

76층 벤치마크 건물에 설치된 다중 동조 액체 기둥 감쇠기의 최적 설계 변수

Optimal Design Parameters of Multiple Tuned Liquid Column Dampers for a 76-Story Benchmark Building

김형섭* 민경원** 김홍진*** 이상현**** 안상경*****
Kim, Hyoung-Seop Min, Kyung-Won Kim, Hongjin Lee, Sang-Hyun Sang-Kyung Ahn

ABSTRACT

This paper presents the parameter study of multiple tuned liquid damper (MTLCD) applied to the 76-story benchmark building. A parameter study involves the effects of number of TLCD, frequency range, and central tuning frequency ratio, which are important parameters of MTLCD. The performance of MTLCD is carried out numerical analysis which reflects the nonlinear property of liquid motion. The parameters of TLCD exist different each optimal values according to mass ratio. The performance of single-TLCD (STLCD) is sensitive for tuning frequency ratio. Therefore, MTLCD is proposed to protect such the shortcoming of STLCD. The result of numerical analysis presents improved performance for robustness of MTLCD

1. 서 론

수동제어장치로서의 동조 액체 기둥 감쇠기 (tuned liquid column damper : TLCD)는 관내 액체의 운동에 의하여 구조물이 받은 외부에너지를 소산시키는 감쇠장치이다. TLCD는 작동원리가 동조 질량 감쇠기 (tuned mass damper : TMD)와 유사하고 제어성향 및 성능이 비슷하지만⁽¹⁾ TLCD내의 액체는 흔히 물을 사용하기 때문에 생활용수 및 비상시 방화수 등으로 사용이 가능하다. 그리고 물기둥의 길이 변경에 따라 쉽게 주 구조물에 동조가 가능하고, 관내 구멍의 크기에 따라 감쇠비 조절이 가능하다. 또한 액체가 수평을 유지하려는 중력의 힘이 강성으로 작용하기 때문에 TMD와 달리 특별한 초기 구동장치가 필요 없을 뿐만 아니라 유지관리 측면에서도 더 경제적인 감쇠기라 할 수 있다⁽²⁾⁽³⁾. 또한, TLCD의 성능향상을 위하여 U자형 (U-shaped TLCD), V자형 (V-shaped TLCD), 수평과 수직의 단면적이 다른 형태 (Liquid column vibration absorber) 등, 다양한 형태의 Single-TLCD (이하 STLCD)에 관한 실험 및 이론적인 연구가 많이 진행되었다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 이러한 TLCD는 동조진동수비(tuning frequency ratio) 및 수두손실계수 (head loss coefficient)등의 파라미터를 적절하게 선택함으로써 바람하중을 받는 구조물에 설치된 TLCD는 가속도 및 변위의 응답제어에 있어서 큰 효과를 발휘함이 증명되었다. 그러나 실제적으로 구조물에 적용함에 있어서, 구조물과 TLCD의 주기를 산정은 해석 및 측정상의 오차 및 시간

* Dankook University, Dept. of Architecture, Seoul, Korea

** Dankook University, Dept. of Architecture, Associate Professor, Tel: 02-709-2731, E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

