

비대칭 고층건물의 내풍 및 제진 해석

Control of Asymmetrical Tall Buildings under Wind Loading

민 경 원* 김 진 구** 조 한 옥***
Min, Kyung-Won Kim, Jin - Koo Cho, Han - Wook

요 약

고층건물의 설계에 있어서 지진보다 바람에 의한 영향이 더욱 크므로 바람에 의한 건물의 안전성과 거주성 등을 검토하는 것이 중요하다. 이러한 내풍해석은 모형 실험을 통하여 그 결과를 예측할 수 있으나 본 연구에서는 수치해석의 모형 개발에 중점을 두어 변동 풍하중의 3차원 모델과 건물 평면의 비대칭성을 고려하여 동조질량감쇠기를 설치하였을 때의 건물의 진동 성능을 분석하고 있다. 건물의 질량과 강성중심이 일치하지 않아 횡변위와 비틀림이 연계되는 102층의 건물을 예로 들어 내풍해석 및 동조질량감쇠기를 설치하였을 때 진동제어 해석을 수행하여 건물의 변위와 가속도의 평균응답을 구하여 결과를 비교하였다.

Abstract

In the design of tall building system, the wind loading can be more dominant factor than earthquake loading, and thus, it is important to check the stability and human comfort against wind. Experimental wind tunnel test is usually performed to predict wind behavior of a tall building, however, the test is not cost-effective in the preliminary stage for various structural models of tall building systems. In this regard, the study is focused on the numerical wind analysis of the tall building with and without tuned mass dampers based on the three dimensional model of wind loads and building behavior. As a numerical result, an asymmetrical 102-story tall building is presented to show the results of root mean squares of build responses with and without tuned mass dampers.

Keywords : tall building, wind loading, building response, tuned mass damper, wind model

1. 서 론

건물이 고층화 할수록 건물에 미치는 바람의 영향은 증가하게 되며 구조적인 문제 뿐만 아니라 외장, 거주성, 주변 환경 등에 큰 영향을 미친다. 현대의 고층건물은 고강도 재료의 이용으로 건물의 뼈대가 세장하여지고 외벽 및 내부 칸

막이벽에 경량한 자재가 사용되어 강성과 중량, 감쇠능력이 감소함에 따라 횡력, 특히 바람에 대하여 점차 취약하여지는 경향이 있다. 지진과 달리 바람하중은 자주 발생하므로 건물의 강성이나 에너지 감쇠능력이 부족할 경우 진동에 의한 여러가지 문제가 발생할 수 있다¹⁾. 최근 횡력에 의한 동적 거동을 제어하기 위하여 동조질량감쇠기

* 정희원·시립인천대학교 건축공학과 조교수

** 삼성물산 건설부문 기술연구소 신입연구원

*** 정희원·삼성물산 건설부문 기술연구소 수석연구원

· 이 논문에 대한 토론을 1997년도 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1997년도 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

(tuned mass damper, 이하 TMD라 칭함.)를 이용하여 건물의 감쇠력을 증가시키는 방법에 대하여 많은 연구가 이루어지고 있다.

일반적으로 건물 평면의 질량중심과 강성중심은 일치하지 않으며(이하 비대칭 건물이라 칭함.) 이러한 경우 비틀림 진동이 횡진동과 연관이 되어 나타나 진동 특성이 복잡해지고 그 값은 대칭인 건물의 응답보다 크게 된다. 또한 TMD는 횡방향의 진동을 제어하기 위한 것이기 때문에 비대칭 건물에 설치되었을 때 진동제어의 특성을 예측하기가 어렵다²⁾.

본 연구는 횡변위와 비틀림이 서로 연계되어 나타나는 비대칭 고층건물을 모델로 하여 풍하중 스펙트럼을 이용한 동적응답을 구하고 TMD 설치에 의한 진동제어의 효과와 특성을 파악하는데 목적이 있다. 해석과정으로는 건물과 TMD를 각각의 부분구조(sub-structure)로 간주하여 머드합성(modal synthesis)에 의한 특성 방정식(characteristic equation)을 유도하고 진동수 영역으로 치환하여 응답스펙트럼을 구한 후 최종적으로 응답의 평균값(root mean square)을 구한다. 해석을 위한 모델로는 높이에 따라 평면이 불규칙하게 변하여 횡변위와 비틀림이 서로 연관된 동적 특성을 보이는 비대칭 고층건물을 사용하였다^{3, 4)}.

