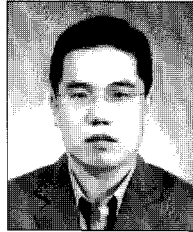


TLD를 이용한 초고층건축물의 풍진동제어

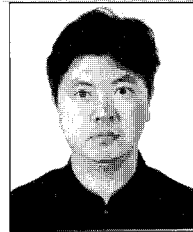
Mitigation of Wind-induced Motion of Tall Buildings Using TLD



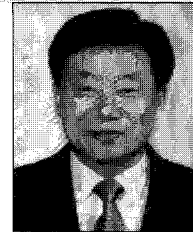
김 홍 진*



조 지 성**



김 대 근***



이 광 재****

*경북대학교 건축토목공학부 건축공학전공 전임강사
 **포스코건설 기술연구소 차장
 ***포스코건설 송도사업본부 차장
 ****포스코건설 송도사업본부 상무

1. 서 론

현대의 구조물은 재료 및 기술의 발달로 인하여 점점 가벼워지고 유연해 짐에 따라 지진 및 바람 등의 외부하중에 의해 점점 큰 진동 및 변위가 유발된다. 따라서 단순히 강성을 증가시켜 진동을 줄이는 기존의 내진 및 내풍설계에서 벗어나 경제적인 면을 고려하여 강성을 증가시키는 대신 추가적인 감쇠장치를 설치하여 구조물의 외부하중에 의해 생기는 에너지를 감쇠장치에 의해 소산시키는 방법이 점점 더 증가하고 있다.

대표적인 수동제어 방법으로는 층간에 설치하여 층간변위에 따른 감쇠장치의 이력거동에 의해 에너지를 소산시키는 감쇠장치와 구조물의 상부층 혹은 옥상층에 부가 질량체를 설치하

여 관성력에 의해 에너지를 소산시키는 부가질량형 감쇠장치(secondary mass damper) 등이 있다. 그 중 층간에 설치하는 방법은 성능측면에서는 효과적이지만 건물의 이용적 측면에서 많은 불이익을 가져올 수 있다. 이에 반해, TMD(Tuned Mass Damper, 동조질량감쇠기)와 TLD (Tuned Liquid Damper, 동조액체감쇠기)로 대표되는 부가질량형 감쇠장치는 건물 전체 질량에 약 0.5~1%를 차지하는 추가적인 질량을 옥상층에 설치하여 에너지를 소산시키는 장치로 건물의 이용적 측면에서 층간설치형에 비해 제약이 적은 장점이 있어 최근 들어 그 사용이 점차 증가되고 있다.

2. TMD(Tuned Mass Damper)

TMD는 건물에 스프링과 감쇠기가 달린 부가질량체(주로 철)를 설치함으로써 감쇠를 증가시키는 장치이다(그림 2). 이 부가질량체의 주기는 본 건물의 고유주기(=1/고유진동수)에 동조 또는 거의 일치되도록 설치하고, 구조물의 고유진동수에 동조되게 함으로써 그 진동수 성분의 가진이 발생할 때 TMD의 거동은 구조물의 거동과 반대의 위상으로 거동하게 되고 TMD의 관성력에 의하여 구조물의 에너지가 소산된다. 그림 2(b)는 구조물 무게의 1%의 무게를 갖는 TMD를 설치하였을 때의 주파수 응답을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이

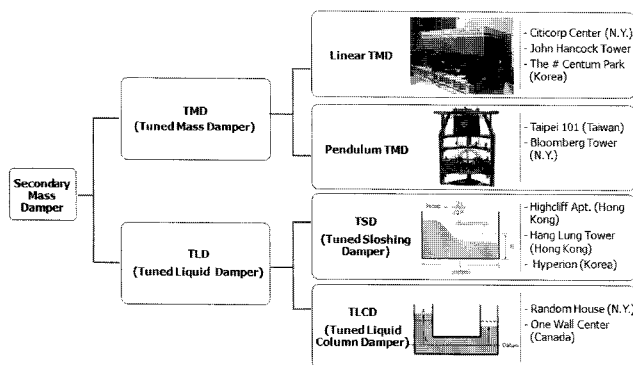
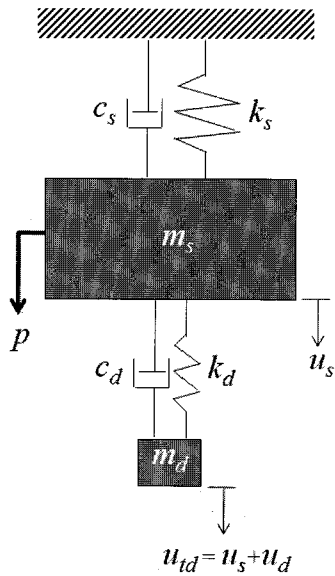
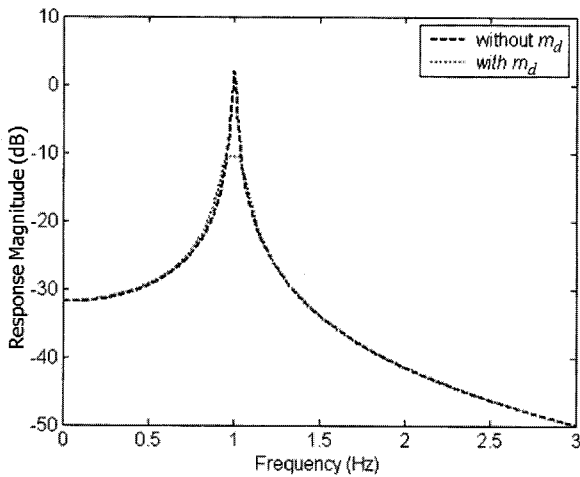


그림 1 부가질량형 감쇠장치(Secondary mass damper) 의 종류



(a) TMD가 설치된 단자유도 시스템



(b) 주파수 응답 비교 (m_t = 0.01ms)

그림 2 TMD 시스템

TMD를 구조물의 고유진동수에 동조되도록 설치할 경우 구조물의 고유진동수 근처에서 응답이 현저히 감소함을 알 수 있다.