*** Dankook University, Center for Research in Building Science, Senior Lecturer, Seoul, Korea

**** Seoul National University, Research Fellow, Seoul, Korea

***** Samsung Engineering Research Institute, Research Fellow, Seoul, Korea

경과에 따른 변화로 인하여 동조 진동수가 바뀌게 된다. 이로 인하여 STLCD는 구조물의 응답제어 성능측면에서 성능저하가 발생하게 된다. 실험 및 이론적인 보고서는 STLCD에서 동조 진동수비는 성능에 큰 영향을 주는 변수이기 때문에, 동조진동수비의 오차는 응답제어를 위해 설치된 STLCD의 심각한 성능저하를 가져올 수 있음을 증명하였다. 최근 들어, 이러한 STLCD의 단점인 강인성측면을 보완하기 위해 multiple-TLCD (이하 MTLCD)의 연구가 활발하게 진행되고 있다. Sadek 등 (1998)(6)은 MTLCD의 적절한 파라미터를 결정하기 위하여 72개의 실제 기록된 지진에 대하여 평균 변위 응답비와 평균 가속도 응답비를 산출하였고, 그에 따라 반복 수행을 하지 않고 최적화된 파라미터를 결정할 수 있는 식을 제안하였다. Gao 등 (1999)(7)은 조화하중을 받는 구조물에 설치된 MTLCD의 주요변수 연구를 STLCD와 비교하여 수행하였고, 또한 진동수비와 감쇠비의 변화에 따른 효과와 강인성을 조사하였다. Xu 와 Shum (2003)(8)은 백색 잡음과 조화하중으로 인한 구조물의 비틀림 진동을 줄이기 위한 방법으로 MTLCD를 사용하였다. 또한 구조물의 비틀림 진동에 대하여, 분석적인 모델을 사용하여 계산된 결과는 실험으로부터 획득된 결과와 잘 일치함을 보였고, STLCD와 성능비교를 수행하였다.

본 논문에서는 Yang 등 (1998)(9)이 제안한 바람하중을 받는 76층의 벤치마크 건물에 MTLCD를 적용하여 수치해석을 수행하였다. 바람하중은 풍동시험을 거쳐서 생성한 압력계수데이터를 층 하중으로 변환하였다. 그리고 성능평가는 벤치마크 논문에서 제시하는 성능지수를 사용하였다. MTLCD 설계에 있어서 주요 변수인 STLCD의 개수, 중심 진동수비, 진동수 범위에 따른 제어성능을 분석하였다. 그 결과, 질량비에 따라 각각의 변수의 최적화 변화의 경향을 알 수 있었다. 추가적으로 STLCD의 가장 큰 단점인 강인성에 대하여 MTLCD와 비교하여 연구를 수행하였다.

2. 76층 벤치마크 건물

예제 구조물은 Yang 등 (1998)이 제안한 풍하중을 받는 고층건물의 진동제어에 관한 벤치마크 문제에서 제시된 구조물을 대상으로 한다. 이 건물은 높이 306m인 76층 사무소 건물로서 호주 Melbourn에 지어질 예정으로 구조해석 및 설계가 끝났으나 재정상의 문제로 세워지지 못하고 있는 건물이다. 구조 형식은 바람에 의한 횡하중에 저항하는 철근 콘크리트 코어와 수직하중에 저항하는 철근 콘크리트 골조로 구성되어 있다. 구조물의 총 질량은 153,000 ton, 부피는 510,000m³이며, 구조물의 높이와 폭의 비율은 306.1/42=7.3이다.

2.1 구조물의 모델링

벤치마크 문제에서 예제 구조물은 수직의 캔틸레버 보로 모델링 되었다. Yang 등은 각 층이 동일한 두께를 가진 고전적 보 요소로 구성된 76개의 수평변위와 76개의 회전각을 가진 유한요소 모델을 구성한 뒤 이를 정적응축(static condensation) 방법을 사용하여 76개의 각 층 수평변위만을 가진 구조물 모델링 하였다. 저차의 5개 고유진동수는 0.160, 0.765, 1.992, 3.790, 6.395 Hz이다. 감쇠행렬은 저차의 5개 모드가 모두 1%의 감쇠비를 갖는

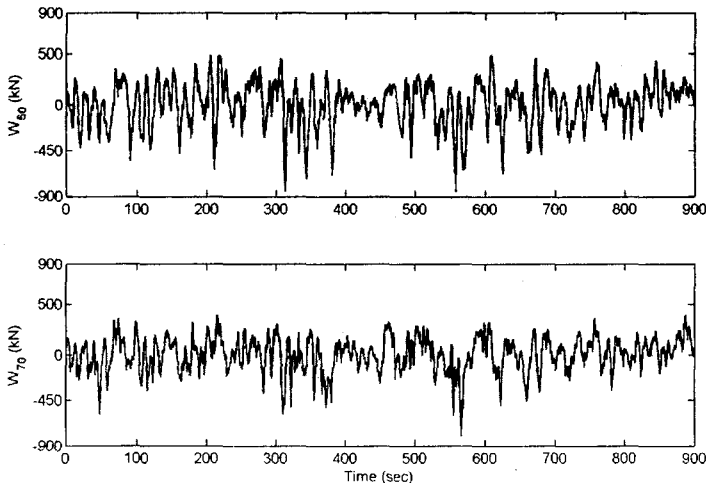


그림 1 풍 적각방향 바람하중의 시간이력

비례감쇠로 모델링 되었다.

