

선형 및 비선형 TLD의 지진응답 제어성능 평가

Seismic Response Control Performance of Linear and Nonlinear TLD Models

이 상 현*
Lee, Sang-Hyun

우 성 식**
Woo, Sung-Sik

정 란***
Chung, Lan

ABSTRACT

This paper compares the seismic response control performance of linear and non-linear models for tuned liquid damper (TLD). The existing linear and nonlinear TLD models were used for the numerical analysis of single degree of freedom (SDOF) and multi degree of freedom (MDOF) systems with TLD. The nonlinear model considers the variation of the frequency and damping of the TLD with varying excitation amplitude while the linear one has the invariant parameters. Numerical analysis results from SDOF systems indicate that the nonlinear model shows about 5% better control performance than linear one when the mass ratio is 2% and the optimal parameters for reducing peak responses are dependent on the characteristics of the excitation earthquake loads.

1. 서론

동조액체감쇠기(Tuned Liquid Damper, TLD)는 액체의 출렁임(Sloshing)을 이용하여 구조물에 감쇠를 추가하는 장치로, 물탱크의 수평면을 기준으로 수직 방향으로 발생한 변위를 원래의 위치로 복원하려는 중력과 액체 질량의 조합에 따라 일정한 출렁임 주기를 가진다. 이 출렁임 주기를 구조물의 1차 모드 주기(또는 고유진동수)와 일치시킴으로써 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)와 동일한 원리로 구조물에 유발된 에너지를 흡수한다. 때문에 액체 운동의 비선형을 배제하고, TMD 근사이론(Analogy) 및 선형파동이론(Linear Wave Theory)을 사용하여 해석을 수행하고 있다[1]. 그러나 정확한 TLD 거동을 모사하기 위해서는 응답의 크기에 따라 특성이 변하는 비선형 요소를 고려하여야 한다. TLD의 비선형 수치해석 모델에 대한 연구로는 Yu 등(1999)[2]의 비선형 강성 및 점성 (Non-linear Stiffness and Damping, NSD) 모델, Yalla(2001)[3]의 출렁임-부딪힘 (Sloshing-Slamming Analogy) 모델 등이 있다.

본 논문에서는 TLD를 사용한 구조물의 지진응답제어성능을 평가하는 데 있어 선형 모델과 비선형 모델의 차이를 비교하였다. 이를 위해 기존 TMD의 근사이론을 바탕으로 한 선형해석과 Yu, 등이 제안한 비선형 모델을 사용하여 단자유도 및 다자유도 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다.

* 정회원·단국대학교 건축대학 건축공학과, 전임강사 (lshyun00@dankook.ac.kr)

** 학생회원·단국대학교 건축공학과, 박사과정

*** 정회원·단국대학교 건축대학 건축공학과, 교수

2. TLD 선형 모델

선형 TLD는 선형파동이론(Linear Wave Theory)에 기반하여 유체의 거동을 모사하며, 액체의 수평방향과 수직방향의 좌표에 따른 액체의 거동 특성 표현한다. 해석 결과는 수직 및 수평 방향으로 조화거동을 보이는 것으로 표현되기 때문에 특정 진동수로 거동하는 특징이 있다.

2.1 유효질량 및 고유진동수

유효질량 m_n 과 고유진동수 ω_n 은 다음 식으로 표현할 수 있다 (Yalla, 2001)[3].

$$m_n = M_t \left(\frac{8 \tanh\{(2n-1)\pi\Delta\}}{\pi^3 \Delta (2n-1)^3} \right); \quad n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$\omega_n^2 = \frac{g(2n-1)\pi t \{(2n-1)\pi\Delta\}}{2a} \quad (2)$$

여기서, n 은 출력임 모드이고, m_n 은 n 차 모드 물질량, ω_n 는 물의 출력임 진동수이고, M_t 는 액체의 총 질량이다. Δ 는 $h/2a$ 로 h 는 동조액체감쇠기 액체의 높이이고, $2a$ 는 가진 방향으로의 액체의 길이이다.

Δ 와 a 는 유효질량과 진동수를 결정하는 데 가장 중요한 변수로 동일한 Δ 의 경우에도 a 가 다르면 진동수가 달라진다.

