

TMD와 TLCD를 이용한 2방향 감쇠기의 동적특성

Dynamic Characteristic of A Bi-directional Damper
Using A Tuned Mass Damper and A Tuned Liquid Column Damper

이 성 경†

민 경 원*

박 은 천**

Lee, Sung-Kyung

Min, Kyung-Won

Park, Eunchurn

(논문접수일 : 2008년 11월 10일 ; 심사종료일 : 2008년 12월 15일)

요지

본 연구에서는 동조질량감쇠기(TMD)와 동조액체 기동감쇠기(TLCD)로 구성된 2방향 감쇠기의 제어성능을 실험적으로 검증하였다. 본 연구에 사용된 감쇠기는 한방향으로는 TMD로 거동하고, 다른 직교하는 방향에서는 LCD로 거동하여 제어력이 발생하는 감쇠기이다. 우선, 제작된 감쇠기의 동적특성과 TMD와 LCD에 의해 발생하는 제어력들의 연계효과를 조사하기 위한 진동대 실험을 수행하였다. 다음으로 이러한 실험결과를 바탕으로 감쇠기의 동적특성에 영향을 미치는 파라미터를 정량적으로 평가하였다. 본 연구에서 사용된 감쇠기가 입사각을 갖는 진동에 의해 가진될 때, TMD와 LCD에 의해 연계된 제어력이 발생하는 것을 진동대 실험결과로부터 확인하였다. 또한, 감쇠기가 건축물의 2방향 응답제어에도 효과적으로 사용될 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 동조질량감쇠기, 동조액체 기동감쇠기, 2방향 감쇠기, 연계된 제어력

Abstract

This study introduces the design of a bi-directional damper using a tuned mass damper(TMD) and a tuned liquid column damper(TLCD) and presents experimental verifications to confirm its control performance. The damper used in this study behaves as a TMD in a specific translational direction and acts as a TLCD in the other orthogonal direction. First, shaking table test is performed to investigate the coupled effect of control forces produced by TMD and TLCD. Then, the parameters that affect to dynamic characteristics of the proposed damper are quantitatively evaluated based on the experimental results. Testing results shows that the damper used in this study produces control forces coupled by TLCD and TMD, as it is excited by waves with an incident angle. Also, it is observed that the damper can be used to reduce bi-directional responses of building structures.

Keywords : tuned mass damper, tuned liquid column damper, coupled control force, bi-directional damper

1. 서 론

과거 수십년 동안, 여러 연구자들에 의해 동조질량감쇠기(TMD) 및 동조액체 기동감쇠기(TLCD)와 같은 수동형 감쇠기가 지진 및 바람과 같은 동적하중에 대한 구조적 안전성을 확보와 사용성 증대를 목적으로 개발되어 왔다. 또한, 이러한 수동형 감쇠기들이 실제 건축구조물에 적용되어 왔으며 제어성능도 입증되었다(Soong and Dargush, 1997). 질량체, 감쇠 및 스프링으로 구성된 TMD는 스프링의 강성을 조

절하여 구조물의 주기에 동조시킴으로써 동적응답을 감소시키기 때문에 동조가 용이하고 상대적으로 설치공간이 적게 소요된다는 장점을 가지고 있다. 대표적인 액체형 댐퍼의 하나인 TLCD는 수조의 기하학적 크기 및 내부 액체의 수위를 조절하여 건물의 기본주기에 동조시킨다. 따라서, 설치 및 유지관리가 용이하고 댐퍼를 위한 추가적인 설비가 필요없이 육상층의 고가수조를 직접 액체형 댐퍼로 활용할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 이러한 TMD와 TLCD의 장점을 결합한 감쇠기를 제작하여 제어성능을 실험적으로 검증하

† 책임저자, 정회원 · 단국대학교 건축공학과 연구원

* 교신저자, 정회원 · 단국대학교 건축공학과 교수

Tel: 031-8005-3734 : Fax: 031-8005-3755

E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

** 단국대학교 건축공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

고, 또한 감쇠기의 동적특성을 조사하여 설계파라미터를 정량적으로 평가하였다.

일반적으로, TMD나 액체형 댐퍼는 건물의 1방향 응답을 제어하기 위하여 사용되는 경우가 대부분이다. 최근에는 건물의 강축과 약축의 2방향 응답을 제어하기 위해 여러 개의 제어장치를 설치하거나 특별한 형태의 TLD 및 액체형 댐퍼를 사용하기도 한다. Zhang 등은 튜브형태의 수조를 건물의 강축과 약축으로 교차되게 배열하여 2방향 응답을 줄일 수 있는 액체형 댐퍼를 제안하였으며, 등가선형화된 댐퍼의 수치모델을 이용하여 제어성능을 검토하였다(Zhang 등, 1993a; Zhang 등, 1993b). Hitchcock 등은 수평부분과 수직부분의 단면적이 서로 다른 TLCD를 개발하여 이를 교차배열하는 방법으로 건물의 2방향 응답을 제어하는 방식을 채택하였으며, 또한, 수조의 수평부분과 수직부분의 길이 및 단면적 비가 댐퍼의 동적특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다(Hitchcock 등, 1997a; Hitchcock 등, 1997b). Reiterer 등은 수평부분과 수직부분이 둔각으로 이루어진 TLCD가 건물의 수평진동은 물론 수직진동을 효과적으로 감소시킬 수 있음을 실험적으로 검증하였다(Reiterer 등, 2005). Desu 등은 하나의 질량체가 건물의 강축과 약축에 연결된 감쇠기를 이용하여 비선형 건물의 횡방향과 비틀림 응답제어에 효과적이라는 것을 수치적으로 검토하였다(Desu 등, 2006). Almazan 등은 진자형태의 TMD를 이용하여 건물의 2방향 응답을 제어하는 방식을 제안하였으며(Almazan 등, 2007), Ueng 등은 2개의 TMD를 건물의 강축과 약축에 각각 직교 배치하여 2방향 지진입력에 대한 건물의 비틀림 응답을 감소시키는 방법을 제안하였다(Ueng 등, 2008).