2. 바람하중

벤치마크건물에 작용하는 바람하중은 호주의 시드니 대학교 토목공학과내의 풍동실험연구소에서 실시한 실험에 의하여 획득하였다. 건물은 1:400의 축소모형을 사용하였고, 속도는 1:3의 크기를 사용하였다. 결과적으로 시간은 약 1:133으로 축소되었다. 따라서 바람데이터는 27초 동안 측정된 데이터는 약 1시간의 표준데이터를 나타낸다. 측정값들은 초기에 건물의 높이에 따른 결합된 압력계수이다. 32페이지에서 기록된 전체의 압력들은 각층의 압력계수를 나타내기 위해 조합된다. 이렇게 결합된 압력계수를 바람하중으로 전환한다. 옥상제어시스템의 성능평가를 위해서 풍 직각방향 바람 데이터 중 단지 처음 15분 (900초)을 사용하였는데 이것은 계산의 어려움의 덜기 위함이다. 70층에 작용하는 풍 직각방향 바람하중의 시간이력은 그림 1에 나타내었다.

3. 구조물과 Multiple-TLCD가 연계된 운동방정식

그림 1과 같이 구조물과 N 개의 MTLCD가 결합된 운동방정식은 식(1)과 같다. 구조물에 추가적으로 질량을 설치하여 제어하는 방식의 감쇠기는 주구조물의 1차모드에 동조시켜 설계를 하기 때문에 구조물의 단자유도 가정하여 운동방정식을 나타내었다.

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = F \quad (1)$$

여기서, M , C , 그리고 K 는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내고 F 와 z 는 외란과 변위벡터를 나타낸다. 그 형태는 다음과 같다.

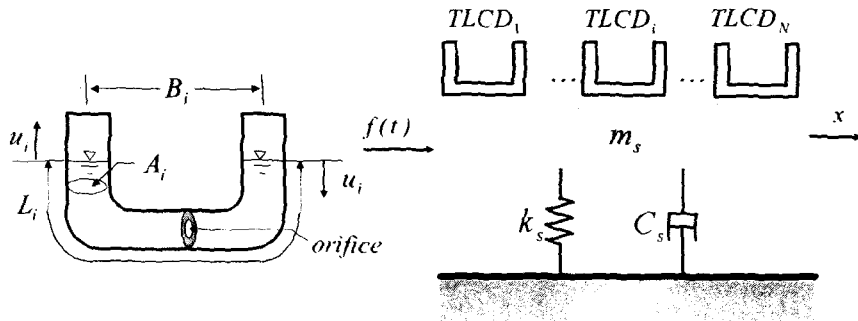
$$M = \begin{bmatrix} m_s + m_{d1} & \alpha_1 m_{d1} & \alpha_2 m_{d2} & \cdots & \alpha_n m_{dN} \\ \alpha_1 m_{d1} & m_{d1} & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_2 m_{d2} & 0 & m_{d2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \alpha_n m_{dN} & 0 & \cdots & 0 & m_{dN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = \text{diag} \left\{ c_s, \frac{\rho A_1}{2} \xi_1 |u_1|, \frac{\rho A_2}{2} \xi_2 |u_2|, \cdots, \frac{\rho A_n}{2} \xi_n |u_n| \right\} \quad (3)$$

$$K = \text{diag} \{ k_s, 2\rho A_1 g, 2\rho A_2 g, \cdots, 2\rho A_n g \} \quad (4)$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{f(t)}{m_s} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$z = [x \ u_1 \ u_2 \ \cdots \ u_N]^T \quad (6)$$



(a) 물기둥 시스템

(b) MTLCD 시스템

그림 2 MTLCD 구조물 시스템

여기서, m_s, c_s, k_s, x , 그리고 g 는 각각 주 구조물 질량, 감쇠계수, 강성, 변위, 그리고 중력가속도이다. m_i, ρ_i, A_i, ξ_i , 그리고 u_i 는 각각 i 번째 TLCD의 질량, 액체밀도, 단면적, 수두손실계수, 그리고 수직변위이고, x 는 구조물의 변위이다. 또한, α_i 와 m_d 는 다음 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{B_i}{L_i} \quad m_d = \sum_{i=1}^N m_{di} \quad (7)$$

여기서, B_i 는 액체기둥의 수평길이 이다.