(1)식으로 부터 출력임에 참여하지 않은 질량은 다음과 같다.

$$m_0 = M_t - \sum_{n=1}^{\infty} m_n \quad (3)$$

일반적으로 TLD 해석에는 1차 모드만 고려되며, 1차 모드 고유진동수는 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{2a} \tanh(\pi\Delta)} \quad (4)$$

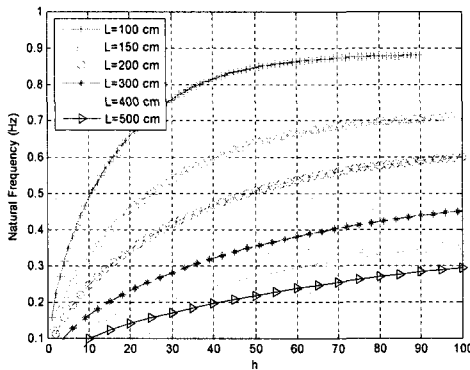


그림 1. 수심과 길이에 따른 TLD 1차 고유진동수

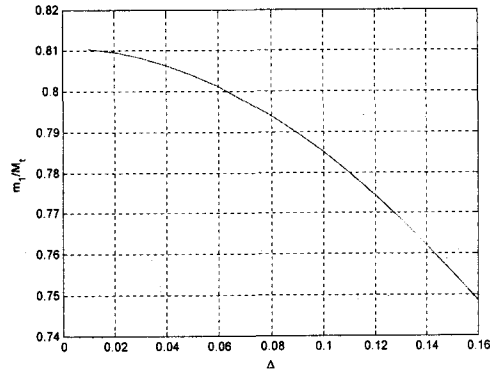


그림 2. Δ 에 따른 1차 모드 질량 참여계수

그림 1은 단위질량에 대한 수심과 길이에 따른 1차 고유진동수의 변화를 나타내었다. 그림 1에서 나타나듯, 동일한 진동수에서 TLD의 길이와 깊이는 여러 개가 있음을 알 수 있다. 그러나 폭이 작은 경우에는 높이의 변화에 따른 진동수의 변화가 매우 크기 때문에 동조에 어려움을 가질 수 있다.

그림 2와 같이 TLD는 감쇠력에 참여하는 질량과 구조물의 질량증가에 기여하는 질량인 총질량이 다르기 때문에 운동방정식이 다음과 같이 구성되어야 한다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p - G_2\ddot{u} - G_3\ddot{u}_d \quad (5)$$

$$G_1\ddot{u}_d + c_d\dot{u}_d + k_d u_d = -G_3\ddot{u} \quad (6)$$

여기서, G_1, G_3 는 $\frac{8}{\pi^3\Delta} \tanh(\pi\Delta)M_t$ 이고, $G_2 = M_t$ 이다.

3. TLD 비선형 모델

선형 모델에서는 TLD의 특성이 불변인 것으로 가정하였으나, 실제 TLD 가진 크기에 따라 액체운동을 규정하는 변수의 특성이 바뀌는 비선형성을 가지는 것으로 알려져 있다. Yalla(2001)[3], Yu(1999)[2] 등이 수행한 비선형 요소들에 대한 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 강성 경화비(Stiffness hardening ratio)

입력하중의 가진 크기가 증가하면 물의 출렁임 진동수도 증가한다. 질량이 고정되어 있다고 가정하였을 때, 가진 크기의 증가에 따라 강성이 증가하는 비선형 스프링을 단것과 같이 모델링 하거나, 가진의 크기가 증가할수록 물의 질량이 출렁임보다는 충격에 참여하는 질량의 크기가 증가하여 출렁임 질량이 줄어들어 진동수가 증가한다고도 모델링 할 수 있다.

(2) 충격효과 (Impact effect)

입력하중의 가진의 크기가 증가함에 따라 액체 질량의 일부가 한꺼번에 TLD 벽면에 충격을 가하는 현상으로 Yalla 등은 출렁임-부딪힘 이론을 제안하였다. 이 이론은 그림 3과 같이 동조액체 감쇠기를 선형 운동과 비선형 운동인 부딪침 현상으로 구분하여 제시하고 있다. 여기서, m_1 과 m_2 는 각각 액체의 출렁임과 부딪힘에 참여하는 질량을 나타낸다.

