

동조액체 감쇠기를 설치한 철근콘크리트 축소모델의 진동대 실험

Shaking Table Test of Small Scale RC Structure with Tuned Liquid Damper

우 성 식*
Woo, Seong Sik

이 상 현**
Lee, Sang Hyun

정 란***
Chung, Lan

ABSTRACT

In this study, in order to investigate the effectiveness of tuned liquid damper (TLD) for the seismic performance enhancement of the existing reinforced concrete (RC) apartment structure which is not seismically designed, shaking table test was conducted for the small scale five story RC structure with TLD. TLD model was constructed to have the frequency tuned to the first modal frequency of the structure, 2% mass ratio of the first modal mass, and 0.08 liquid depth ratio.

White noise with 0.2~5Hz frequency bandwidth tests were performed using the shaking table at Korea Institute of Machinery and Materials, and the displacement and absolute acceleration of each floor were measured. Test results indicate that more than 30% seismic responses reduction can be achieved using TLD for RC structure under white noise.

1. 서 론

질량형 제진장치의 하나인 TLD(Tuned Liquid Damper)는 설치가 용이하고, 유지관리 면에서 큰 장점을 가지고 있으며, 초기설치비용 또한 TMD(Tuned Mass Damper)에 비해 저렴하다.¹⁾ 이러한 장점들 때문에 해외는 물론 국내에서도 H 사가 시공하는 주거용 초고층 구조물에 진동제어장치로 사용되는 등 연구와 적용이 활발하게 이루어지고 있다. 하지만 이러한 연구 및 사례는 주로 신축되는 철골구조물의 풍하중을 고려한 사용성 향상을 목적으로 적용되고 있다. 지진하중을 고려한 TLD의 연구는 Banerji²⁾가 실제, 인공지진하중을 이용하여 Shallow water 형태의 TLD의 제어변수인 폭-깊이비, 물질량비, 진동수비에 따른 성능검토를 하였으나, 기존 구조물, 특히 철근콘크리트 벽식 아파트의 내진성능 확보를 위한 TLD 연구는 매우 부족한 현실이다.

본 연구에서는 내진설계가 되지 않은 기존 RC 벽식아파트의 내진성능 향상에 있어 동조액체감쇠기의 유효성과 제어성능을 파악하기 위한 초기연구의 성격으로 TLD를 설치한 RC 축소모델에 대한 진동대 실험을 수행하였다.

2. TLD 이론적 배경

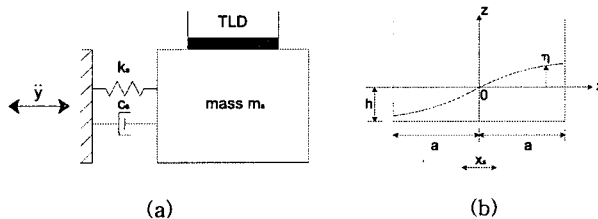


그림 1. TLD 운동모델

*정회원, 단국대학교 건축공학과 석사과정

**정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사, 공학박사

***정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수, 공학박사

TLD는 구조물의 고유진동수와 동조시켜 탱크내의 물의 움직임을 크게 하여 에너지를 소산시키는 원리를 가지고 있다. 그림 1 (a)는 구조물에 부착된 TLD 모델로, 다음 식 (1)과 같은 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$m_s \ddot{v}_s + c_s \dot{v}_s + k_s v_s = -m_s \ddot{y} + F \quad (1)$$

여기서, m_s, c_s 그리고 k_s 는 구조물의 질량, 감쇠 그리고 구조물의 강성이고, v_s 는 지반에 대한 구조물의 상대변위, \ddot{y} 는 지반가속도, F 는 물의 출렁임에 의해 TLD 바닥에 생기는 전단력으로 다음 식 (2) 표현할 수 있다.

$$F = \frac{\rho g b}{2} [(\eta_m + h)^2 - (\eta_0 + h)^2] \quad (2)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도이고, b 는 탱크의 폭, η_m, η_0 는 각각 탱크의 오른쪽과 왼쪽에서 측정된 자유면의 높이이다. 그리고 TLD의 고유진동수는 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh\left(\frac{\pi h}{2a}\right)} \quad (3)$$

여기서, $2a$ 는 물탱크의 길이이고, h 는 수심, g 는 중력가속도이다.