4. 성능평가

측면변형과 비틀림 변형의 연계가 무시되고 풍 직각방향 바람과 풍 방향 바람은 서로 연계되지 않기 때문에 풍 직각방향 바람과 풍 방향 바람에 의한 빌딩의 응답은 서로 독립적으로 계산될 수 있다. 풍동실험에 기초하여 풍 직각방향 바람에 의한 빌딩의 응답 크기는 풍 방향 바람하중으로 인한 것보다 훨씬 더 크다. 결과적으로, 제어기의 설계는 풍 직각방향 바람하중만을 고려한다. 76층 건물에 제어기를 설치하는 주된 목적은 거주자의 불안함을 경감시키기 위해 절대가속도를 줄이는 것이기 때문에 첫 번째 성능지수는 RMS (roots mean squares) 가속도를 줄이는 것이다. 그러한 성능지수는 다음과 같이 주어진다.

$$J_1 = \max(\sigma_{\ddot{x}_1}, \sigma_{\ddot{x}_{30}}, \sigma_{\ddot{x}_{50}}, \sigma_{\ddot{x}_{55}}, \sigma_{\ddot{x}_{60}}, \sigma_{\ddot{x}_{65}}, \sigma_{\ddot{x}_{70}}, \sigma_{\ddot{x}_{75}}) / \sigma_{\ddot{x}_{75}}, \quad (8)$$

여기서 $\sigma_{\ddot{x}_i}$ 는 i 층의 RMS 가속도이고, $\sigma_{\ddot{x}_{75}}$ 는 75층의 제어 전 RMS 가속도이다. 성능지수 J_1 은 거주용으로 사용하지 않는 76층을 이용하지 않고, 거주용으로 사용되는 최고층인 75층의 가속도가 고려된다. 두 번째 성능지수는 50층 이상의 선택된 층의 평균가속도를 나타내며, 그러한 식은 다음과 같다.

$$J_2 = \frac{1}{6} \sum_i (\sigma_{\ddot{x}_i} / \sigma_{\ddot{x}_{i0}}) \quad i=50, 55, 60, 65, 70 \text{ 그리고 } 75 \quad (9)$$

여기서 $\sigma_{\ddot{x}_{i0}}$ 는 i 층의 제어 전 RMS 가속도이다. 세 번째와 네 번째 성능지수는 RMS 변위는 줄이는 성능을 나타낸다.

$$J_3 = \sigma_{x_{76}} / \sigma_{x_{76o}} \quad (10)$$

$$J_4 = \frac{1}{7} \sum (\sigma_{x_i} / \sigma_{x_{i0}}) \quad i=50, 55, 60, 65, 70, 75 \text{ 그리고 } 76 \quad (11)$$

여기서, σ_{x_i} 와 $\sigma_{x_{i0}}$ 는 각각 제어전과 제어후의 i 층의 RMS 변위이다. 본 논문에서는 수동제어기를 사용하기 때문에 능동제어기의 스트로크와 관련된 성능지수 J_5 과 J_6 는 포함시키지 않았다. RMS 성능에 추가적으로, 최대응답 또한 중요하다. 그러한 최대응답 제어 능력을 나타내는 성능지수는 다음과 같다.

$$J_7 = \max(\ddot{X}_{p1}, \ddot{X}_{p30}, \ddot{X}_{p50}, \ddot{X}_{p55}, \ddot{X}_{p60}, \ddot{X}_{p65}, \ddot{X}_{p70}, \ddot{X}_{p75}) / \ddot{X}_{p75o} \quad (12)$$

$$J_8 = \frac{1}{6} \sum_i (\ddot{X}_{pi} / \ddot{X}_{pi0}) \quad i=50, 55, 60, 65, 70 \text{ 그리고 } 75 \quad (13)$$