2. 풍하중의 모델링

2.1 풍하중 스펙트럼

일반적으로 건물의 j 층에 작용하는 풍방향 하중(along wind force)은 다음과 같이 가정한다⁵⁾.

$$F_j(t) = \frac{1}{2} \rho A_j C_D V_j^2 \quad (1)$$

위 식에서 ρ 는 공기의 밀도, A_j 는 j 층의 풍하중을 받는 면적, V_j 는 바람의 속도, 그리고 C_D 는 항력계수(drag coefficient)이다. 그리고 풍속은 다음과 같이 평균풍속 u_j 와 평균풍속에 대한 변동풍속 \bar{u}_j 로 분리할 수 있다.

$$V_j = u_j + \bar{u}_j \quad (2)$$

풍속실험 결과에 의하면 평균풍속 u_j 는 지표면으로부터의 높이에 따라 다음과 같이 변한다고 가정할 수 있다.

$$u_j = u_s \left(\frac{z_j}{z_s} \right)^\alpha \quad (3)$$

위에서 z_j 는 j 층의 높이, z_s 는 기준고도(gradient height), u_s 는 기준고도에서의 풍속, α 는 주변 환경에 따라 0.15에서부터 0.5 사이의 값을 가지는 상수이다.

바람의 변동성분은 매우 불규칙하여 일반적으로 진동수 영역에서 스펙트럼으로 표시하게 되며 Davenport⁶⁾가 제안한 스펙트럼을 바탕으로 다음과 같은 i 층과 j 층에 대한 상호 스펙트럼 밀도함수를 구할 수 있다⁷⁾.

$$S_{ij}(\omega) = \frac{2k_0 u_i^2}{u_i u_j |\omega|} \left\{ \frac{\left(\frac{600\omega}{\pi u_j} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{600\omega}{\pi u_j} \right)^2 \right]^{4/3}} \right\} \times \exp \left[\left(-\frac{c_1 |\omega|}{2\pi} \right) \left(\frac{|i-j|h}{u_j} \right) \right] \quad (4)$$

윗 식에서 k_0 와 c_1 는 상수로서 각각 0.03과 7.7이며 h 는 층의 높이이고 \exp 는 지수 함수를 의미한다. 또한 u_j 은 고도 10m에서의 평균풍속이며 ω 는 풍하중의 진동수(rad/sec)이다.

2.2 풍하중의 3차원 모델

건물평균의 질량, 강성, 그리고 공기동역학적(aerodynamical)인 중심들이 일치하지 않는 경우 건물은 두방향의 횡운동과 비틀림 운동이 발생하게 되며 이러한 것들은 서로 연계가 된다.

그림 1에서 A, C, E는 각각 공기동역학, 질량, 강성의 중심을 의미하며, (x_A, y_A) 는 강성중심에서의 공기동역학 중심의 위치를 나타내며 (x_C, y_C) 는 강성중심에서의 질량 중심의 위치를 의미한다.

이와같은 중심들이 일치하지 않을 때 j 층에 작용하는 x, y 방향의 병진 풍하중 F_{xj}, F_{yj} 과 θ 방향의 회전 풍하중 $F_{\theta j}$ 은 다음과 같이 요약될 수 있다²⁾.