3. RC 축소모델 진동대 실험

3. 1 실험체의 구성

본 실험에 사용된 RC 실험체는 서울시에 위치한 15층 높이의 S 노후공동주택의 2개의 전단벽을 포함한 1경간 구조체 하부 5개 층의 축소모델이다. 판상형 공동주택의 평면에서 전단벽체의 면적이 부족한 장축방향의 내진성능을 평가하기 위해 전단벽의 수직방향으로 진동대 실험을 수행하였다. 백색잡음 가진 실험 결과, 가력방향의 1차 고유진동수는 그림 2와 같이 4.37Hz로 나타났다. 축소율이 적용된 실험체의 제작치수는 표 1과 같으며, 높이가 2950mm, 넓이 735mm, 폭 300mm로 그림 2는 실험체의 설치형상이다.

본 실험체의 초기상태는 하부 5개 층을 대상으로 제작되어 실제 15층 구조물의 동적특성을 고려하지는 못하나, 그림 3에 나타나 있는 것과 같이 최대가속도 0.6g의 크기로 조정된 El Centro 지진파 진동대 실험 후, 실험체는 각 층에 균열이 진행되면서 진동수가 감소하여 최종적으로 0.6Hz를 가지게 되었으며, 이 진동수는 마이다스 해석결과 얻어진 실제 15층 공동주택의 장축방향 1차 고유진동수 0.67Hz에 거의 근접한 값이다. 구조물의 지진응답은 지진 하중과 구조물의 주기에 따라 결정된다는 점을 고려할 때, 본 실험체는 동일한 파형으로 지진하중을 가진 경우에 실제 15층 구조물의 지진응답을 모사할 수 있다고 판단되며, 이 균열이 진행된 실험체를 대상으로 TLD 모델을 설계하여 실험을 수행하였다.

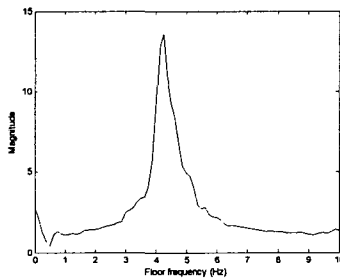


그림 2 가속도 전달함수(실험 전)

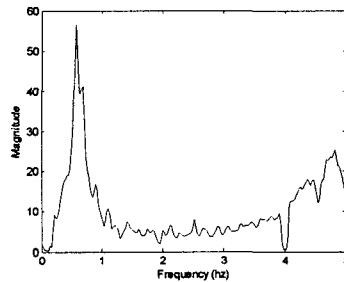


그림 3 가속도 전달함수
(지진파 실험 후)

표 1 원형구조물과 축소실험체의 축소조건

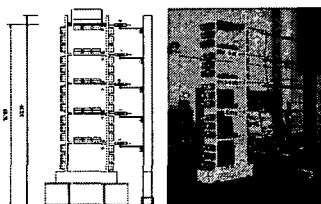


그림 4 실험체 설치형상

부재	원형모델			축소모델		
	좌측벽	우측벽	슬래브	좌측벽	우측벽	슬래브
단면(mm)	200×600	170×600	120×600	40×300	35×300	30×300
길이(mm)	2600	2600	3300	520	520	660
철근	D10+D13			D2		
F_y (Mpa)	300			350		
F_{ck} (Mpa)	21			24		
최대골재(mm)	25			5		

3.2 TLD 모델

TLD 모델 제작 시 고려되어야 할 변수에 진동수비, 질량비, 감쇠네트, 형상비 등이 있으며, 다음 표2와 같이 설정하였다. 물질량은 TLD 설치 전 RC 축소모델의 백색잡음 실험에 통해 1차 모드 질량을 파악하여 적용하였으며, 그에 따른 형상비를 0.15이내에서 설정하였다. 감쇠네트의 개구율은 Noji³⁾의 연구결과에 따르면, 개구율이 너무 크거나 작으면 감쇠효과가 좋지 않은 것으로 평가되고 있어 56%의 개구율을 갖는 철망을 선택하였고, 배치는 중앙부를 기준으로 0, 1, 3 매를 설치하였다.

