

고층건물 내진설계용 TLD의 감쇠성능 파라메트릭 해석

Parametric Analysis of Damping Performance of TLD for Seismic Design of High-Rise Building

이 재 훈* · 박 성 우** · 조 진 래***
Lee, Jae-Hoon · Park, Seong-Woo · Cho, Jin Rae

ABSTRACT

Many researches have been studied several vibration control device such as TMD and TLD to reduce the influence of wind or seismic waves for high-rise buildings. TLD provides some advantages such as easy installation and low maintenance cost. However, because of the difficulties in evaluating the characteristics of TLD, the dynamic characteristics of TLD must be investigated by experiment or analysis. In this study, the dynamic response analysis of structure with TLD was carried out to verify the vibration control ability of the proposed TLD for high-rise building. The parameter of interest was chosen by the height of the water level and the frequency of input seismic wave in the same shape of water tank.

Keywords: TLD(Tuned Liquid Damper), vibration control, seismic wave, finite element method, ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)

1. 서 론

지진이나 풍하중에 의해 발생하는 진동의 제어는 고층 건물 설계에 있어서 중요한 사항이다. 국내에서도 고층의 주상복합 건물들이 다수 건설되고 있는 추세이며, 2005년 140m 높이에 이르는 초고층 주상복합 아파트 옥상에 동조액체댐퍼(Tuned Liquid Damper : TLD)를 설치하여 강풍에 의한 입주자들의 어지럼증과 구조증세를 완화하고 지진 등의 재해에서도 건물의 안전성을 확보하기 위해 노력하는 사례도 나타나고 있다. TLD는 물의 슬로싱(sloshing)에 의해 제진력을 얻는 방식으로 쉬운 설치와 저렴한 유지비용이 소요된다는 장점을 지니고 있어 구조물의 진동을 제어하기 위한 방법으로 동조질량댐퍼(Tuned Mass Damper : TMD)와 함께 많은 연구가 진행되고 있다. TLD를 실제 설치·사용하는 건물은 주로 일본에서 많이 찾아볼 수 있는데, 요코하마 마린 타워, 신요코하마 프린스호텔, 도쿄 국제 공항 등 타워 형태의 세장한 구조물의 진동 제어용으로 사용되고 있다.

TLD는 구조물의 상부에 물을 담을 수 있는 탱크를 설치, 물의 슬로싱 주기를 건물의 주기와 동조시켜 지

* 학생회원 · 부산대학교 기계설계공학과 석사과정 Email: lee-jaehoon@hanmail.net

** 학생회원 · 부산대학교 기계설계공학과 석사과정 Email: shyalle@pusan.ac.kr

*** 부산대학교 기계공학부 교수 Email: jrcho@pusan.ac.kr

진이나 풍하중 등의 외력에 의해 구조물이 진동할 때, 물탱크의 벽면에 작용하는 유체력을 제어력으로 사용한다. TLD는 설치 건물의 특성과 설치 공간의 조건 등에 따라 다양한 형태로 구성될 수 있으며, 각각의 형태에 따라 제진 특성이 어떤 차이를 보이는지 연구할 필요성이 있다. 하지만 실제로 초고층건물에 설치하여 지진하중이나 풍하중 등에 대한 제진성능을 평가하는 것은 현실적 한계가 있기 때문에 일반적으로 축소 모델을 통한 실험이나 전산모사를 통한 수치 해석적 방법으로 그 특성을 평가한다.

본 논문은 TLD의 설치에 의한 구조물의 진동저감 효과를 파악하기 위해 높이 300m 규모의 초고층건물을 실험모델로 가정하여 건물 최상부에 TLD모델을 설치하고 건물의 최하단에 지진에 해당하는 가진력 걸어주는 방식으로 TLD 탱크내 물의 높이에 따른 제진성능과 지진파의 주파수에 따른 제진성능을 파악하고자 한다. 해석은 상용 소프트웨어인 MSC/Dytran을 이용하여 수행하였다.