이와 같이 2방향 제어기에 관한 기존 연구는 제한적으로 수행되었으며, 그 수도 많지 않아 실제 현장 적용되기에는 2방향 제어기의 실험적 검증, 수치모델, 최적설계 등과 같은 관련연구의 축적이 필요한 실정이다. 또한, 단일 TMD의 양방향 강성을 조절하여 건물의 2방향에 대해서 동조시키는 방안도 적용되고 있다. 이러한 경우에는 각각의 방향에 대한 주기조절이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 질량체의 2방향 왕복운동을 보전하기 위해 추가적인 레일설비가 필요하며, 이에 따른 장치구성이 복잡해지고 제작비용이 많이 소요된다는 단점이 있다.

따라서, 본 연구진은 기존의 제어장치에 비해 상대적으로 제작이 간단하고 2방향의 동조가 용이한 동조액체질량감쇠기(Tuned Liquid Mass Damper)를 제안하고 성능을 실험적으로 검증하였다(허재성 등, 2008a; 2008b; 2008c). 이러한 연구들은 2방향 감쇠기의 설계와 제어성능을 실험적으로 검증한 것이다. 본 연구는 이러한 감쇠기가 입사각을 갖

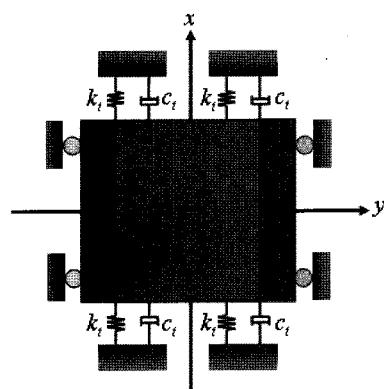


그림 1 2방향 감쇠기 모델

는 진동에 의해 가진될 때, TMD와 TLCD에 의해 연계된 제어력을 실험결과에 바탕을 둔 수치모델에 의하여 정량적으로 평가하였다. 그림 1은 본 연구에서 사용된 감쇠기의 평면을 나타내는 것으로 실제 현장적용시 설치비용 및 공간절약을 고려하여 하나의 본체로 구성되었으며, X방향으로는 TMD로 거동을 하며 Y방향에서는 TLCD로 거동을 하여 제어력이 발생한다.

2. 질량 및 액체형 감쇠기

2.1 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper)

질량체, 감쇠 및 강성으로 구성되는 TMD는 일반적으로 건물의 최상층에 설치되며, 질량체의 왕복운동에 의하여 주 구조물의 진동에너지를 흡수함으로써 동적응답을 감소시킨다(Den Hartog, 1956). 본 연구에서는 제어장치 자체의 동적특성조사에 초점을 두어 그림 2와 같이 횡방향운동 $u_r(t)$ 에 의해 가진되는 동조질량 감쇠기를 다뤘으며, 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m_t \ddot{u}_r(t) + c_t \dot{u}_r(t) + m_t \omega_t^2 u_r(t) = -m_t \ddot{u}_t(t) \quad (1)$$

여기서, $u_r(t)$ 는 질량체의 절대운동 $u(t)$ 에 대한 지반의 상대운동이다. m_t , c_t 그리고 k_t 는 각각 동조질량 감쇠기의

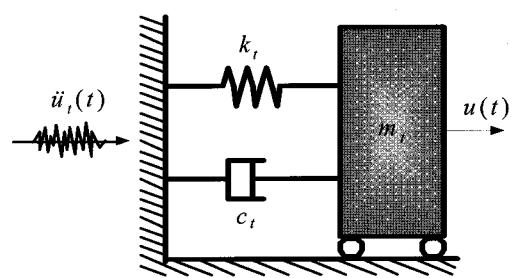


그림 2 횡방향 가진되는 동조질량 감쇠기

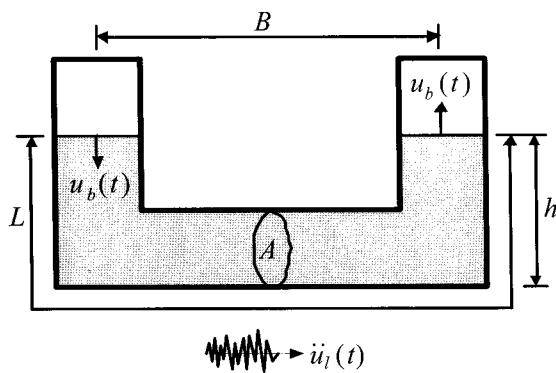


그림 3 횡방향 가진되는 동조액체 기동감쇠기

질량, 감쇠 및 강성계수를 나타낸다. ω_t 는 질량체의 고유진동수 $\sqrt{k_t/m_t}$ 이다.