$$J_9 = X_{p76} / X_{p76o} \quad (14)$$

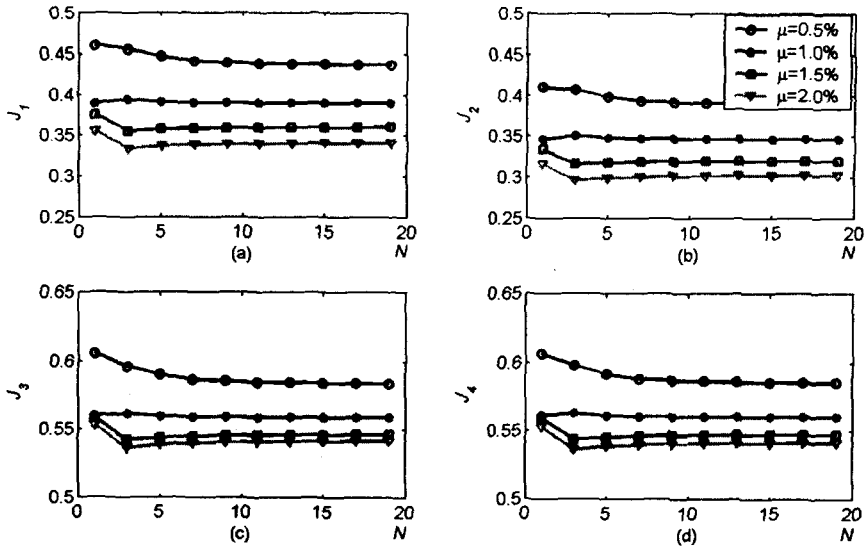


그림 3 MTLCD의 개수에 따른 성능지수 변화

$$J_{10} = \frac{1}{7} \sum_i (X_{pi}/X_{pio}) \quad i=50, 55, 60, 65, 70, 75 \text{ 그리고 } 76 \quad (15)$$

여기서 \ddot{X}_{pi} 와 \ddot{X}_{pio} 는 각각 i 층의 제어전과 제어후의 최대가속도이고, 또한 X_{pi} 와 X_{pio} 는 각각 i 층의 제어전과 제어후의 최대변위이다. 위의 식으로부터 성능지수가 작을수록 더 좋은 성능을 발휘함을 알 수 있다.

5. MTLCD의 수치해석

MTLCD는 두개 혹은 그 이상의 STLCD가 다른 진동수 혹은 형태를 가지며 구조물에 설치된다. 따라서 STLCD와는 다르게 일정한 진동수 폭을 가지고 있다. STLCD에서 주구조물의 진동수 변화와 측정 및 설계오차로 인한 동조진동수비의 변화는 제어시스템의 성능에 심각한 성능저하를 가져올 수도 있다. 이러한 점을 보완하기 위하여 MTLCD가 제안되었고, 특히 넓은 진동수 분포대역을 가지고 있는 바람에 대하여 MTLCD가 STLCD보다 강인성 측면에서 더 좋다⁽⁵⁾. 따라서 이러한 강인성 측면에서 대두되기 시작한 MTLCD의 주요 변수로는 STLCD의 개수(N), 일정한 진동수 간격으로 설계된 MTLCD의 진동수 범위($\Delta\omega$), 그리고 MTLCD의 STLCD들 중에 중심 진동수와 주 구조물과의 진동수의 비(f_0) 등이 있다.

5.1 MTLCD의 개수 (N)

MTLCD는 감쇠기의 강인성을 증가시키기 위해 STLCD가 일정한 진동수 폭을 가지고 주 구조물에 동조되기 때문에 개수에 따른 제어성향이 다르게 나타난다. 그림 3은 STLCD의 개수에 따른 제어성능은 나타내는 것으로써, 가속도 및 변위의 RMS 성능지수를 통하여 나타내었다. MTLCD를 설계함에 있어서 각 질량비에 대하여 중심동조진동수비, 수두손실계수, 그리고 진동수범위는 반복수행을 거쳐 RMS 가속도 응답을 최소화하는 수치를 사용하였다. 또한 TLCD의 전체길이에 대한 수평길이비는 기존 연구에 의하여 벤치마크 건물에 대하여 반복수행한 결과 0.8로 선택하였다⁽⁶⁾. 그림 3에서 TLCD의 질량비가 커짐에 따라 RMS 응답이 감소함을 알 수 있고, 가속도 성능지수인 J_1 과 J_2 가 변위성능지수인 J_3, J_4 보다 더 큰 것을 알 수 있다. TLCD의 개수가 3개 혹은 5개 정도까지는 전체적으로 제어성능의 향상을 나타내고 있지만, 5개 이상부터는 제어성능의 변화가 거의 없다. 따라서 MTLCD의 설계 시 개수를 무조건 증가시키는 것 보다 시공성과 경제성을 고려한 설계가 필요하다.

