

진동대실험에 의한 동조액체기둥감쇠기의 동적특성

Dynamic Characteristics of Tuned Liquid Column Dampers Using Shaking Table Test

민 경 원* · 박 은 천*

Kyung-Won Min and Eunchurn Park

(2009년 4월 2일 접수 ; 2009년 5월 27일 심사완료)

Key Words : Tuned Liquid Column Damper(동조액체기둥감쇠기), Shaking Table Test(진동대 실험), System Identification(시스템 식별), Transfer Function(전달함수), Effective Mass(유효질량), Head Loss Coefficient(수두손실계수), Natural Frequency(고유주파수)

ABSTRACT

Shaking table test was carried out to obtain dynamic characteristics of TLCDs with uniform and non-uniform sections for both horizontal and vertical tubes. The input to the table is harmonic acceleration with constant magnitude. The output is horizontal dynamic force which is measured by load cell installed below the TLCD. Transfer functions are experimentally obtained using the ratio of input and output. Natural frequency, the most important design factor, is compared to that by theoretical equation for TLCDs with five different water levels. System identification process is performed for experimentally obtained transfer functions to find the dynamic characteristics of head loss coefficient and effective mass of TLCDs. It is found that their magnitudes are larger for a TLCD with non-uniform section than with uniform section and natural frequencies are close to theoretical ones.

1. 서 론

동조질량감쇠기(tuned mass damper, 이하 TMD라 칭함.) 및 동조액체기둥감쇠기(tuned liquid column damper, 이하 TLCD라 칭함.)와 같은 수동형 감쇠기가 지진 및 바람과 같은 동적하중에 대한 구조적 안전성을 확보와 사용성 증대를 목적으로 개발되어왔다. TMD와 TLCD가 실제 건물에 적용되었으며 제어성능도 입증되었다^(1,2). 질량체, 감쇠 및 스프링으로 구성된 TMD는 스프링의 강성을 조절하여 건물의 고유주파수에 동조시킴으로써 동적응답을 감소시키기 때문에, 동조가 용이하고 설치공간

이 적게 소요된다는 장점을 가지고 있으나 질량체, 감쇠 및 스프링 시스템을 유지하기 위한 관리가 필요하다. 대표적인 액체형 감쇠기의 하나인 U형태의 TLCD는 수직관 및 수평관의 기하학적 크기 및 내부 물의 수위를 조절하여 건물의 고유주파수에 동조시킨다. 따라서, 설치 및 유지관리가 용이하고 감쇠기를 위한 추가적인 설비가 필요 없이 옥상층의 고가수조를 직접 액체형 댐퍼로 활용할 수 있다는 장점이 있다. TLCD는 일반적으로 수평관과 수직관의 단면이 동일한 감쇠기를 칭한다⁽³⁾. TLCD의 수평관과 수직관의 단면이 다른 변단면 동조액체기둥감쇠기는 Hitchcock등에 의하여 처음 연구되었으며 TLCD와 구분하기 위하여 명칭을 liquid column vibration absorber라고 하였다. 그러나 이 논문에서는 단면 크기의 구분 없이 TLCD라고 칭하는 것이 합리적이라 판단하여 이 명칭을 쓰기로 한다. TLCD의

† 교신저자; 정회원, 단국대학교 건축공학과
E-mail : kwmin@dankook.ac.kr
Tel : (031)8005-3734, Fax : (031)8005-3755
* 단국대학교 건축공학과

중요한 설계변수는 고유주파수다. 이것을 제어대상인 건물의 1차 고유주파수에 동조시킴으로써 건물을 제어하는 것이다. 건물 완공 후 건물의 1차 고유주파수가 일반적으로 변화하기 때문에 제작된 감쇠기를 재동조 시키는 작업을 다시 수행하여야 한다. 이러한 점에서 TLCD는 물이 차 있는 관의 길이와 수직관과 수평관의 단면적 비로 고유주파수를 설계할 수 있는 다양성이 있다. 이 논문에서는 단면적 비가 일정한 것과 다른 것을 제작하여 물 높이를 변화시켜 진동대 실험을 수행하였다. Hitchcock의 연구에서도 자유진동 실험을 수행하여 고유주파수 분석을 한 바 있다^(4,5). 이후 여러 연구자들에 의해 TLCD 관련연구가 수행되어 왔다⁽⁶⁻¹¹⁾. 이들 연구는 건물의 최적 진동 제어 성능에 관한 수치해석적인 연구를 다루고 있다. 실험적인 연구도 진동제어 성능의 검증에 머물러 있어 실험결과에 근거한 TLCD의 동적특성에 대한 정량적 평가는 이루어지지 않았다.

