

고층건물 내진설계용 TLD의 유한요소 해석에 관한 연구

Study of Finite Element Analysis of Tuned Liquid Damper for Seismic Design of High-Rise Building

박성우* · 조진래** · 이재훈***
 Park, Seung-Woo · Cho, Jin-Rae · Lee, Jae-Hoon

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 with about 60 stories. A real seismic wave was used, and the parameter of interest was chosen by the height of water level in the same shape of water tank. From the numerical results, the responses of structure with water tank were confirmed to be safer than those of structure without water tank.

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

1. 서론

건물의 초고층화에 따라 지진이나 풍하중에 의해 발생하는 진동의 제어는 고층 건물 설계에 있어서 중요한 검토 사항이 되고 있다. 국내에서도 고층의 주상복합 건물들이 2000년대 들어 다수 건설되고 있으며, 실제로 국내에서는 2005년, 140m에 이르는 초고층 주상복합 아파트 옥상에 동조액체댐퍼(TLD)를 설치하여 입주자들이 강풍이나 지진 발생 시 어지럼증과 구토 등을 느낄 수 있는 위협을 방지하기 위해 국내 최초로 설치하였다. 또한 설계 시 수평방향의 사용성(usability) 검토가 의무화되어 있으며, 사용성 조건을 만족시키지 못할 경우 이를 개선하기 위한 방법으로는 건물의 강성을 증대시켜 건물 자체를 강하게 설계하거나 부가강치를 설치하여 건물의 감쇠력을 증대시키는 방법 등을 사용하고 있다.

이러한 구조물의 진동을 제어하기 위한 방법에는 구조물에 질량체, 스프링 및 댐퍼로 구성된 진동체를 설치하는 동조질량댐퍼(Tuned Mass Damper : TMD)방식이 있으며 이는 이미 미국, 일본 등에서 많이 사용되

* 학생회원 · 부산대학교 기계설계공학과 석사과정 E-mail: shyalle@pusan.ac.kr
 ** 정회원 · 부산대학교 기계공학부 교수 E-mail: jrcho@pusan.ac.kr
 *** 부산대학교 기계설계공학과 석사과정 E-mail: jhlee@pusan.ac.kr

고 있으며, 이에 대한 연구도 꾸준히 이어지고 있다. 또한 질량체 대신에 물을 사용하여 물의 슬로싱(sloshing)에 의해 제진력을 얻는 동조액체댐퍼(Tuned Liquid Damper : TLD)가 쉬운 설치와 저렴한 유지비용의 장점을 이용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. TLD를 설치한 건물은 주로 일본에서 많이 찾아볼 수 있으며, 요코하마 마린 타워, 신요코하마 프린스호텔, 도쿄 국제 공항 타워 등 타워 형태이고, 세장한 구조물의 진동 제어용으로 TLD를 사용한다.

TLD는 구조물의 상부에 물을 담을 수 있는 탱크를 설치하여 물의 슬로싱 주기를 건물의 주기와 동조시켜 지진이나 풍하중 등의 외력에 의해 구조물이 진동할 경우, 물탱크의 벽면에 작용하는 유체력을 제어력으로 사용한다. 또한 TLD는 설치 건물의 특성 및 설치 공간의 조건 등에 따라 다양한 형태로 구성될 수 있으며, 각각의 형태에 따라 제진 특성이 어떤 차이를 보이는지 연구할 필요성이 있다. 그러나 실제 초고층건물에 설치할 경우 지진하중이나 풍하중 등에 대한 제진성능은 평가하는 것은 현실적 한계가 있기 때문에 축소 모델을 통한 실험이나 전산모사를 통해 수치 해석적으로 그 특성을 평가할 수 있다.

본 논문은 지진에 의해 발생하는 병진운동에 의해 구조물의 진동 저감 효과를 파악하기 위한 해석에 관한 것이다. 구조물은 지진에 의해 발생하는 병진운동에 의해 시스템에 급격한 변화를 받게 된다. 또한 구조물의 병진운동은 구조물 상부에 위치한 물탱크 내부에 슬로싱을 발생하게 되고, 여기서 발생하는 유체의 동하중이 구조물의 진동 저감 효과에 미치는 영향을 분석하였다. 60층 규모의 초고층건물을 대상으로 건물 최상부에 TLD를 적용하고, 과거 실제로 발생했던 지진 데이터를 가진력으로 사용하여 탱크의 물의 높이에 따른 제진 성능을 파악하고자 한다. 해석은 상용 소프트웨어인 MSC/Dytran을 이용하여 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 ALE 기술법

