

복수의 TMD를 이용한 고층건물의 진동조절

(Vibration Control of Tall Buildings using Multiple Tuned Mass Dampers)

* 민 경원* 홍 성목**

Abstract

Modern tall buildings are subject to wind induced oscillations. Those oscillations can cause discomfort to the occupants. To control these motions, tuned mass dampers have been used. In this paper, component mode synthesis, based on Lagrange multipliers formulation, is applied to the along-wind motion of tall buildings with multiple tuned mass dampers. Spectral densities of accelerations of top floor are compared by changing the numbers and locations of tuned mass dampers. It is found that multiple tuned mass dampers can be more effective than single tuned mass damper in reducing the acceleration response.

1. 서론

동조질량감쇠장치(Tuned Mass Dampers)는 건물에 설치되어 풍하중이나 지진하중같은 외력에 의한 건물의 응답을 감소시키기 위한 목적으로 이용이 된다. 이러한 장치의 기본원리는 동조질량감쇠장치의 고유진동수를 건물의 고유진동수에 同調(tuning)시킴으로써 동조질량감쇠장치가 진동흡수기의 역할을 하여 건물의 응답을 억제하는 것이다.

지난 연구[1]는 건물의 상층에 한개의 동조질량감쇠장치를 설치하여 상층의 변위응답특성만을 파악한 것으로서 건물의 기본 고유진동수에서 가장 큰 변위응답이 나타났으며 동조질량감쇠장치에 의해 응답이 감소되는 것이 확인되었다. 그러나 건물이 고층화되고 세장화가 되면 건물의 유연성은 증가하여 기본모드뿐만 아니라 고차모드도 응답에 영향을 미치게 된다. 특히 가속도 응답의 경우에는 변위응답과는 달리 고차모드의 영향이 뚜렷해지는 경향이 있다.[2]

본 연구에서는 라그랑지 멀티플라이어(Lagrange multiplier)방법을 기초로 하고 부분모드합성법(component mode synthesis)을 적용하여 단일 동조질량감쇠장치가 설치된 건물의 응답특성을 파악한 연구[1]를 일반화하여 여러개의 동조질량감쇠장치가 건물의 여러곳에 설치된 건물의 운동방정식을 유도하고 가속도응답특성을 파악하기로 한다.

2. 운동방정식의 유도

구조해석 모델로는 그림 1과 같이 건물 임의의 층에 n 개의 동조질량감쇠장치가 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.[3]

운동방정식의 유도과정은 논문[1]에 있는 과정과 유사하므로 여기서는 대표적인 과정만을 서술하기로 한다. 동조질량감쇠장치가 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 k 번째의 동조질량감쇠장치는 단자유도 시스템으로써 질량 m_k , 강성 k_k , 감쇠비 ξ_k 및 고유진동수 ω_k 로 표현된다. 여기서 건물과 동조질량감쇠장치의 고유진동수는 각각 복소 고유진동수으로써 감쇠 현상을 고려하며 고전적 감쇠의 성질을 가지고 있다고 가정을 한다.

조화 응답의 변위계는 건물의 경우

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

k 번째 동조질량감쇠장치의 경우

* 정희원 삼성종합건설 기술연구소 공학박사

** 서울대학교 건축학과 교수

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

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

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

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

I 는 단위행렬을 $\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 동조질량감쇠장치가 설치된 층에서의 i 번째 모드성분을 나타내며 Φ_{ij} 는 j 층에서의 i 번째 모드성분을 의미한다. 또한 q_j 는 j 층에 가해지는 풍하중의 크기를 나타낸다.

3. 풍하중 스펙트럼과 가속도 응답

논문[3]에서 적용한 Davenport의 스펙트럼 밀도함수 $\Phi_{q_j q_k}$ 을 이용하여 건물 상층의 변위와 가속도 응답을 파악하였다.

$$\Phi_{q_j q_k} = \frac{8V_j V_k K_0 U_r^2}{U_j U_k |\omega|} \left[\frac{\left(\frac{600}{\pi U_r} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{600\omega}{\pi U_r} \right)^2 \right]^{4/3}} \right] \exp \left[-\frac{c_1 |\omega| |j-k|h}{2\pi U_r} \right] \quad (7)$$

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

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

윗식에서 j 와 k 는 각각 건물의 j 층과 k 층을 나타내며 K_0 =地表抗力係數, U_r =地上10m에서의 기준 평균풍속, U_j = i 층에서의 평균풍속, C_d =상수, h =층고, ρ =공기밀도, A_j =受壓面積, C_d =抗力係數, U_g =傾度풍속, Z_g =傾度高, α =상수, Z_j = j 층의 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.

