

TMD의 위치변화에 따른 건물의 응답효과 (Location Effect of Tuned Mass Dampers on the Response of Buildings)

민 경 원* 홍 성 목** 황 재 승***
Min, Kyung-Won Hong, Sung-Mok Hwang, Jae-Seung

ABSTRACT

Conventional tuned mass dampers are located on the top floor of tall buildings, which reduce the fundamental mode response of buildings. Higher modes may have a greater contribution toward the acceleration response of tall buildings. To reduce this, additional tuned mass dampers are required and could be substituted as building equipments. This paper shows, with a numerical example, how the locate tuned mass damper in order to reduce the higher mode response effectively

1. 서 론

동조질량감쇠장치(tuned mass dampers 또는 TMD, 이하 TMD라 함)가 설치된 건물의 동적 특성을 파악하기 위해서는 그림 1과 같이 2자유도계로 이루어진 모델을 채택하는 것이 일반적이다. 이유는 TMD의 모드(mode)와 건물의 기본모드만이 상호작용을 일으켜 응답에 주된 영향을 미친다는 가정이 전제되었기 때문이다. 따라서 2자유도 모델에 관한 연구[1,2]가 진행되어 진동특성에 관한 기본적인 이해를 할 수 있었다. 그러나 건물이 고층화 되면 가속도의 영향이 커지게 되며 이때는 건물의 기본모드 뿐만 아니라 고차 모드의 영향도 커지기 때문에 TMD의 모드와 건물의 여러모드와의 상호 작용을 고려한 진동해석이 필요하며 이에 관한 논문[3,4]이 발표되었다. 위 논문에서는 2차모드 등 고차모드가 가속도 응답에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있었으며 TMD와 동조된 건물의 모드만이 주된 상호작용을 하여 다른 모드와의 상관성은 무시하여도 좋다는 것이 확인되었다.

일반적으로 TMD는 건물의 상층에 설치되는데 이것은 건물의 응답이 상층에서 가장 크기 때문이다. 그러나 건물 상층의 TMD는 횡방향의 응답을 제어하기 위한 것으로 연직방향으로는 하중만 부담케 하는 전혀 필요가 없는 것이다. 따라서 적은 질량의 TMD로 제어 효과를 낼 수 있는 것과 TMD의 설치로 인한 층고의 증가 억제가 TMD설계의 주된 관심사항이 되고 있다. 최근 TMD형식으로는 여러개의 진자로 이루어 층고를 줄인 것이 있으며[5] 물탱크 및 빙축열장치 등 설비 시스템을 이용하여 질량의 부가적인 증가를 억제하는 것도 개발되었다.[6]

건물이 고층화가 되면 여러 모드가 가속도 응답에 영향을 미칠 뿐만 아니라 설비계획적인 면에서 건물 중간에 설비 장치를 설치하는 것이 고려가 된다. 그러므로 이러한 설비장치를 TMD로 이용할 경우 건물의 고차모드에 동조시켜 해당되는 응답을 제어하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 TMD를 특정한 건물의 모드에 동조시킬 때 가장 효과적인 위치를 제시하여 설계에 반영하는데 있다.

* 삼성 종합 건설 기술연구소 선임 연구원
** 서울대학교 건축학과 교수
*** 서울대학교 건축학과 석사과정

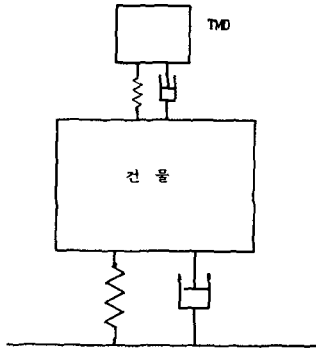


그림 1. TMD가 설치된 건물의 2자유도계 모델

2. 운동방정식의 유도

구조 해석 모델로는 그림2와 같이 건물 임의의 층에 TMD가 설치된 전단건물(shear building)을 대상으로 하였으며 각층의 질량은 집중되었다고 가정을 하였다. 또한 변형은 비틀림없이 수평방향으로만 일어나고 기둥은 선형 스프링으로 대체되었다. 그리고 풍하중은 각층에 가해지는 것으로 가정하였으며 Davenport가 제시한 스펙트럼을 이용하였다.[4]