TMD는 구조물에 1개 층이 증가한 것으로 쉽게 모델링이 가능하다. 단자유도 구조물과 TMD의 연계된 운동방정식은 아래와 같다(Den Hartog, 1956).

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ 0 & m_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s + c_d & -c_d \\ -c_d & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s + k_d & -k_d \\ -k_d & k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, m_s, c_s, k_s 는 각각 구조물의 질량, 감쇠계수, 강성이고, m_d, c_d, k_d 는 각각 TMD의 질량, 감쇠계수, 강성이고, u_s 는 구조물의 변위, $u_{td}(=u_s+u_d)$ 는 TMD의 변위이다. 이를 TMD가 설치된 층 변위(u_s)와 TMD 변위(u_{td})의 상대변위($u_d=u_{td}-u_s$)로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_s & 0 \\ m_d & m_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_s \\ \ddot{u}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_d \\ 0 & c_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_s \\ \dot{u}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_s & -k_d \\ 0 & k_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)의 첫 번째 행을 다시 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = p + k_d u_d + c_d \dot{u}_d \quad (3)$$

그리고 식 (2)의 두 번째 행을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$m_d \ddot{u}_d + m_d \ddot{u}_d = -k_d u_d - c_d \dot{u}_d \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = p - m_d (\ddot{u}_s + \ddot{u}_d) \quad (5)$$

최종적으로 구조물과 TMD의 운동방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = p - m_d \ddot{u}_s - m_d \ddot{u}_d \quad (6)$$

$$m_d \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d = -m_d \ddot{u}_s \quad (7)$$

국내에서 고층건물의 풍진동제어를 위해 최초로 설치된 TMD 사례는 인천공항 관제탑(2001)과 양양공항의 관제탑(2002)이다. 인천공항의 관제탑의 경우 TMD의 능동제어형태의 일종인 HMD(Hybrid Mass Damper)가 설치되었고 양양공항 관제탑의 경우에는 수동 TMD가 설치되었다. 주거용 건물에는 부산 센텀파

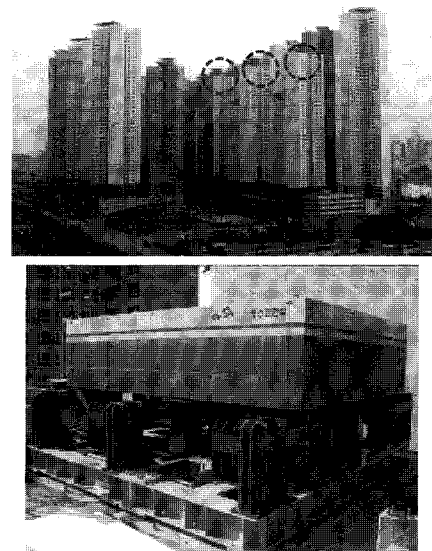


그림 3 부산 센텀파크에 설치된 TMD

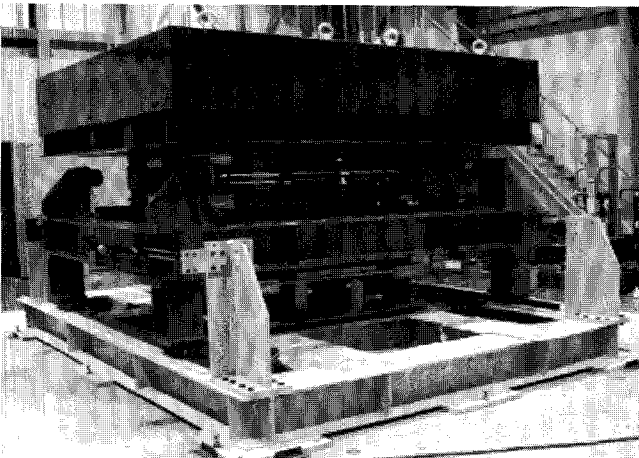
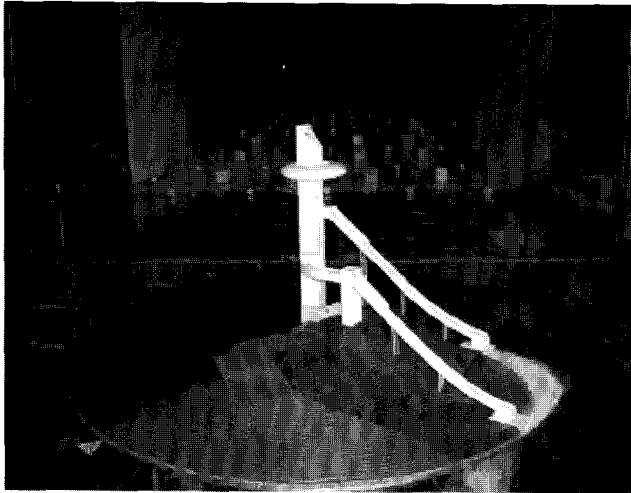


그림 4 평창 알펜시아 스키장 스키점프대 설치예정 TMD

크아파트에 TMD가 최초로 설치되었고(2004) 울산 롯데호텔에 AMD(Active Mass Damper)가 최근에 설치되었다(2007). 그리고 강원도 평창 알펜시아 스키장내 스키점프대에 TMD가 설치될 예정이다.

