

지진 하중에 대한 동조액체감쇠기 성능 수치해석 검토

한 상 환^{1*} · 오 승 보¹ · 하 성 진¹

¹한양대학교 건축공학부

Seismic Performance of SDF Systems with Tuned Liquid Damper Subjected to Ground Motions

Sang-Whan Han^{1*}, Seung-Bo Oh¹ and Sung-Jin Ha¹

¹Division of Architectural Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 04763, Korea

Abstract

Tuned Liquid Dampers(TLD) are energy dissipation devices that have been proposed to control the dynamics response of structure. The TLD has been shown to effectively control the wind response of structures. However, controlling responses of structures with TLD under seismic loads are not fully investigated. The objective of this study is to evaluate the seismic performance of single degree of freedom(SDF) with TLDs having various tuning and mass ratios. For this purpose, analytical studies are conducted. Different soil conditions are considered in this study. As a result, performance of TLD, appeared differently depending on the natural period, damping ratio of the structure. Also TLD tuning ratio appeared differently.

Keywords : tuned liquid damper(TLD), vibration control, earthquake response, energy dissipation

1. 서 론

1.1 연구의 목적

컴퓨터의 발달로 해석이 빠르고 간편해짐에 따라 건축물은 점차 고층화되고 부재는 세장해지고 있다. 그와 더불어 내진 공학의 발달로 구조물의 내진성능을 확보하기 위해 연성 능력이 중요해졌으며, 이는 극한 하중에서 에너지의 에너지 흡수 및 소산 능력이 무엇보다 중요하게 되었다.

최근까지 여러 종류의 수동 에너지 소산 장치가 개발되었는데, 이런 수동 감쇠기 중에 동조액체감쇠기(tuned liquid damper, TLD)는 적은 설치 비용 및 쉬운 설치, 경제적 효율성으로 인해 많은 관심을 받고 있다.

TLD는 액체를 채운 탱크 안에 액체가 출렁임으로 인해 발생하는 경계층(boundary layer)의 마찰력으로 인해 구조물의 진동을 감쇠시키고, 액체표면의 쇄파(wave breaking)를 통해 에너지를 소산시킨다.

TLD는 진동저감 성능이 동조질량감쇠기(tuned mass damper, TMD)보다 우수한 것으로 보고되고 있으며(Mondal, 2014), 일본에 위치한 Shin Yokohama Prince Hotel과 Yokohama Marine Tower, 미국의 Manhattan Random House Tower, 그리고 캐나다의 One King West Building과 같이 세계 널리 적용되고 있다.

TLD에 관한 연구는 풍하중뿐만 아니라 여러 지진하중에 대해서도 연구가 진행되어 왔지만, 지진하중에 대한 동조비에 따른 성능에 대해서는 많은 연구가 진행되지 않았다. 본 연구에서는 TLD의 여러 조건을 변경하여 지진으로 인한 지반운동에 대한 TLD의 진동제어 효과를 평가하고자 한다. 이를 위하여 다양한 TLD를 장착한 단자유도 구조물을 대상으로 해석연구를 진행한다. 해석연구에서는 다양한 지역과 지반종류를 고려한다.

1.2 기존 연구

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

* Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-1715; E-mail: swan@hanyang.ac.kr

Received April 4 2016; Revised April 18 2016;

Accepted April 19 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

사각 기둥 형태의 TLD에 관한 움직임은 많은 연구가 있었다. TLD의 성능을 결정짓는 변수 중에 가장 중요한 것은 물의 출렁임 고유 진동수(natural sloshing frequency)이다. 물의 출렁임 고유진동수가 구조물의 고유진동수와 같을수록 최적의 성능을 나타내는 여러 연구에서 밝혀졌다. 따라서 많은 에너지 소산을 위해 일반적으로 구조물의 고유 주기와 TLD의 고유주기를 일치시킨다. TLD는 큰 진폭을 가진 운동을 시작하면 파쇄가 발생하고, 이는 액체 고유 출렁임 진동수를 변경시킨다. 이 복잡한 비선형 움직임이 일으킨 TLD 탱크 바닥에 생긴 전단 마찰력으로 인해 구조물의 움직임에 저항을 하게 되고, 또한 파쇄가 발생함으로 인해, 파쇄가 없는 TLD의 감쇠보다 더 큰 감쇠를 나타낼 수 있다(Fujino, 1992).

전체 구조물에 대한 물의 비율을 나타내는 질량비 또한 TLD-구조물 상호작용에 있어서 중요한 변수이다. 질량비는 일반적으로 1%에서 4%가 제안되었다(Banerji, 2000). 구조물 전체 질량에 비해 상대적으로 적은 질량비는 전체 시스템에 있어 관성력에 크게 기여하지 않고, 효과적으로 구조물의 응답 감소를 얻을 수 있다.