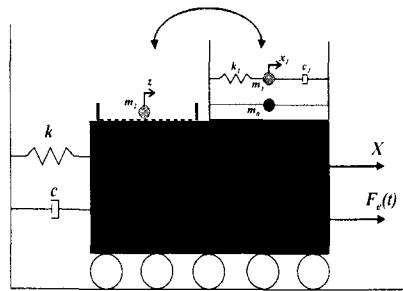


그림 3. 출렁임-부딪힘 모델

(3) 파단 (Breaking wave)

입력하중의 가진 크기가 증가하면 파형이 깨지는 현상이 발생하며, 이는 감쇠를 증가시킨다.

(4) 점프 진동수 (Jump frequency)

특정 진동수 이상에서는 동조액체감쇠기의 에너지 소산능력이 급격히 감소하게 되는데 이를 점프 진동수라 한다. 일반적으로 동조액체감쇠기 고유진동수보다 약간 크며 2배보다 작고 가진의 크기가 증가할수록 증가하는 특성을 가진다. 즉, 가진의 크기가 작은 경우에는 고유진동수 보다

조금 큰 가진에 대하여 TLD의 에너지 소산능력이 급격히 감소한다.

이러한 요소들에 의해 TLD는 가진 크기에 의존적인 현상을 보이며, 일반적으로 진동수와 감쇠비가 증가한다. 진동수가 증가하면서 에너지 소산이 좀 더 넓은 범위의 진동수 대역에서 발생하기 때문에 강건성(Robustness)을 가지고, 파단과 충격효과로 인해 감쇠비가 증가하면서 TLD-구조물 시스템은 전달함수가 두 개의 공진 주파수를 가지는 함수에서 하나의 공진 주파수를 가지는 함수로 바뀐다. Yu(1999)는 비선형 거동에 의한 강성과 감쇠의 특성 요소인 파고, 수심 그리고 가진 진폭, 탱크의 크기에 연구를 통하여 진폭비를 다음 (7)식과 같이 나타내었다.

$$\Lambda = \frac{A}{2a} \quad (7)$$

여기서, A 는 가진 진폭이고, $2a$ 는 탱크의 길이이다.

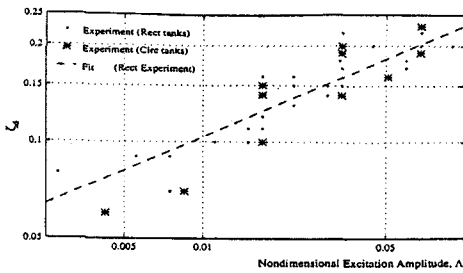


그림 4. 감쇠비의 변화

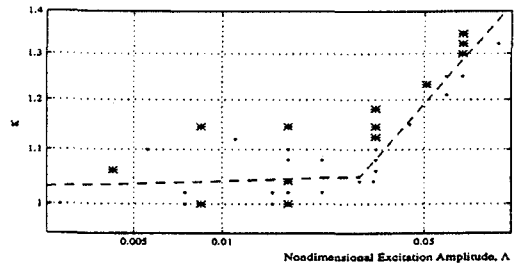


그림 5. 강성 경화비 분포

그림 4와 같이 감쇠비는 다음 (8)식으로 나타낼 수 있다.

$$\zeta_d = 0.5\Lambda^{0.35} \quad (8)$$

그림 5와 같이 Λ 값이 0.03 일 때를 기준으로 약한 파단과 강한 파단으로 나누어 강성 경화비를 다음 (9)식으로 나타내었다.

$$k = 1.075\Lambda^{0.007} \quad \Lambda \leq 0.03 \quad (9-a)$$

$$k = 2.52\Lambda^{0.25} \quad \Lambda > 0.03 \quad (9-b)$$

그림 5에서 나타나듯, 약한 파단에서는 강성 증가비의 변화가 적으나 강한파단에서는 급격한 변화를 보이고 있으며, 이러한 강성의 변화에 따른 진동수변화비는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi = 1.038\Lambda^{0.0034} \quad \Lambda \leq 0.03 \quad (10-a)$$

$$\xi = 1.59\Lambda^{0.125} \quad \Lambda > 0.03 \quad (10-b)$$

본 연구에서는 Yu 등(1999)의 연구 결과를 사용하여 비선형 TLD를 모델링하고 해석을 수행하였다. Yu 등의 연구 결과를 사용한 이유는 간단히 기존의 선형 모델에서 강성과 점성을 시간에 따라 변하는 변수로 취급함으로써 TLD의 비선형성을 고려할 수 있기 때문이다.