2.2 동조액체 기동감쇠기(Tuned Liquid Column Damper)

동조액체 기동감쇠기는 수조 내부 액체의 운동에 의해 건물의 횡방향 진동을 흡수하는 감쇠기로서, 수직부분의 액체는 횡방향 입력진동과 함께 운동을 하고 수평부분의 액체는 추가적인 운동을 하여 거동한다. 그림 3은 횡방향 운동 $u_l(t)$ 에 의해 가진되는 동조액체 기동감쇠기로서, U자형 수조 내부 액체의 변위는 다음과 같은 운동방정식으로 표현된다(Sakai 등, 1989).

$$m_l \ddot{u}_b(t) + \frac{1}{2} \rho A \xi |\dot{u}_b(t)| \dot{u}_b(t) + m_l \omega_t^2 u_b(t) = -m_h \ddot{u}_l(t) \quad (2)$$

여기서, u_b 는 감쇠기 내부 액체의 변위이고, B 와 h 는 각각 감쇠기 내부 액체의 수평 및 수직부분의 길이이고, L 은 액체의 길이로서 $B+2h$ 가 된다. ρ , A 및 ξ 는 각각 수조 내부 액체의 밀도, 단면적 그리고 수두손실계수이다. m_l 과 m_h 는 수조 내부 액체의 총질량과 수평부분의 액체의 질량으로, 각각 ρAL 과 ρAB 가 된다. ω_t 은 액체의 고유진동수인 $\sqrt{2g/L}$ 로 표현되며, g 는 중력가속도이다.

3. 실험체 제작 및 진동대 실험

3.1 2방향 진동감쇠기 실험체

TMD와 TLCD는 간단한 부속품으로 구성되어 제작, 설치 및 유지관리가 용이하고, 또한, 2장에서 살펴본 바와 같이

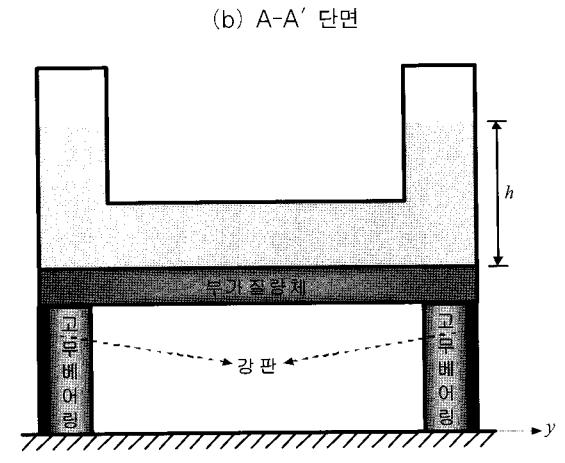
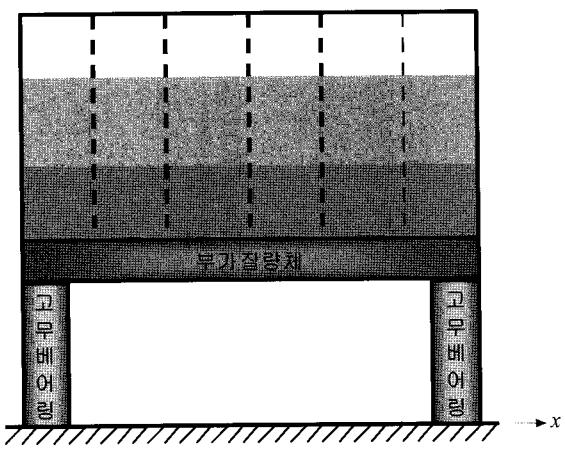
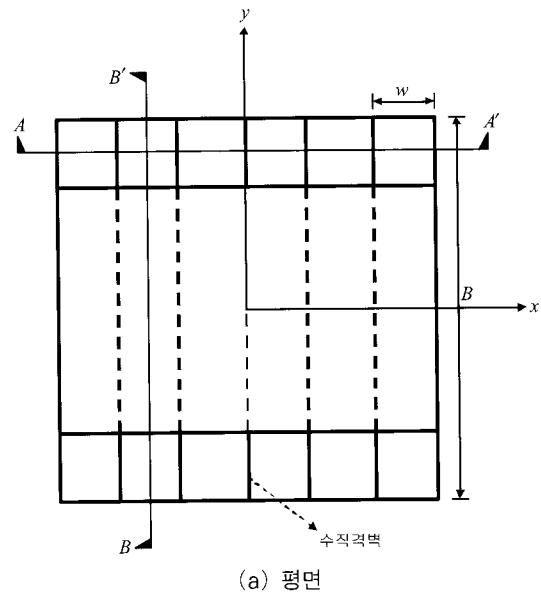


그림 4 2방향 진동감쇠기

강성 및 수조내부 액체의 길이를 조정하여 주기를 조절하기 때문에 주 구조물과 동조가 용이한 장점을 가지고 있다. 그림 4는 TMD와 TLCD를 하나의 본체에 통합하여 X와 Y 각각의 방향에 대해서 서로 독립적으로 제어력을 발생시키는

감쇠기를 보여준다. 감쇠기는 최상부의 TLCD 수조, 중간의 부가질량체 그리고 하부의 고무베어링으로 구성되었다. 고무 베어링은 그림 2와 같은 TMD의 감쇠와 강성을 대신하는 것으로서, 고무자체의 이력거동에 의해 TMD자체의 감쇠를 크게 증진시켜 결과적으로 건물의 유효감쇠비를 추가적으로 부여하는 효과가 있다. 그림 4(a), (b)와 같이 감쇠기 내부에 5개 수직격벽이 일정한 간격으로 설치되어 있다. 이러한 격벽들은 2방향 감쇠기가 X방향으로 TMD로 거동할 때, TLCD 수조 내부의 액체의 X방향 운동을 억제하여 TMD의 질량을 증가시키기 위해서 설치되었다. 그림 4(c)에 보이는 바와 같이, 고무베어링 옆에 횡강성이 큰 강판을 설치하였다. Y방향의 횡방향 가진에 대해서 고무베어링의 운동을 방지하고 수조 내부의 액체만이 운동을 하여 2방향 감쇠기가 Y방향으로 TLCD로 거동하도록 강판이 설치되었다.

