

TMD와 TLCD의 지진응답에 대한 제어성능 평가 연구

Performance Evaluation of TMD and TLCD for Earthquake-Induced Response Control

김 홍 진* Kim, Hongjin 김 형 섭** Kim, Hyoung-Seop 민 경 원*** Min, Kyung-Won 오 정 근**** Oh, Jung-Keun

국문요약

설치의 용이성과 경제성, 여러 다른 용도로의 전용 가능성, 유지보수의 용이성, 그리고 재동조의 편의성 등을 고려할 때 TLCD (Tuned Liquid Column Damper)는 기존에 건물의 응답제어에 많이 사용되는 TMD를 대체할 수 있는 감쇠장치라 할 수 있다. 본 논문에서는 TMD (Tuned Mass Damper)와 TLCD의 지진하중을 받는 구조물의 응답제어 성능평가에 관한 비교연구를 수행하였다. 성능비교분석 결과, 층간변위 제어성능에서는 TLCD가 TMD보다 우수한 성능을 보였고, 가속도 제어성능에서는 서로 비슷한 것으로 나타났다. 또한 층간변위 제어에서는 저층에서 큰 제어성능을 발휘하고, 절대가속도 제어에서는 상층부에서 성능이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 TLCD가 지진에 가장 문제가 되는 구조물의 안전성 및 거주자의 사용성에 있어서 효율적인 감쇠기라 할 수 있는 근거가 된다.

주요어 : Tuned Liquid Column Damper, Tuned Mass Damper, Kanai-Tajimi 확률밀도, 수동제어, 지진

ABSTRACT

TLCD is a good alternative to TMD for control of structures because of its cost efficiency, ease of installation, little maintenance requirement, potential for multiple usage, and ease of re-tuning. In this study, the control performances of TMD and TLCD are evaluated and compared for seismically excited structures. Results show that TLCD is more effective than TMD for interstory drift control while TLCD is as effective as TMD for acceleration control. In special, it is shown that interstory drifts are maximally controlled in lower floors and accelerations are reduced most in upper floors. This indicates that TLCD is an effective controller for earthquake-induced structures in terms of structural safety as well as serviceability.

Key words : Tuned Liquid Column Damper, Tuned Mass Damper, Kanai-Tajimi spectral density, passive control, earthquake

1. 서 론

현대의 구조물은 재료 및 기술의 발달로 인하여 점점 높아지고 유연해 짐에 따라 지진 및 바람 등의 외부하중에 의해 점점 큰 진동 및 변위가 유발된다. 따라서 단순히 강성을 증가시켜 진동을 줄이는 기존의 내진 및 내풍설계에서 벗어나 경제적인 면을 고려하여 강성을 증가시키는 대신 추가적인 감쇠장치를 설치하여 구조물의 외부하중에 의해 생기는 에너지를 감쇠장치에 의해 소산시키는 방법이 점점 더 증가하고 있다. 대표적인 수동제어 방법으로는 층간에 설치하여 층간변위에 따른 감쇠장치의 이력거동에 의해 에너지를 소산시키는 감쇠장치와 구조물의 상부층 혹은 옥상층에 설치하여 관성력에 의해 에너지를 소산시키는 장치 등이 있다. 그 중 층간에 설치하는 방법은 성능측면에서는 효과적이지만 건물의 이용적 측면에서 많은 불이익을 가져올 수 있다. 이에 반해, TMD 및 TLD(Tuned Liquid Damper)는 건물 전체 질량에 약 0.5~2%를 차지하는 추가적인 질량을 옥상층에 설치하여 에너지를 소산시키는 장치로 건물의 이용적

측면에서 층간설치형에 비해 제약이 적다. 그 중 TMD는 불필요한 콘크리트 등의 거대한 질량이 건물의 옥상층을 차지하고 있고, 초기 구동하는 장치 등이 추가로 필요하다. 또한 구조물의 주기 변동에 따른 동조주기 변경에 어려움이 따른다.

TLCD는 TLD내의 액체의 운동에너지를 극대화하기 위한 고안된 특별한 형태이다. U자 형태로 이루어져 있으며 관내 액체의 흐름과 관내 구멍(orifice)으로 인한 유체의 압력차를 이용하여 구조물에 작용하는 에너지를 소산시키는 장치로써 Sakai 등(1989)이 제안하였다.⁽¹⁾ TLCD내의 액체는 흔히 물을 사용하기 때문에 생활용수 및 비상시 방화수 등으로 사용이 가능하다. TLCD는 그 작동원리가 TMD와 유사하지만⁽²⁾, 물기둥의 길이 변경에 따라 쉽게 주 구조물에 동조가 가능하고, 관내 구멍의 크기에 따라 감쇠비 조절이 가능하다. 또한 액체가 수평을 유지하려는 중력의 힘이 강성으로 작용하기 때문에 TMD와 달리 특별한 초기 구동장치가 필요 없다. 따라서 경제적인 면에서 더 좋은 감쇠기라 할 수 있다. 이러한 장점 때문에 최근에 TLCD의 이용이 늘고 있다. 실제로 미국 뉴욕의 Random House는 TLCD를 사용함에 따라 추가감쇠장치 없이 골조에만 의존하여 횡력에 저항하는 구조시스템에 비해 약 7~8백 만불(약 100억원, 총 공사비대비 약 5%)의 절감효과가 있는 것으로 조사되었고, 캐나다 밴쿠버에 위치한 One Wall Center 의 경우 TLCD를 설치함으로써 TMD 설치시 보다 약 200만불(약 25억) 절약된 것으로