3. TLD(Tuned Liquid Damper)

TLD는 TMD의 작동원리와 유사하나, 부가질량체를 액체(주로 물)를 사용하는 것이 차이점이다. 즉, 액체가 질량체로 작용하여 증력을 복원력으로 하며 물의 출렁임(sloshing)을 이용하여 건물의 에너지를 액체의 유동에너지로 흡수하는 장치로 TMD와 마찬가지로 액체의 출렁임의 주기를 건물의 1차 주기와 일치하도록 동조시킨다. 이러한 유사성 이외에, TLD는 TMD에 비해 시공비가 저렴하고 유지관리가 용이하며 구조물의 주기의 변화 등의 동적특성 변화에 물 높이를 변화하는 방식으로 쉽게 대응이 가능하고 진동저감 효과가 TMD와 유사하기 때문에 최근 들어 사용이 증가하고 있는 부가질량형 감쇠기이다.

저렴한 공사비 외에도 TLD의 또 다른 이점은 고층건물에서 분명하게 드러난다. 대부분의 고층건물에서는 소방을 목적으로

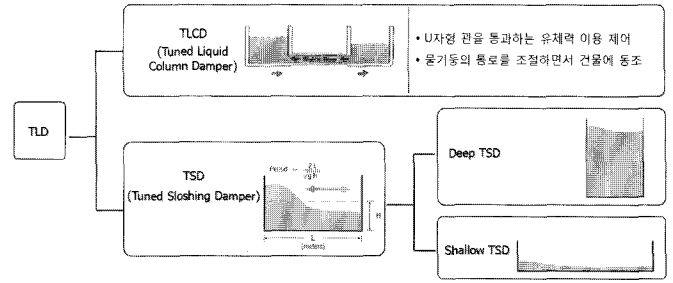


그림 5 TLD의 종류

한 스프링클러용 물탱크의 설치가 필수적인 경우가 많다. 이 경우 풍진동 제어를 위한 용도로 설치된 TLD내의 물이 소방용수로 동시에 사용된다면 진동제어 목적 이외의 어떠한 추가기능을 갖고 있지 않는 TMD의 질량체에 비해 상당한 비용 절감효과를 가져올 수 있다. 실제로 미국 뉴욕의 Random House는 TLD를 사용함에 따라 부가감쇠장치 없이 골조에만 의존하여 횡력에 저항하는 구조시스템에 비해 약 7~8백만불(총 공사비 대비 약 5%)의 절감효과가 있는 것으로 조사되었고(Wright, 2002), 캐나다 밴쿠버에 위치한 One Wall Center의 경우 TLD를 설치함으로써 TMD 설치 시 보다 약 200만 불이 절약된 것으로 보고되었다(Fortner, 2001).

TLD의 종류는 그림 5와 같이 U자형 기둥내의 액체의 유체력을 이용한 TLCD(Tuned Liquid Column Damper)와 물의 출렁임(sloshing)을 이용한 TSD(Tuned Sloshing Damper)가 있다. TSD는 크게 낮은 수심(shallow-water)형과 깊은 수심(deep-water)형으로 나누어지며 이는 액체의 폭에 대한 깊이의 비로 구분된다. 폭-깊이비의 기준은 0.15이며, 폭-깊이비가 0.15보다 작은 낮은 수심 TLD의 에너지 소산은 기본적으로 액체의 점성력과 액체표면의 파의 부서짐(wave breaking)에 기인한다. 깊은 수심 TSD는 기본적으로 감쇠효과를 증가시키기 위해 막(screen)이나 차폐장치(baffle)를 필요로 한다. 따라서 감쇠는 액체의 움직임의 크기, 파의 부서짐의 형태, 그리고 막의 형태에 따라 결정된다. 깊은 수심 TSD의 가장 큰 단점은 액체의 상당 부분이 출렁이지 않기 때문에 에너지를 소산시키기 보다는 단순히 적재하중을 증가시키는 역할만을 한다는 점이다. 따라서 동조액체감쇠기는 많은 칸막이로 구분하여 출렁임에 참여하는 유효질량의 크기를 증가시키는 것이 현실적이다.

TLD내의 액체의 기본 거동은 비선형성을 가지며, 특히 응답의 크기에 의존하는(amplitude dependent) 특성을 가지고 있으나 일반적으로 선형 TMD 근사이론(analogy)을 사용하여 해석하는 경우가 많다. 그러나, 정확한 거동분석을 위해서는 반드시 비선형성을 고려해야 하며, 이에 대한 많은 연구가 수행되었다(Soong 등, 1997). 그리고 이러한 다양한 TLD의 수치해석 기법에 대한 연구와 더불어 TLD의 성능향상을 위해 다양한 형태의 TLD가 제안되었다(주영규, 2002, Tait 등, 2004).

3.1 TSD(Tuned Sloshing Damper)

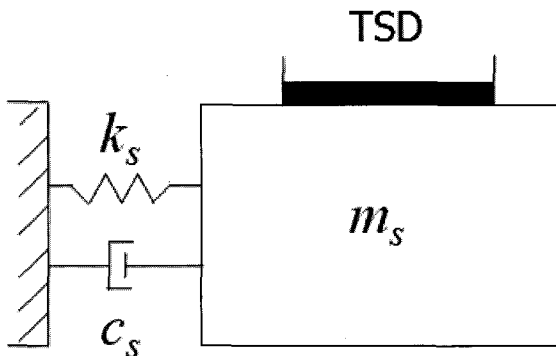
TSD의 기본적인 형태는 그림 6과 같이 물과 같은 액체를 넣은 용기를 건물의 상부에 설치하여 주 구조체의 입력 에너지를 용기내의 유동 에너지로 흡수하고 이것을 액체의 마찰, 액체 상호간 또는 용기 내의 벽면과의 충돌로 소산시킨다.