그림 4(b)와 같이 2방향 감쇠기가 TMD로 거동할 때 진동운동을 하는 질량은 TMD의 부가질량체 이외에 TLCD수조 자체와 수조내부의 액체의 질량이 포함된다. 따라서, 이와 같은 2방향 감쇠기를 설계하는 절차는 먼저 TLCD 제어방향의 동조주기에 의해 수조내부액체의 길이를 결정한다. 그리고 TLCD의 질량을 고려하여 TMD의 강성을 결정하는 단계가 추가된다. 본 연구에서는 X와 Y방향의 진동수를 각각 0.82Hz와 0.72H로 설정하여 감쇠기를 설계하였다. 먼저, Y방향 진동수 0.72Hz를 $\omega_t = \sqrt{2g/L}$ 식에 대입하여 TLCD 수조 내부의 액체의 길이 L 을 0.95m로 결정하였고, 수평부 길이 B 는 0.60m로 설계하였다. 다음으로, 액체의 질량인 $\rho A L = 57.2\text{kg}$ 이고, 아크릴로 제작된 TLCD의 수조의 질량은 20kg, 그리고, 부가질량은 30kg을 설치하였다. 최종적으로, X방향 진동수 0.82Hz를 $\omega_t = \sqrt{k_t/m_t}$ 식에 대입하여 TMD의 강성 $k_t = 2846\text{N/m}$ 가 계산되었다.

3.2 진동대 실험

최종설계된 2방향 감쇠기의 동적특성 파악하기 위하여 회전형 지그 상부에 설치된 실험체를 일축 진동대에 의해 가진하였다. 그리고, 전단형 로드셀을 진동대에 부착하였으며, 진동대의 동적특성을 모니터하기 위해 가속도 센서를 진동대와 감쇠기에 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 25Hz 저주파수 통과 필터를 통과한 AD/DA보드인 NI PCI-6052E로 수집되는 시스템으로

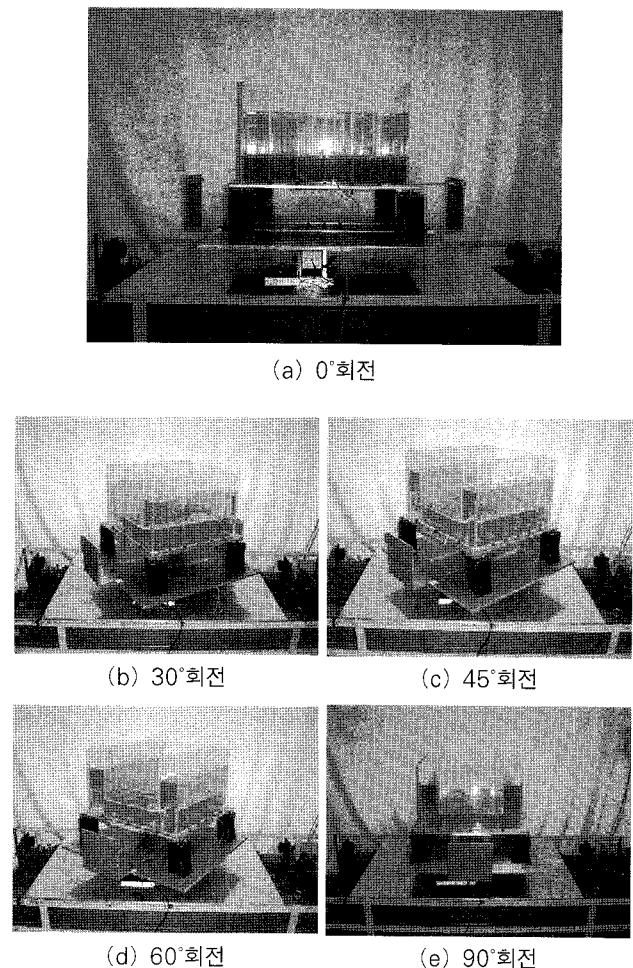


그림 5 회전된 실험체 전경

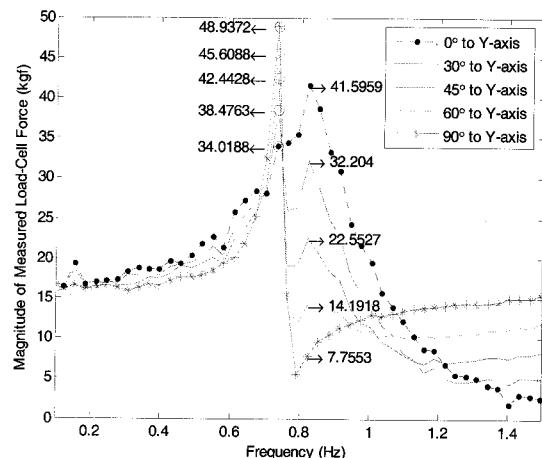


그림 6 측정된 전달함수

이루어졌다. 마지막으로 가우시안 분포를 따르는 화이트 노이즈 신호를 진동대로 가진하여 진동대 가속도와 감쇠기에 의한 제어력을 계측하였다. 또한, 2방향 감쇠기에 의한 TMD와 TLCD 각각의 제어력에 의한 특정방향에서의 합성 효과를 조사하기 위해서 그림 5와 같이 실험체를 일정한 각

도로 회전시켜서 일방향 진동대를 가진하는 실험을 실시하였다. 이와 같은 실험방식은 실험체인 2방향 감쇠기가 입사각을 갖는 횡방향 진동에 의해 가진되는 효과가 있다.