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

윗식에서 T_j 는 다음과 같으며 j 는 건물의 j 번째 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 속한 것이다. 따라서 건물 상층의 변위스펙트럼 밀도함수는 다음과 같이 표현되며

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

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

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

윗식에서 *는 공액복소수(conjugate)를 의미하며 \ddot{f} 는 건물상층의 가속도를 뜻한다.

4. 적용에 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 $K_0 = 10^6 KN/m$; 각층의 受壓面積 $A_i = 192m^2$; 傾

度高 $Z_g = 300m$; 地上10m에서의 기준평균풍속 $u_r = 11.46m$; 抗力係數 $C_d = 1.2$; 공기밀도 $\rho = 1.23kg/m^3$; 地表抗力係數 $K_0 = 0.03$; 상수 $\alpha = 0.4$, $c_1 = 7.7$. 또한 건물의 일부층에 설치되는 동조질량감쇠장치의 질량은 32ton, 49ton과 98ton의 3종류로 하였으며 강성은 동조시키는 건물의 고유주기에 따라 변화시켰다. 그리고 감쇠비 ξ 는 0.01로 일정하게 하였다.

건물의 감쇠비로 Rayreigh damping을 이용하였으나 1차와 2차 모드의 감쇠비를 각각 $\xi_1 = 0.01$ $\xi_2 = 0.007$ 로 가정하여 고차모드일수록 감쇠비가 증가하여 고차모드의 영향이 무시되는 단점을 보완하였다.[4] 그리고 건물의 1, 2, 3차 고유진동수가 각각 1.434rad/sec, 4.297rad/sec, 7.150rad/sec이므로 동조질량감쇠장치의 질량에 따라 강성 k_d 를 변화시켜 66KN/m, 100KN/m, 594KN/m, 910KN/m, 1645KN/m를 이용하였다.

그림 2는 동조질량감쇠장치를 설치하지 않은 건물 30층의 가속도 스펙트럼을 의미하는 것으로 진동수영역은 건물의 4차모드까지를 포함하는 것으로 하였다. 그림 3과 4는 각각 30층에 한개의 동조질량감쇠장치 ($m_d=98ton, 199KN/m$ 로써 1차모드에 동조시킴)를 설치하였을 때와 15층과 30층에 동조질량감쇠장치(15층에는 $m_d=49ton, k_d=910KN/m$ 로써 2차모드에, 30층에는 $m_d=49ton, k_d=100KN/m$ 로써 1차모드에 동조시킴)를 설치하였을 때의 가속도 스펙트럼을 나타낸다. 그리고 그림 5는 30층에 3개의 동조질량감쇠장치($m_d=32ton$ 이며 k_d 를 각각 66KN/m, 594KN/m, 1645KN/m로 하여 1, 2, 3차모드에 동조시킴)를 설치하였을 때의 가속도 스펙트럼이다.

5. 분석

위의 예제해석에서 각각 한개, 두개, 세개의 동조질량감쇠장치가 설치된 건물의 가속도 응답을 다루었는데 각각의 경우 동조질량감쇠장치의 총질량은 98ton으로 동일하게 하여 응답을 비교하였다. 그림 2과 3에서 응답의 피크는 건물의 고유모드에서 생기는데 동조질량감쇠장치를 설치함으로써 최대값이 약 65% 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 3에서 2차모드에서의 피크가 감소된 1차모드에서의 피크보다 크며 3차, 4차모드의 영향도 무시할 수 없음을 볼 수 있다.

또한 그림 4에서는 동조질량감쇠장치의 질량을 1/2로 감소시키고 각각 15층과 30층에 설치하여 1차모드와 2차모드에 따른 피크가 감소되었음을 볼 수 있는데 15층에 설치하는 대신 30층에 두개의 동조질량감쇠장치를 설치하여도 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있었

다. 그리고 그림 5에서는 건물의 1, 2, 3차 모드에 동조시킨 동조질량감쇠장치를 설치하여 이에 따른 피크가 감소하는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

다수의 동조질량감쇠장치가 설치된 고층건물이 풍하중을 받았을 때의 운동방정식을 유도하고 풍하중 스펙트럼 모델을 적용하여 예제해석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 변위응답과는 달리 가속도응답에서는 1차모드의 영향뿐만 아니라 2차, 3차모드의 영향을 무시할 수 없다는 것을 알 수 있었다.

둘째, 동조질량감쇠장치의 질량을 각각 1/2과 1/3로 줄여 두개와 세개의 동조질량감쇠장치를 설치하여 1차모드뿐만 아니라 2차와 3차모드에 관한 피크를 감소시킬 수 있었으며 감소량은 동조질량감쇠장치의 질량크기보다는 모드의 동조여부에 관계가 있음을 알 수 있었다. 그러나 앞으로 질량과 감소량에 관한 상세한 연구가 필요하리라 생각된다.