* 단국대학교 내진/리모델링 연구센터, 연구교수, 공학박사

** 단국대학교 건축대학 건축공학과, 석사과정

*** 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수(대표저자 : kwmin@dankook.ac.kr)

**** 삼성물산 건설부문 수석연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 7. 19 / 심사종료일 : 2003. 9. 26)

조사되었다.^{(3),(4)}

본 논문에서는 TMD와 TLCD의 지진하중을 받는 구조물의 응답제어 성능평가에 관한 비교연구를 수행하였다. TMD와 TLCD의 최적의 설계변수는 외란의 크기 및 형태와 주 구조물의 동적특성에 따라 서로 달라진다.⁽⁵⁾ 본 논문에서는 기존의 연구자들에 의해 제안된 최적공식을 이용하여 각각의 제어기를 설계하였다. 우선 1차 고유주기가 일치하는 여러 형태의 10층 전단건물에 Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀도함수에 의해 실제 지진과 유사한 형태로 생성한 인공지진을 이용하여 TMD 및 TLCD가 주 구조물에 미치는 영향의 특성을 파악하였다. 또한 장주기 건물인 20층 전단 건물에 El Centro 지진을 이용하여 TMD와 TLCD의 지진응답 제어성능에 대한 비교연구를 수행하였다.

2. TLCD의 운동방정식

TLCD 액체기둥의 운동방정식은 그림 1에서 보는 것과 같이 물기둥의 수직변위(u)와 구조물의 수평변위(x)를 고려한 식 (1)과 같다.

$$\rho AL\ddot{u} + \frac{\rho A}{2} \xi_h |\dot{u}| \dot{u} + 2\rho Ag u = -\rho AB\ddot{x} \quad (1)$$

여기서 ρ , A , L , B , g 는 각각 액체기둥의 밀도, 단면적, 전체길이, 수평길이, 그리고 중력가속도 이다. ξ_h 는 물기둥 내의 구멍(orifice) 크기에 의해 변하는 무단위 수두손실계수(Head Loss Coefficient) 이며 외란의 크기에 따라 최적화 수치가 달라지고, 수치를 주 구조물의 반응에 따라 수시로 변화시킴으로써 준능동제어 시스템으로도 이용이 가능하다.⁽⁶⁾ 액체기둥의 운동방정식을 나타내는 식 (1)에서 물기둥의 고유진동수, ω_d 와 감쇠계수, c_d 는 아래와 같다.

$$\omega_d = \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (2)$$

$$c_d = \frac{\rho A}{2} \xi_h |\dot{u}| \quad (3)$$

식 (2)에서 액체기둥의 고유주기는 액체기둥의 길이에만 관계되기 때문에 쉽게 구조물에 동조시킬 수 있다. 하지만, 식 (3)에서 감쇠계수는 TMD와 다르게 속도의 절대값이 포함되므로 비선형성을 나타낸다.

단자유도 주 구조물과 TLCD의 연계된 운동방정식을 나타내면 다음 식과 같다(그림 1(b)).

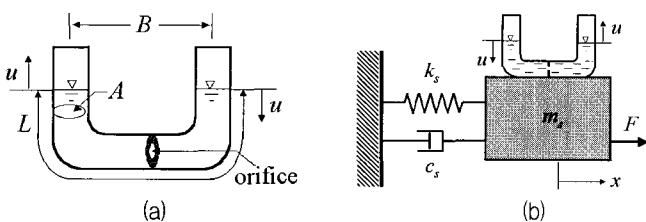


그림 1 TLCD 시스템

$$\begin{bmatrix} \rho AL + m_s & \rho AB \\ \rho AB & \rho AL \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{u} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & 0 \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & 0 \\ 0 & 2\rho Ag \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 m_s , c_s , k_s , F 는 각각 주 구조물의 질량, 감쇠계수, 강성, 그리고 외란을 나타낸다. 이 운동방정식에서 수평방향의 물기둥이 주 구조물과 연계되어 있음을 알 수 있다. 이 경우, 구조물의 진동수에 대한 감쇠기의 진동수비, f 와 주 구조물에 대한 감쇠기의 질량비, μ 는 각각 아래와 같다.

$$f = \frac{\omega_d}{\omega_s} \quad \mu = \frac{\rho AL}{m_s} \quad (5)$$

여기서 ω_s 는 주구조물의 고유진동수를 나타낸다.