TSD 용기내의 액체의 복잡한 비선형거동을 모사하기 위하여 선형파동이론(linear wave theory)에 기반한 선형이론을 이용하여 액체의 수평방향과 수직방향의 좌표에 따른 액체의 거동 특성을 표현한다. 해석 결과는 $x-z$ 두 방향으로 조화거동을 보이는 것으로 표현되며, n 차 출렁임 모드에 대한 유효질량 (m_n)과 고유진동수 (ω_n)는 다음 식 (8)과 (9)로 표현할 수 있다(Graham 등, 1952).

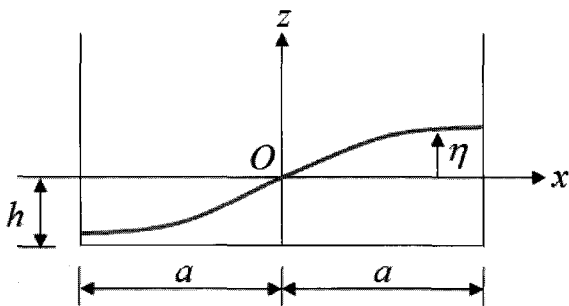
$$m_n = m_d \left(\frac{8 \tanh\{(2n-1)\pi r\}}{\pi^3 r (2n-1)^3} \right); \quad n=1,2,\dots \quad (8)$$

$$\omega_n^2 = \frac{g(2n-1)\pi \tanh\{(2n-1)\pi r\}}{2a}; \quad n=1,2,\dots \quad (9)$$

여기서, n 은 출렁임 모드이고, m_d 는 액체의 총질량, g 는 중력가속도이다. r 은 $h/2a$ 로 h 는 그림 6에서 나타난 것처럼 동조액체감쇠기 액체의 높이이고, $2a$ 는 가진 방향으로의 수조 길이이다.



(a) 구조물-TSD 운동모델



(b) TSD 운동모델

그림 6 TSD 운동모델

일반적으로 TSD의 적용에 있어서 구조물의 1차모드에 동조시키기 때문에 1차 출렁임 모드만 제어성능에 참여하고 2차 이상의 출렁임 모드는 TSD의 제어성능에 참여하지 않는다. 식 (8)로부터 제어성능에 참여하는 질량(m_1)과 참여하지 않은 질량(m_0)은 다음과 같음을 알 수 있다.

$$m_1 = m_d \left(\frac{8}{\pi^3 r} \tanh(\pi r) \right) \quad (10)$$

$$m_0 = \sum_{n=2}^{\infty} m_n = m_d - m_1 \quad (11)$$

따라서, TSD의 경우 TMD와 달리 제어력에 참여하는 질량과 구조물의 질량증가에 기여하는 질량인 총질량이 다르기 때문에 운동방정식이 식 (12)와 (13)과 같이 구성된다.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = p - G_2 \ddot{u}_d - G_3 \ddot{u}_d \quad (12)$$

$$G_1 \ddot{u}_d + c_d \dot{u}_d + k_d u_d = -G_3 \ddot{u}_s \quad (13)$$

여기서,

$$G_1 = m_d \left(\frac{8}{\pi^3 r} \tanh(\pi r) \right) \quad (14)$$

$$G_2 = m_d \quad (15)$$

$$G_3 = G_1 \quad (16)$$

이다. 참고로 TMD 운동방정식 (6)과 (7)의 경우에는 $G_1 = G_2 = G_3 = m_d$ 이다. 식 (13)에서 c_d 와 k_d 는 각각 TSD의 감쇠계수와 강성으로 다음과 같이 주어진다.

$$c_d = 2\xi_d \omega_d m_d \quad (17)$$

$$k_d = \omega_d^2 G_1 \quad (18)$$

여기서, ξ_d 와 ω_d 는 각각 액체의 감쇠비와 고유진동수이고, 식 (9)로부터 TSD의 1차 모드 고유진동수는 아래와 같이 구해진다.

$$\omega_d = \omega_1 = \sqrt{\frac{g\pi}{2a} \tanh(\pi r)} \quad (19)$$

액체자체의 감쇠비는 수조 밑바닥과 옆면의 경계층 효과, 액

체의 자유표면오염(free surface contamination)효과와 감쇠네트(screen)의 영향을 받으며, 특히 비선형 특성을 가지고 있기 때문에 대상하중에 의해 예측되는 변위에 대한 실험을 수행하여 그 값을 구하여야 한다. 일반적으로 TSD의 최적 감쇠비는 5%이상 10%이하의 값을 가지며, 예상가진에 대하여 감쇠비가 부족한 경우에는 감쇠네트를 설치해야 한다.