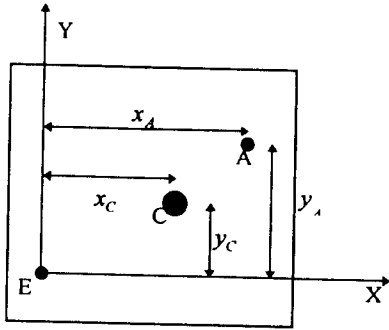


그림 1 비대칭 건물의 평면

$$\begin{aligned}
 F_{x_i}(t) &= \frac{1}{2} \rho b h u_i [2C_x(\beta)u'_i - C_v(\beta)v'_i] \\
 F_{y_i}(t) &= \frac{1}{2} \rho b h u_i [2C_v(\beta)u'_i + C_x(\beta)v'_i] \\
 F_{\theta_i}(t) &= \frac{1}{2} \rho b h u_i [2g_1(\beta)u'_i + g_2(\beta)v'_i]
 \end{aligned} \tag{5}$$

윗 식에서

$$\begin{aligned}
 g_1(\beta) &= x_A C_v(\beta) - y_A C_x(\beta) \\
 g_2(\beta) &= x_A C_x(\beta) + y_A C_v(\beta) \\
 C_x(\beta) &= C_D(\beta) \cos \beta - C_L(\beta) \sin \beta \\
 C_v(\beta) &= C_D(\beta) \sin \beta + C_L(\beta) \cos \beta
 \end{aligned} \tag{6}$$

이며, ρ , b , h 는 각각 공기밀도, j 층의 건물폭, 높이이며 C_D , C_L 에 입사각 β 에 좌우되는 항력 및 양력계수이다. 또한 u_i 와 v_i 는 변동풍속의 양방향 성분, u'_i 는 j 층에 가해지는 평균풍속이다.

윗 식은 j 층에 관계된 것이므로 j 층과 k 층의 상호관계에 따른 스펙트럼은 다음과 같은 3×3 행렬이 된다.

$$[S_F]_{ik} = \begin{bmatrix} S_{F_{x_i}F_{x_k}} & S_{F_{x_i}F_{y_k}} & S_{F_{x_i}F_{\theta_k}} \\ S_{F_{y_i}F_{x_k}} & S_{F_{y_i}F_{y_k}} & S_{F_{y_i}F_{\theta_k}} \\ S_{F_{\theta_i}F_{x_k}} & S_{F_{\theta_i}F_{y_k}} & S_{F_{\theta_i}F_{\theta_k}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

위 스펙트럼은 대칭행렬이며 각 원소는 위에서 설명한 풍하중 및 건물의 자료로 구성된 함수이며 자세한 내용은 Yang²⁾의 논문을 참고하면 된다.

3. 내풍해석

본 연구에서는 비대칭 건물의 3차원 거동을 다루므로 각 층마다 3개의 자유도, 즉 두 방향의 횡 거동의 자유도(x , y)와 비틀림 거동의 자유도(θ)를 가정할 수 있으며 다음과 같은 건물의 운동방정식을 구성할 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \tag{9}$$

M , C , K 는 각각의 건물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이며 건물수의 층수가 n 이면 행렬의 크기는 모두 $3n \times 3n$ 이다. $F(t)$ 는 건물에 가해지는 풍하중 행렬로 식 (5)에 나타나 있으며 $x(t)$ 는 건물의 자유도이며 행렬의 크기는 모두 $3n \times 1$ 이다.

위 운동방정식을 해석하기 위해 다음과 같은 관계식으로 x 를 치환하고 비연성화(mode decoupling)를 수행하면

$$x = \Phi \alpha \tag{10}$$

다음과 같은 단자유도계의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{\alpha}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\alpha}_i + \omega_i^2 \alpha_i = f_i \tag{11}$$

윗 식에서 Φ 와 α 는 모드행렬과 모드계수벡터이며 Φ_i 와 α_i 는 각각 i 번째 모드벡터와 모드계수를 의미한다. 또한 ω_i 와 ξ_i 는 각각 i 번째의 고유진동수와 모드감쇠비를 나타낸다. 그리고 f_i 는 $\Phi_i F(t)$ 이다.