이와 달리, TMD는 구조물에 1개층이 증가한 것으로 쉽게 모델링이 가능하다. 단자유도 구조물과 TMD의 연계된 운동방정식은 아래와 같다.⁽⁷⁾

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_m & -c_m \\ -c_m & c_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_m & -k_m \\ -k_m & k_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서 m_m , c_m , k_m 는 각각 TMD의 질량, 감쇠계수, 강성이고, x_T 는 TMD의 변위이다. TLCD와 비슷하게 구조물의 진동수에 대한 감쇠기의 진동수비, f 와 주 구조물에 대한 감쇠기의 질량비, μ 는 각각 아래와 같다.

$$f = \frac{\omega_m}{\omega_s} \quad \mu = \frac{m_m}{m_s} \quad (7)$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{k_m}{m_m}} \quad (8)$$

여기서 ω_m 는 TMD의 고유진동수이다.

3. TMD와 TLCD의 최적 설계변수

본 논문에서는 최적화 된 파라미터를 찾기 위해 기존의 연구자들에 의해 제안된 최적공식을 이용하여 TMD와 TLCD의 최적설계를 하였다. Den Hartog는 감쇠가 없는 주 구조물에 TMD 파라미터의 적당한 선택의 과정과 기초 원리를 개발하였고, 또한 비감쇠 구조물의 응답을 줄이기 위한 방법으로 동적증폭계수를 도입하여 TMD의 효과를 산정하였다.⁽⁸⁾ Sadek 등 (1997)은 지진하중에 대하여 저감쇠 구조물의 1, 2차 모드의 감쇠비가 평균 감쇠비 보다 더 크다는 개념에 기초하여 TMD의 최적의 파라미터를 유도하였다.⁽⁹⁾ 이 논문에서 TMD의 최적설계변수를 위해 Sadek 등이 제안한 식을 사용하였다.

Gao 등 (1999)은 조화하중을 받는 구조물에 설치된 TLCD의 주요 파라미터 연구를 수행하였고, 또한 진동수비와 감쇠비의 변화에 따른 효과와 강인성을 조사하였다.⁽¹⁰⁾ Yalla와 Kareem(2000)은 다양한 질량비에 대하여 백색잡음과 필터된 백색잡음을 가진입력으로 이용하여 TLCD의 최적화된 변수들을 결정하였다.⁽⁵⁾ 이 논문에서의 TLCD 최적설계변수는 Yalla와 Kareem 이 제안한 식을 사용하였다. 여기서 TMD와 TLCD에 적용된 변수는 외란의 특성 및 크기, 구조물의 특성 및 여러 다른 요인에 의해 달라지기 때문에 다른 최적화식을 선택하여 적용할 경우 TMD와 TLCD의 제어 성능은 다소 달라 질 수도 있다. 표 1에 본 논문에서 사용한 TMD와 TLCD 설계변수들의 최적공식을 정리하여 나타내었다. 여기서 ζ_s 는 주 구조물의 감쇠비, ξ_d 는 TMD의 감쇠비, 그리고 α 는 TLCD 물기둥의 전체길이에 대한 수평길이비 (l/L) 이다.

4. 응답평가지수

본 논문에서는 TMD/TLCD의 제어성능을 평가하기 위하여 최대응답(Peak Responses)과 RMS 응답(Root Mean Square Responses)에 대하여 아래 식 (9)와 (10)과 같은 성능지수 (Performance Index)를 사용하여 나타내었다.

$$J_1 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |x_{di}(t)|}{x_o^{\max}} \right\}, J_2 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |d_{di}(t)|}{d_o^{\max}} \right\},$$

$$J_3 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |\ddot{x}_{di}(t)|}{\ddot{x}_o^{\max}} \right\} \tag{9}$$

$$J_4 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |\sigma_{x_{di}}|}{\sigma_{x_{do}}^{\max}} \right\}, J_5 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |\sigma_{d_{di}}|}{\sigma_{d_{do}}^{\max}} \right\},$$

$$J_6 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |\sigma_{\ddot{x}_{di}}^{\max}|}{\sigma_{\ddot{x}_{do}}^{\max}} \right\} \tag{10}$$

여기서, x_o^{\max} , d_o^{\max} , \ddot{x}_o^{\max} 는 각각 제어 전의 최대 상대변위, 최대 층간변위, 그리고 최대 절대가속도이고, $x_{di}(t)$, $d_{di}(t)$, $\ddot{x}_{di}(t)$ 는 각각 제어 후 i 층의 상대변위, 층간변위, 그리고 절대가속도이다. 그리고 $\sigma_{x_{do}}^{\max}$, $\sigma_{d_{do}}^{\max}$, $\sigma_{\ddot{x}_{do}}^{\max}$ 는 각각 제어 전의 최대 RMS 상대변위, 층간변위, 그리고 절대가속도이고, $\sigma_{x_{di}}$, $\sigma_{d_{di}}$, $\sigma_{\ddot{x}_{di}}$ 는 제어 후 i 층의 RMS 상대변위, 층간변위, 그리고 절대가속도이다. 성능지수 J_1, J_2, J_3 는, 각각 최대 상대

변위, 층간변위, 그리고 절대가속도에 대한 제어성능을 나타내며, J_4, J_5, J_6 는 각각 RMS 상대변위, 층간변위, 그리고 절대가속도에 대한 제어성능을 나타낸다. 모든 성능지수는 값이 작을수록 우수한 제어성능을 의미한다.