유체-구조물 연계해석에서는, 서로 다른 두 물질 영역이 경계면을 통해 강한 상호작용을 나타낸다. 이러한 TLD의 해석을 위해 이상유체에 대한 질량-스프링-감쇠의 동역학적 등가모델을 이용하여 유체의 영향을 해석, 평가하는 방법과 부가질량기법 등의 여러 수치기법들이 개발되었다. TLD와 같이 자유표면이 존재하고, 유체와 구조물이 연계된 문제의 해석에는 복잡성과 비선형성으로 인해 주로 FEM, BEM 등을 이용한 연계 수치해석 방법이 주로 적용되었으며, Euler 및 Lagrange법, 그리고 ALE(arbitrary Lagrangian-Eulerian)법 등 여러 수치해석 기법들이 제안되었다.

여기서는 Eulerian법과 Lagrange법의 장점을 결합한 ALE 수치기법을 적용하였다. ALE 기법에서는 물질영역(material domain)과 공간영역(spatial domain)에 참조영역(referential domain)이 추가된다. 참조영역은 유한요소의 격자(mesh)에 상응하고, 임의의 운동이 가능하여 적절한 격자운동 알고리즘과 병행하여 사용하면 유동경계 문제나 자유표면 유동 등의 문제를 적절하게 묘사할 수 있다.

Fig. 1을 보면, ALE 기술법에 있어서 사용되는 좌표계는 물질좌표계(혹은 Lagrange coordinates, X)와 공간좌표계(혹은 Euler coordinates, x) 그리고 참조좌표계(reference coordinates, \hat{X})의 총 세 가지이다. 물질좌표를 다음과 같이 X 와 t 의 함수로 나타낸다.

$$x = \phi(X, t) \quad (1)$$

여기서 x 는 공간좌표로 X 로 정의된 절점의 현재 위치이며, ϕ 는 시간에 대한 절점의 운동, x 와 X 간의 사

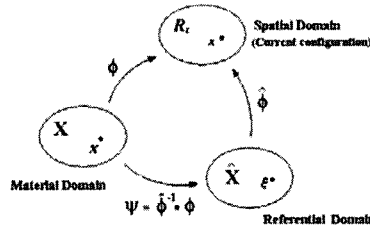


Fig. 1 Three different coordinates

상함수(mapping function)이다. 또한 연속체의 거동은 참고좌표 \hat{X} 를 통하여 표현할 수 있다.

$$x = \hat{\phi}(\hat{X}, t) \tag{2}$$

여기서 $\hat{\phi}$ 는 참조좌표점의 운동, 혹은 x 와 \hat{X} 사이의 사상함수이다. 이러한 참조좌표점의 거동은 임의적이며, 물질좌표계와 일치할 필요는 없다. 하지만 세 개의 좌표계는 반드시 일대일 관계가 성립되어야 한다.

ALE 기술법에서 함수와 그 시간미분은 세 좌표계에서 정의가능하고, 각각 비독립적이다. 물질 좌표계에서의 시간미분과 참조좌표계에서의 시간 미분은 아래의 기본적인 관계가 성립한다.

$$\left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_X = \left. \frac{\partial f}{\partial t} \right|_{\hat{X}} + c_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \tag{3}$$

$$c_i = v_i - \hat{v} \tag{4}$$

여기서 c 는 물질의 속도(v)와 참조좌표의 속도(\hat{v})의 상대속도, 즉 대류속도(convective velocity)이다. 따라서 식 (3) 우측의 두 번째 항은 물질과 참조좌표계의 상대운동에 의한 대류효과를 나타낸다. ALE 기법에서 참조좌표계의 속도(\hat{v})는 임의의 값을 가질 수 있고, 그에 따라서 세 가지 기술법으로 분류된다.

- i) $\hat{v} = 0$ 인 경우, 참조좌표계는 공간상에 고정되고, 이를 Euler 기술법이라 한다.
- ii) $\hat{v} = v$ 인 경우, 참조좌표계는 물질좌표계와 동일한 운동을 하게되고, 이는 Lagrange기술법에 해당한다.
- iii) $\hat{v} \neq v \neq 0$ 인 경우가 ALE기술법에 해당한다.

유체-구조물 연계해석에서 유체 격자는 비정상적으로 변형된다. Explicit 시간적분법을 적용하는 시간해석에서는 지나친 격자의 변형으로 해석 중에 오류가 발생할 수 있다. ALE 기법에서 참고좌표계는 대부분 유한요소 격자에 해당하며, 변형된 격자에 임의의 속도를 부여함으로써 균일하고 일정한 격자를 유지해 나갈 수 있으며, 해석의 효율성 및 해의 정확도를 높일 수 있다.