셋째, 위와 마찬가지로 감소량은 동조질량감쇠장치가 설치되는 위치보다는 모드의 동조여부에 관계가 있음을 알 수 있었다.

7. 참고 문헌

- [1] 민경원(1992) "풍하중을 받는 고층건물의 진동조절", 대한건축학회 논문집 (4월호)
- [2] Kareem, Ahsan(1983) "Mitigation of Wind Induced Motion of Tall Buildings", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Science Publishers B.V., Vol.11, pp.273-284.
- [3] Yang, J.N. and Samali, B. "Control of Tall Buildings in Along Wind Motion", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.109, No.1, pp.50-68.
- [4] Weaver W., Timoshenko S.P., and Young D.H. (1990), Vibration Problems in Engineering, John Wiley & Sons, New York, N.Y.

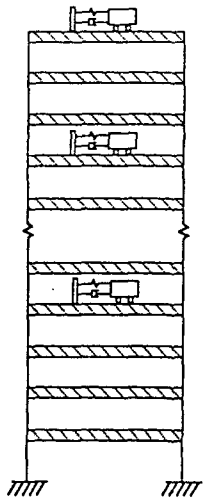


그림 1. 복수의 TMD가 설치된 고층건물

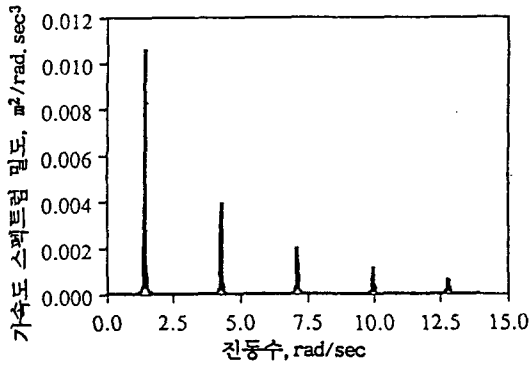


그림 2. 가속도 스펙트럼 밀도 (TMD를 설치하지 않았을 때)

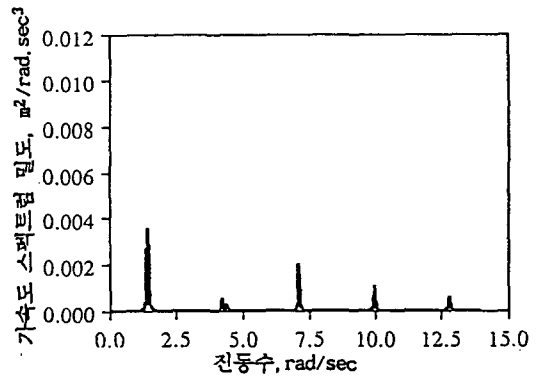


그림 4. 가속도 스펙트럼 밀도
(15층과 30층에 각각 1개의 TMD를 설치하였을 때)

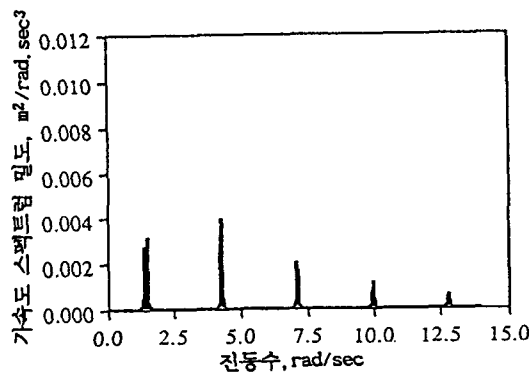


그림 3. 가속도 스펙트럼 밀도 (30층에 1개의 TMD를 설치하였을 때)

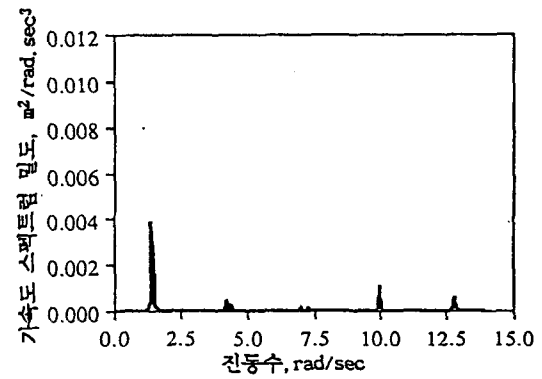


그림 5. 가속도 스펙트럼 밀도
(30층에 3개의 TMD를 설치하였을 때)