이 연구의 목적은 TLCD자체의 동적특성을 실험적으로 파악하고 해석적인 전달함수식을 유도한 다음, 실험으로 구한 전달함수와의 비교를 통한 시스템 식별과정을 거쳐 주요변수의 특성을 구하여 기존의 이론값과 비교분석 하는 것이다. 이 논문에서는 TLCD의 동적특성을 파악하기 위하여 진동대 위에 TLCD를 설치하여 가진을 하였다. 진동대 입력크기인 가속도를 일정하게 유지하면서 입력주파수만 점진적으로 증가시키는 조화가진을 TLCD에 하였다. TLCD하부에 전단형 로드셀(shear type load cell)을 설치하여 출력인 동하중을 계측하였다. 출력대 입력의 비인 전달함수를 입력주파수 별로 구하여 시스템 식별 작업을 수행하였다. 중요한 동특성인 고유주파수, 수두손실계수와 유효질량을 구하여 분석하였다. 유효질량은 물 전체질량과는 달리 수평관에서 운동하는 질량으로 횡응답을 제어하는데 효과적이다. 수두손실계수는 수평관의 오리피스(orifice)로 인하여 나타나는데 이 실험에서는 오리피스 없이 물과 관의 마찰 및 수직관과 수평관의 직각 연결부에서의 물의 불규칙 흐름으로 인한 영향을 알아보기 위하여 실험에 의하여 특성을 파악하였다. TLCD의 감쇠상수항은 물의 속도에 관계된 비선형 특성을 가지고 있으나 등가선형감쇠로 치환하였다^(6,10). 파고계(wave height meter)로 수위를 계측하여 등가선형

감쇠상수를 유도하고 수두손실계수를 구하였다.

2. TLCD 실험

2.1 TLCD 운동방정식

Fig. 1에 기반가속도 \ddot{x} 을 받는 TLCD가 나타나 있다. 관 내부 물의 운동에 의해 건물의 횡방향 진동을 흡수하는 감쇠기이다. 수직관의 물은 원위치로 가려는 복원운동을 하며 수평관의 물은 수평운동을 하여 실제로 건물의 수평응답을 감소시키는 제어력 역할을 한다. 기반가속도를 받는 TLCD의 운동방정식은 다음과 같다⁽³⁾.

$$\begin{aligned} \rho A_h v L_e \ddot{x}_i + (1/2)\rho A_h v^2 \eta |\dot{x}_i| \dot{x}_i + \\ 2\rho A_h g v x_i = -\rho A_h v L_h \ddot{X} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_i 은 TLCD 수직관의 물 표면의 수직변위이고, ρ 는 물의 밀도, η 는 TLCD의 수두손실계수를 나타낸다. H 는 수위(wave height)이다. L_h 와 L_v 는 각각 수평관 및 수직관의 물 길이를 나타내며, A_h 와 A_v 는 각각 TLCD의 수평관 및 수직관의 단면적을 나타낸다. $v=A_v/A_h$ 는 수직관과 수평관의 단면적 비로 일반적으로 1이하다.

식(2)는 TLCD의 유효길이를 나타내며, TLCD의 물 고유주파수는 식(3)과 같다⁽⁴⁾.

$$L_e = v L_h + 2 L_v \quad (2)$$

$$f_n = \frac{\sqrt{2g/L_e}}{2\pi} \quad (3)$$

여기서, g 는 중력가속도이며 수평 및 수직관의 단면적이 같을 경우 v 는 1이 되나 다를 경우 수평변위는

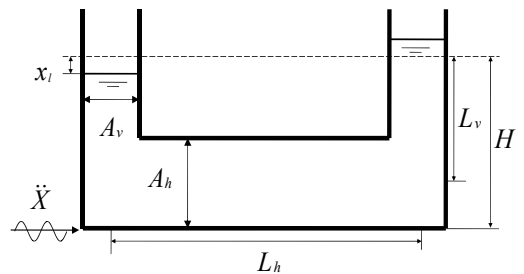


Fig. 1 Conceptual view of a TLCD

수직변위 x_i 와 다르게 되므로 이를 보정해 주는 변수이다.