5. 수치해석

5.1 10층 예제구조물

본 예제에서는 1차모드 고유주기가 1.09초로 비슷한 4가지 다양한 형태의 10층 다 자유도 전단건물을 이용함으로써 건물의 특성에 따른 감쇠기의 성능평가 및 특성을 파악하였다. 수치해석은 Matlab을 이용하여 수행하였다. 첫 번째 구조물, Model-I은 전층의 층질량과 층강성이 동일한 구조물이고, 두번째 구조물, Model-II는 Model-I과 마찬가지로 전층의 질량은 동일하지만 강성이 줄어드는 특징을 나타내는 건물로써, 중저층 구조물에서 흔히 사용되는 형태의 구조물이다. 세번째 구조물, Model-III는 질량과 강성이 모두 고층으로 갈수록 줄어드는 구조물로써, 피라미드의 형태의 구조물이고, 마지막으로 네번째 구조물, Model-IV는 옥상층에 연약층이 존재하는 구조물로써, 연약층은 일반층에 대하여 20%의 강성과 질량을 가진다. 주 구조물의 모든 모드의 감쇠비는 각각 2%로 일치시켰다. 위와 같은 구조물들의 질량과 강성을 표 2에 나타내었고, 또한 각각의 구조물의 1, 2, 3차 모드형상을 그림 2의 (a), (b), (c)에 나타내었다. 그림 2에서 각 구조물의 1차 모드는 비슷한 형상을 보이거나, 고차로 갈수록 모드형상이 상이해짐을 알 수 있다. 일반적으로 TMD와 TLCD 모두 1차모드에 동조를 시키는 방식으로 설계되어지므로, 이 예제들을 통하여 서로 다른 고차모드를 가지는 구조물에 대한 제어효과를 살펴보고자 한다.

유사한 조건하에서의 응답제어 성능비교를 위하여, 4가지 형태의 구조물에 사용된 TLCD와 TMD는 주 구조물의 1차 모드 질량에 대한 감쇠기 질량의 비($\mu=0.02$)를 같게 하였으며 이는 Model-I, II, III, IV 구조물의 전체질량에 대하여 각각 1.06, 0.94, 0.81, 0.91%에 해당한다. TLCD와 TMD에 대한 최적공식을 적용하여 산정한 설계변수는 표 3에 나타내었다.

본 예제에는 Yang 등(1987)과 Spancer 등(1994)에 의해 사용된 Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀도를 가진 확률적 신호에 의해 생성한 외란을 사용하였다.^{(11),(12)} Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀도는 아래식과 같다.

$$S(\omega) = S_0 \left[\frac{4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^4}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \tag{11}$$

표 1 TMD/TLCD의 최적 설계변수

	f	ξ_d	ξ_h
TMD	$\frac{1}{1+\mu} \left[1 - \zeta_s \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}} \right]$	$\frac{\zeta_s}{1+\mu} + \sqrt{\frac{\mu}{1+\mu}}$	-
TLCD	$\frac{\sqrt{1+0.5\mu}}{1+\mu}$	-	$\mu \sqrt{\frac{(1+\mu+\alpha^2\mu)}{S_0} \left(\frac{\mu+\alpha^2}{1+\mu} \right)^{\frac{3}{2}} g L \omega_d \sqrt{\mu}}$

표 2 10층 예제구조물의 층질량과 층강성

층	Model	층질량(ton)				층강성(10 ⁴ kN/m)			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV
10		32	32	19.5	32	4.8	3.0	3.0	3.48
9		32	32	24.5	32	4.8	3.3	3.3	3.48
8		32	32	29.5	32	4.8	3.6	3.6	3.48
7		32	32	34.5	32	4.8	3.9	3.9	3.48
6		32	32	39.5	32	4.8	4.2	4.2	3.48
5		32	32	44.5	32	4.8	4.5	4.5	3.48
4		32	32	49.5	32	4.8	4.8	4.8	3.48
3		32	32	54.5	32	4.8	5.1	5.1	3.48
2		32	32	59.5	6.4	4.8	5.4	5.4	0.70
1		32	32	64.5	6.4	4.8	5.7	5.7	0.70

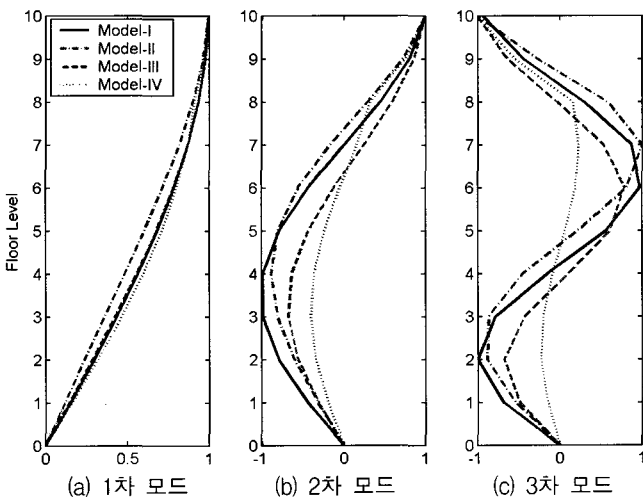


그림 2 10층 예제구조물의 모드형상

표 3 예제 10층 구조물들에 사용된 TMD/TLCD 최적설계변수 값

Model	TMD		TLCD	
	f	ξ_d	f	ξ_h
I	0.978	0.16	0.985	1.671
II	0.978	0.16	0.985	1.651
III	0.978	0.16	0.985	1.650
IV	0.978	0.16	0.985	1.651