5.2 진동수 범위 ($\Delta\omega$)

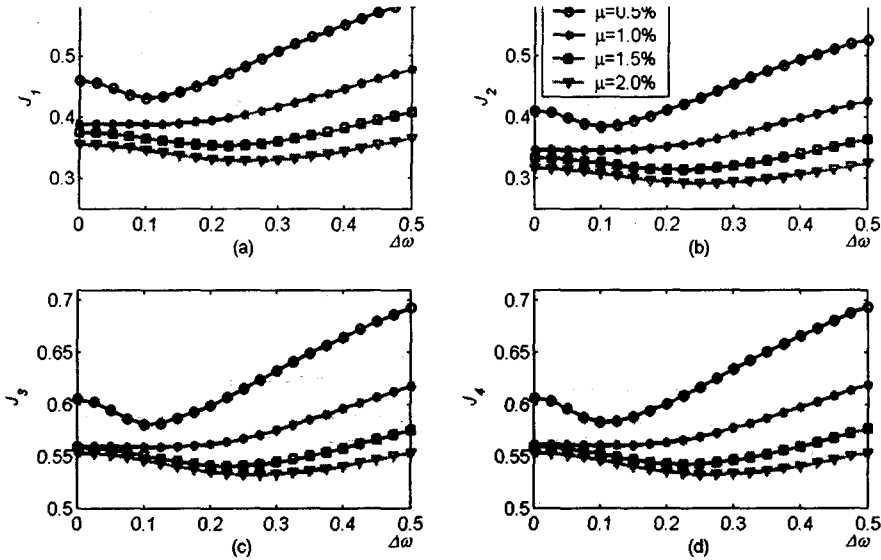


그림 4 MTLCD의 진동수 범위에 따른 성능지수 변화

MTLCD는 각각의 STLCD가 일정한 진동수 간격을 가지고 주구조물에 동조된다. 그에 따라 진동수의 범위는 MTLCD의 중요한 변수로써, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta w = w_N - w_1 \quad (16)$$

여기서 w_N 와 w_1 는 첫 번째와 마지막 STLCD의 진동수 이다.

앞서 수행한 해석을 통하여 MTLCD의 개수를 7개로 선택하고 다음의 수치해석들을 수행하였다. 그림 4은 MTLCD의 진동수 범위에 따른 RMS 성능지수의 변화를 알아보았다. 길이비(a)는 0.8로 일치시켰고, 중심동조진동수비와 속도손실계수는 반복수행을 거쳐 RMS 가속도 응답을 최소화하는 수치를 사용하였다. 그림 4에서 진동수 범위의 최적값이 존재하고 있는 것을 알 수 있고, 그 수치는 질량비가 증가할수록 커지는 것을 알 수 있다. 이는 작은 질량비를 가진 TLCD를 너무 넓게 분포시키면 MTLCD로써의 제어효과가 저하되기 때문이고, 이와는 반대로 질량비가 증가할수록 진동수 범위를 증가시킴으로써 MTLCD로써의 성능을 발휘할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 4에서 진동수범위 0은 STLCD를 의미한다.

5.3 중심 동조진동수비 (f_0)

MTLCD에서 동조진동수비는 STLCD와 마찬가지로 중요한 설계변수이다. MTLCD에서의 동조진동수비(f_0)는 STLCD의 진동수들 중에 중심에 위치한 진동수와와의 비를 나타내며, 다음 식(17)과 같다.

$$f_0 = \frac{w_{dj}}{w_s} \quad \left(j = \frac{N+1}{2} \right) : N \text{이 홀수일 때}$$

$$f_0 = \frac{w_j + w_{j+1}}{2w_s} \quad \left(j = \frac{N}{2} \right) : N \text{이 짝수일 때} \quad (17)$$

여기서 N 은 TLCD의 개수이다.