Fig. 2와 같이 수직관 및 수평관의 단면이 동일한 TLCD와 다른 TLCD를 제작하였다. 진동대의 성능등을 고려하여 TLCD의 크기를 정하였다. Fig. 2(a)는 동일한 단면의 TLCD이고 Fig. 2(b)는 단면비가 18/44=0.41인 TLCD이다. 수평관의 물 흐름이 제어력으로 주되게 작용하기 때문에 수평관의 단면을 수직관보다 크게 한다. 단면비가 1보다 큰 경우는 실제인 경우에는 없다. 따라서 이 연구에서도 단

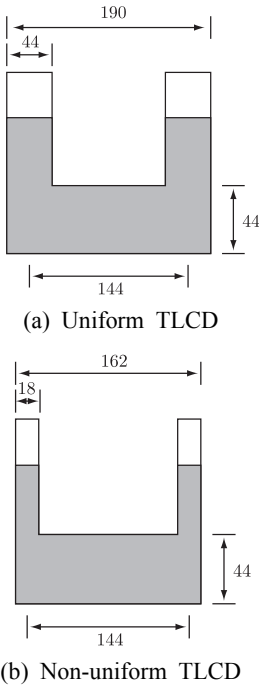


Fig. 2 Test specimens of TLCD (unit : mm)

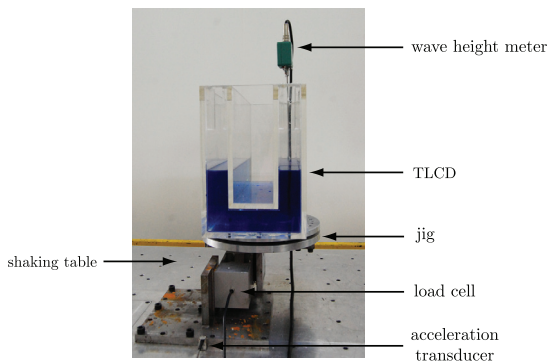


Fig. 3 Installation of TLCD

면비가 1보다 작은 경우를 택하였다.

Fig. 3과 같이 TLCD는 투명 아크릴로 제작하였으며 진동대 사이에 설치판인 지그(jig)와 힘을 계측하는 로드셀이 있다. TLCD의 주요 설계변수인 고유주파수, 수두손실계수 및 유효질량을 정량적으로 평가하기 위하여 진동대와 TLCD 사이에 전단형 로드셀을 설치하였다. TLCD 운동에 의한 수평방향의 힘이 계측된다. 가속도계가 진동대에 설치되어 입력가속도를 계측하였다. 수직관에 파고계를 설치하여 물의 수위를 측정하였다.

TLCD의 동적특성 파악하기 위하여 지그 상부에 설치된 실험체를 일축 진동대에 의해 가진하였다. 그리고, 전단형 로드셀을 진동대와 TLCD 사이에 부착하였으며, 진동대의 동적특성을 모니터링하기 위해 가속도 센서를 진동대에 부착하였다. 데이터 수집과 디지털 제어는 실시간 디지털 신호 처리기(DSP)를 통해 수행되었다. 데이터 수집 보드는 측정된 가속도 및 로드셀 데이터를 측정하여 아날로그-디지털 변환하는 기능과 디지털-아날로그 변환하는 기능을 수행한다. 데이터 수집은 25 Hz 저주파수 통과 필터를 통과한 AD/DA보드인 NI PCI-6052E로 수집되는 시스템으로 이루어졌다. 모든 계측 및 가진은 Matlab Simulink의 real-time windows target으로 수행되었다⁽¹²⁻¹⁴⁾.

3. TLCD 실험

3.1 전달함수

진동수를 변화시키면서 일정한 크기의 가속도를 가지는 조화하중신호로 진동대를 가진하여 진동대 가속도와 TLCD에 의한 제어력을 계측하였다. 물 높이를 5가지, 즉 128 mm부터 170 mm까지 변화시켜 TLCD의 특성을 분석하였다. 높이변화를 Table 1과 같이 식 (2)의 유효길이로 변환하여 나타내었다.