그림 6은 진동대에서 측정한 가속도를 입력으로 하고 전단형 로드셀로부터 측정한 제어력을 출력으로 하는 전달함수를 회전각 별로 도시한 것이다. 실험체가 X축과 0도를 이룰 때, 감쇠기는 TMD로 거동하여 설계 진동수인 0.82Hz근처의 진동수가 탁월하게 된다. 회전각을 증가시킴에 따라 TLCD에 의한 제어력이 발휘되어 2개의 탁월진동수가 나타난다. 실험체가 X축과 90도를 이룰 때 감쇠기는 TLCD로 작용하여 설계 진동수인 0.72Hz근처의 진동수가 탁월하게 되고, TMD의 고유진동수는 사라지는 것을 확인할 수 있다.

4. 실험결과 분석

4.1 TMD 제어 방향

그림 5(a)와 같은 진동대 실험에서 로드셀로부터 계측된 힘이 TMD에 의해 발생되는 제어력이며, 이러한 힘은 TMD의 감쇠력과 복원력으로 구성된다. 따라서, TMD 제어방향 실험으로부터 계측된 힘 f_{tmd} 는 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$f_{tmd}(t) = c_t \dot{u}_r(t) + m_t \omega_t^2 u_r(t) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하면 TMD의 운동방정식은 다음과 같이 표현되어 TMD의 절대가속도에 의한 관성력이 건물에 제어력으로 작용하는 것을 알 수 있다.

$$f_{tmd}(t) = -m_t [\ddot{u}_r(t) + \ddot{u}_t(t)] \quad (4)$$

식 (4)의 양변을 $\ddot{u}_t(t)$ 로 나누어 푸리에 변환을 취하면, 횡방향 입력진동에 대한 TMD에 의해 발생하는 제어력의 비는 다음과 같다.

$$\frac{F_{tmd}(i\omega)}{\ddot{U}_t(i\omega)} = \frac{-m_t [\ddot{U}_r(i\omega) + \ddot{U}_t(i\omega)]}{\ddot{U}_t(i\omega)} \quad (5)$$

여기서, i 는 허수이고, $F_{tmd}(i\omega)$, $\ddot{U}_t(i\omega)$, $\ddot{U}_r(i\omega)$ 는 각각 $f_{tmd}(t)$, $\ddot{u}_t(t)$, $u_r(t)$ 의 푸리에 변환이다.

식 (1)에 푸리에 변환을 적용하여 횡방향 입력진동과 TMD의 절대가속도에 의한 관성력을 구하면 각각 다음과 같다.

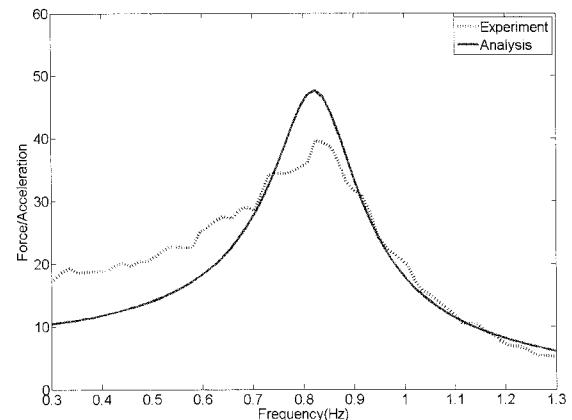


그림 7 TMD 제어방향

$$\ddot{U}_t(i\omega) = -\frac{-\omega^2 m_t + i\omega c_t + m_t \omega_t^2}{m_t} U_r(i\omega) \quad (6)$$

$$-m_t [\ddot{U}_r(i\omega) + \ddot{U}_t(i\omega)] = [i\omega c_t + m_t \omega_t^2] U_r(i\omega) \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)을 식 (5)에 대입하면, 횡방향 입력진동에 대한 TMD에 의해 발생하는 제어력의 크기비는 다음과 같다.

$$\left| \frac{F_{tmd}(i\omega)}{\ddot{U}_t(i\omega)} \right| = \left| \frac{-m_t (i\omega c_t + m_t \omega_t^2)}{-\omega^2 m_t + i\omega c_t + m_t \omega_t^2} \right| \quad (8)$$

식 (8)에서 TMD방향의 운동질량 m_t 과 진동수 ω_t 는 실험에서 측정한 값이므로, 감쇠계수 c_t 를 변수로 하여 전달함수를 계산하였다. 그림 7은 식 (8)에 의해 계산된 전달함수를 실험결과와 비교한 것으로, 감쇠계수 c_t 는 $188 \cdot \text{sec}/\text{m}$ 로 식별되었다.