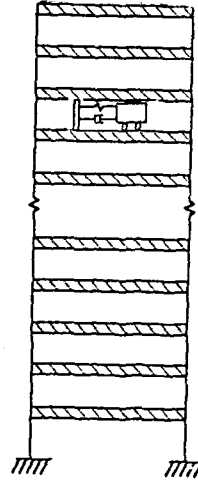


그림 2. TMD가 설치된 건물

운동방정식의 유도과정은 논문[4]에 있는 과정과 유사하므로 여기서는 대표적인 과정만을 서술하기로 한다. TMD가 없는 건물 자체는 모드형상 $\phi_i(x)$, 고유진동수 ω_i 및 각층의 질량 m 으로 표현되며 모드형상은 질량 매트릭스에 대하여 표준화시켰다. 또한 건물 k 층과의 지지점을 고정시킨 TMD는 단자유도 시스템으로써 질량 M_k , 강성 K_k , 감쇠비 ξ_k 및 고유진동수 ω_k 로 표현된다. 여기서 건물과 TMD의 고유진동수는 각각 복소 고유진동수으로써 감쇠현상을 고려하며 고전적 감쇠의 성질을 가지고 있다고 가정을 한다.

조화응답의 변위계는 건물의 경우

$$W(x,t) = \sum_i a_i \phi_i(x) \exp(-i\omega t) \quad (1)$$

$$u_k(t) = \left[\frac{b_k}{\sqrt{m_k}} + c_k \right] \exp(-i\omega t) \quad (2)$$

로 표현된다. 위식에서 a_i 와 b_k 는 모드좌표이며 c_k 는 TMD의 지지점의 수평변위를 의미한다. 다음에 설명될 부분에서는 모든 식에 나타나는 $\exp(-i\omega t)$ 를 편의상 생략하기로 한다.

운동 방정식을 유도하기 위하여 첫째, 라그랑지 방정식을 이용, 운동에너지 K 와 위치에너지 U 를 구하고 둘째, 지지점의 수평변위에 대한 라그랑지 멀티플라이어 적용을 하고, 셋째, 위의 결과를 이용하여 모빌리티, 임피던스 및 모드외력으로 표현된 다음과 같은 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$[I + N(\omega) \text{diag}(Z_1(\omega), \dots, Z_n(\omega))] f = Q(\omega) \quad (3)$$

I는 단위 행렬을 $\text{diag}()$ 는 대각선 행렬을 의미하며 $N(\omega)$ $Z_k(\omega)$ 및 $Q(\omega)$ 는 각각 모빌리티, 임피던스 및 모드외력을 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$N(\omega) = \sum_i \frac{-i\omega}{\omega_i^2 - \omega^2} \Phi_{is} \Phi_{is}^T \quad (4)$$

$$Z_k(\omega) = \frac{-i\omega m_k \omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \quad (5)$$

$$Q(\omega) = \sum_i \frac{\sum_j \Phi_{ij} q_j}{\omega_i^2 - \omega^2} \Phi_{is} \quad (6)$$

여기서 Φ_{is}^T 는 TMD가 설치된 층에서의 i번째 모드 성분을 나타내며 Φ_{ij} 는 j층에서의 i번째 모드성분을 의미한다. 또한 q_j 는 j층에 가해지는 풍하중의 크기를 나타낸다.