Table 1 Effective lengths respect to wave heights (unit : mm)

Water height (H)	Effective length (L_e)	
	Uniform	Non-uniform
128	311	298
140	335	322
150	355	342
160	375	362
170	395	382

로드셀로 측정되는 수평방향 힘은 TLCD 수조, 수평관의 물, 부가질량 그리고 수직관의 물의 움직임에 의한 것이다. TLCD 수조와 물 전체 질량은 강체운동으로 입력진동인 \ddot{X} 의 가속도로 움직인다고 볼 수 있으며 정적질량이라 할 수 있다. 수조안의 물은 \ddot{X} 와는 다른 가속도로 움직이기 때문에 동적질량으로 작용한다. 다음 식 (4)와 같이 표현이 된다.

$$F(t) = (m_l + m_a)\ddot{X}(t) + m_e v \ddot{x}_l(t) \quad (4)$$

여기서, m_l 은 물 전체질량, m_a 는 수조와 지그 등의 부가질량이며 변하지 않는 정적질량이므로 미리 알 수 있다. \ddot{x}_l 는 수직관 수위의 가속도이며 수평관 가속도는 $v\ddot{x}_l$ 로 표현이 된다. 여기에 동적질량 m_e 의 성분이 곱해져 힘으로 측정이 된다.

식 (1)의 감쇠상수를 나타내는 항은 $(1/2)\rho A_h v^2 \eta |\dot{x}_l|$ 로서, 수직관 물의 속도인 $|\dot{x}_l|$ 이 있어 비선형이다. TLCD가 조화하중에 의해 가진되어 물의 수위를 $x_l = \phi_l \sin \omega t$ 로 가정할 경우, 한 사이클 동안의 비선형 감쇠에 의한 에너지 소산량과 등가점성감쇠에 의한 에너지 소산량이 동일하다는 조건에 의해 비선형 감쇠를 선형화 할 수 있다. 이것을 등가선형 감쇠상수 c_l 로 변환하면 다음 식 (5)와 같다^(6,10).

$$c_l = \frac{4}{3\pi} \rho A_h v^2 \eta \omega \phi_l \quad (5)$$

여기서, c_l 은 수두손실계수 η 와 수직관 물 수위의 최대값 ϕ_l 과 관계가 있다.

비선형 감쇠상수를 등가선형감쇠상수 c_l 로 치환하고 식 (1)와 식 (4)를 푸리에 변환하여 조합하면 가속도에 대한 힘의 전달함수를 구할 수 있다. 진동대에서 측정한 가속도와 로드셀에서 측정한 힘의 전달함수는 식 (6)과 같으며 ω_l 은 TLCD 물의 고유각진동수이다.

Fig. 4는 진동대에서 측정한 가속도를 입력으로 하고 전단형 로드셀로부터 측정한 제어력을 출력으로 하는 전달함수를 나타낸 것이다. 측정한 힘과 입력가속도로 나눈 전달함수이기에 단위는 동적 및

정적 성분을 나타내는 질량이다. 물 높이가 높아짐에 따라 TLCD의 물 질량이 증가하며 고유주파수는 낮아지는 것을 Fig. 4 및 5에서 관측할 수 있다.

m_e 는 제어력에 참여하는 유효질량이며 수평방향의 움직임을 나타내는 물의 질량으로 계속하여 나온 전달함수의 식별과정을 수행하여 얻을 수 있다. TLCD의 물이 거동하지 않는다고 가정하면, 즉 물과 TLCD가 같이 강체운동을 하는 경우 수직변위 x_l 이 0이 되므로 전체질량과 부가질량 만이 전달함수에서 나타난다. 이것은 식 (6)의 상수항 $m_l + m_a$ 으로 TLCD 전체질량을 나타낸다. 가진주파수가 낮을 때 즉, 정적하중으로 가하는 성질이 강할 때 전달함수 Fig. 4 및 5에서 왼쪽으로 갈수록 수렴되어 가는 것을 관측할 수 있다. 가진주파수가 TLCD 고유주파수가 가까워질수록 물의 움직임 즉 x_l 이 활발하게 되어 유효질량 m_e 의 효과가 나타나는 것이다. 다음 3.2절의 과정을 통해 식 (6)의 변수를 식별하였으며 결과를 Fig. 4 및 5에 나타내어 측정한 값과 비교하였다.