여기서 변수 ζ_{gr} , ω_g 그리고 S_0 는 각각 토양의 감쇠비, 지반의 진동수, 그리고 밀도크기이다. 이러한 파라미터들의 수치는 특정한 지리적 위치에 지반가속도의 밀도와 특성에 의존한다. 이 예제에서 사용한 ζ_{gr} , ω_g 는 표 4에 나타내었고, S_0 는 $4.5 \times 10^4 \text{m}^2/\text{sec}^3$ 를 사용하였다. 여기서 EQ-II는 1952년 Kern Country N90E 지진과 비슷한 특성을 나타내는 지진이다.

표 4 인공지진 생성에 사용된 변수

	EQ-I	EQ-II
ξ_h	0.65	0.317
$\omega_g(\text{rad/sec})$	18.85	10.516

인공지진 EQ-I은 지진의 시간에 따른 형상을 나타내기 위해, 다음의 시간함수 $\tau(t)$ 를 사용하였다.

$$\tau(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & \text{for } t_1 \leq t \leq t_2 \\ \exp[-c(t-t_1)] & t \geq t_2 \end{cases} \quad (12)$$

여기서, $t_1=3\text{sec}$, $t_2=13\text{sec}$, 그리고 $c=0.26\text{sec}^{-1}$ 가 사용되었다.⁽¹¹⁾ 인공지진 EQ-I과 EQ-II는 그림 3의 (a), (b)에 각각 나타내었다.

그림 4는 EQ-I에 대한 Model-I 지붕층의 상대변위 응답의 시간이력해석을 나타낸다. 전반적으로 TMD와 TLCD의 옥상층 변위의 제어성능은 비슷한 경향을 나타낸다. 특히 최대응답을 보이는 15초 전후에서는 TLCD의 성능이 좋은 것으로 나타났고, 응답의 크기가 작아지는 지진의 후반부에서는 TMD가 우수한 것으로 나타났다. 이러한 경향은 4가지 구조물 모두 비슷하게 나타난다. 표 5는 4가지 구조물들에 대하여 인공지진 EQ-I에서는 최대 성능지수를 적용하고 EQ-II에 대해서는 RMS 성능지수를 적용하여 TLCD/TMD의 제어 성능평가를 수행한 결과를 나타낸다. 그림 4에서처럼, TLCD가 TMD에 비해 전반적으로 우수하거나 비슷한 제어 성능을 보여줄 수 있다. 그리고 EQ-I에 대한 최대응답 제어효과는 층변위가 가장 좋은 것으로 나타났으며 그 다음, 층간변위, 가속도 순으로 나타났다. 또한 이러한 특징은 4가지 구조물에 공통적으로 나타난다. EQ-II에 대한 RMS응답 제어의 특징은 층변위 제어와 층간변위 제어가 거의 비슷한 것으로 나타났으며, EQ-I과 마찬가지로 가속도 제어 효과가 가장 적은 것으로 나타났다.

추가적으로 식 (13)와 같이 Balendra 등(1999)이 사용한 RMS 저감계수를 사용하여 인공지진 EQ-II에 대한 TLCD/TMD의 건물높이에 따른 제어성향을 분석하였다.⁽¹³⁾

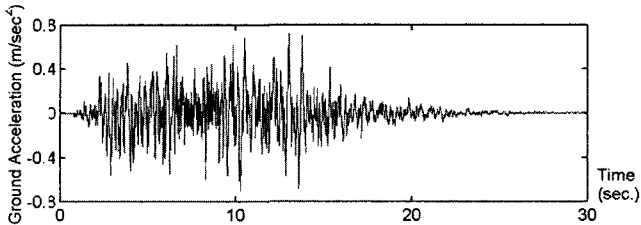
$$R_{RMS}^a = \frac{\sigma_{a-o} - \sigma_a}{\sigma_{a-o}} \times 100$$

$$R_{RMS}^d = \frac{\sigma_{d-o} - \sigma_d}{\sigma_d} \times 100 \quad (13)$$

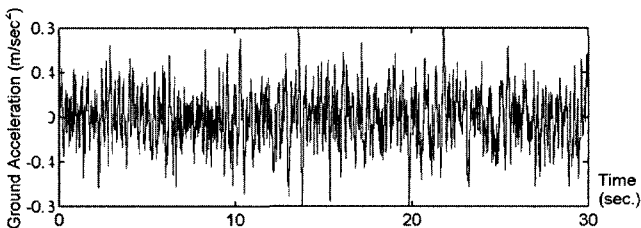
α 기서 $\sigma_{a_{or}}$, σ_a 는 각각 제어 전과 제어 후의 RMS 층가속도이고, $\sigma_{d_{or}}$, σ_d 는 각각 제어 전과 제어 후의 RMS 층간변위이다. 이들 저감계수의 경우 성능지수와 달리 값이 클수록 우수한 제어성능을 의미한다.