그림 5는 TLCD의 개수를 5개로 일치시킨 후, 동조 진동수비에 따른 MTLCD의 제어성능을 나타낸다. 각 질량비에 따라 길이비를 0.8로 고정시키고, 속도손실계수, 진동수범위는 반복을 통해 RMS 가속도응답을 최소화 하는 수치를 사용하였다. 최적의 중심동조진동수비는 STLCD의 진동수비와 마찬가지로 1에 가까운 것을 알 수 있다. 앞서의 수치해석과 마찬가지로 질량비가 증가할수록 감쇠기의 제어성능이 향상됨을 알 수 있고, 전체적으로 중

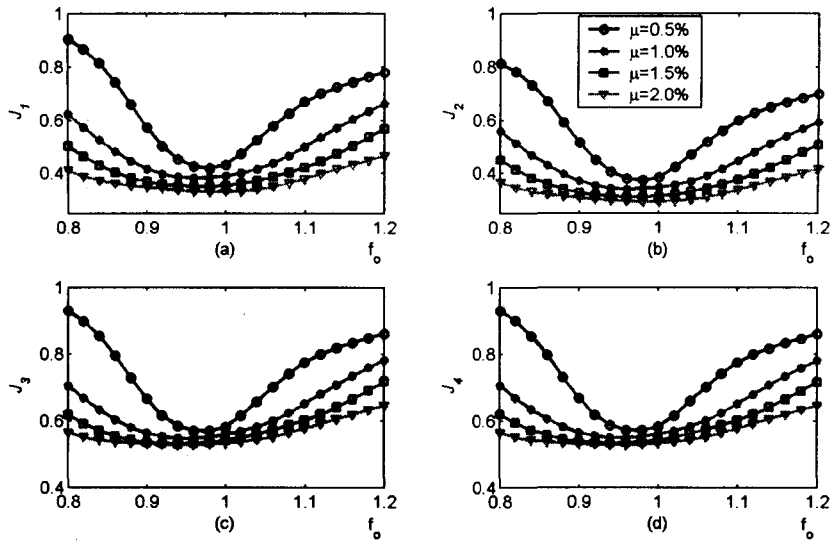


그림 5 MTLCD의 동조진동수비에 따른 성능지수 변화

심동조진동수비에 따른 민감성도 작아진다. 따라서 MTLCD에서 질량비가 나중에 언급할 강인성에도 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

6. STLCD와 MTLCD의 강인성 비교

76층의 벤치마크 건물에 MTLCD를 적용함에 있어서 주구조물과의 동조진동수비는 매우 중요한 변수이다. 따라서 주구조물 강성 측정오차, 외부하중에 의한 주구조물의 진동수 변화, 그리고 주구조물의 질량 및 강성의 변화 등 여러 가지 요인에 의하여 동조진동수비에 변화가 생길 수 있다. 이러한 측면에서 감쇠기의 강인성 검토도 중요하다. MTLCD는 STLCD의 강인성의 보완하기 위해서 제시되었고, MTLCD의 개수는 5개를 사용하여 해석을 수행하였다. 주 구조물의 강성오차에 따른 TLCD의 성능지수를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 강성오차가 없는($\Delta K=0\%$) 곳에서 MTLCD와 STLCD의 RMS성능은 거의 같은 것으로 나타났다 하지만 최대응답 성능지수에서는 MTLCD가 약간 우수한 것을 알 수 있다. 강성오차가 존재할 때($\Delta K=\pm 15\%$) RMS응답은 STLCD보다 MTLCD가 보다 우수한 제어성능을 보인다. 최대응답 성능지수는 성능지수 J_7 을 제외하고는 강성의 변화가 있을 때 MTLCD가 우수한 것으로 나타났다. MTLCD를 적용함으로써 STLCD에서의 단점인 강인성을 좀더 보완할 수 있음을 알 수 있다.