TSD를 설계할 때 중요하게 고려할 사항은 동조작업이다. 일반적으로 TSD의 설계와 시공이 끝나 물탱크의 폭이 고정된 경우, 주 구조물의 시공이 완료될 시점에 건물의 1차 주기를 측정하여 물탱크의 주기를 건물의 1차주기에 맞게 재 동조하는 작업이 필요하다. 이 때 설계 당시 계산된 구조물의 1차주기와 실제 측정된 건물의 1차주기가 일치할 경우에는 설계된 TSD와 동일한 물의 양을 채우게 되지만, 현실에 있어서는 일치하지 않는 경우가 대부분이고 이 경우 물높이를 조절하여 재동조를 해야 한다. 더구나 구조설계에서는 콘크리트의 균열강성을 고려하여 보수적으로 설계하는 경우가 많기 때문에 실제 측정된 구조물의 1차주기가 계산된 주기에 비해 짧아지는 경우가 일반적이다. 이 경우, 물탱크의 폭(L=2a)가 고정되어 있기 때문에 물의 깊이(h)만 조절하여 식 (19)에 의해 TSD의 주기를 조절하여야 하는데 측정된 고유주기가 짧아질 경우 더 큰 물깊이가 필요하게 된다.

그림 7에는 물탱크의 폭이 정해진 경우 건물의 주기에 따른 물높이 변화의 예를 보여준다. 계산된 건물의 고유주기는 약 6.2초인 경우에 해당하며, 동일한 주기를 갖는 7.5m와 10m 폭 두 가지의 TSD에 대하여 살펴보았다. 그림에서 볼 수 있듯이 만일 측정된 고유주기가 예상된 고유주기에 비해 길어질 경우 필요한 물높이가 줄어들어야 하고, 반대로 짧아질 경우 필요한 물높이가 커져야 함을 알 수 있다. 물높이가 줄어들어야 하는 경우에는 물높이 변화가 그리 크지 않아 문제가 되지 않지만, 물높이가 커져야 하는 경우 그 변화율이 무척 크기 때문에 충분한 주의를 기울여야 함을 알 수 있다. 특히 구조물의 주기가 4초 이하로 측정되는 경우 필요한 물높이가 초기 설계된 물높이에 비해 아주 커짐을 알 수 있다. 따라서 충분한 물탱크의 높이가 확보되지 않을 경우 TSD의 동조에 어려움이 생길 수 있기 때문에 TSD의 설계에 있어 동조의 문제에 주의하여야 한다.

국내에 TSD가 설치된 사례로는 부산 해운대의 하이페리온(2006)이 있다. 해운대 하이페리온은 건물층수 42층, 높이 140m의 철근콘크리트 구조의 주상복합건물로서 아파트 타워와 오피스 타워의 2개 동으로 이루어져 있다. 오피스 타워에는 남북방향 진동을 저감시키기 위하여 100톤 용량의 TSD가 2개 설치되어있고, 아파트 타워에는 남북방향 진동저감용 TSD 1개와 동서방향 진동저감용 TSD 2개로 모두 3개가 설치되었으며 액체의 총 질량은 150톤이다(김상대 등, 2007).

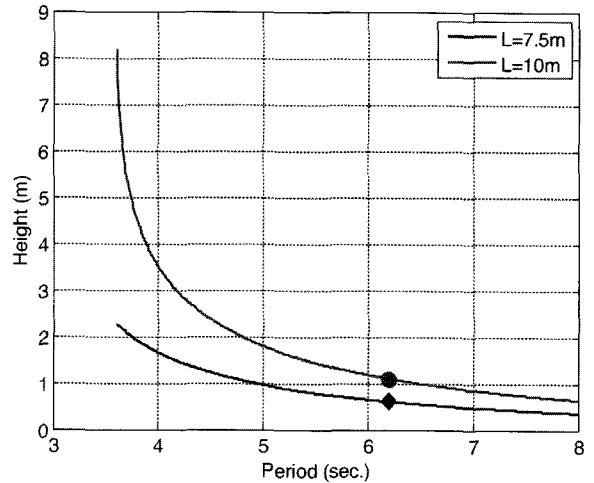
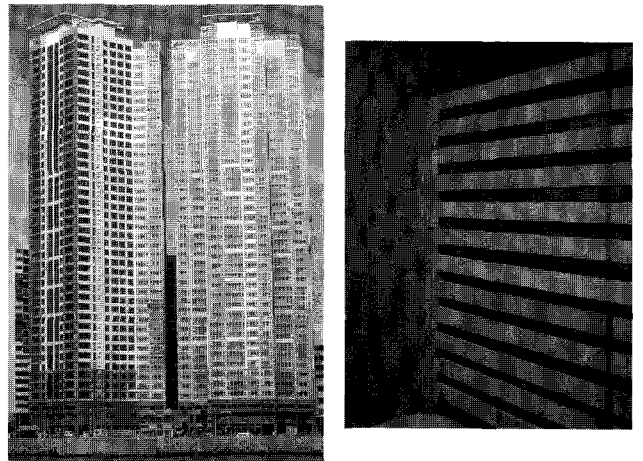


그림 7 물탱크 폭이 고정되어 있을 경우 고유주기 변화에 따른 TSD 물높이 변화



(a) TSD가 설치된 빌딩의 전경 (b) TSD내부에 설치된 감쇠네트 (높이 = 2.35m)

그림 8. TSD가 설치된 부산 우동 하이페리온 (2006)

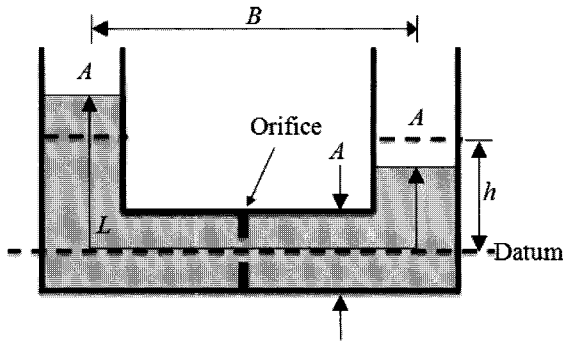
3.2 TLCD(Tuned Liquid Column Damper)

TLCD는 TLD내의 액체의 운동에너지를 극대화하기 위해 고안된 특별한 형태이다. U자 형태로 이루어져 있으며 관내 액체의 흐름과 관내 구멍(orifice)으로 인한 유체의 압력을 이용하여 구조물에 작용하는 에너지를 소산시키는 장치로써 Sakai 등(1989)이 제안하였다.