2. 이론적 배경

비압축성, 점성 유체에 대한 Navier-Stokes 방정식을 ALE 기술법으로 표현한 운동방정식과 연속방정식을 각각 식 (1)와 식 (2)에 나타내었다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij} + f_i, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (1)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (2)$$

여기서 응력텐서는

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (3)$$

이다. v 는 참조좌표계에서의 유체의 속도이며, ρ_F 는 유체의 밀도, f_i 는 중력, p 는 압력, 그리고 μ 는 점성 계수이다. 유체는 공간 영역 Ω_F 를 차지하고 있고, 자유표면 경계는 $\partial\Omega_F^S$ 로, 구조물과 접하는 경계는 $\partial\Omega_F^I$ 로 나타낸다. 각 경계조건은 아래와 같다.

$$v_i = \overline{v}_i, \quad \text{on } \Omega_F \times (0, T] \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} n_j = \overline{t}_i, \quad \text{on } \partial\Omega_F^S \times (0, T] \quad (5)$$

식 (1)의 운동방정식의 시간 적분은 대류항의 존재로 인해 수치해석 시 많은 어려움이 따른다. 여기서 대류항 처리를 위해 이단계 분리기법(two phase operator split)이 사용됐으며, 이 방법은 먼저 라그랑지 단계가 수행된다. 참조좌표계는 물질좌표계와 일치하게 되고, 따라서 식 (1)에서 상대속도는 0이 된다.

$$\frac{\partial v_i^t}{\partial t} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij}^t + f_i \quad (6)$$

라그랑지 계산 후 오일러 단계가 수행되며, 먼저 격자 형상이 과도하게 변형된 경우, 적절한 격자 운동 알

고리즘을 통해 격자 재구성이 이루어지고, 격자는 임의의 속도를 가지게 된다. 따라서 상대속도에 의한 대류 항을 고려하여 라그랑지 계산에서의 결과를 새로운 격자계로 변환 혹은 맵핑(mapping)이 이루어져야 한다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{ij}^t = 0 \quad (7)$$

3. 유한 요소 해석 모델 및 파라미터 해석 조건

3.1 연구 대상모델 선정 및 FEM 모델링

연구 대상 모델은 국내의 초고층 건물에 해당하는 높이 300m 규모의 구조물이다. 전체적인 모습은 Fig. 2 (a)에 나타내었고 Fig. 2 (b)와 (c)에는 최상부에 설치되어 있는 TLD와 건물자체의 형상 및 크기가 나타나있다. 지진파는 El Centro(1940년) 지진의 데이터 중에서 지배적인 영향을 미치는 지진파의 주기와 진폭 값인 주기 2.74 s, 진폭 0.260 m/s를 추출하여 Fig. 3과 같은 속도파형을 입력지진파로 사용하였으며, 지진파는 구조물의 최하단에 Fig. 2의 x방향에 대하여 작용시켰다.