TLD의 수심 또한 성능을 결정하는 중요한 요소이다. TLD는 깊은 물 또는 얇은 물에서 모두 그 성능을 발휘할 수 있다. Banerji(2000)와 Seto(1996)의 연구에서는 상대적으로 얇은 물(shallow water), h/L 의 비가 0.15와 같거나 그보다 작아야 더 많은 에너지 소모를 불러 온다고 소개하고 있다. 여기서 h 는 TLD안 정지상태에서 물의 높이이고, L 은 TLD 탱크의 가진방향 길이이다.

탱크 안의 얇은 물은 큰 힘이 가해질수록 더 많은 쇄파가 발생하게 된다. 쇄파가 발생하게 되면 액체 표면은 연속적이지 않으며, 더 큰 에너지 소산을 나타나게 한다(Fujino, 1992). 그러므로 가진의 크기 또한 TLD 수치해석에 있어 중요한 요소이다. 또한 물의 움직임으로 인해 발생하는 비선형 또한 중요하다.

이러한 구조물의 진동에 따른 TLD의 움직임을 이해하기 위해 많은 해석 모델이 제안되었다. Fujino(1992)는 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 비선형성을 포함한 TLD의 에너지 소실량을 연구하였으나, 지나치게 계산량이 많은 단점이 있다. 다른 해석방법으로는 TLD의 특성을 TMD로 질량, 강성 및 감쇠를 등가 치환하여 해석하는 모델이 있다. Sun(1995)은 비선형 Navier-Stokes 방정식을 기본으로 하여 등가 TMD 요소를 구하였다. Yu(1999)는 TLD를 고체 질량 댐퍼로 모델링하였는데, 이는 물 움직임의 비선형 강성과 감쇠를 잘 나타낼 수 있다. 이 모델은 구조물의 운동방정식에 포함시켜 TLD로 하여금 추가 자유도를 갖게 한다.

대부분의 연구는 풍하중에 대한 진동제어를 목표로 TLD의

연구가 진행되었으나 본 연구에서는 지반운동에 대한 진동 제어를 목적으로 해석적 연구를 진행하고자 한다. TLD 해석 모델로는 Yu 모델을 이용한다. TLD의 출렁임 진동수는 구조물의 진동수에 맞춰 여러 진동수를 고려할 것이다. 또한 최대가속도가 각기 다른 세 지역의 지진하중을 모델로 하여 그 성능을 검토할 것이다.

2. TLD-구조물의 상호작용 해석모델

TLD를 등가의 TMD로 모델링함에 있어 출렁임에 참여하는 질량을 정하는 일은 매우 중요하다. 액체 내의 재순환 영역의 형성으로 인해 일부의 액체들이 출렁임에 참여하지 않게 된다. 1950년대의 연구자들은 위치에너지 이동에 관한 이론으로 출렁임에 참여하는 질량(m_{eff})과 출렁임에 참여하지 않는 질량(m_0)를 밝혀내었다(Graham and Rodriguez, 1952). m_{eff} 에 관한 식은 다음과 같다.

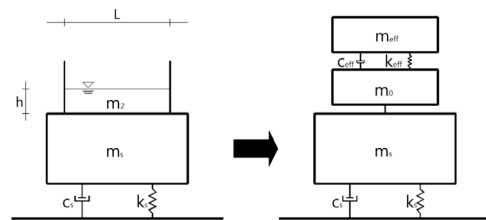


Fig. 1 Schematic of practical damped equivalent TMD

$$m_{eff} = \frac{8 \tanh(\pi \frac{h}{L})}{\pi^3 (\frac{h}{L})} m_2 \quad (1)$$

여기서, h 는 TLD 안의 액체 깊이이고, L 은 TLD의 가진 방향 길이이다. Fig. 1은 출렁임 진동에 참여하지 않는 질량 m_0 와 출렁임에 참여하는 질량 m_{eff} 가 표시되어 있다. m_2 는 TLD 액체의 전체 질량이다.

사각기둥형 TLD의 출렁임 진동수(sloshing frequency)는 TLD 탱크의 가진방향 길이와 물 높이에 의해 결정된다. TLD의 진동수는 TLD의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소이며 이를 구하는 식은 식 (2)와 같다(Lamb, 1932).

$$f_{TLD} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh(\frac{\pi h}{L})} \quad (2)$$

Yu가 개발한 모델은, TLD의 소산된 에너지를 등가의 NSD(nonlinear-stiffness-damping) 모델로 치환하는 것이다. NSD로 치환한 모델의 등가 강성과 감쇠비를 찾는 데에는 실험을 통해 얻은 응답이 사용되었다. 등가 강성 및 감쇠비는

물의 깊이와 물 탱크의 가진방향 길이, 가진 진폭이 사용되었다. 무차원 진폭(A)은 강성과 감쇠비를 설명하는데 가장 중요한 값이다.