4.2 TLCD 제어 방향

식 (2)는 비선형 감쇠형을 포함하고 있기 때문에, 수치적인 직접해를 구하기가 용이하지 않다. 이러한 비선형 감쇠를 조화하중 가진(Gao 등, 1997; Shum, 2008) 및 가우시안분포를 갖는 화이트 노이즈 가진(Xu 등, 1992; Yalla 등, 2000)에 대해서 등가선형 감쇠로 치환하는 방법이 여러 연구자들에 의해 개발되었다. 식 (2)는 감쇠기 내부 액체의 운동속도가 가우시안분포라고 가정하면 등가선형화 과정을 통해 다음과 같이 표현된다(Xu 등, 1992; Yalla 등, 2000).

$$m_l \ddot{u}_b(t) + c_l \dot{u}_b(t) + m_l \omega_l^2 u_b(t) = -m_h \ddot{u}_l(t) \quad (9)$$

$$c_l = 2m_l \omega_l \xi_l = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \rho A \xi \sigma_{\dot{u}_b} \quad (10)$$

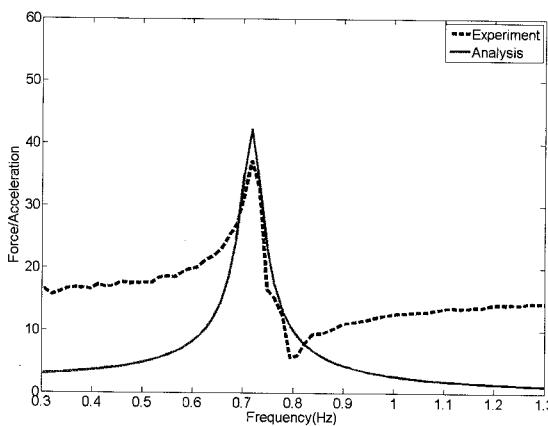


그림 8 TLCD 제어 방향

여기서, ξ_l 와 ξ_h 는 각각 TLCD의 등가감쇠비와 수두손실계수이다. σ_{u_b} 는 감쇠기 내부 액체의 속도에 대한 표준편차이다.

식 (9)에서 TLCD 제어방향 실험으로부터 계측된 힘, f_{tlcd} 는 다음과 같다.

$$f_{tlcd}(t) = c_l u_b(t) + m_l \omega_l^2 u_b(t) \quad (11)$$

TMD의 경우와 유사한 과정에 의해, 횡방향 입력진동에 대한 TLCD에 의해 발생하는 제어력의 크기비는 식 (9)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\left| \frac{F_{tlcd}(i\omega)}{\ddot{U}_l(i\omega)} \right| = \left| \frac{-m_h(i\omega c_l + m_l \omega_l^2)}{-\omega^2 m_l + i\omega c_l + m_l \omega_l^2} \right| \quad (12)$$

여기서, $F_{tlcd}(i\omega)$ 와 $\ddot{U}_l(i\omega)$ 는 각각 $f_{tlcd}(t)$ 와 $\ddot{u}_l(t)$ 의 푸리에변환이다.

식 (12)에서 TLCD방향의 운동질량 m_l 과 m_h 그리고 진동수 ω_l 은 실험에서 측정한 값이므로 감쇠계수 c_l 을 변수로 하여 전달함수를 계산하였다. 그림 8은 식 (12)에 의해 계산된 전달함수를 실험결과와 비교한 것으로, 감쇠계수 c_l 은 $18 N \cdot sec/m$ 로 확인되었다.

4.3 입사각을 갖는 가진 방향

그림 9는 입사각을 갖는 횡방향 가진에 대한 2방향 감쇠기의 평면을 보여준다. 그림에서 TMD방향이 X방향을 나타내고, TLCD방향이 Y방향을 나타낸다. 또한, 그림 10은 입사가진에 대한 변위 및 하중관계를 나타낸다. 그림과 같이 θ 방향으로 실험체를 가진할 때, 변위 u_θ 는 X축의 변위 u_t 와

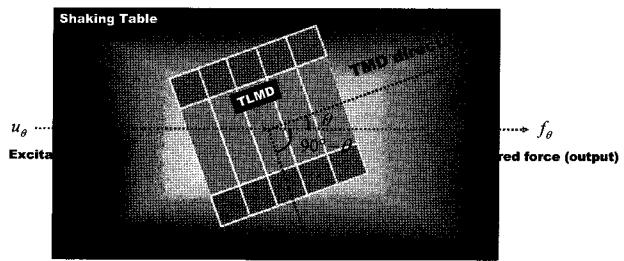


그림 9 입사가진에 대한 2방향 감쇠기

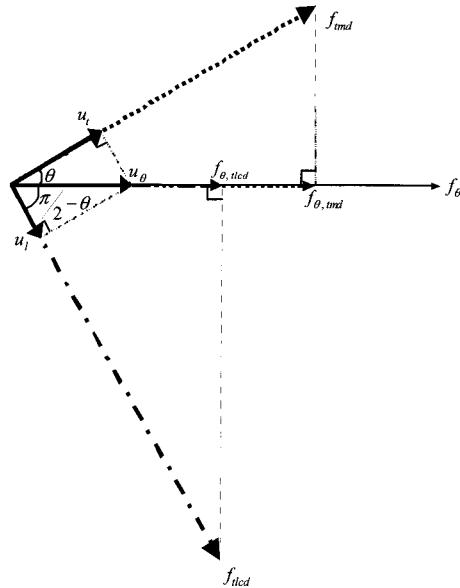


그림 10 입사가진에 대한 변위 및 하중관계

Y축의 변위 u_t 로 각각 분해되며, f_{tmd} 와 f_{tlcd} 는 θ 방향의 힘 f_θ 로 합성된다.