그림 5는 건물높이에 따른 TMD의 RMS 층간변위와 RMS 가속도 제어효과를 나타내고, 그림 6은 TLCD의 RMS 층간변위와 RMS 가속도 제어효과를 나타낸다. 그림 5와 6에서

알 수 있듯이 TMD와 TLCD 모두 비슷한 높이에 따른 비슷한 제어경향을 보이며 TMD보다는 TLCD가 좀 더 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. TMD와 TLCD 모두 층간변위에 대하여 4가지 형태의 구조물 모두 저층일수록 제어효과가 큰 것을 나타냈다. 그 중 옥상층에 연약층이 존재하는 Model-IV은 고층에서 다른 형태의 구조물에 비해 가장 적은 제어효과를 보이고 있고, 이에 반해, 가속도 제어효과

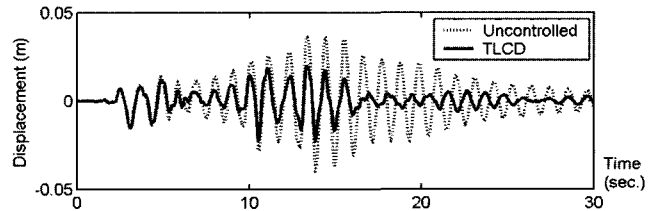


(a) EQ-I

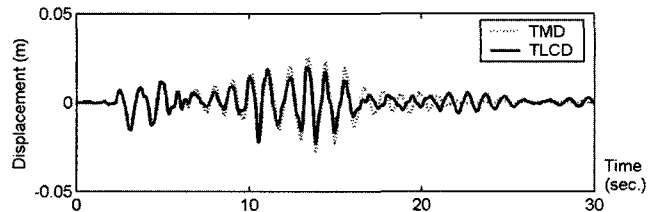


(b) EQ-II

그림 3 10층 예제구조물에 사용된 인공지진



(a) 제어 전과 TLCD 설치 후



(b) TMD와 TLCD 비교

그림 4 Model-I의 EQ-I에 대한 옥상층 상대변위 시간이력

표 5 10층 예제구조물에 대한 TMD/TLCD의 성능지수 결과

Model	제어기	EQ-I			EQ-II		
		J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
I	TLCD	0.570	0.632	0.708	0.620	0.622	0.689
	TMD	0.690	0.772	0.823	0.669	0.665	0.712
II	TLCD	0.577	0.692	0.761	0.623	0.622	0.711
	TMD	0.691	0.750	0.845	0.670	0.665	0.743
III	TLCD	0.647	0.727	0.875	0.630	0.646	0.790
	TMD	0.748	0.767	0.874	0.674	0.674	0.781
IV	TLCD	0.616	0.703	0.722	0.625	0.631	0.724
	TMD	0.702	0.793	0.822	0.676	0.662	0.753