$$A = \frac{A}{L} \tag{3}$$

여기서, A는 가진 진폭이다. A를 구하였으면, 이제 등가의 감쇠비와 강성경화비를 구할 수 있다. 등가 감쇠비는 식 (4)를 통해서 구할 수 있다.

$$\xi_d = 0.5A^{0.35} \tag{4}$$

강성 경화비는 TLD의 강성을 등가의 NSD 모델의 강성(k_d)로 치환시키기 위한 값이다. 이는 쇄파의 크기에 따라 두 개의 범위값을 가지며 이는 A에 의해 결정된다.

$$\kappa = 1.075A^{0.007} \quad A \leq 0.03 \text{ 약한 쇄파} \tag{5}$$

$$\kappa = 2.52A^{0.25} \quad A > 0.03 \text{ 강한 쇄파} \tag{6}$$

Fig. 1은 TLD가 설치된 단자유도 구조물이 등가의 TMD로 치환됨에 따라 TLD-구조물의 상호작용을 연구함에 있어 2 자유도 구조물로 해석될 수 있음을 보여주고 있다.

$$M = \begin{bmatrix} m_s + m_0 & \\ & m_{eff} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_s + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_s + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix}$$

질량 행렬 M, 감쇠 행렬 C, 강성 행렬 K는 각각 위와 같이 표현할 수 있다.

여기서, m_s, c_s, k_s는 각각 구조물의 질량, 감쇠, 강성이다. 위의 M, C, K값을 운동방정식에 넣으면 다음과 같다.

$$M \begin{Bmatrix} \ddot{x}_s \\ \ddot{x}_d \end{Bmatrix} + C \begin{Bmatrix} \dot{x}_s \\ \dot{x}_d \end{Bmatrix} + K \begin{Bmatrix} x_s \\ x_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P(t) \\ x_0 \end{Bmatrix} \tag{7}$$

여기서, x_s, x_s, x_s는 각각 구조물의 가속도, 속도, 변위이다. 작은 첨자 d가 붙은 항목도 NSD 모델의 같은 항목이다.

이 모델에서 TLD가 설치된 구조물의 변위인 식 (3)의 A를 얻을 수 있다. 따라서 변위가 0을 지나칠 때까지의 각 시간

별로 NSD 모델의 식 (4), 식 (5), 식 (6)을 통하여 TLD의 강성과 감쇠비를 구할 수 있다.

3. 구조물 선정

구조물은 구조물의 진동 고유주기별로 5가지로 분류하였고, 또 그 감쇠에 따라 0%, 1%, 2%, 5% 4가지로 분류하였다. 그 분류는 Table 1과 같다.

Table 1 Structural analysis of variables

Category	Mass (kg)	Stiffness (kg/cm)
T _n (sec.) 0.5	564	88973
0.75	564	39543
1.0	564	22243
2.0	564	5561
5.0	564	890

구조물은 고유주기 1초를 기준으로 단주기의 구조물 2가지와, 장주기의 구조물 2가지를 선정하였다. TLD의 현실적인 크기와 중저층 구조물에서 많이 나타나는 고유주기를 고려하여 단주기의 구조물은 각각 0.5초, 0.75초를 선정하였으며, 장주기에서는 국내 20층 내외 규모의 아파트 등에서 많이 나타나는 2초, 또한 초고층 구조물에서 많이 나타나는 고유주기인 5초를 선정하였다.

4. 지진하중 선정

지진하중은 ASCE 7-10에서 제시한 설계 가속도 스펙트럼에 적합한 지반운동을 선정하였으며, 선정 방법은 Ha와 Han (2016)이 제안한 알고리즘을 따른다. 이 알고리즘은 설계 스펙트럼의 평균만 고려하여 Sum of square error(SSE)를 평가하여 순차적으로 지반운동을 선정하는 방법이다.

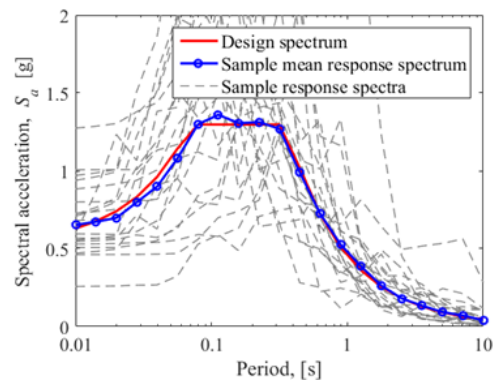


Fig. 2 Design spectrum of S_A, los angeles. Ground motion using algorithms of ha and han selected

Table 2 Maximum considered earthquake(MCE)

Location & soil condition		Accel S_{D1}	S_{DS}
Los angeles	S_A	0.455g	1.297g
	S_B	0.568g	1.621g
	S_C	0.739g	1.621g
	S_D	0.852g	1.621g
	S_E	1.364g	1.459g
Seattle	S_A	0.282g	0.728g
	S_B	0.352g	0.910g
	S_C	0.458g	0.910g
	S_D	0.529g	0.910g
	S_E	0.846g	0.819g
Boston	S_A	0.037g	0.155g
	S_B	0.046g	0.144g
	S_C	0.078g	0.173g
	S_D	0.111g	0.231g
	S_E	0.161g	0.361g

지역은 크게 3가지를 선정하였다. 미국의 대표적 강진 지역인 Los Angeles와 중진 구역인 Seattle, 한국과 비슷한 약진구역인 Boston을 선정하였다.