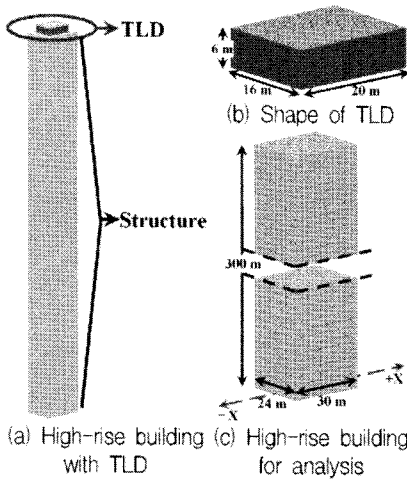


Fig. 2 Analysis model

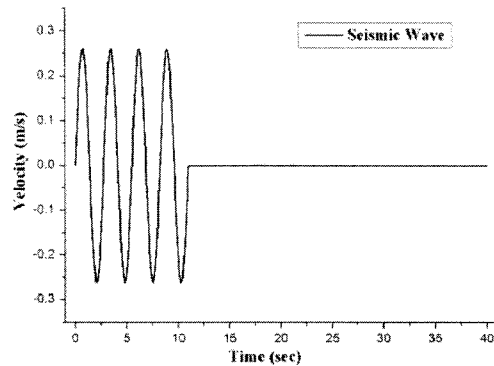


Fig. 3 Velocity field of input seismic wave

연성장 해석을 위해 연계 기법 중에서 계산시간에 있어 상당한 이점이 있고, 적은 수의 오일러 격자라도 충분한 해석이 가능한 ALE 연계 기법을 이용하여 구조물 연계면과 유체 연계면을 ALE 연계면으로 정의하였다. 연계면 정의를 위해서 Fig.4에서와 같이 shell 요소로 정의한 TLD 탱크와 절점을 공유하고 동일한 형태의 shell 요소로 정의된 구조물 연계면(ALE C.S. Tank), 절점을 공유하지 않고 동일한 형태의 shell 요소로 정의된 유체 연계면(ALE C.S. Fluid), 그리고 오일러 요소로 정의된 유체에 대하여 모델링을 수행하였으며 29504개의 요소와 21879개의 절점이 사용되었다. TLD 탱크 하부의 절점들과 건물의 최상부에 위치한 절점들을 강제 연결로 정의하여 건물의 운동 상태를 TLD 탱크에 전달할 수 있도록 하였고 구조물은 라그랑지 요소로 8000개의 요소와 9999개의 절점으로 구성되었다. 해석에 적용한 구조물과 물탱크, 그리고 물에 대한 물성은 Table 2.1과 같다.

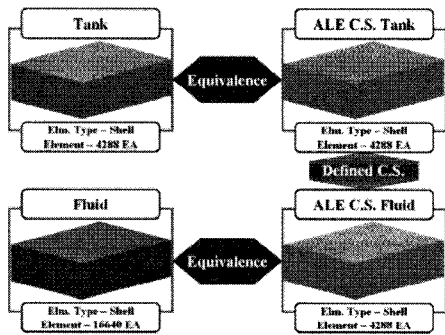


Fig. 4 FE model using ALE coupling

Table 1. Material properties of components

Model	Material Properties	Value
Tank	ρ (density)	7850 kg/m ³
	E (elastic modulus)	210 GPa
	ν (Poisson's ratio)	0.3
	t (thickness)	5 mm
Fluid	ρ (density)	1000 kg/m ³
	K (Bulk modulus)	2.2 GPa
Building	ρ (density)	2535 kg/m ³
	E (elastic modulus)	22 GPa
	ν (Poisson's ratio)	0.3

3.2 파라미터 해석 조건

전술한 바와 같이 정의된 유한 요소 해석 모델을 통하여 TLD의 제진 특성을 파라미터 해석을 통해 파악하고자 한다. 모델의 파라미터로는 TLD 탱크 내의 물의 높이, 가진 속도장의 주파수이다. TLD 탱크 내의 물의 높이는 0m에서 5.5m까지 0.5m 단위로 증가시키며 해석을 수행했고, 가진 속도장의 주파수는 Fig. 3 (b)에서 정의한 속도장을 기준(100%)으로 하여, 각각 50%, 75%, 125%, 150%, 175%, 200%로 변화시키며 해석을 수행했다. Fig. 3 (b)의 입력되는 가진 속도장의 지진파는 주기가 2.74초로 4번의 주기를 반복하는 시간, 즉 10.96초간 강제 진동 형태로 입력한 후 자유 진동 구간에서의 영향을 중점적으로 관찰하였으며, 각 파라미터의 변화에 따라 구조물의 진동 저감에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 각 파라미터가 적용된 해석 모델명을 Table 2와 같이 정리하였다. 가진 진동수의 파라미터 해석에서 H30VR 모델을 기준으로 정한 것은 TLD 탱크 길이(L)에 대한 물의 높이(H)의 비가 0.15인 모델로, H/L 0.15의 값은 일반적으로 TLD를 낮은 수심(shallow water) TLD와 높은 수심(deep water) TLD로 구분하는 기준점이기 때문이다.