4. 선형 및 비선형 수치해석

4.1 예제구조물 및 성능지수

본장에서는 단자유도 구조물 및 다자유도 구조물에 대한 수치해석을 통해, 선형 및 비선형 모델

의 지진응답제어성능을 비교하였다.

수치해석을 통해 파악된 단자유도 및 다자유도 구조물에 설치된 TLD의 최대응답과 RMS(Root Mean Square) 응답 감소효과를 평가하기 위해, 다음의 성능지수를 사용하였다.

$$\begin{aligned}
 J_1 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |x_{di}(t)|}{x_0^{\max}} \right\} & J_2 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |d_{di}(t)|}{d_0^{\max}} \right\} & J_5 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{x_{di}}}{\sigma_{x_{di}}^{\max}} \right\} & J_6 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{d_{di}}}{\sigma_{d_{di}}^{\max}} \right\} \\
 J_3 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |\ddot{x}_{di}(t)|}{\ddot{x}_0^{\max}} \right\} & J_4 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max |F_{s_{di}}(t)|}{F_{s_{di}}^{\max}} \right\} & J_7 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{\ddot{x}_{di}}}{\sigma_{\ddot{x}_{di}}^{\max}} \right\} & J_8 &= \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\sigma_{F_{s_{di}}}}{\sigma_{F_{s_{di}}}^{\max}} \right\} \quad (11)
 \end{aligned}$$

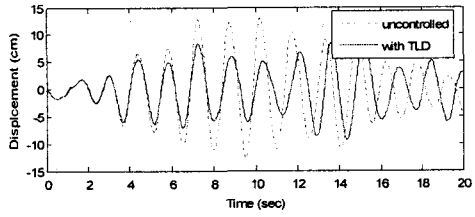
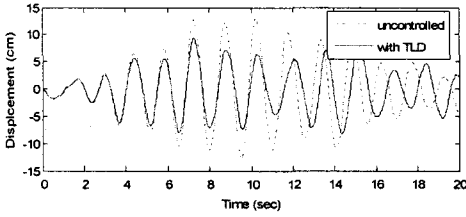
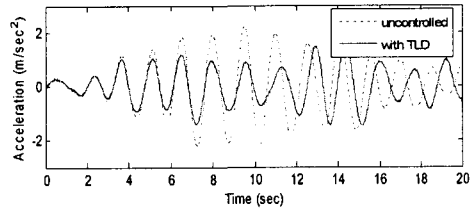
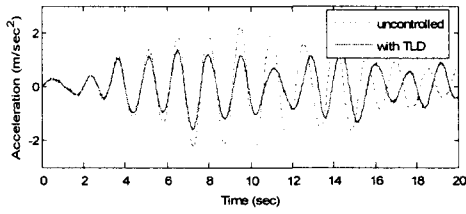
여기서, J_1, J_2, J_3 , 그리고 J_4 는 각각 최대 상대변위, 층간변위, 절대가속도, 그리고 층전단력에 대한 성능지수를 나타낸다. $x_0^{\max}, d_0^{\max}, \ddot{x}_0^{\max}$, 그리고 $F_{s_{di}}^{\max}$ 는 각각 제어 전의 최대 상대변위, 최대 층간변위, 최대 절대가속도, 그리고 최대 층전단력이고, $x_{di}(t), d_{di}(t), \ddot{x}_{di}(t)$, 그리고 $F_{s_{di}}(t)$ 는 각각 제어후의 i 층의 상대변위, 층간변위, 그리고, 절대가속도, 층전단력이다. J_5, J_6, J_7 , 그리고 J_8 은 각각 RMS 상대변위, 층간변위, 절대가속도, 층전단력에 대한 성능지수이다. $\sigma_{x_{di}}^{\max}, \sigma_{d_{di}}^{\max}, \sigma_{\ddot{x}_{di}}^{\max}$, 그리고 $\sigma_{F_{s_{di}}}^{\max}$ 는 각각 제어 전의 최대 RMS 상대변위, 층간변위, 절대가속도, 그리고 층전단력이고, $\sigma_{x_{di}}, \sigma_{d_{di}}, \sigma_{\ddot{x}_{di}}$, 그리고 $\sigma_{F_{s_{di}}}$ 는 제어 후의 최대 RMS 상대변위, 층간변위, 절대가속도, 그리고 층전단력이다. 모든 성능지수는 값이 작을수록 우수한 제어성능을 의미한다.