지반조건은 각각 S_A, S_B, S_C, S_D, S_E 를 고려하였으며, 각 지역별로 2475년 주기 최대예상지진(maximum considered earthquake, MCE)은 Table 2와 같다.

각 지반조건별로 총 15개의 철계 가속도 스펙트럼에 대해 20개의 지반운동을 선정하여 총 300개의 지반운동을 고려하였다.

5. 해석 결과 및 분석

동조비(β)는 TLD의 고유진동수 f_{TLD} 와 구조물의 고유진동수 f_n 의 비이다. 이는 식 (8)과 같이 표현한다.

$$\beta = f_{TLD} / f_n \tag{8}$$

동조비는 TLD의 성능을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 일반적으로 동조비 β 는 1.0 내외의 값을 취한다. 구조물에 조화하중이나 또는 어떠한 외력이 가해지게 되면, 구조물은 구조물이 가지고 있는 고유주기와 그 mode shape에 맞춰 운동을 하기 때문이다. 구조물이 고유주기에 맞춰 움직이게 되었을 때, 그에 동조된 TLD가 설치된 구조물의 운동에 설치된 구조물의 운동에 맞춰 함께 출렁일 때 일반적으로 감쇠의 크기가 가장 크기 때문이다.

지진하중은 조화하중과 다르게 하중의 형태가 일정하지 않고, 그 크기와 형상 또한 각기 다르다. 그러므로 그 하중과 형태와 크기, 구조물의 고유주기에 따라 그 움직임이 다르며,

그 결과 조화하중에 대한 TLD의 최적 성능이 반드시 동조비가 1.0일 때 나타나지 않을수도 있다.

본 연구에서는 $0.2 \leq \beta \leq 2.0$ 구간을 정하여, 0.1 간격으로 동조비를 증가시키며, 총 114,000번의 계산을 통하여 각 지반운동에 대한 TLD의 성능을 평가하며 최적의 동조비를 계산하였다.

또한 지진으로 인한 설계 전단력은 최대구조물 변위(peak structure displacement, PSD) $\times \omega_n^2 \times$ 질량으로 결정되므로 변위 비교를 통해 성능을 검토한다.

5.1 구조물의 고유주기에 따른 결과 및 분석

Fig. 3은 Los Angeles의 S_C 지반에 대한 지진에 따른 응답을 나타낸 그래프이다. 각 지반운동에 대한 구조물의

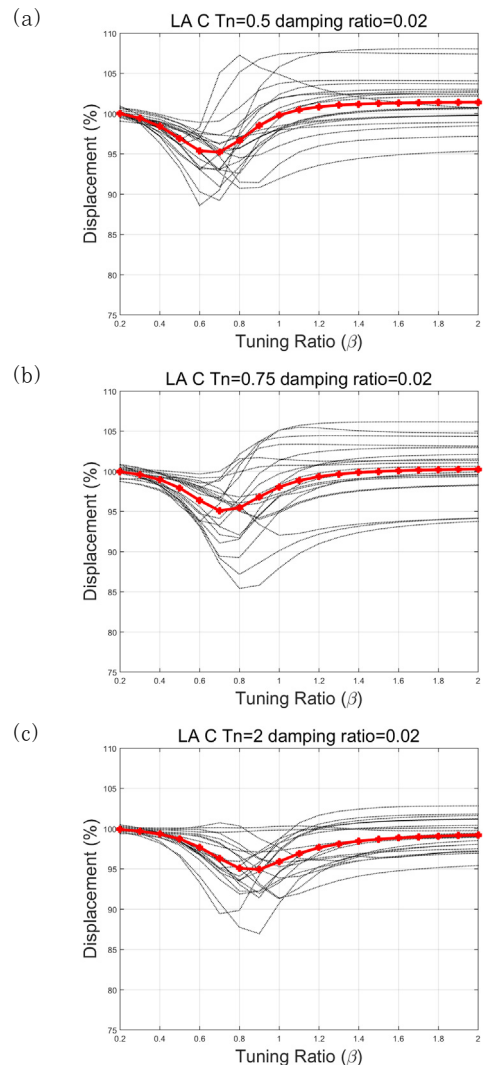


Fig. 3 Response of earthquake, los angeles S_C , $\xi = 2\%, \beta = 1\%$
(a) $T_n = 0.5\text{sec}$. (b) $T_n = 0.75\text{sec}$. (c) $T_n = 2.0\text{sec}$.