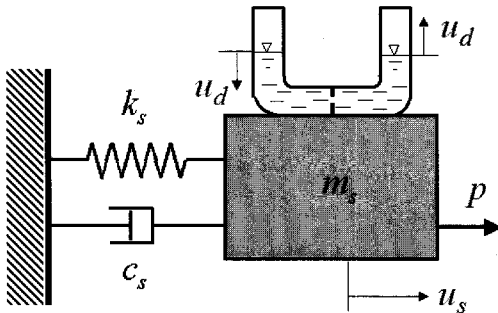
TLCD의 U자형 관과 주구조물 사이에는 스프링과 대쉬팟(dashpot)이 없으므로 수직 관내의 액체는 구조물과 함께 움직이고 수평 관내의 액체는 추가적인 움직임이 발생하여 다음 동적 평형이 성립한다.

$$m_{dh}(\ddot{u}_s + \ddot{u}_d) + m_{dv}\ddot{u}_s + m_s\ddot{u}_s + c_s\dot{u}_s + k_s u_s = p \quad (20)$$

여기서 m_{dh} 는 U자형 관의 수평부의 액체질량이고 m_{dv} 는 수



(a) U자 형태의 물기둥



(b) TLCD 단자유도 시스템

그림 9 TLCD 시스템

적부의 액체질량이다. 식 (20)을 정리하면 다음과 같다.

$$(m_s + m_d)\ddot{u}_s + m_{dh}\ddot{u}_d + c_s\dot{u}_s + k_s u_s = p \quad (21)$$

여기서 $m_d (= m_{dh} + m_{dw})$ 는 수직부와 수평부의 액체질량을 합한 전체 액체질량이다.

관 내부의 수압 사이의 평형은 다음과 같다.

$$\rho A B \ddot{u}_s + \rho A L \ddot{u}_d + \frac{\rho A}{2} \zeta |\dot{u}_d| \dot{u}_d + 2 \rho A g u_d = 0 \quad (22)$$

여기서 ρ 는 액체의 밀도, A 는 액체기둥의 단면적, B 는 수평부분의 길이, L 은 액체기둥의 전체길이를 다음과 같이 구한다.

$$L = B + 2h \quad (23)$$

여기서 h 는 물기둥의 높이이다. 식 (22)에서 ζ 는 수두손실계수(headloss coefficient)이고 orifice의 크기에 따라 변화한다.

식 (21)과 (22)로부터 구조물과 TLCD가 연계된 운동방정식은 TSD운동방정식 식 (12)와 (13)을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$G_1 = \rho A L = m_d \quad (24)$$

$$G_2 = m_d \quad (25)$$

$$G_3 = m_d \frac{B}{L} \quad (26)$$

$$c_d = \frac{\rho A}{2} \zeta |\dot{u}_d| \quad (27)$$

$$k_d = 2 \rho A g \quad (28)$$

식 (27)에서 TLCD 감쇠계수는 TMD와 TSD에 다르게 속도의 절대값이 포함되므로 비선형성을 나타냄을 알 수 있다.

식 (22)로부터 TLCD의 고유진동수는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\omega_d = \sqrt{\frac{2g}{L}} \quad (29)$$

식 (29)로부터 TLCD의 1차 진동수를 구조물의 1차 모드 고유진동수에 맞추는 것은 물기둥의 높이를 증가시켜 물의 중심길이 L 을 증가시킴으로써 해결이 가능한 것을 알 수 있다. 하지만 TSD의 경우에서와 마찬가지로 일반적인 경우에 구조물은 해석상의 진동수보다 실제 진동수가 매우 크기 때문에 증가하는 경우가 있으므로 그에 대한 주의를 기울여야 한다.

그림 10과 같이 수평부 면적과 수직부 면적이 다른 TLCD를 LCVA(Liquid Column Vibration Damper)라고 한다. LCVA는 TLCD의 특수한 형태로 물기둥의 수직부와 수평부의 크기를 달리함으로써 주기조절을 보다 자유롭게 할 수 있다는 장점이 있어 실제 TLCD의 적용은 LCVA의 형태가 대부분이다.

LCVA와 같이 수직부와 수평부의 면적이 다른 형태도 고유진동수의 산정은 식 (29)의 TLCD 고유진동수 산정식과 동일한 형식을 사용하나 액체의 유효길이 산정에서 약간의 차이를 보인다.

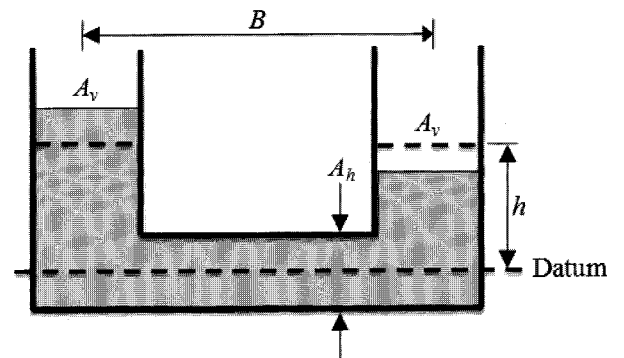


그림 10 LCVA 시스템

$$\omega_d = \sqrt{\frac{2g}{L_e}} \quad (30)$$

$$L_e = (A_v/A_h)B + 2h \quad (31)$$

여기서 A_v 는 액체기둥 수직부의 단면적, A_h 는 수평부의 단면적이다.