4.2 단자유도 구조물 해석

단자유도 구조물은 질량 정규화되고 5%의 감쇠비와 1.5초의 주기를 가진다. 가진 하중으로는 백색잡음을 사용하였으며, 물-깊이비 0.1의 TLD를 설치하였을 때, 질량비, 진동수비, 그리고 TLD 자체의 감쇠비 변화에 따른 성능지수의 분포를 선형 및 비선형 해석을 수행하여 분석하였다. 그림 6은 백색잡음을 선형 및 비선형 해석을 통해 나타난 가속도 및 변위 시간이력으로서, 동조진동수비(f)가 1.05, 질량비(μ) 2%, 그리고 감쇠비(ξ)가 5%일 때의 결과를 보여준다. TLD에 의해 변위 및 가속도 응답의 크기가 모두 크게 줄어들음을 확인 할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 백색잡음을 받는 단자유도 구조물의 최대응답에 대한 성능지수를 선형 및 비선형 해석을 통해 나타난 것이다. 최적 동조진동수비는 선형 및 비선형 해석 모두 1.05로 이 값에서 가장 작은 성능지수를 나타내고 있으며, 질량비 증가에 따른 성능 향상 경향도 동일한 것으로 나타났다. 질량비가 증가함에 따라 성능지수는 전체적으로 감소하지만 동조가 되지 않은 경우의 감소폭은 크지 않기 때문에 구조물의 진동수를 정확히 식별하는 것이 TLD 설계에 있어 매우 중요함을 알 수 있다. 이러한 특성은 비선형 해석에서 더욱 두드러지며, 동조시 질량비의 증가에 따른 성능향상은 크나 동조가 이루어지지 않을 때 성능저하 역시 큰 것으로 나타났다.

2% 질량비와 5%의 감쇠비를 갖는 TLD의 선형 및 비선형 해석에 따른 최대응답 및 RMS 성능지수를 비교하여 그림 9, 10에 나타내었다. 동조된 경우 비선형 해석에 따른 성능지수 값은 선형 해석의 경우보다 5% 이상 작음을 알 수 있다. 이는 실제 비선형 TLD는 근사 선형화된 TLD보다 더욱 큰 최대응답감소 효과를 보이고, 선형모델은 보수적인 설계 결과를 가져옴을 의미한다.