3. 풍하중 스펙트럼과 가속도 응답

논문[4]에서 적용한 Davenport의 스펙트럼 밀도함수 $\phi_{q_i q_i}$ 을 이용하여 건물 상층의 변위와 가속도 응답을 파악하였다.

$$\phi_{q_i q_i} = \frac{8V_j V_k K_o U_r^2}{U_j U_k |\omega|} \left[\frac{\left[\frac{600\omega}{\pi U_r} \right]^2}{\left[1 + \left[\frac{600\omega}{\pi U_r} \right]^2 \right]^{4/3}} \right] \exp \left[- \frac{c_1 |\omega| |j-k| h}{2\pi U_r} \right] \quad (7)$$

$$V_j = \frac{1}{2} \rho A_j C_d U_j^2 \quad (8)$$

$$U_j = U_g \left[\frac{Z_j}{Z_g} \right]^\alpha \quad (9)$$

윗식에서 j와 k는 각각 건물의 j층과 k층을 나타내며 K_o =地盤抵抗係數, U_r =地上 10m에서의 기준 평균풍속, U_j =j층에서의 평균풍속, C_d =상수, h =층고, ρ =공기밀도, A_j =受壓面積, C_d =抵抗係數, U_g =傾度풍속, Z_g =傾度高, α =상수, Z_j =j층의 높이이다.

운동방정식 (3)에서 다음과 같이 건물 상층의 변위를 나타내는 식을 얻을 수 있으며

$$f = [I + N(\omega) \text{diag}(Z_1(\omega), \dots, Z_n(\omega))]^{-1} Q(\omega) \quad (10)$$

윗식을 각층에 가해지는 풍력이 표현되도록 변형을 하면 다음과 같다.

$$f = \sum_j T_j A_j \quad (11)$$

윗식에서 T_j 는 다음과 같으며 j는 건물의 j번째 층을 의미한다.

$$T_j = [I + N(\omega) \text{diag}(Z_1(\omega), \dots, Z_n(\omega))]^{-1} \sum_i \frac{\Phi_{is} \Phi_{ij}}{\omega_i^2 - \omega^2} \quad (12)$$

윗식들은 $\exp(-i\omega t)$ 를 제외한 식이므로 진동수영역에 속한것이다. 따라서 건물 상층의 변위 스펙트럼 밀도함수는 다음과 같이 표현되며

$$\Phi_{ff} = \sum_j \sum_k T_j T_k^* \Phi_{qR}, \quad (13)$$

가속도스펙트럼 밀도함수는 변위스펙트럼 밀도함수에 ω^4 을 곱하여 다음과 같이 간단히 유도할 수가 있다.

$$\Phi_{f''f''} = \omega^4 \Phi_{ff} \quad (14)$$

윗식에서 *는 공액 복소수(conjugate)를 의미하며 f'' 는 건물상층의 가속도를 뜻한다.

4. 적용예 및 해석

30층 건물을 예제 해석 모델로 하였으며 건물과 풍하중 스펙트럼에 관계된 데이터는 Yang[3]이 적용한 것을 기초로 하여 다음과 같이 정하였다: 층수 $N=30$; 층고 $h=4m$; 각층의 질량 $m=1290ton$; 각층의 강성 $Ke=10^6KN/m$; 각층의 受壓면적 $Ai=192m^2$; 傾度高 $Zg=300m$; 地上 10m에서의 기준평균풍속 $Ur=11.46m$; 抗力係數 $Cd=1.2$; 공기밀도 $\rho=1.23kg/m^3$; 地表抗力係數 $Ko=0.03$; 상수 $\alpha=0.4$; $c_1=7.7$

또한 건물의 임의층에 설치되는 TMD는 질량 98t, 강성 199 KN/m 와 질량 49t, 강성 925KN/m 인 두 종류로 하였다. TMD의 고유진동수는 1.424 rad/sec 와 4.330 rad/sec 로써 건물의 건물의 기본모드와 2차 모드와 일치하며 건물과 TMD의 감쇠비는 0.001로 하였다.