국내에 TLCD가 설치된 사례는 인천 송도 the # 1st World (2008)이 있다. The # 1st World는 52,000m²의 연면적에 237m 높이의 주거용 건물 4개 동과 주변에 중저층 건물이 위치하여 있다(그림 11).

네 개의 고층타워는 동일하게 설계되었으며 64층의 주거층과 지하실 3개층, 그리고 옥탑부에 3개 층의 기계실이 위치하고 있다. 이 건물은 2008년 말에 완공될 예정이며 완공될 경우 국내에서 최초로 TLCD가 설치되는 건물이 될 것이다.

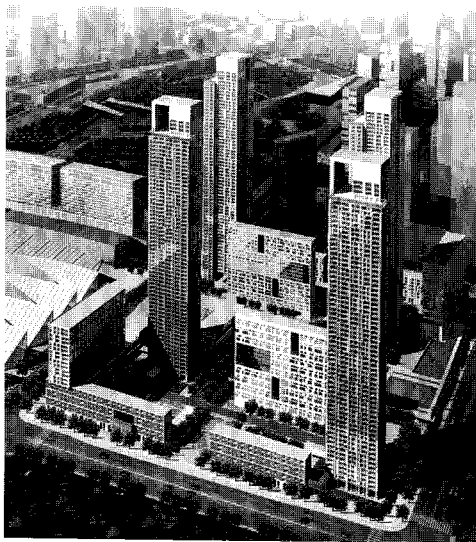
고층타워는 무량관 구조로 설계되었으며 중력에 의한 하중은 1200mm에서 600mm까지의 두께를 가지는 콘크리트 코어와 최

대 6.8m의 스패를 갖는 외부 기둥에 의해 견디도록 설계되었다. 지진 및 풍하중에 의한 횡하중은 콘크리트 코어와 33층과 60층에 설치되는 아웃리거에 의해 저항되어진다. 모드해석을 통해 구해진 고유진동수는 강축방향(x-방향)으로 0.181, 0.678, 1.675 Hz이고 약축방향(y-방향)으로 0.164, 0.587, 1.368Hz이다.

풍동실험을 위한 기초풍속 데이터는 김포국제공항과 인천기상청의 1950년부터 1997년 사이의 기록을 사용하였고, 풍동실험 결과 예측된 최대 가속도가 설계기준으로 정한 AIJ-2004의 H-50기준을 초과하여 H-70에서 H-90사이의 풍진동이 발생할 것으로 예측되었다(그림 12).

설계기준으로 정한 H-50의 기준을 충족하기 위하여 두 개의 TLCD를 직각으로 최상 주거층의 2개 층 상부인 66층에 설치하기로 하였다(그림 13). 설계 초기 단계부터 추가적인 감쇠장치를 이용하여 풍진동을 저감하기로 하였기 때문에 TLCD 설치를 위한 공간은 초기부터 적절하게 계획되었다. 그림 13에 보이듯이 the # 1st World에 계획된 TLCD는 수평부와 수직부의 단면적이 상이한 LCVA이다.

Y-방향 LCVA는 7.2m의 폭, 20.2m의 길이, 7.3m의 높이로 설계되었으며 x-방향 LCVA는 그보다 작게 설계되었다. 그림 13(a)에 나타난 것처럼 각각의 LCVA에는 감쇠비 조절을 위하여 수직부와 수평부가 만나는 부위에 두개의 조절이 가능한 루버가 설치되었다. 물기둥의 수직부위는 2m에서 4m의 폭을