표 1 STLCD와 MTLCD의 강인성 비교

	RMS 응답							최대 응답					
	$\Delta K=+15\%$		$\Delta K=0\%$		$\Delta K=-15\%$			$\Delta K=+15\%$		$\Delta K=0\%$		$\Delta K=-15\%$	
성능 지수	N=1	N=7	N=1	N=7	N=1	N=7	성능 지수	N=1	N=7	N=1	N=7	N=1	N=7
J_1	0.633	0.581	0.391	0.392	0.686	0.660	J_7	0.641	0.659	0.473	0.464	0.715	0.691
J_2	0.629	0.576	0.387	0.388	0.683	0.658	J_8	0.636	0.631	0.476	0.472	0.723	0.680
J_3	0.783	0.745	0.552	0.550	0.786	0.772	J_9	0.770	0.708	0.621	0.614	0.857	0.817
J_4	0.783	0.745	0.554	0.552	0.788	0.774	J_{10}	0.764	0.702	0.628	0.621	0.861	0.822

7. 결론

본 논문은 76층 벤치마크 건물에 MTLCD를 적용하여 변수에 따른 제어성능을 분석하였다. 하중으로는 풍동시험을 기리 생성된 비선형하중을 사용하였고, 제어기의 제어성능은 선택된 층의 기층도 및 변위에 대하여 각각

RMS와 최대값의 저감계수를 사용하여 분석하였다. TLCD의 성능에 가장 큰 영향을 주는 변수로는 질량비를 들 수 있다. 질량비는 구조물의 특성 및 제어 목표에 따라 선택될 수 있으며, 수치가 커질수록 제어효과는 크다. 또한 동조진동수비의 변화에 따른 민감도도 감소한다. 하지만 질량비에 비례하여 성능이 증가하는 것이 아니므로 구조 및 설비 측면을 고려하여 TLCD를 설계해야 한다. TLCD와 같이 추가적인 질량을 사용하여 제어하는 감쇠기의 가장 큰 단점인 강인성을 보완하기 위해 MTLCD가 제안되었다. MTLCD의 주요 설계변수로는 STLCD의 개수, 진동수 범위, 중심 동조 진동수비 등이 있다. 이러한 변수들은 질량비에 따라 최적수치가 다르게 존재한다. 또한 MTLCD에서 개수가 약 5개 이상부터는 성능변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 MTLCD의 성능향상을 위해서는 무조건 적으로 개수를 늘리는 것보다 시공성 및 경제성 등을 종합적으로 고려해서 설치해야 한다. 추가적으로 강인성 검토를 수행한 결과 MTLCD가 STLCD보다 좀 더 우수한 것으로 나타내었다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 지정 스마트사회기반시설 연구센터와 삼성물산(주)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Samali, B., Kwok, K., and Gao, H. (1998) "Wind Induced Motion Control of a 76 Storey Building by Liquid Dampers", *Proceedings of Second World Conference on Structural Control*, Vol. 1, pp. 1473-1480.
2. Wright, G., "Steadying Influence - Damper systems save millions in cost, while reducing lateral movement in tall buildings", *Building Design & Construction*, Nov. 01, 2002.
3. Fortner, B., "Water Tanks Damp Motion in Vancouver High-Rise", *Civil Engineering*, June, p.18., 2001.
4. Chang, C. C., and Qu, W. L. (1998) "Unified Dynamic Absorber Design Formulas for Wind-Induced Vibration Control of Tall Buildings", *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 7, pp. 147-166.
5. Gao, H., Kwok, K. C. S., and Samali, B. (1997) "Optimization of Tuned Liquid Column Dampers", *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 6, pp. 476-486.
6. Sadek, F., Mohraz, B., and Lew, H. S. (1998) "Single-and Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Seismic Applications", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, pp. 439-463.
7. Gao, H., Kwok, K. C. S., and Samali, B. (1999) "Characteristics of Multiple Tuned Liquid Column Dampers in Suppressing Structural Vibration", *Engineering Structures*, Vol. 21, pp. 316-331.
8. Xu, Y. L., and Shum, K. M. (2003) "Multiple-Tuned Liquid Column Dampers for Torsional Vibration Control of Structures: Theoretical Investigation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, 2003년, pp. 309-328.
9. Yang, J. N., Wu, J. C., Samali, B., and Agrawal, A. K., "A Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings" *Proceedings Of Second World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 1998년, pp. 1407-1416.