(a) 선형 해석

(b) 비선형 해석

그림 6. 가속도 및 변위 시간이력

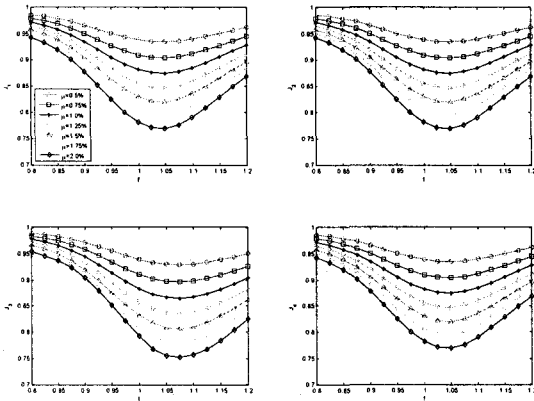


그림 7. 선형해석을 통한 최대응답 성능지수 분포

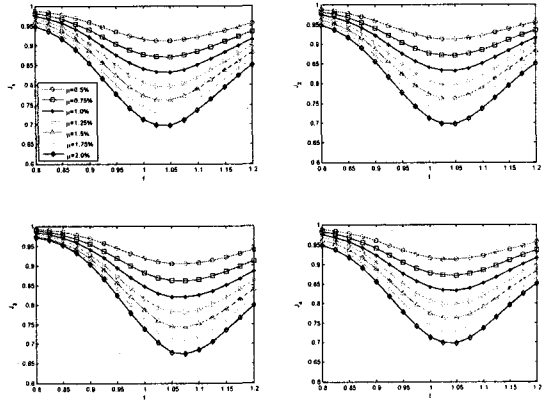


그림 8. 비선형 해석을 통한 최대응답 성능지수 분포

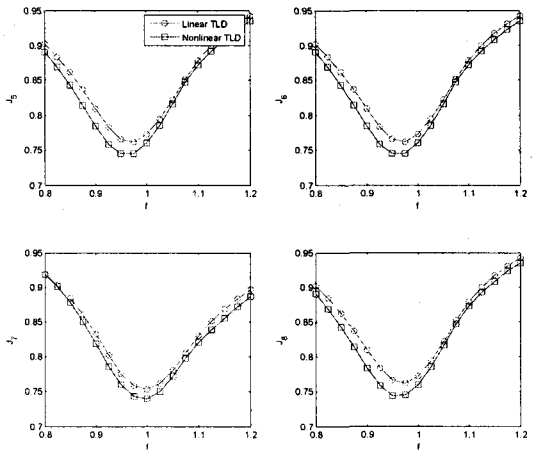


그림 9. 선형/비선형 RMS 성능지수 비교(μ : 2%)

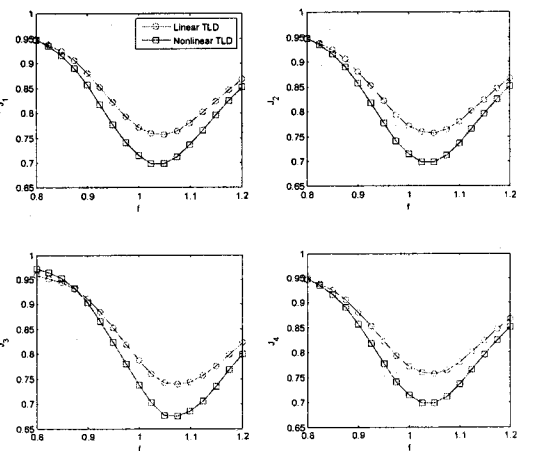


그림 10. 선형/비선형 최대성능지수 비교(μ : 2%)

4.3 10층 다자유도 구조물

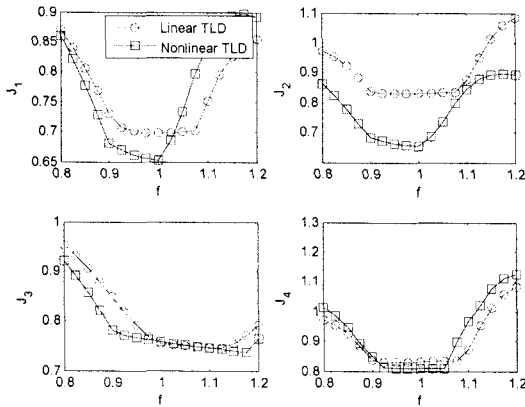


그림 11. 선형/ 비선형 TLD 최대성능지수 비교(μ : 2%)

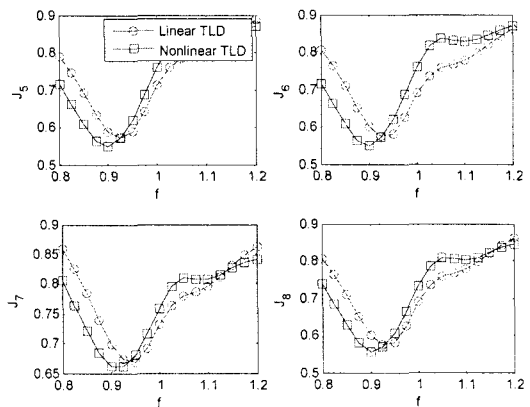


그림 12. 선형/ 비선형 TLD RMS 성능지수 비교(μ : 2%)

10층 다자유도 구조물에 대한 해석은 1차 모드주기가 1.09초로 전 층의 층질량, 층강성이 각각 32ton, $4.8\text{kN}\times 10^4/\text{m}$ 로 전 층이 동일한 구조물을 사용하였고, El Centro (NS성분, 1942) 지진파를 사용하여 감쇠비 5%, 물-깊이비 0.1의 동조액체감쇠기의 질량비 및 진동수비 변화에 따른 성능지수의 분포를 분석하였다.