Table 2 Model for parametric analysis

Parameter	Model Name	L/H (H/L)	Height of Water	Velocity Field
Height of Water	† H00VR	∞ (0.000)	0 m	Reference field Amplitude - 0.260 m/s Frequency - 0.365 Hz (Period - 2.74 sec)
	H05VR	40.0 (0.025)	0.5 m	
	H10VR	20.0 (0.050)	1.0 m	
	H15VR	13.3 (0.075)	1.5 m	
	H20VR	10.0 (0.100)	2.0 m	
	H25VR	8.00 (0.125)	2.5 m	
	‡ H30VR	6.67 (0.150)	3.0 m	
	H35VR	5.71 (0.175)	3.5 m	
	H40VR	5.00 (0.200)	4.0 m	
	H45VR	4.44 (0.225)	4.5 m	
	H50VR	4.00 (0.250)	5.0 m	
	H55VR	3.64 (0.275)	5.5 m	
Frequency	H30F050	6.67 (0.150)	3.0 m	50% of Reference Frequency
	H30F075			75% of Reference Frequency
	H30F125			125% of Reference Frequency
	H30F150			150% of Reference Frequency
	H30F175			175% of Reference Frequency
	H30F200			200% of Reference Frequency

† : Reference model of parameter "Height". ‡ : Reference model of parameter "Frequency"

3. FEM 해석결과 및 분석

Tank 내의 수위에 따른 진동 저감효과를 파악하기 위한 H00VR~H55VR 모델들에서 진동 감쇠 정도를 수치적으로 알아보기 위해 각 모델의 자유진동 구간에서 최상부인 높이 300m 지점의 변위에 대해 푸리에 변환을 실시하였다. 이를 통해 가장 높은 진폭을 나타내는 주파수가 0.1465 Hz 근처에서 나타남을 알았고, 각 모델의 0.1465Hz에서의 진폭을 Table 3에 나타내었다. Table 3을 통해 TLD 탱크 내의 물의 높이에 따른 진동의 진폭 감소율을 보면, 낮은 수심 모델의 경우에는 진동 저감 효과를 거의 기대하기 힘들거나 미소한 저감 효과가 나타나고 있으며, 그 중에 H30VR 모델의 경우에는 약 11.62%의 진동 저감 효과를 나타낸다. H30VR 모델보다 높은 수심 모델에서는 거의 대부분 진동 저감 효과가 나타나고 있고, H40VR 모델이 24.05%의 가장 큰 진동 저감효과가 나타내었고, H40VR 모델보다 높은 수심 모델의 경우 그 효과가 감소하여 H55VR 모델의 경우 감쇠효과가 미미한 것을 확인 할 수 있었다.

Table 3 Analysis results for water height in TLD

Model Name	L/H (H/L)	Height of Water	Amplitude	Rate of gap (%)
† H00VR	∞ (0.000)	0 m	0.35449	reference
H05VR	40.0 (0.025)	0.5 m	0.37147	4.79 %
H10VR	20.0 (0.050)	1.0 m	0.37253	5.09 %
H15VR	13.3 (0.075)	1.5 m	0.36893	4.07 %
H20VR	10.0 (0.100)	2.0 m	0.36578	3.18 %
H25VR	8.00 (0.125)	2.5 m	0.34853	-1.68 %
‡ H30VR	6.67 (0.150)	3.0 m	0.31329	-11.62 %
H35VR	5.71 (0.175)	3.5 m	0.28300	-20.17 %
H40VR	5.00 (0.200)	4.0 m	0.26922	-24.05 %
H45VR	4.44 (0.225)	4.5 m	0.28731	-18.95 %
H50VR	4.00 (0.250)	5.0 m	0.32248	-9.03 %
H55VR	3.64 (0.275)	5.5 m	0.35564	0.32 %

Table 4 Analysis results for frequency of forced vibration

Model Name	H/L (Height)	Input Freq.	Amplitude	Rate of gap (%)
H30F050	0.150 (3.0 m)	50 %	- (1.3425)	- (328.50)
H30F075		75 %	0.5022	60.29
‡ H30VR		100 %	0.3133	reference
H30F125		125 %	0.2353	-24.90
H30F150		150 %	0.1897	-39.45
H30F175		175 %	0.1592	-49.19
H30F200		200 %	0.1380	-55.95