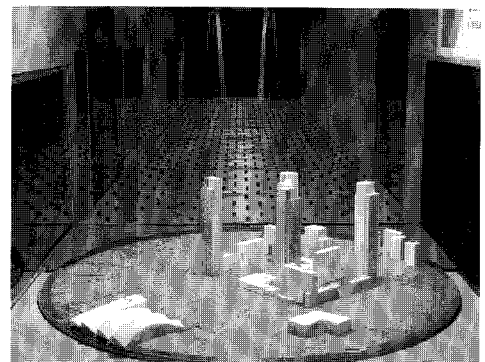


(a) 조감도

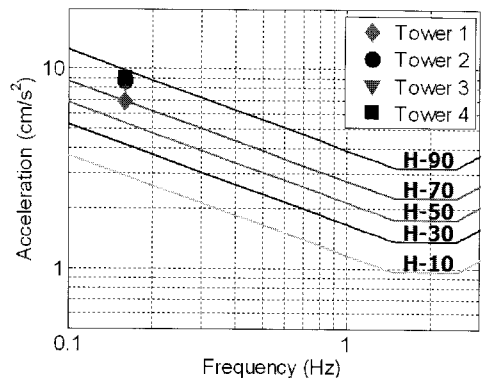


(b) 시공 중 사진

그림 11 인천 송도 The # 1st World

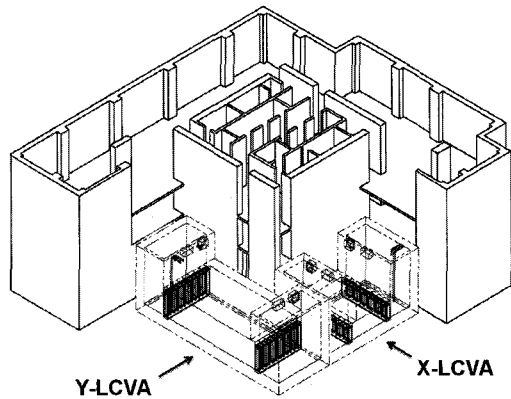


(a) 풍동실험 전경

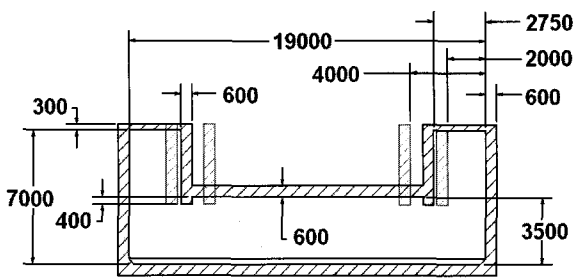


(b) 예측 최대 가속도

그림 12 풍동실험 및 결과



(a) LCVA 설치층



(b) Y- LCVA 단면도(mm)

그림 13 66층에 설치되는 두 개의 LCVA

가질 수 있도록 가변적으로 설계되었는데, 이는 앞에서 언급하였던 것처럼 LCVA의 동조에 있어 좀더 가변성을 가질 수 있도록 하기 위함이다. 가변적인 수직부의 폭을 갖도록 설계됨으로써 y-방향 LCVA의 진동수는 0.164 Hz로 예측된 구조물의 고유진동수가 0.134 Hz에서 0.180 Hz의 범위에서 변화하는 경우에도 동조가 가능하게 된다. LCVA내의 물의 양도 가변적이어서 y-방향 LCVA의 경우 418톤에서 437톤의 총질량을 가지며 x-방향 LCVA의 경우 184톤에서 225톤의 총질량을 갖는다.

LCVA 기둥 수직부의 폭을 최종적으로 결정하기 위하여 전체 골조공정이 90% 가량 진행된 후에 구조물의 동적거동에 대한 계측을 실시하였다. 계측은 4개의 가속도계를 이용하여 상시진동을 측정하였으며 측정결과 Tower 3 건물의 경우 1차모드 진동수는 0.2197 Hz로 나타났다. 90% 완성된 골조를 바탕으로 한 모드해석 결과로부터 예측된 1차모드 진동수는 0.2119 Hz로 예측값에 비해 약 4%의 오차가 발생하였다. 이 결과를 바탕으로 0.164 Hz로 예측된 최종 완성 구조물의 1차 진동수는 0.171 Hz로 수정되었고, 최종적으로 LCVA의 수직부의 폭은 2.31m로 결정되었다.

건물의 최종 완공에 앞서 보다 정밀한 동조를 위하여 또 한번의 계측이 실시될 예정이다. 최종계측을 위하여 압축펌프를 이용하여 LCVA내의 물이 움직이도록 하게 된다. 이 경우 물의 움직임은 구조물의 움직임을 유발하여 구조물과 LCVA의 동적거동의 측정이 가능하다. 이 계측 결과를 바탕으로 하여 물기둥의 최종 높이와 루버의 열림각이 결정될 예정이다.

4. 맺음말

이상에서 부가질량형 감쇠장치를 이용한 초고층 건축물의 풍진동 저감에 대해서 살펴보았으며 상대적으로 최근에 국내에 소개가 된 TLD에 대하여 보다 자세히 살펴보았다. 국내의 경우 TMD나 TLD가 비교적 최근에 도입이 되어 구조실무자들에게 생소한 부분이 많기 때문에 아직은 초기설계 단계에서부터 적극적으로 설치를 고려한다기 보다는 과도한 풍진동 문제가 발생하였을 경우에만 설치를 검토하는 소극적인 방식이 주를 이루고 있었다. 하지만 점차 TMD와 TLD의 사용이 증가하면서 각각의 특징과 장점이 알려지고 있어 보다 많은 구조실무자들이 부가질량형 감쇠장치를 이용한 적극적인 풍진동 대책을 검토하는 것이 증가할 것으로 예상된다.

참고 문헌

1. 김상대, 박용현, 김재건 (2007), "초고층 주거건물의 진동제어를 위한 동조액체감쇠기(TLD)", 대한건축학회지, Vol. 51, No. 9, pp.84~88.
2. 주영규 (2002), "벽면 요철을 고려한 동조액체 댐퍼의 고유진동수 및 감쇠계수의 실험적 평가", 대한건축학회논문집, 18권 2호, pp.35~43.
3. Den Hartog, J. P. (1956), Mechanical Vibrations, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
4. Fortner, B. (2001), "Water tanks damp motion in Vancouver high rise", Civil Engineering, June, p.18.
5. Graham, E. W. and Rodriguez, A. M. (1952), "The characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics", Journal of Applied Mechanics, Vol. 19, No. 3, pp. 381-388.
6. Sakai, F., Takaeda S., and Tamaki T. (1989), "Tuned Liquid Column Damper New Type Device for Suppression of Building Vibrations", Proc. Int Conf. on High Rise Building, Nanjing, China, pp.25~27.
7. Soong, T. T. and Dargush, G. F. (1997), Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, New York, John Wiley & Sons.
8. Tait, M. J. El Damatty, A. A., and Isyumov, N. (2004), "Testing of tuned liquid damper with screens and development of equivalent TMD model", Wind and Structures, Vol. 7, No. 4, pp.215~234.
9. Wright, G. (2002), "Steadying Influence - Damper systems save millions in cost, while reducing lateral movement in tall buildings", Building Design & Construction, Nov.

[담당 : 유은중, 편집위원 ; 노혁천, 편집부위원장]