3.2 시스템 식별

이 연구에서는 식 (6)과 같은 해석적인 전달함수를 이용하여 LCVA의 동적특성을 정량적으로 평가하였다. 식 (6)을 이용하여 시스템식별을 수행하기 위해서, 수조 내부 물의 전체질량 m_l 과 추가적인 질량 m_a 는 측정값을 이용하였으며 ω_l 은 실험적인 전달함수로부터 구한 피크점에서의 진동수를 사용하였다. 이와 같은 변수 외에 나머지 변수들을 파라미터 $\mathbf{P} = [m_e, c_l]$ 로 설정하여 시스템 식별을 수행하였다. 시스템 식별파라미터를 수행하기 위해서 먼저, 다음 식과 같은 오차함수를 정의하였다.

$$E(\mathbf{P}) = \sum_{\omega=\omega_1}^{\omega_2} [\tilde{H}(i\omega) - H(\mathbf{P}, i\omega)]^2 \quad (7)$$

여기서, $\tilde{H}(i\omega)$ 는 Fig. 4 및 5에서 점선으로 표현된 실험적인 전달함수를 나타내며, $H(\mathbf{P}, i\omega)$ 는 식 (6)과 같은 해석적인 전달함수를 나타낸다. ω_1 과 ω_2 는 시스템식별 구간으로서 각각 $2 \times \pi \times 0.9 = 5.65$ rad/sec와 $2 \times \pi \times 1.5 = 9.43$ rad/sec를 나타낸다.

$$\frac{F(i\omega)}{\ddot{X}(i\omega)} = \frac{-(m_l^2 + m_l m_a - v m_e^2)\omega^2 + i(m_a + m_l)c_l \omega + m_l \omega_l^2 (m_a + m_l)}{-m_l \omega^2 + i c_l \omega + m_l \omega_l^2} \quad (6)$$

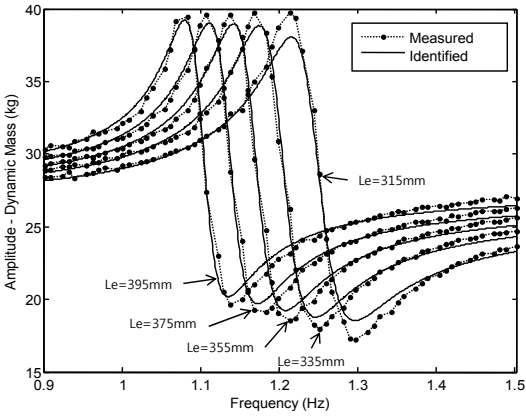


Fig. 4 Transfer function of non-uniform TLCD

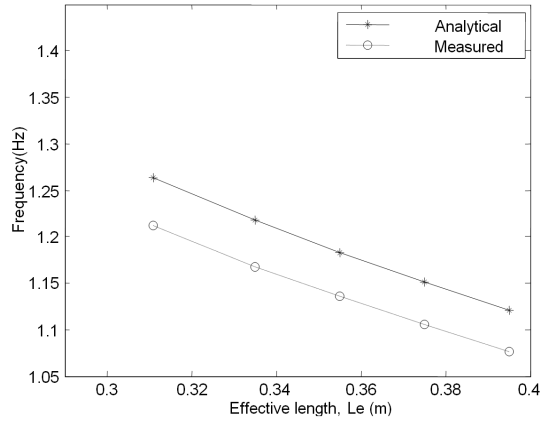


Fig. 6 Natural frequency of uniform TLCD

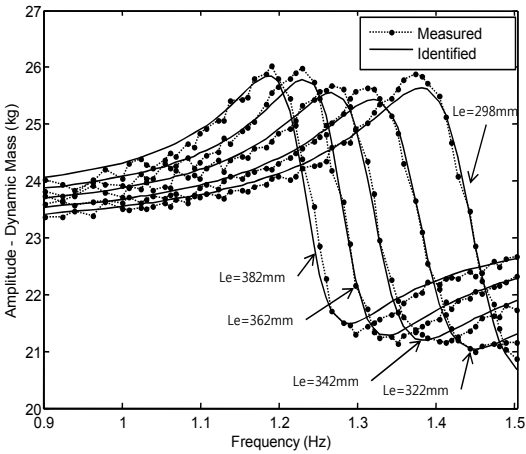


Fig. 5 Transfer function of uniform TLCD

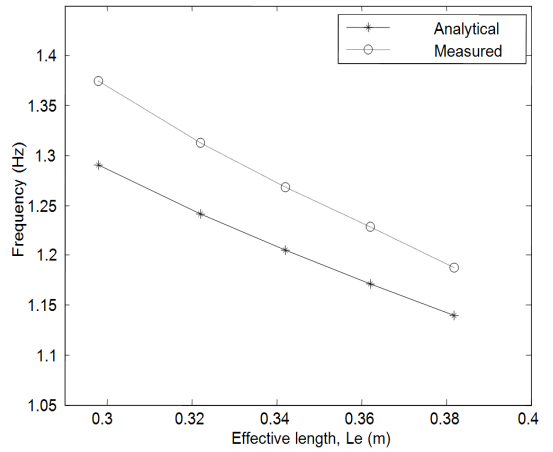


Fig. 7 Natural frequency of non-uniform TLCD

식 (7)과 같은 오차함수 이외에 다음 식과 같은 제한조건을 설정하였다.