θ 방향의 가진운동과 두 직교방향의 운동사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$|U_t(i\omega)| = |U_\theta(i\omega)| \cos \theta, \quad |U_i(i\omega)| = |U_\theta(i\omega)| \sin \theta \quad (13)$$

또한, θ 방향의 가진운동에 대해서 로드셀로부터 측정된 댐퍼의 제어력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |F_\theta(i\omega)| &= |F_{\theta,tmd}| + |F_{\theta,tlcd}| \\ &= |F_{tmd}(i\omega)| \cos \theta + |F_{tlcd}(i\omega)| \sin \theta \end{aligned} \quad (14)$$

식 (13)을 식 (5)와 식 (12)에 각각 대입하여 두 직교좌표계의 변위를 θ 방향의 변위로 변환 후, 그 결과를 식 (14)에 대입하면, θ 방향의 가진가속도에 대한 제어력의 크기의 비를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\left| \frac{F_\theta(i\omega)}{\ddot{U}_\theta(i\omega)} \right| = \left| \frac{-m_t(i\omega c_t + m_t \omega_t^2)}{-\omega^2 m_t + i\omega c_t + m_t \omega_t^2} \right| \cos^2 \theta + \left| \frac{-m_h(i\omega c_t + m_t \omega_t^2)}{-\omega^2 m_t + i\omega c_t + m_t \omega_t^2} \right| \sin^2 \theta \quad (15)$$

식 (15)와 같이 입사가진에 대한 감쇠기의 제어력을 식 (8)과 식 (12)를 선형조합하여 구할 수 있음을 알 수 있다. 식 (15)를 정리하면,

$$\left| \frac{F_\theta(i\omega)}{\dot{U}_\theta(i\omega)} \right| = \left| \frac{Z(i\omega)}{P(i\omega)} \right| \quad (16)$$

$$\begin{aligned} Z(i\omega) &= i\omega^3 m_t \{m_t c_t \cos^2 \theta + m_h c_t \sin^2 \theta\} \\ &+ i\omega^2 \{c_t c_l \{m_t \cos^2 \theta + m_h \sin^2 \theta\} + m_t \{m_t k_t \cos^2 \theta + m_h k_t \sin^2 \theta\}\} \\ &- i\omega(m_t \cos^2 \theta + m_h \sin^2 \theta)(c_t k_t + c_l k_t) \\ &- k_t k_l (m_t \cos^2 \theta + m_h \sin^2 \theta) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} P(i\omega) &= \omega^4 m_t m_l - i\omega^3 (m_t c_l + m_l c_t) \\ &- i\omega^2 (m_t k_l + m_l k_t + c_t c_l) + i\omega(c_t k_l + c_l k_t) + k_t k_l \end{aligned} \quad (18)$$

그림 11~13은 식 (16)~(18)에서 감쇠계수 c_t 와 c_l 을 시스템식별 파라미터로 설정하여 계산된 전달함수를 실험결과와 비교한 것이다. 이러한 그림들 이외에 그림 7과 8에서와 같이, TMD와 TLCD 동조진동수 근처에서만 두 결과가 일치하고 다른 진동수 구간에서는 상당한 차이를 나타내고

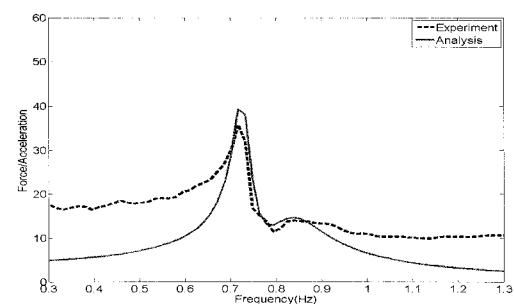


그림 13 60도 입사가진

있다. 본 연구에서는 그림 5와 같이 2방향 감쇠기를 회전시키기 위해서 로드셀과 감쇠기 사이에 회전형 지그를 설치하였다. 따라서, 감쇠기에 의한 제어력 이외에 회전형 지그의 영향이 로드셀에 전달되어 이러한 불일치가 발생한 것으로 판단된다.

표 1은 입사각에 따라서 식 (16)~(18)에 의해 식별된 감쇠계수를 나타낸다. 입사각이 변화해도 TMD 및 TLCD 제어방향의 실험에서 계산된 감쇠계수들과 약 5% 이내의 오차를 보이는 것을 알 수 있다.

표 1 입사각에 따른 감쇠계수의 변화

각도 감쇠	0°	30°	45°	60°	90°
$c_t (N \cdot s/m)$	188	185	183	179	..
$c_d (N \cdot s/m)$..	17	17.5	17.5	18

5. 결 론

본 연구에서는 TMD와 TLCD로 구성되어 한 평면상에서 직교하는 2방향의 진동을 제어할 수 있는 감쇠기의 동적제어 특성을 실험적으로 검증하였다. 하나의 본체로 구성된 2방향 감쇠기는 한 방향으로는 동조질량감쇠기(TMD)로 거동하여 제어력을 발생하고, 다른 직교하는 방향에서는 TLCD로 거동하여 제어력이 발생하는 것을 진동대 실험에 의해 확인하였다. 이러한 실험결과를 바탕으로 감쇠기의 동적특성에 영향을 미치는 감쇠계수를 정량적으로 평가하였다. 또한, 2방향 감쇠기를 회전시키면서 진동대 실험을 수행한 결과, 입사각을 갖는 가진방향의 제어력은 TMD와 TLCD에 의해 발생하는 제어력들의 선형결합으로 표현되는 것을 실험결과를 바탕으로 한 수치해석으로 증명하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터육성사업