일정한 수위(3m)를 가진 TLD 모델에서 가진 속도장의 주파수에 따른 진동 감쇠 효과를 보기위한 실험에서 H30F050 모델의 경우 자유 진동 구간에서 총 해석 시간 40초 중에서 24초 시점에서 대변형으로 인하여 해석이 중단되었다. 따라서 H30F050 모델은 자유진동구간 시작 시점에서 24초 지점 까지의 결과를 바탕으로 하고, 나머지 모델들은 자유진동구간 전체에 대하여 수위에 따른 파라메트릭 해석결과 분석과 같은 방식으로 결과를 정리한 것이 Table 4에 나타나 있다. H30VR 모델을 기준으로 볼 때 가진 속도장의 주파수 비율에 따라 각 모델의 진동은 반비례 관계를 가지고 있는 것으로 나타났다. 건물이 고층이 될수록 낮은 가진 주파수에서 더 큰 변위량을 가질 수 있으며, 가진 주파수가 높아질수록 최상층의 진폭은 작아진다는 것을 알 수 있다. 또한 주파수가 낮아질수록 진폭의 변화폭은 점점 더 증가함을 알 수 있다. 하지만 이 실험에서 각 가진 주파수 별로 수위가 0인, TLD가 설치되지 않았을 때의 결과와의 차이를 서로 비교해보고 진폭 감소정도를 파악하는 실험이 차후 필요할 것으로 보인다.

4. 결 론

건물의 초고층화에 따라 지진, 풍하중 등에 대한 진동의 제어를 위한 방법인 TLD의 효과를 전산 해석적 방법으로 평가하기 위해, TLD의 설치 특성인 수위와 외부의 가진 특성인 가진 주파수를 변화시키며 TLD의 제진성능을 예측해 보았으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) TLD 탱크 내의 물의 높이는 TLD의 제진 특성에 지배적인 영향을 미치는 파라미터로 이 파라미터의 변화에 따른 진동의 진폭 감소율을 통하여 영향을 평가하였으며 낮은 수심 모델의 경우, 주어진 가진 주파수에서 진동 저감 효과를 거의 기대하기 힘들거나 미소한 저감 효과가 나타났다. 하지만 높은 수심 모델의 경우, 대부분 진동 저감 효과가 나타났으며 H40VR 모델의 경우 24.05%의 가장 큰 진동 저감효과가 나타났고, H40VR 모델보다 높은 수심 모델에서는 효과가 감소하는 것을 확인하였다.

(3) 가진 속도장의 주파수 변화에 따른 TLD의 제진 특성은 30m 높이의 수위를 가진 고정된 모델로 0.260 m/s의 진폭과 0.365 Hz 가진주파수 모델을 기준으로 수행되었다. 가진주파수가 높아질수록 구조물의 최상부의 진폭은 감소하는 경향을 나타내었으며 기준 주파수 보다 낮은 주파수에서는 진폭이 증가하게 되는데 그 증가 비율은 가진주파수가 높아질 때의 비율보다 더 큰 변화 폭을 가진다는 것이 확인되었다.

이러한 결과를 뒷받침하기 위해 가진 주파수대 별 수위 변화모델을 해하는 실험이 차후 진행되어, 가진 주파수 대 별로 진동감쇠에 효과적인 수위를 파악하고 그 경향을 분석하는 작업이 필요할 것으로 보인다. 또한 구조물의 높이와 강성, 질량에 따른 TLD설계 변수와 감쇠성능의 상관관계를 파악하는 것도 중요한 연구 방향이 될 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 지역대학우수과학자 지원사업(KRF-2004-202-D00034)으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- C. W. Hirt and A. A. Amsden (1974) An arbitrary Lagrangian-Eulerian computing method for all flow speeds, J. Comput. Phys, 14, pp. 227-253.
- J. R. Cho and S. Y. Lee (2003) Dynamic analysis of baffled fuel-storage tanks using the ALE finite element method, Int. J. Numer. Meth. Fluids, 41, pp. 185 - 208
- Y. Tamura et al. (1996) Wind-induced responses of an airport tower-efficiency of tuned liquid damper, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 65, pp. 121-131
- Y. H. Chen, et al. (1995) Flexibility of TLD to high-rise building by simple experiment and comparison, Computers. and Structures, 57(5), pp. 855-861