그림 3은 질량 98t, 강성 199 KN/m 인 TMD의 위치를 변화시켰을 때의 건물최상층의 가속도를 나타낸 것으로 기본모드에 동조시켰기 때문에 기본모드의 성분이 가장 큰 최상층에 TMD를 설치하였을 때 가속도가 제일 감소가 되며 성분이 작은 하층으로 내려올수록 TMD의 효과가 적어진다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 4는 질량 49t, 강성 910 KN/m 인 TMD, 즉 건물의 2차모드에 동조된 TMD의 층별 위치에 따른 최상층의 가속도를 나타낸 것으로 건물의 2차모드 성분이 큰 중간층 부분에서 가속도가 많이 감소가 되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

건물의 특정한 모드에 동조된 TMD의 층별 위치에 따른 건물상층의 가속도를 구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 동조된 모드의 성분이 가장 큰 층에 TMD를 설치하였을 때 TMD의 효과가 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 따라서 건물의 기본모드에 동조시킨 TMD는 최상층에 설치하는 것이 효과적이다. 고층건물의 가속도 응답은 건물의 2차 모드 등 고차모드의 영향이 크므로 이러한 모드에 의한 응답을 최대한 감소시키기 위해선 모드성분이 가장 큰 층에 TMD를 설치하는 것이 바람직하다.

둘째, 건물의 모드성분이 제로인 위치(node)가 되는 층에 TMD를 설치하였을 때는 TMD의 효과가 없다는 것을 유추할 수 있다.

6.참고 문헌

- [1] Crandall, S., and Mark, W., Random Vibration, Academic Press, New York, N.Y., 1963
- [2] McMamara, R., "Tuned Mass Dampers for Buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.103, No.ST9., pp.1785-1798, Sept. 1977.

[3] 민 경원, "수동동조질량감쇠장치를 이용한 고층건물의진동특성", 대한 건축학회 논문집, 제 8권 제 4호, pp.89-96

[4] 민 경원, 홍 성목, "복수의 TMD를 이용한 고층건물의 진동조절", 한국전산구조 공학회 1992년도 봄학술발표회 논문집, pp. 26-29

[5] "Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-nuclear Structures", Special Issue for the Exhibition of the 11th international Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT 11), August 18-23,1991, Tokyo, Japan, pp.93-96

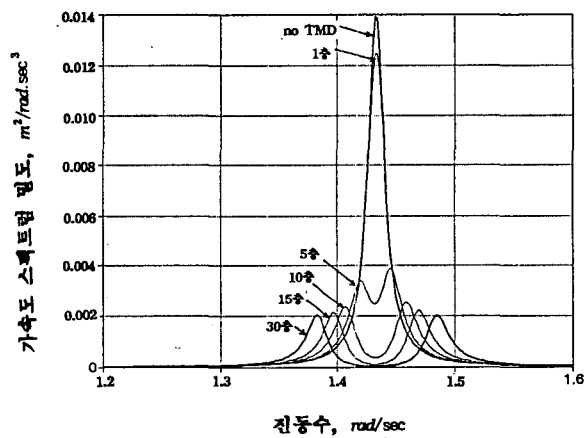


그림3. TMD의 위치변화에 따른 가속도 스펙트럼 밀도

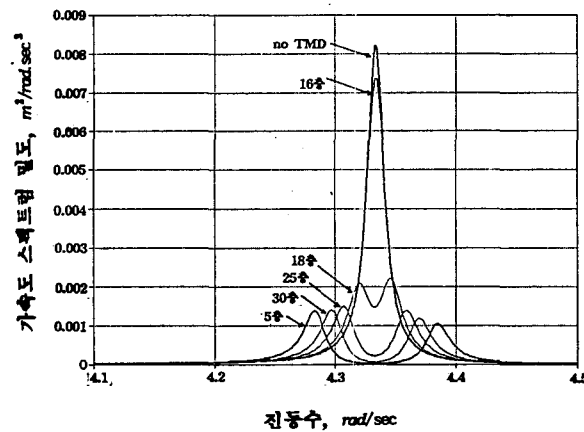


그림4. TMD의 위치변화에 따른 가속도 스펙트럼 밀도