$$m_e < m_i \quad (8)$$

이 연구의 시스템 식별은 식 (8)과 같은 제한조건을 갖는 식 (7)과 같은 오차함수를 최소화하는 최적화 문제이다.

이러한 최적화 문제는 최소자승법(least square method)에 기반한 Matlab의 내장함수 ‘fmincon’을 사용하여 구성할 수 있으며, 식별결과를 Fig. 4 및 5에 나타내어 예측한 값과 비교하였다. 두 결과가 매우 잘 일치하는 것으로부터, 식 (6)으로 표현된 해석적인 전달함수로 TLCD 실험체의 실제적인 동적거동을 정확하게 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.3 고유주파수

TLCD의 고유주파수는 전달함수의 최대값이 나타나는 곳으로 알아내어 이론적인 식 (3)에서 구한 고유주파수와 비교하였다. Fig. 6 및 7에서 알 수 있듯이 유효길이가 증가할수록 즉 물의 질량이 증가할수록 저주파수로 떨어지는 현상을 관측할 수 있다. 단면이 같은 TLCD의 경우 이론 고유주파수 식에 비해서 낮게 예측되었으며 단면이 다른 TLCD의 경우 이론고유주파수보다 크게 예측되었다. 그러나 그 차이는 크지 않으며, 구조물에 감쇠가 존재할 경우의 진동저감에 이러한 오차는 허용한도 이내인 것으로 판단된다.

3.4 수두손실계수

수두손실계수는 식 (1)에서와 같이 감쇠에 관계된

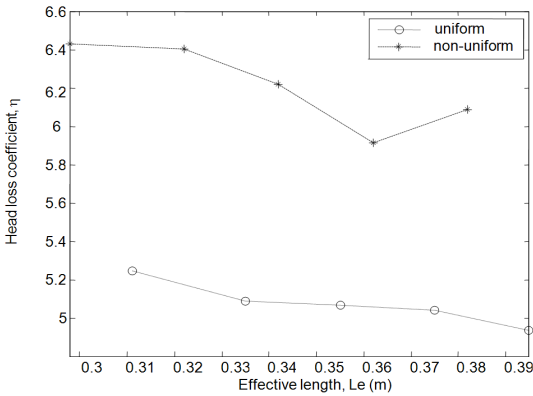


Fig. 8 Head loss coefficient of TLCDS

속도항에 있다. 물과 관과의 마찰, 수직관과 수평관이 꺾이는 엘보우(elbow)에서 불규칙한 물 흐름 등으로 인하여 나타나는 현상이다. 이 논문에서는 식 (6)에 있는 감쇠상수를 선형점성감쇠상수 c_f 로 가정하고 실험으로 구한 전달함수를 시스템 식별을 하여 구하였다. 수두손실계수는 식 (5)를 이용하여 유도하였다.

이론상으로 수두손실계수의 최적의 값이 존재하는데 설계 계수 값이 낮은 경우 수평관에 네트(net)나 오리피스 등을 설치하여 물의 흐름을 방해하여 값을 높인다. 높을 경우에는 인위적으로 낮추기가 어렵기 때문에 최적의 값을 이용하지 못하여 제어 효율이 떨어진다. 따라서 수두손실계수의 크기를 아는 것이 중요하다. Fig. 8은 실험을 통해 구한 각각 TLCDS의 유효길이에 따른 수두손실계수를 나타내었다. 유효길이가 증가할수록 수두손실계수가 감소하는 경향을 보이나 차이는 크지 않았다. 단면비가 다른 TLCDS의 수두손실계수가 단면비가 일정한 경우보다 크게 나타났는데 수평관과 수직관이 만나는 엘보우에서 물 흐름 교란이 많이 발생되었기 때문이라 판단된다.

