2~4% 내외로 작게 나타났으며, 최대응답을 보이는 진동수의 변화 또한 매우 작게 나타났다. 따라서 감쇠비의 효과는 미미하지만 구조물에 적용 시 낮은 수심 보다 고유진동수 변화의 안정적 거동으로 인해 구조물에 동조시키기에는 용이할 것으로 판단된다. 유효질량은 낮은 수심과 마찬가지로 기존의 선형파동이론에 의한 질량보다 적게 평가되었으며, 특히 가진 하중이 증가할수록 점점 감소하는 경향이 나타났다.
- 3) 동적 데이터를 이용하여 시스템 식별을 통한 TLD의 설계 변수를 추출하여 실제 구조물 적용 시 합리적으로 감쇠비와 고유진동수 및 유효질량을 대략적으로 평가할 수 있는 산정식을 제안하였다.
- 4) 본 연구를 통해 도출된 산정식을 사용하여 지진하중을 받는 TLD에 대한 비선형동적특성 파악을 위한 추가적인 실험 및 해석적 연구가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 2005년도 첨단도시개발사업(과제번호 : 05-건설핵심 D06)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

### 참 고 문 헌

유기표, 조지은, 김영문 (2006) 동조액체댐퍼의 감쇠율 증가를 위한 진동대 실험, 대한건축학회논문집 구조계, 22(3), pp.53~61.

이재훈, 박성우, 조진래 (2007) 고층건물 내진설계용 TLD의 감쇠성능 파라메트릭 해석, 한국전산구조공학회 학술발표대회 논문집, pp.783~788.

주영규, 정석창, 유은중, 김대영, 최 항, 박철림 (1998) 동조액체감쇠장치의 등가감쇠계수 산정에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 18(2), pp.141~146.

홍갑표, 이영학 (1999) 건축구조물의 진동제어를 위한 칸막이형 동조액체감쇠기의 적용성에 관한 연구, 대한건축학회 논문집 구조계, 15(1), pp.11~18.

Chen, Y. H., Hwang, W. S., Chiu, L. T., Sheu, S. M.



- (1995) Flexibility of TLD to High-Rise Building by Simple Experiment and Comparison, *Computers & Structures*, 57(5), pp.855~861.
- Dorothy Reed, Jinkyu Yu, Harry Yeh, Sigurdur Gardarsson** (1998) Investigation of Tuned Liquid Dampers under Large Amplitude Excitation, *Journal of Engineering Mechanics*, pp.405~413.
- Jinkyu Yu, Toshihiro Wakahara, Dorothy A. Reed** (1999) A Non-linear Numerical Model of The Tuned Liquid Damper, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, pp.671~686.
- Olson, D. E., Reed, D. A.** (2001) A nonlinear numerical model for sloped-bottom tuned liquid dampers, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 30, pp.731~743.
- Pradipta Banerji, Mohan Murudi, Arvind H. Shah, Neil Popplewell** (2000) Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 29.
- Sun, L. M., Fujino, Y., Pacheco, B. M., Chairseri P.** (1992) Modeling of Tuned Liquid Damper (TLD), *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41-44, pp.1883~1894.
- Swaroop Krishna Yalla** (2001) Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response: Theoretical Development and Experimental Validation. Department of Civil Engineering and Geological Sciences Notre Dame, Indiana.