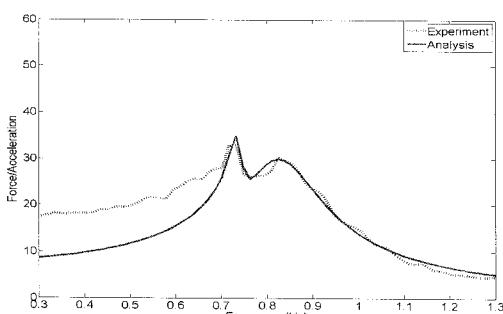


그림 11 30도 입사가진

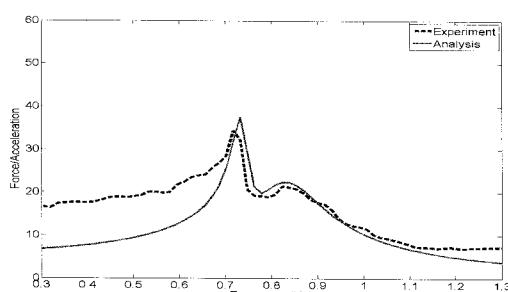


그림 12 45도 입사가진

(R11-2002-101-03004-0) 및 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(No. R01-2008-000-20796-0)을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 본 연구에 참여한 연구자는 (주)포스코건설 및 (재)포항산업과학연구원의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 허재성, 박은천, 이상현, 이성경, 김홍진, 조봉호, 조지성, 김동영, 민경원** (2008a) 건축구조물의 2방향 진동제어를 위한 동조액체질량감쇠기, 한국소음진동공학회 논문집, 18(3), pp.345~355.
- 허재성, 이성경, 박은천, 이상현, 김홍진, 조지성, 조봉호, 민경원** (2008b) 실시간 하이브리드 진동대 실험법에 의한 양방향 TLMD의 진동제어 성능평가, 한국소음진동공학회 논문집, 18(5), pp.485~495.
- 허재성, 박은천, 이성경, 이상현, 김홍진, 조지성, 조봉호, 주석준, 민경원** (2008c) 실물크기 구조물에 설치된 동조액체질량감쇠기의 성능실험, 한국전산구조공학회 논문집, 21(2), pp.161~168.
- Almazan, J. L., Llera, J. C., Inaudi, J. A., Garcia, D. L., Izquierdo, L. E.** (2007) A bidirectional and homogeneous tuned mass damper: A new device for passive control of vibrations, *Engineering Structures*, 29, pp.1548~1560.
- Den Hartog, J. P.** (1956) *Mechanical vibrations*, McGraw-Hill.
- Desu, N. B., Deb, S. K., Dutta, A.** (2006) Coupled tuned mass dampers for control of coupled vibrations in asymmetric buildings, *Struct. Control Health Monit.*, 13, pp.897~916.
- Gao, H., Kwok, K. C. S.** (1997) Optimization of tuned liquid column dampers, *Engineering Structures*, 19(6), pp.476~486.
- Hitchcock, P. A., Kwok, K. C. S., Watkins, R. D.** (1997a) Characteristics of liquid column vibration absorbers (LCVA)-I, *Engineering Structures*, 19(2), pp.126~134.
- Hitchcock, P. A., Kwok, K. C. S., Watkins, R. D.** (1997b) Characteristics of liquid column vibration absorbers (LCVA)-II, *Engineering Structures*, 19(2), pp.135~144.
- Reiterer, M., Ziegler, F.** (2005) Bi-axial seismic activation of civil engineering structures equipped with tuned liquid column dampers, *JSEE: Spring*, 7(1), pp.45~60.
- Sakai, F., Takaeda, S., Tamaki, T.** (1989) Tuned Liquid Column Damper - New Type Device for Suppression of Building Vibrations, *Proc. Int. Conf. on Highrise Buildings*, Nanjing, China, pp.926~931.
- Shum, K. M.** (2008) Closed form optimal solution of a tuned liquid column damper for suppressing harmonic vibration of structures, *Engineering Structures*, doi:10.1016/j.engstruct. 2008.07. 015, *in press*.
- Soong, T. T., Dargush, G. F.** (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*, John Wiley & Sons.
- Ueng, J. M., Lin, C. C., Wang, J. F.** (2008) Practical design issues of tuned mass dampers for torsionally coupled buildings under earthquake loadings, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 17, pp.133~165.
- Xu, Y. L., Samali, B., Kwok, K. C. S.** (1992) Control of along-wind response of structures by mass and liquid dampers, *Journal of Engineering Mechanics*, 118(1), pp.20~39.
- Yalla, S. K., Kareem, A.** (2000) Optimum absorber parameters for tuned liquid column dampers, *Journal of Structural Engineering*, 126(8), pp.906~915.
- Zhang, X. T., Zhang, R. C., Xu, Y. L.** (1993a) Analysis on control of flow-induced vibration by tuned liquid damper with crossed tube-like containers, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 50, pp.351~360.
- Zhang, X. T., Zhang, R. C.** (1993b) On control of along-wind and across-wind vibrations of structure by crossed dampers, *Proc. Third Asia-Pacific Symp. on Wind Engineering*, Hong Kong, 2, pp.859~864.