3.5 유효질량비

가장 이상적인 TLCDS는 물의 질량이 모두 수평 제어력 즉, 유효질량으로 참여하는 경우이다. TLCDS는 수직관과 수평관으로 이루어져 있어 물의 질량은 각각 수직과 수평으로 움직인다. 수직관의 물의 질량은 중력가속도에 의하여 복원운동을 하며 수평관의 물의 질량은 수평진동으로 건물에 동조시켜 제어력에 참여하나 일부가 식 (4)에서 유효질량인

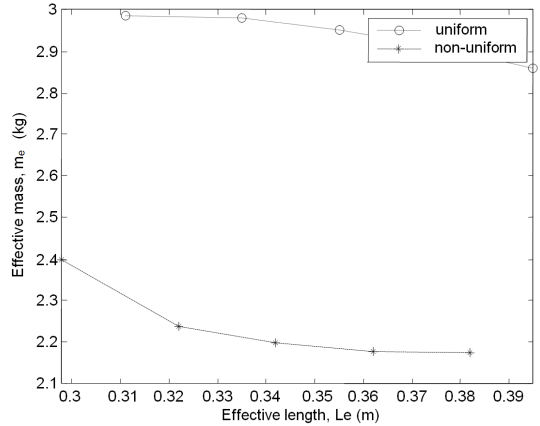


Fig. 9 Effective mass of TLCDS

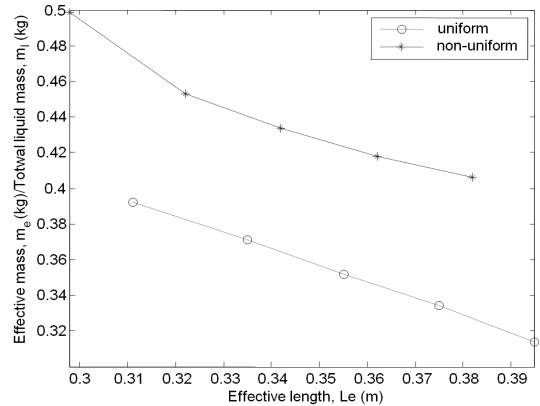


Fig. 10 Ratio of effective mass respect to total liquid mass of TLCDS

m_e 로 참여하여 제어력을 발휘한다. 전달함수의 식별과정을 통해 유효질량을 구하였다. Fig. 9는 유효길이에 따른 각각의 유효질량을 나타낸다. 이 연구에 사용된 non-uniform과 uniform TLCDS의 이론적인 유효질량은 각각 2.0 kg과 2.5 kg이지만, 두 경우 모두 이론값을 상회하는 것으로 나타났다. 유효길이가 증가할수록 유효질량은 감소하는 경향을 보인다. 이 연구에서는 물의 수위를 증가시켜 유효길이를 증가시켰으며, 물의 수위에 비례하여 수직관의 물에 의한 복원력이 증가하여 제어력에 참여하는 유효질량을 감소시키는 것으로 판단된다.

Fig. 10은 TLCDS의 물 전체질량에 대한 유효질량의 비를 나타낸다. 단면이 동일한 TLCDS의 경우 30~40% 정도의 질량이 제어력에 참여하는 것을 알 수 있으며, 이론값인 33~48%의 범위내에 포함되어 있

다. 단면이 다른 TLCD의 경우 40~50% 가량의 질량이 제어력에 참여하는 것을 알 수 있으며, 이론값인 54~70% 보다는 적게 평가되었다. 두 경우만 보면 단면이 다른 즉 수직관의 단면이 수평관의 단면보다 작을 때 전체 물 질량의 많은 부분이 제어력으로 작용하여 유리하다는 것을 알 수 있다. TLCD는 TMD와는 달리 수조가 필요하므로 추가 중량이 많이 요구된다. 물의 중량을 줄일 수 있으면 좋다. 단면이 일정한 경우보다 다른 경우가 물의 중량이 적기 때문에 유리하다.