응답을 구하여, 그 변위 감소 백분위 평균을 붉은 선으로 나타내었다. 위 그래프에 나타나듯이 각 구조물의 주기별로 최적의 성능을 나타내는 동조비는 구조물의 고유주기 별로 각기 다르게 나타났다. 고유주기 1.0sec. 미만 단주기 구조물의 지진하중에 대한 최적 동조비는 0.6~0.8을 나타내었다.

또한 고유주기 1초 이상의 장주기 구조물의 경우는 주기가 길어질수록 그 최적 성능을 가지는 동조비가 1.0에 가까워짐을 알 수 있었다.

이는 구조물의 지진하중에 대한 응답에 구조물의 주기가 영향을 미치기 때문이다. 일반적으로 구조물은 가진주기(t_d)와 구조물의 고유주기(T_n)의 비율에 따라 구조물의 응답은 각기 다른형태로 나타나게 되며, 대체적으로 그 t_d/T_n 의 값이 클수록 최적 동조비가 1보다 작은 경향이 있다.

일반적으로 지진하중의 주기는 복잡하며 또한 구조물의 고유주기보다 매우 작다. 단주기의 구조물의 경우, 장주기 구조물에 비해 지진하중의 주기와 차이가 크지 않기 때문에, 장주기 구조물에 비해 구조물의 고유주기로 운동하기 보다는, 지진과 같은 복잡하고 짧은 시간에 급격하게 변하는 하중에 대해 지진력과 유사한 형태로 운동을 하여, 최적의 동조비가 1보다 더 작게 나타난 것으로 판단된다.

이에 반해, 장주기의 구조물 경우 지진하중의 주기와 구조물의 고유주기의 차이가 커, 구조물이 비교적 단주기에 비해 구조물이 가진 고유주기대로 운동을 하여, 최적의 감쇠 효과의 감쇠비가 1.0에 가깝게 나타난 것으로 보인다. 이는 풍진동과 같은 하중에 의해 설계된 TLD가 고유주기가 1초 미만인 구조물의 경우에는 지진하중에 대해 그 성능이 제한적일 수 있음을 나타낸다.

5.2 구조물의 감쇠비에 따른 결과 및 분석

Fig. 4는 Seattle 지역의 S_D 지반의 지진에 대한 고유주기 2초를 갖는 구조물을 질량비 1%의 TLD를 설치했을때 응답을 감쇠비 1%, 5%로 나타낸 그래프이다.

최적의 동조비는 0.9로 구조물의 감쇠비에 따라 최적의 동조비는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 TLD의 성능은 구조물의 감쇠비 별로 다르게 나타났다. 구조물의 감쇠가 작을 수록 TLD의 성능이 뛰어나게 나타났다. 이는 TLD가 구조물의 감쇠와 관계없이 물의 물렁임과 쇠파로 인해 에너지를 소산시키는 장치이기 때문에 발생하는 현상이다. 이 에너지 손실은 구조물에 일정한 수준으로 유지된다. 구조물이 더 큰 감쇠를 가진다면 TLD의 출렁임으로 인한 경계층 마찰이나 쇠파로 인한 에너지 손실량이 더 줄어들게 될 것이다. 따라서 TLD의 영향력 또한 줄어들게 된다. 따라서 구조물의 감쇠가 작은

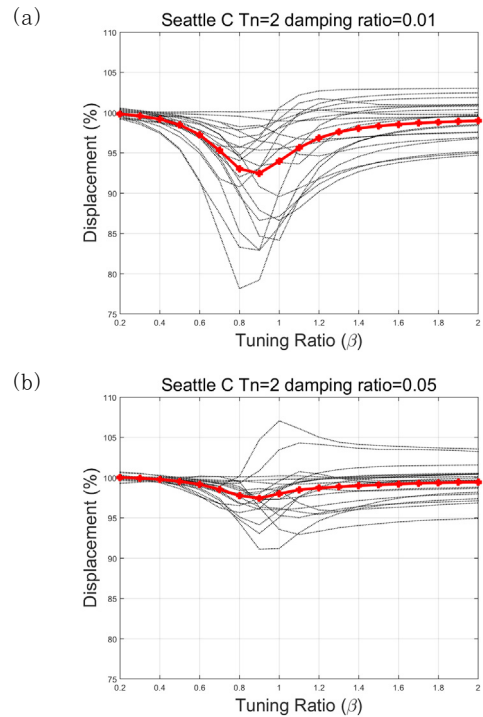


Fig. 4 Response of earthquake, seattle S_D , $T_n=2$ sec, $\beta=1\%$ (a) $\xi_s=1\%$. (b) $\xi_s=5\%$.