실험은 한국기계연구원 구조연구부의 진동대를 이용하여 수행되었으며, 가진신호는 일반적인 지진하중의 진동수 특성 및 대상구조물의 1차 진동수를 고려하여 0.2~5Hz 범위의 백색잡음을 사용하였다.

표 2 TLD 실험체 제원 및 변수

길이(mm)	폭(mm)	수심(mm)	고유진동수(Hz)	물중량(kg)	질량비(%)	형상비(Δ)	감쇠네트
540	500	48	0.6	13.76	2	0.08	개구율 56%

4. 실험 결과 및 분석

실험 결과는 가속도, 변위 시간이력 및 전달함수를 통해 분석하였다. 전달함수는 가진된 입력신호의 응답을 0.01초의 시간간격으로 14000개의 데이터를 측정 한 후, 3500개의 데이터를 가지는 표본들을 중첩하지 않은 상태로 구성하였다. 전달함수는 이 각각의 표본으로부터 구해진 전달함수들의 평균으로 계산하였다. 또한, 전달함수의 평활화한 윈도우 방식은 Hamming 윈도우를 사용하였다. TLD의 최대응답(Peak Response)과 RMS응답(Root Mean Square Response) 감소효과를 평가하기 위해, 다음 성능지수를 사용하였다.

$$J_1 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |x_{di}(t)|}{x_{i,0}^{\max}} \right\}, \quad J_2 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |d_{di}(t)|}{d_{i,0}^{\max}} \right\}, \quad J_3 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |\ddot{x}_{di}(t)|}{\ddot{x}_{i,0}^{\max}} \right\} \quad (4)$$

$$J_4 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{x_{di}}}{\sigma_{x_{i,0}}^{\max}} \right\}, \quad J_5 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{d_{di}}}{\sigma_{d_{i,0}}^{\max}} \right\}, \quad J_6 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{\ddot{x}_{di}}}{\sigma_{\ddot{x}_{i,0}}^{\max}} \right\} \quad (5)$$

여기서, J_1, J_2, J_3 는 각각 최대 상대변위, 층간변위, 절대가속도에 대한 성능지수를 나타내며, $x_{i,0}^{\max}, d_{i,0}^{\max}, \ddot{x}_{i,0}^{\max}$ 는 각각 제어 전의 최대상대변위, 최대층간변위, 최대절대가속도이고, $x_{di}(t), d_{di}(t), \ddot{x}_{di}(t)$ 는 각각 제어후의 i 층의 상대변위, 층간변위, 절대가속도이다. J_4, J_5, J_6 는 각각 RMS 상대변위, 층간변위, 절대가속도에 대한 성능지수이며, $\sigma_{x_{di}}, \sigma_{d_{di}}, \sigma_{\ddot{x}_{di}}$ 는 각각 제어 전의 최대 RMS 상대변위, 층간변위, 절대가속도이고, $\sigma_{x_{di}}, \sigma_{d_{di}}, \sigma_{\ddot{x}_{di}}$ 는 제어 후의 최대 RMS 상대변위, 층간변위, 절대가속도이다. 모든 성능지수는 값이 작을수록 우수한 제어성능을 의미한다.

백색잡음은 0.01g 강도로 180초간 가진 하였다. 그림 7, 8은 백색잡음 가진에 의한 비제어시와 TLD를 설치하여 제어하였을 때의 5층 가속도 및 변위 응답의 진동대 가속도 및 변위에 대한 전달함수로 나타난 것이다. 가속도, 변위 전달함수 모두 공통적으로 TN0가 큰 성능을 발휘하고 있는 것으로 나타났으며, TN1은 제어성능이 작게 나타났다.