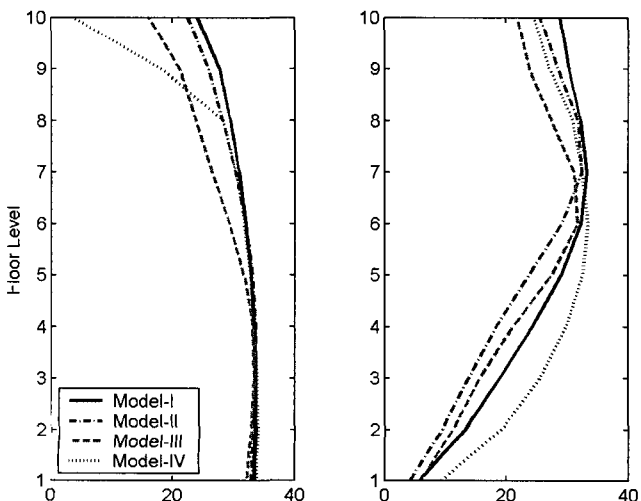


그림 5 10층 예제구조물의 TMD 설치 후 RMS 응답 감소계수

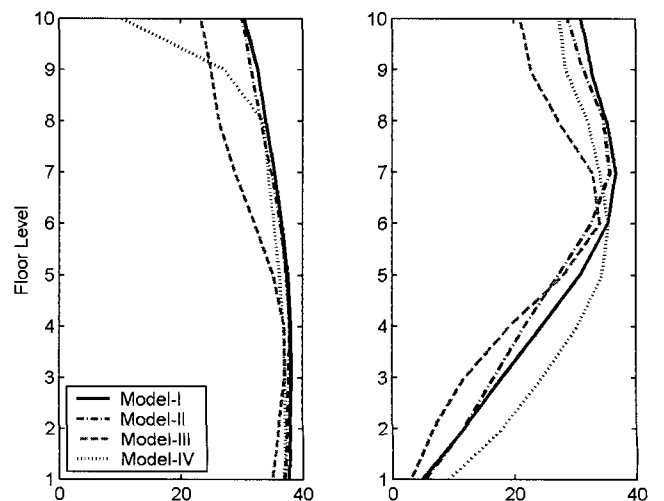


그림 6 10층 예제구조물의 TLCD 설치 후 RMS 응답 감소계수

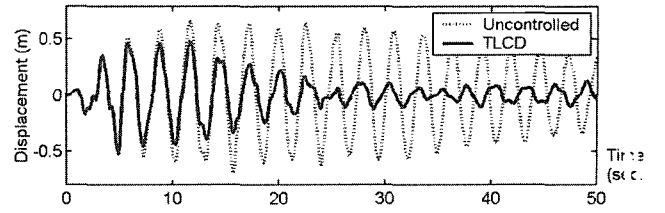
는 Model-IV가 저층에서 다른 형태의 구조물에 비해 가장 큰 제어효과를 보이고 있다. 전체적으로 가속도 제어에 있어서는 저층보다는 고층에서 가속도 제어효과가 큰 것으로 나타났다. 일반 건축구조물의 지진에 대한 영향은 저층에 구조물의 손상에 중요한 요소인 큰 층간변위를 유발시키고 상층 부어는 사용성에 중요한 요소인 절대가속도를 크게 유발시킨다. 따라서 위의 예제에서 보이듯이 변위에 대하여 고층보다 저층에 보다 좋은 감쇠효과를 발휘하고 가속도에 대하여 저층보다는 고층에 보다 좋은 감쇠능력을 발휘하는 TMD와 TLCD 모두 효율적인 감쇠장치라 할 수 있다.

5.2 20층 예제구조물

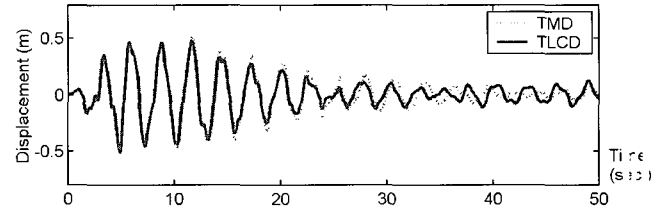
본 예제구조물은 옥상층에 TLCD 또는 TMD를 설치한 20층의 전단건물로서 표 6에 구조물의 특성을 나타내었다. 이 구조물은 1차모드 고유주기가 2.75초로 앞의 예제에 비하여 상당히 장주기 구조물에 속한다. 각 모드의 감쇠비는 1%로 가정하였다. 외란으로는 최대 가속도가 0.4g인 1940년 El Centro S00E 지진을 사용하여 감쇠기의 성능평가 및 특성을 파악하였다. 주 구조물의 1차모드 질량에 대한 감쇠기의 질량은 TLCD와 TMD 모두 동일한 질량의 비($\mu=0.02$)를 사용하였으며, 이는 구조물의 전체질량에 대하여 0.81%에 해당한다. 표 2에 주어진 최적공식을 사용하여 산정한 TLCD와 TMD의 최적설계변수는 표 7에 나타내었다.

그림 7(a)는 TLCD 설치 전과 설치 후의 옥상층 상대변위의 시간이력을 보여준다. 초기에는 제어되는 모습을 거의 볼 수 없지만 시간이 지남에 따라 변위가 급격하게 감소함을 알 수 있다. 그림 7(b)는 TMD와 TLCD의 옥상층 변위시간이력을 비교한 모습인데 두 제어기 모두 거의 비슷한 모습을 보인다. 그림 8의 (a)와 (b)는 각각 건물 높이에 따른 최대 상대변위와 최대 층전단력을 나타낸 것이다. TLCD와 TMD를 설치함으로써 상대 변위와 전단력이 제어되는 모습이 거의 같게 나타났다.

또한 감쇠기의 제어성능을 상대변위, 층간변위, 절대가속도에 대하여 각각 최대 성능지수와 RMS 성능지수를 사용하여 평가하였고, 그 결과를 표 8에 나타내었다. 최대성능지수($J_1 \sim J_3$)에서 상대변위 제어에서는 TMD가 그리고 층간변위와 절대가속도 제어에서는 TLCD가 더 우수하게 나타났다. 전



(a) 제어 전과 TLCD 설치 후



(b) TMD와 TLCD 비교

그림 7 20층 예제구조물의 El Centro 지진에 대한 옥상층의 상대변위 시간이력

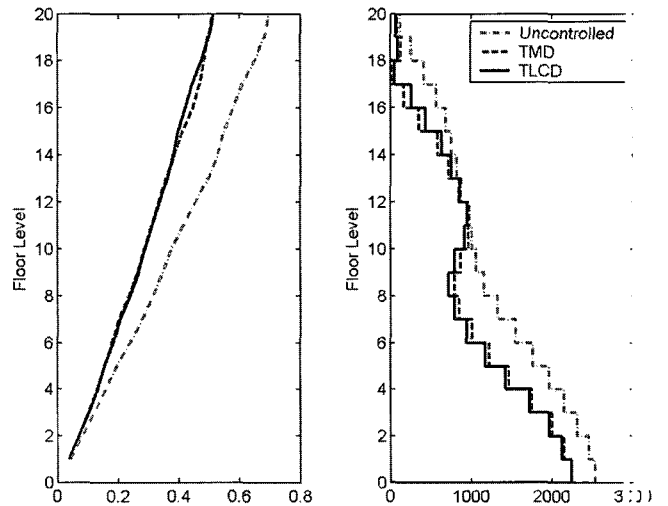


그림 8 20층 예제구조물의 El Centro 지진에 대한 응답

체적으로는 상대변위 성능지수가 가장 우수하게 나타났고, 층간변위, 절대가속도 순으로 나타났다. RMS 성능지수 ($J_4 \sim J_6$)에서는 전체적으로 TLCD가 TMD보다 우수한 것으로 나타났고, 층간변위 성능지수가 가장 우수한 것으로 나타났고, 다음으로 상대변위, 절대가속도 순으로 나타났다.