건물에 대해서 지진하중에 대해 TLD는 그 성능을 충분히 발휘 할 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 구조물의 지역에 따른 결과 및 분석

Fig. 6은 각각 Los Angeles, Boston의 지반조건 S_C 에서, 구조물의 고유주기 0.75초, 감쇠비 1%의 조건일 때 지진에 대한 구조물의 응답을 나타낸 그래프다.

지역 외에는 같은 조건임에도 TLD의 최적 동조비는 지역마다 조금씩 차이가 있었고, 그 성능에도 약간의 차이가 있었다. Boston이 최적 동조비에서 제일 성능이 뛰어나게 나타났으며, Seattle과 Los Angeles가 그 다음 순이다.

S_E 지반의 최대 예상지진은 Table 2에서와 같이 Los Angeles와 Seattle, Boston은 각각 단주기 스펙트럼가속도는

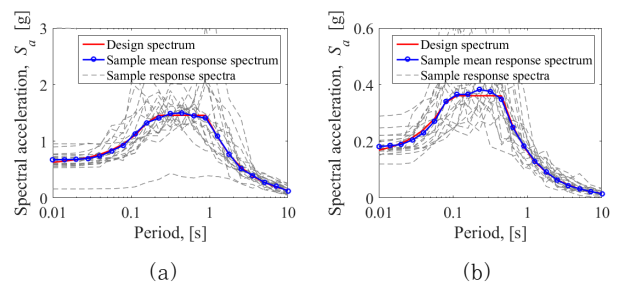


Fig. 5 Design response spectrum, S_E (a) Los angeles, (b) Boston

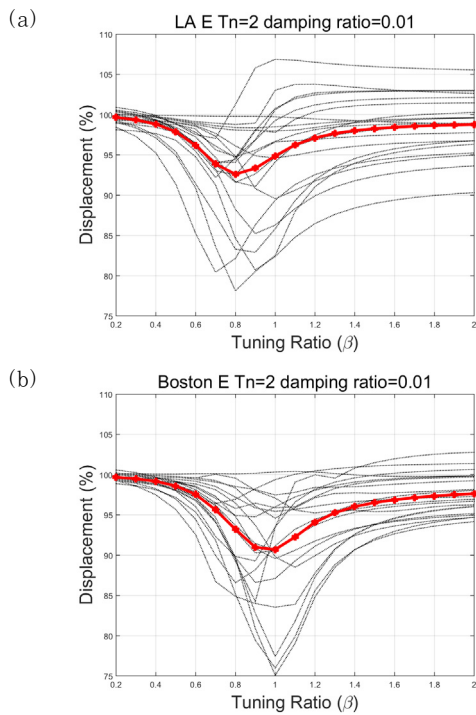


Fig. 6 Response of earthquake, S_E , $T_n=2$ sec, $\beta=1\%$, $\xi_s=1\%$ (a) Los angeles, (b) Boston

1.459g, 0.819g, 0.361g 이다. 즉 지진하중의 크기는 Los Angeles가 가장 크고, Boston이 가장 작다고 할 수 있다. 이는 지진으로 인한 변위가 Los Angeles가 가장 크며, Boston이 가장 적다고 할 수 있다. 또한 Fig. 5는 S_E 지반에서의 설계응답스펙트럼이다. 각 지역을 비교해보면 설계 지진하중이 클수록 지진하중의 주기 또한 길어짐을 알 수 있다.

앞서 5-1에서 t_d/T_n 의 값에 따라 최적 동조비가 달라짐을 알 수 있었다. 그와 같이 지진하중의 가진 주기가 길어 짐에 따라 Fig. 6에 나타난 것과 같이 최적 동조비가 달라짐이 나타났다. 또한 지진하중이 클수록 그 성능이 떨어짐이 나타났다.

식 (5), 식 (6)은 진폭이 커질수록 TLD의 강성이 커짐을 나타내고 있다. 즉 TLD의 강성이 커지게 되면, TLD의 고유 주기는 짧아지게 되고, 이는 구조물의 고유주기에 영향을 줄 뿐만 아니라, TLD와 구조물의 고유주기가 일치하지 않게 되어 그 성능이 저하된다.

5.4 구조물의 지반조건에 따른 결과 및 분석

Fig. 7은 Boston의 S_B 지반과 S_E 지반에 대한 구조물의 지진응답 그래프이다. 이를 종합하여 각 지역에 따른 최적 TLD 동조비는 Table 3과 같다.