그림 11에서와 같이, El Centro(1942) 지진하중에 대한 최대응답의 각 성능지수의 분포에서 상대변위(J_1)와 층간변위(J_2)는 비선형 해석이 선형 해석에 비해 5%이상의 성능증가를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 또한 선형 해석시 상대변위는 동조진동수비 0.9~1.1사이에서 최적 성능을 나타내고 있으나, 비선형 해석시 동조진동수비 1.0 이후 급격한 성능저하를 나타내고 있으며, 구조물의 진동을 증폭시키는 경우도 나타나고 있다. 이러한 경향은 상대변위(J_2)에서도 나타나고 있으나, 가속도(J_3)와 전단력(J_4)에 대한 성능지수 분포에서는 선형해석과 비선형 해석이 거의 유사한 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

RMS 응답에 대한 성능지수 분포는 그림 12와 같으며, 최대응답과 다르게 비선형 해석은 최적 진동수비가 0.9에서 선형해석은 0.9이상에서 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 각 해석방법에 따른 최대 성능값은 최대응답과 달리 유사하게 나타나고 있다.

5. 결론

TLD의 선형 해석 및 비선형 해석방법에 대한 단자유도, 다자유도 구조물에 대한 수치해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

가. 백색잡음을 받는 단자유도 구조물에 대한 수치해석결과, 질량비가 증가함에 따라 성능지수는 전체적으로 감소하지만 동조가 되지 않은 경우의 감소폭은 크지 않다. 따라서 구조물의 진동수를 정확히 식별하는 것이 TLD 설계에 있어 매우 중요함을 확인하였다.

나. 선형 및 비선형 모델을 사용하여 동조액체감쇠기가 설치된 구조물을 해석한 결과, 비선형 해석에 따른 성능지수 값은 단자유도 구조물의 경우, 모든 성능지수에 선형해석의 경우보다 5%이

상 작음을 확인하였다. 하지만 다자유도 구조물의 경우, 최대응답의 상대변위(J_1)와 층간변위(J_2)만 감소하였고, 다른 성능지수는 선형해석과 유사한 분포를 나타내고 있다.

다. 선형 해석과 비선형 해석간의 차에 따라서 대상 구조물의 변위를 제어하기위해 TLD를 설치할 경우, 보수적인 설계를 위해서는 선형 모델을 사용하는 것이 충분할 것으로 판단되나, 실제 비선형 결과와 같이 비동조시 TLD의 성능지수가 급격히 증가하는 현상을 나타내므로, 정확한 성능평가를 위해서는 비선형 모델이 사용되어야 함을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고, 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 05 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05 산학연 C105A1050001-05A0505-00110)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. L. M. Sun, Y. Fujino, P. Chaiseri, and B. M. Pacheco, "The properties of Tuned Liquid Dampers using a TMD analogy", EESD, Vol.24, pp.967-976, 1995.
2. Jin-Kyu Yu, Toshihiro Wakahara, Dorothy A. Reed, "A non-linear numerical model of the tuned liquid damper", Earthquake Engineering & Structural Dynamics Vol. 28, No. 6, 1999.
3. Swaroop K. Yalla, "Liquid Dampers for mitigation of structural response: Theoretical Development and Experimental validation", Ph.D. Thesis, University of Notre Dame, 2001.
4. L. M. Sun, Y. Fujino, B. M. Pacheco, M. Isobe, "Nonlinear waves and dynamic pressures in rectangular tuned liquid damper(TLD)", Structural Eng./Earthquake Eng. 1989.6, 81-92.
5. T.T Soong and G. F. Dargush, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons, New York.
6. Noji T. et al., "Study of Water Sloshing Vibration Control Damper", Jr. of SCE, AIJ, No. 411, pp. 97-105, 1990.
7. P. Banerji, M. Murudi, A. H. Shah, N. Popplewell, "Tuned liquid dampers for controlling earthquake response of structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29:587-602, 2000.