표 6 20층 예제구조물

층	층 질량(tonf)	층 강성(kN/m)	고유주기(초)
1, 2, 3, 4, 5	50	60000	$T_1=2.75$ $T_2=1.04$ $T_3=0.63$
6, 7, 8, 9, 10		45000	
11, 12, 13, 14, 15		30000	
16, 17, 18, 19, 20		21000	

표 7 20층 예제구조물에 사용된 TMD/TLCD의 최적 설계변수

TMD		TLCD	
f	ξ_d	f	ξ_h
0.979	0.150	0.985	0.831

표 8 20층 예제구조물에 대한 TMD/TLCD의 성능지수 결과

J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6	
TLCD	0.735	0.873	0.955	0.637	0.501	0.722
TMD	0.732	0.876	0.973	0.690	0.540	0.765

6. 결 론

본 논문에서는 TMD 와 TLCD를 최적공식을 이용하여 설계한 후 다양한 건물에 적용을 하고, Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀도함수를 이용하여 실제의 지진에 가깝도록 설계한 인공지진과 El Centro 지진을 외력으로 구조물에 가한 후 응답을 관찰하여 그에 따른 제어성능을 비교 분석하였다. 인공지진을 사용한 10층 4가지의 예제구조물의 옥상층에 설치된 TMD와 TLCD의 제어성능 분석결과, 층간변위 제어에서는 지층에서 큰 제어성능을 발휘하고, 절대가속도 제어에서는 상층부에서 성능이 우수한 것으로 나타났다. 이것은 지진에 대해 구조물의 손상에 가장 큰 피해를 주는 저층부의 층간 변위와 거주자의 사용성 측면에서 가장 취약한 고층부의 절대가속도에 있어서 TLCD와 TMD 모두 효과적인 제어기임을 보여준다고 할 수 있다. 또한 El Centro를 사용한 장주기 구조물의 제어에 있어서도 TLCD 와 TMD 모두 상당한 정도의 최대응답과 RMS 응답의 제어효과가 있음을 알 수 있다.

TLCD와 TMD 성능비교 측면에서는, TLCD가 TMD보다 변위 제어에 우수한 성능을 보였고, 가속도 제어성능에서는 서로 비슷한 것으로 나타났다. 종합적으로 TLCD는 TMD에 비해 응답제어성능에서 있어서 비슷하거나 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있다. 특히, 설치의 용이성과 경제성, 여러 다른 용도로의 전용 가능성, 유지보수의 용이성, 그리고 재설계의 편의성 등을 고려할 때, TLCD가 기존에 건물의 응답제어에 많이 사용되는 TMD를 대체할 수 있는 감쇠장치라 할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 삼성물산(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Sakai, F., Takaeda, S., and Tamaki, T., "Tuned Liquid Column Damper-New Type Device for Suppression of Building Vibrations," *Proc. Int Conf. on High Rise Building*, Nanjing, China, 1989, pp. 25-27.
2. Chang, C. C. and Qu, W. L., "Unified Dynamic Absorber Design Formulas for Wind-Induced Vibration

- Control of Tall Buildings," *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 7, 1998, pp. 147-166.
3. Wright, G., "Steadying Influence - Damper systems save millions in cost, while reducing lateral movement in tall buildings," *Building Design & Construction*, 2002, 11.
4. Fortner, B., "Water Tanks Damp Motion in Vancouver High-Rise," *Civil Engineering*, 2001. 6, p. 18.
5. Yalla, S. K. and Kareem, A., "Optimum Absorber Parameters for Tuned Liquid Column Dampers," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 906-915.
6. Kim, H., "Wavelet-Based Adaptive Control of Structures under Seismic and Wind Loads," The Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University, 2002.
7. Rana, R. and Soong, T. T., "Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 1998, pp. 193-204.
8. Den Hartog, J. P., *Mechanical Vibrations*, 4th Edition. McGraw-Hill, New York, 1956.
9. Sadek, F., Mohraz, B., and Lew, H. S. "Single and Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 439-463.
10. Gao, H., Kwok, K. C. S., and Samali, B., "Optimization of Tuned Liquid Column Dampers," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 6, 1997, pp. 476-486.
11. Yang, J. N., Akbrapour, A., and Ghaemmaghami, P., "New Optimal Control Algorithms for Structural Control," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 113, No. 9, 1987, pp. 1369-1386.
12. Spencer, B. F. Jr., Suhardjo, J., and Sain, M. K. "Frequency Domain Optimal Control Strategies for Aseismic Protection," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 1, 1994, pp. 135-158.
13. Balendra, T., Wang, C. M., and Rakesh, G., "Vibration Control of Various Types of Buildings using TLCD," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 83, 1999, pp. 197-208.