Table 3에 나타나듯이, 지역의 지반 가속도가 작고,

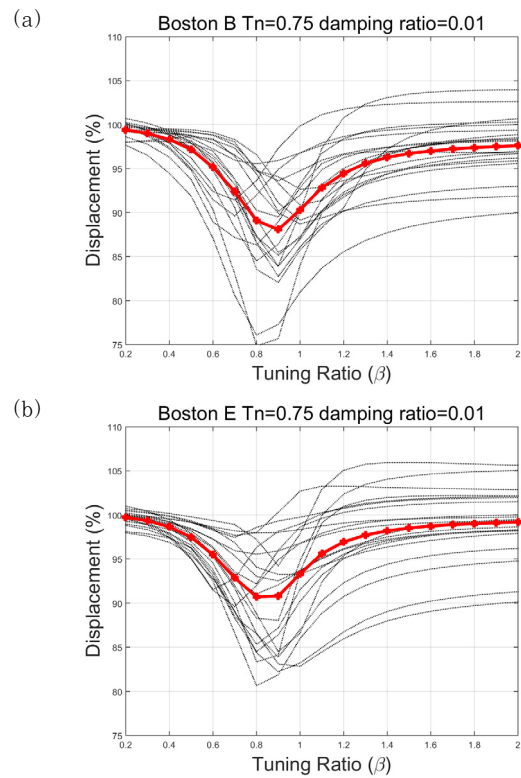


Fig. 7 Response of earthquake, boston, $T_n=0.75$ sec, $\beta=1\%$, $\xi_s=1\%$ (a) S_B , (b) S_E .

Table 3 Optimal TLD tuning ratio

Location \ Tn	0.5	0.75	1.0	2.0	5.0
Los angeles	0.71	0.76	0.79	0.86	0.9
Seattle	0.75	0.83	0.83	0.9	0.915
Boston	0.795	0.855	0.87	0.925	0.985

구조물의 고유주기가 길수록 TLD의 동조비가 1.0에 가까워 짐을 알 수 있다. 반면에 구조물의 주기가 짧고, 지진 하중이 강할수록, 1.0에서 차이가 점점 커짐을 알 수 있었다. 이는 짧은 고유주기를 가지거나, 강진 지역에 위치한 구조물의 경우에는 풍하중 제어를 위해 설계된 TLD가 그 성능을 발휘할 수 없음을 의미한다. 그러므로 구조물의 주기가 짧거나, 강진 지역의 경우에는 TLD 설치 시 그 목적과 용도를 확실히 하고 설치하는 것이 중요하다.

5.5 TLD 질량비에 따른 성능 검토

구조물과 TLD의 질량비는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\mu = m_2/m_s \tag{9}$$

여기서, m_2 는 Fig. 1에 표기된 것과 같이 TLD 탱크 안 물의

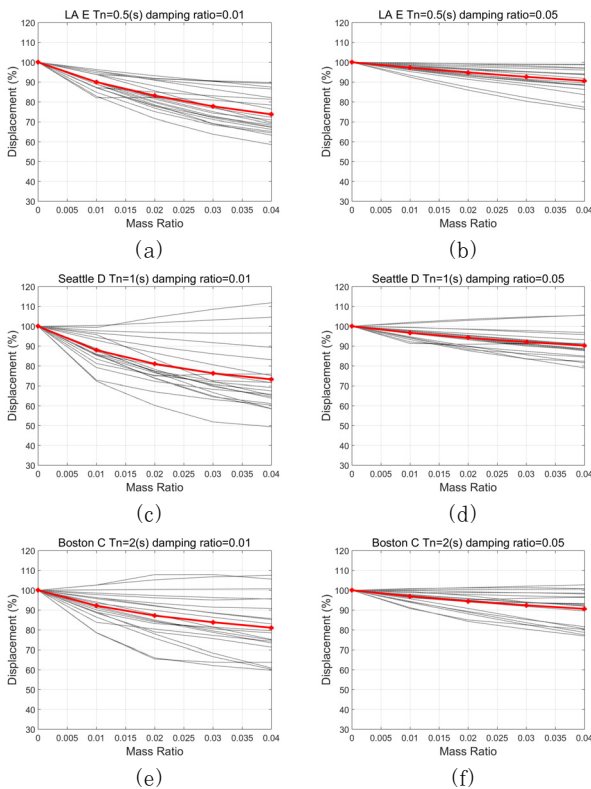


Fig. 8 Response of structures according by mass ratio and damping ratio
 (a) Los angeles, S_E , $\xi_s = 1\%$, (b) Los angeles, S_E , $\xi_s = 5\%$,
 (c) Seattle, S_D , $\xi_s = 1\%$, (d) Seattle, S_D , $\xi_s = 5\%$,
 (e) Boston, S_C , $\xi_s = 1\%$, (f) Boston, S_C , $\xi_s = 5\%$,

Table 4 w/o TLD contrast displacement percentage, $\mu = 4\%$

Location	Tn	Damping ratio		
		1%	2%	5%
L.A.	0.5	80.3	85.4	91.7
	0.75	78.8	84.7	91.3
	1.0	65.0	85.8	91.8
	2.0	81.8	85.7	91.2
	5.0	85.0	87.7	92.9
Seattle	0.5	80.0	83.2	90.8
	0.75	77.7	83.4	90.3
	1.0	77.7	83.6	90.7
	2.0	80.1	84.5	90.6
	5.0	83.6	86.7	92.3
Boston	0.5	77.8	83.3	90.4
	0.75	77.0	82.3	89.4
	1.0	76.9	82.1	89.2
	2.0	80.4	85.1	91.1
	5.0	82.6	85.5	90.8

질량이고, m_s 는 구조물의 질량이다. 일반적으로 μ 는 1~4%를 사용한다.