2.2 ALE방정식과 수치해석 기법

비압축성, 점성 유체에 대한 Navier-Stokes 방정식을 ALE 기술법으로 표현한 운동방정식과 연속방정식을 각각 식 (5)와 식 (6)에 나타내었다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij,j} + f_i \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (5)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad \text{in } \Omega_F \times (0, T] \quad (6)$$

여기서 응력텐서는

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (7)$$

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

$$v_i = \bar{v}_i, \quad \text{on } \Omega_I \times (0, T] \quad (8)$$

$$\sigma_{ij}n_j = \bar{t}_i, \quad \text{on } \partial\Omega_F^S \times (0, T] \quad (9)$$

식 (5)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 (5)에서 상대속도는 0이 된다.

$$\frac{\partial v_i^L}{\partial t} = \frac{1}{\rho_F} \sigma_{ij,j} + f_i \quad (10)$$

라그랑지 계산 후 오일러 단계가 수행되며, 먼저 격자 형상이 과도하게 변형된 경우, 적절한 격자 운동 알고리즘을 통해 격자 재구성이 이루어지고, 격자는 임의의 속도를 가지게 된다. 따라서 상대속도에 의한 대류항을 고려하여 라그랑지 계산에서의 결과를 새로운 격자계로 변환 혹은 맵핑(mapping)이 이루어져야 한다.

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + c_j v_{i,j}^L = 0 \quad (11)$$

3. 유한 요소 해석 및 결과 분석

3.1. 해석 대상 모델

해석 대상인 구조물과 TLD의 물탱크의 개략적인 형상은 Fig. 2와 같다. 구조물의 단면은 $22 \times 6\text{m}$, 높이는 200m 이고, TLD의 물탱크는 셸(shell)로 모델링 되었으며 단면은 $12 \times 6\text{m}$ 이고 높이는 4m 로 설정하였다. 또한 물탱크와 유체사이에는 각각의 연계면을 생성하여 ALE 커플링을 적용하였으며, 지진파에 의한 가진에 의해 구조물이 진동을 할 때 구조물의 최상부에서 발생하는 운동 형태가 물탱크의 하부에 전달되도록 하기 위해서 구조물의 최상단 절점들과 물탱크 최하부의 절점들 사이에 강체 연결을 적용하였다. 지진파는 Fig. 3과 같이 El Centro(1940년 270degree) 지진으로 하였으며, 입력파의 형태는 속도형태로 구조물 최하부의 노드에 적용한다. 물탱크 내의 물의 높이를 0m , 1.0m , 1.5m , 2.5m 로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 입력되는 지진파를 10초간 강제 진동 형태로 입력한 후 자유 진동 구간에서의 영향을 중점적으로 관찰하였으며, 각각

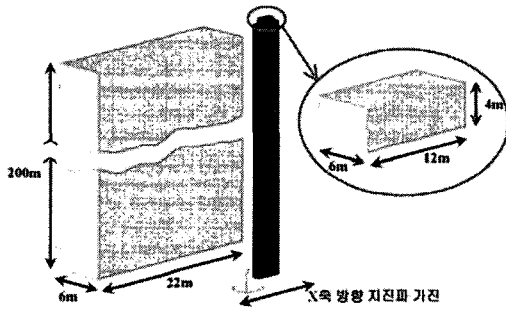


Fig. 2 Structure model with TLD

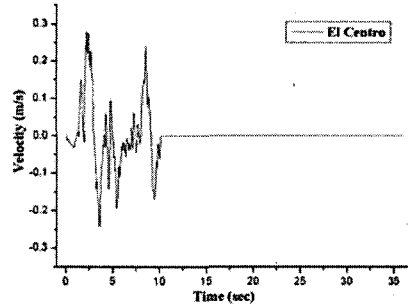


Fig. 3 Seismic wave at El Centro in 1940

의 물의 높이에 따라 구조물의 진동 저감에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 해석에 적용한 구조물과 물탱크, 그리고 물에 대한 물성값은 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties

Group	Property	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (GPa)	Poisson ratio	Bulk Modulus (GPa)
Structure		2535	22	0.3	.
Tank (t=0.05m)		7850	210	0.3	.
Water		1000	.	.	2.2