4. 결 론

이 논문에서는 수직관 및 수평관의 단면적 비가 일정한 TLCD와 다른 TLCD를 제작하여 물높이를 변화시켜가며 진동대 실험을 수행하였다. TLCD의 동특성을 파악하기 위하여 진동대 위에 TLCD를 설치하여 가진을 하였다. 진동대 입력 크기인 가속도를 일정하게 유지하면서 입력주파수만 점진적으로 증가시키는 조화가진을 TLCD에 하였다. TLCD 하부에 전단형 로드셀을 설치하여 출력인 동하중을 측정하였다. 출력 대 입력의 비인 전달함수를 입력주파수 별로 구하여 시스템 식별 작업을 수행하였다. 중요한 동특성인 고유주파수, 수두손실계수와 유효질량을 구하여 분석하였다. 고유주파수는 이론식과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 감쇠상수를 선형점성감쇠상수로 가정하고 실험으로 구한 전달함수를 시스템 식별을 하여 수두손실계수를 구하였다. 유효길이가 증가할수록 수두손실계수가 감소하는 경향을 보이나 차이는 크지 않았다. 단면비가 다른 TLCD의 수두손실계수가 단면비가 일정한 경우보다 크게 나타났는데 수평관과 수직관이 만나는 엘보우에서 물 흐름 교란이 많이 발생되었기 때문이라 판단된다. 단면이 다른 즉 수직관의 단면이 수평관의 단면보다 작을 때 전체 물 질량의 많은 부분이 제어력으로 작용하여 유리하다는 것을 알 수 있다.

수직관과 수평관의 단면적 비가 각각 0.41 및 1.0인 두 종류의 TLCD에 대해서 실험을 수행하여, 유효질량과 관계된 TLCD의 설계파라미터가 기존의 이론값과 오차가 큰 것으로 나타났다. 추후 연구로서 여러 단면적 비를 가지는 TLCD에 대한 실험을

수행하여 실험식을 제시하고, 건물의 진동제어성능에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다. 또한 TLCD의 감쇠항이 응답의 속도에 관계된 비선형 특성을 나타내기 때문에 입력크기 변화에 따른 영향분석이 요구된다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.R01-2008-000-20796-0)

참 고 문 헌

- (1) Soong, T. T. and Dargush, G. F., 1997, "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering," John Wiley & Sons.
- (2) Heo, J. S., Park, E. C., Lee, S. H., Lee, S. K., Kim, H. J., Cho, B. H., Jo, J. S., Kim, D. Y. and Min, K. W., 2008, "A Tuned Liquid Mass Damper(TLMD) for Controlling Bi-directional Responses of a Building Structure," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 345~355.
- (3) Sakai, F., Takaeda, S. and Tamaki, T., 1989, "Tunes Liquid Column Damper-new Type Device for Suppression of Building Vibration," Proc. International Conference on High-rise Building, pp. 926~931.
- (4) Hitchcock, P. A., Kwok, K. C. S., Watkins, R. and Samali, D. B., 1997, "Characteristic of Liquid Column Vibrations Absorbers(TLCD)-I," Engineering Structures, Vol. 19, pp. 126~134.
- (5) Hitchcock, P. A., Kwok, K. C. S., Watkins, R. and Samali, D. B., 1997, "Characteristic of Liquid Column Vibrations Absorbers(TLCD)-II," Engineering Structures, Vol. 19, pp. 135~144.
- (6) Gao, H., Kwok, K. C. S. and Samali, B., 1997, "Optimization of Tuned Liquid Column Dampers," Engineering Structures, Vol. 19, pp. 476~486.
- (7) Chang, C. C. and Hsu, C. T., 1998, "Control Performance of Liquid Column Vibration Absorbers,"

Engineering Structures, Vol. 20, pp. 580~586.

(8) Balendra, T., Wang, C. M. and Rakesh G., 1998, "Effectiveness of TLCD on Various Structural Systems," Engineering Structures, Vol. 21, pp. 291~305.

(9) Yalla, S. K., 2001, "Liquid Dampers for Mitigation of Structural Response," Theoretical Development and Experimental Validation, Ph.D. Thesis, University of Notre Dame.

(10) Wu, J. C., Shin, M. H., Lin, Y. Y. and Shen, Y. C., 2005, "Design Guidelines for Tuned Liquid Column Damper for Structures Responding to Wind," Engineering Structures, Vol. 27, pp. 1893~1905.

(11) Heo, J. S., Park, E., Lee, S. K., Lee, S. H., Kim, H. J., Jo, J. S., Cho, B. H., Joo, S.-J. and Min, K. W., 2008, "Performance Test of a Tuned Liquid Mass Damper Installed in a Real-scaled Structure," Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 21, No. 2, pp. 161~168.

(12) The Math Works, 1999, Optimization Toolbox User's Guide, The MathWorks.

(13) The Math Works, Inc, 2007, Simulink Reference, MATLAB® SIMULINK®.

(14) The Math Works, Inc, 2007, Real-time Windows Target 3 User's Guide, MATLAB® SIMULINK®.