Fig. 8은 Los Angeles, Seattle, Boston의 구조물에 대해 최적의 동조비로 TLD를 설치한 후, μ 를 증가시키며

구조물의 응답을 그래프로 나타낸 것이다.

지진하중에 대해 TLD의 질량비에 대한 영향은 구조물의 감쇠비에 따라 근소한 차이를 나타냈다. 구조물의 감쇠비가 큰 경우(Fig. 8, b,d,f)에는 TLD의 질량 증가에 따른 감쇠효과가 비교적 선형적으로 나타났으며, 구조물의 감쇠비가 낮은 경우(Fig. 8, a,c,e)에는 질량에 따라 그 효과가 선형적으로 증가하지 않았으며, TLD 질량 증가에 따른 그 효율은 점차 감소하였다.

이는 TLD를 최상층에 많은 양을 집중하여 설치하더라도, 지진진동의 제어효과에 있어서는 일정수준 이상의 효과를 발휘하지 못하는 것임을 말한다.

최적의 동조비의 질량비 4%에서 감쇠효과는 Table 4이다.

6. 결 론

본 연구에서는 지역 및 지반조건과 구조물의 고유진동주기, 감쇠비를 변경해가며 지진하중에 대한 최적 동조액체 감쇠기의 동조비를 찾는 수치해석을 하였다. 수치해석 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 구조물의 고유주기에 따라서 지진하중에 대한 TLD의 최적 동조비는 다르게 나타났으며, 장주기를 가진 구조물일 수록 동조비가 1.0에 가깝게 나타났다.
- (2) 구조물의 감쇠비가 클수록 지진하중에 대한 TLD의 진동저감효과가 감소하였다.
- (3) 지진하중의 가진 주기가 짧고, 그 크기가 작을수록 지진하중에 대한 TLD의 최적 동조비는 1.0에 가깝게 나타났다.
- (4) TLD의 질량비가 클수록 진동저감효과는 좋아지는 것으로 나타났으나, 구조물의 감쇠비가 낮으면 그 진동저감 효율은 감소한다.
- (5) 따라서 가진 및 구조물의 고유주기에 따라 지진하중에 대한 TLD의 최적 동조비 또한 달라지므로, 지진하중에 의한 진동을 저감하기 위한 TLD를 설치하기 위해서는 예측되는 최대예상지진 및 지반조건을 충분히 조사하여야 하며, 구조물의 고유주기 및 감쇠를 확인하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단이 주관하는 중견연구자지원사업 (No. 2015R1A2A1A15055248)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Banerji, P.** (2000) Tuned Liquid Dampers for Controlling Earthquake Response of Structures, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 29, pp.587~602.
- Chopra, A.** (2001) Dynamics of Structures-theory and Applications to Earthquake Engineering. *Prentice-Hall*.
- Fujino, Y.** (1992) Tuned Liquid Damper(TLD) for Suppressing Horizontal Motion of Structure, *J. Eng. Mech.*, 118(10).
- Ha, S., Han, S.** (2016) A Method for Selecting Ground Motions that Considers Target Response Spectrum Mean and Variance as well as Correlation Structure, *J. Earthq. Eng.*, Published online.
- Yu, J.** (1999) A Non-linear Numerical Model of the Tuned Liquid Damper, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 28, pp.671~686.

요 지

동조액체감쇠기(TLD)는 에너지 소산장치로써 구조물의 동적응답을 제어하기 위해 개발되었다. TLD는 풍하중에 의한 구조물의 응답을 제어에 매우 효과적임을 보여줬다. 그러나 TLD가 설치된 구조물의 지진응답의 제어에 대해서는 충분한 연구가 이뤄지지 않았다. 이 연구의 목적은 TLD가 설치된 구조물에 여러 동조비와 질량비를 대입하여 지진에 대한 TLD의 성능을 도출하는 것이다. 이러한 목적을 위해, 수치해석 연구가 실시되며, 다른 토양 조건 또한 고려되었다. 그 결과 지진하중에 대한 TLD의 성능은 구조물의 고유주기, 감쇠비에 따라 다르게 나타났다. 또한 TLD의 동조비 다르게 나타남을 알 수 있었다.

핵심용어 : 동조액체감쇠기, TLD, 진동제어, 지진응답, 에너지 소산