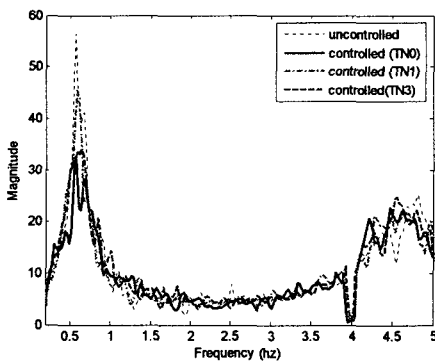


그림 7 5층 가속도 전달함수

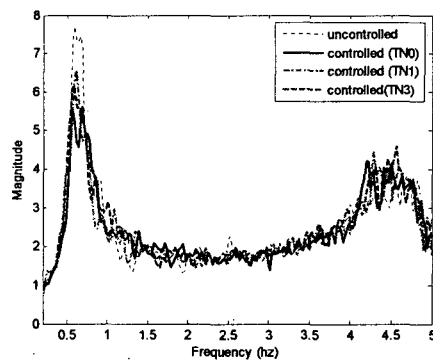


그림 8 5층 변위 전달함수

그림 9는 백색잡음에 의한 진동대에 대한 각 층 상대변위의 최대값과 RMS 값의 층별 분포를 보여준다. 그림 9(a)는 최대 상대변위에 대한 층별 응답으로 TN0가 가장 큰 제어성능을 나타내고 있으며, TN3도 비제어 시에 대해서 진동이 제어되고 있는 것을 알 수 있다. 하지만 TN1은 최대변위 감소에는 응답감소 효과를 거의 보이지 못하였다. 그림 9(b)와 같이 TLD의 RMS 변위응답은 비제어 시에 대해서 TN0가 가장 큰 응답감소 효과를 나타내고 있으며, TN3과 TN1도 성능을 발휘하는 것을 알 수 있다.

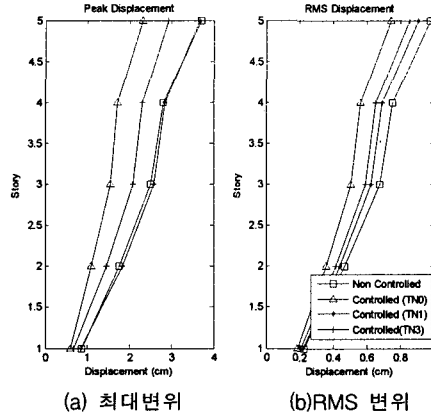


그림 9 변위응답 비교

표 3은 식 (4), (5)를 이용하여 산정된 성능지수를 나타낸 것이다. 최대 변위 및 가속도에 대한 성능지수를 살펴 보면, J_1 은 TN0가 최대 38%의 성능을 보이고 있으며, J_2 는 TN0와 TN3이 각각 35, 33%로 비슷한 성능을 보이고 있다. 하지만 J_3 는 최대 25%의 성능을 보이고 있어, 변위에 비해 낮은 제어성능을 보이고 있음을 알 수 있다. RMS 변위, 가속도에 대한 성능은 J_4, J_5 모두 TN0에서 최대 25%정도의 성능을 보이고 있으며, J_6 는 17%의 제어 성능으로 변위제어에 비해 낮은 성능을 나타내고 있다.

표 3 성능지수

실험체	층	J_1	J_2	J_3	J_4	J_5	J_6
V-TN0	5	0.62	0.65	0.81	0.76	0.75	0.83
V-TN1	5	0.98	0.89	0.81	0.92	0.87	0.89
V-TN3	5	0.78	0.67	0.75	0.87	0.83	0.87

5. 결론

기존 RC 벽식아파트의 내진성능 향상에 있어 동조액체감쇠기의 유효성과 제어성능을 파악하기 위한 목적으로 TLD를 설치한 RC 축소모델에 대한 진동대 실험을 수행하였다. TLD를 설치함으로써 설치하지 않은 구조물과 비교하여 최대 및 RMS 변위를 각각 최대 38%, 25% 정도 저감시킬 수 있었으며, 가속도에 대한 최대 및 RMS 가속도의 제어는 20% 정도의 성능을 발휘하고 있으나, 변위제어 만큼의 성능은 발휘하고 있지 못하였다.

추후 감쇠네트 개수, 개구율, 그리고 지진하중의 특성에 따른 TLD의 지진응답제어 성능에 대한 연구가 수행되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 03 산학연 A07-03)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Wright, G., "Damper systems save millions in cost, while reducing lateral movement in tall buildings", Reprinted courtesy of Building Design & Construction, Nov. 1, 2002.
2. Pradipta Banerji, Mohan Murudi, Arvind H. Shah and Neil Popplewell, "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures", Earthquake Engng Struct. Dyn. 29, pp.587-602, 2000.
3. Noji T. et al., "Study of Water Sloshing Vibration Control Damper", Jr. of SCE, AIJ, No. 411, pp. 97-105, 1990.