3.2. 수치해석 결과

Fig. 4은 구조물에 지진파가 가진력으로 작용시 TLD의 물탱크의 물높이를 0, 1.0, 1.5, 2.5m로 변화시키면서 슬로싱에 의해 구조물의 진동의 진폭이 저감되는 것을 자유진동 구간에서의 데이터를 FFT변환하여 나타내었다. Fig. 4에서 사용된 데이터는 구조물의 최상부의 진동에 의한 변위를 사용하였다. 여기서 0.27344Hz와 1.52344Hz에서 고유진동수로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 Fig. 5에서는 각각의 진동수에서 진폭은 구조물의 하부로 내려감에 따라 0.27344Hz에서는 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 1.52344Hz에서는 증가하는 것을 확인하였다. Fig. 5의 결과 중에서 구조물의 상층부의 결과를 분석하여 Table 2와 같이 나타내었으며, 이를 통해 해석의 파라미터로 적용한 물탱크의 물 높이에 따라 구조물이 진동하는 진폭이 감소하는 정도를 수치적으로 알 수 있다. 물의 높이가 0m 일 경우를 기준으로 하여 구조물의 최상부인 200m지점에서 결

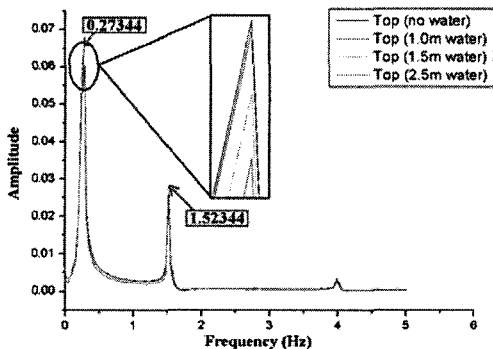


Fig. 4 FFT transformation for displacement

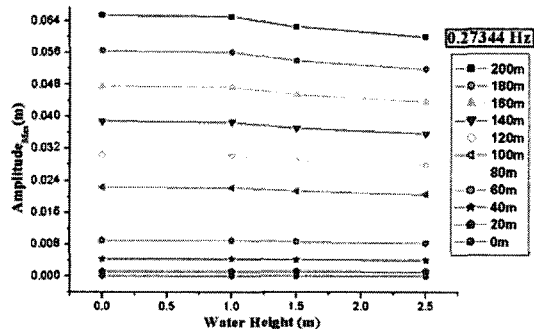


Fig. 5 Results of amplitude for water height

과를 살펴보면, 물의 높이가 1.0m일 경우 진폭의 감소가 거의 없는 것으로 관찰되었으나, 물의 높이가 1.5m 일 경우에는 약 4.47%의 진폭이 감소하였고, 물의 높이가 2.5m 일 경우에는 8.44%의 진폭이 감소하는 것을 확인 하였다. 또 건물의 상부에 해당하는 180m, 160m, 140m 지점에서의 진폭 감소 정도는 200m 지점의 경우보다는 작지만 그에 상당하는 감소율을 가진다.

Table 2 Decrease of amplitude for water height

Water Height	200 m		180 m		160 m		140 m	
	Amp.(m)	%	Amp.(m)	%	Amp.(m)	%	Amp.(m)	%
0.0 m	0.0655	.	0.05653	.	0.0476	.	0.0388	.
1.0 m	0.06507	-0.665	0.05616	-0.655	0.04728	-0.672	0.03855	-0.644
1.5 m	0.06257	-4.47	0.05401	-4.46	0.04549	-4.43	0.03708	-4.43
2.5 m	0.05997	-8.44	0.0518	-8.37	0.04364	-8.32	0.03561	-8.22

4. 결 론

본 논문에서는 지진파에 의한 발생하는 구조물의 진동에 대하여 구조물의 최상부에 설치된 TLD 내부의 물의 높이에 따른 구조물의 진동 저감 영향을 평가하기 위한 파라메트릭 수치해석을 수행하였다. 물탱크 내부의 유체와 물탱크, 그리고 구조물의 정확한 연계해석과 수치해석상의 효율성을 위해 유체와 물탱크에는 ALE 유체-구조물 연계 수치기법을 적용하였고, 물탱크와 구조물은 강체 연결을 적용하였다. 물의 높이에 따른 연구에서 물의 높이가 증가함에 따른 구조물의 각 지점에서의 변위와 최대값을 중심으로 비교 분석 함으로써 TLD의 진동 저감 효과를 평가하였다. 또한 본 연구를 통해 물탱크의 물의 높이에 따른 구조물의 진동 저감 효과를 관찰하였지만, 이는 하나의 파라미터에 대한 연구이며, TLD의 진동 저감 효과를 연구하기 위해서는 물탱크의 형상에 따른 영향, 구조물과 물의 중량비에 따른 영향, 그리고 배플 등의 물탱크에 부가적으로 설치되는 장치와 그 수에 따른 영향도 향후 연구가 진행되어야 할 부분이다.

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