건물에 작용하는 풍하중은 그 성격은 불규칙하고 지진과 달리 모든 층에 작용하기 때문에 시간영역에서의 해석보다는 진동수 영역으로 변환을 하여 응답의 평균값을 구하는 것이 일반적인 해석방법이다. 이 방법은 풍하중의 스펙트럼과 건물의 주파수응답함수(frequency response function)을 이용하여 응답의 파워 스펙트럼 밀도함수를 구한 다음 적분하여 응답의 평균을 구한다. 응답 x 의 파워 스펙트럼 밀도함수 $S_{xx}(\omega)$ 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$S_{xx}(\omega) = \Phi H(\omega) \Phi^T S_{FF}(\omega) \Phi \bar{H}^T(\omega) \Phi^T \tag{12}$$

윗 식에서 $S_{FF}(\omega)$ 는 풍하중의 스펙트럼으로 식 (8)을 참고하면 되며 ω 는 풍하중의 진동수이다. $H(\omega)$ 는 복소 진동수 응답행렬로써 대각행렬이며 j 번째 대각원소는 다음과 같다. 그리고 $\bar{H}(\omega)$ 는 $H(\omega)$ 의 공액 복소수인 행렬이며 위첨자 T 는 행렬의 전치(transposition)를 뜻한다.

$$H_j(\omega) = \frac{1}{\omega_i^2 - \omega^2 + 2i\xi_j\omega_k\omega} \quad (13)$$

위 결과를 이용하여 변동 풍하중에 의한 건물 응답의 평균 σ_x 를 구한다.

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_{xx}(\omega) d\omega \quad (14)$$

4. 제진해석

건물과 TMD를 통합된 한개의 시스템으로 간주하여 모델링하게 되면 감쇠기의 특성이 어떻게 건물에 영향을 미치는 가를 파악하기 어렵다. 이러한 단점 때문에 여러개의 시스템이 연결된 구조체를 해석하고자 할 때는 각각의 시스템 특성을 파악한 다음 제약조건(constraint condition)을 이용하여 전체시스템을 용이하게 파악하는 부분구조 합성법 또는 분할구조법(modal synthesis of subsystem or substructuring technique)을 채택하는 것이 바람직하다.

다음 그림 2는 건물과 TMD를 별개의 독립된 시스템으로 간주하고 여기에 제약조건을 적용하여 전체시스템을 구성하는 개념을 보여주고 있다. 해석 순서는 각각 시스템의 운동방정식을 유도한 다음 여기에 TMD가 설치되는 곳의 제약조건을 적용하여 전체시스템의 운동방정식을 구성하는 것이다.

이러한 운동방정식은 TMD의 각 요소들이 건물의 여러 요소에 미치는 영향을 명확히 보여주기 때문에 각 요소들 간의 관계를 이해하는데 도움을 준다.

본 연구에서의 임의의 k 층에 그림 3과 같이 건물의 질량중심(C)에서 각각 $(0, y_T)$, $(X_T, 0)$ 떨어진 곳에 두개의 TMD 1, 2를 설치하였다.

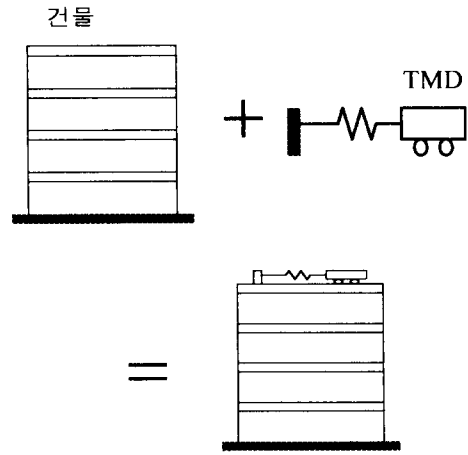


그림 2 부분구조의 합성

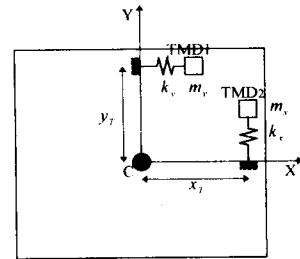


그림 3 k 층 평면에 설치된 TMD

TMD 1, 2의 질량과 강성은 각각 m_y, k_y, m_x, k_x 이고 TMD 1의 설치위치와 질량의 자유도는 각각 z_{y0}, z_y 그리고, TMD 2의 설치위치와 질량의 자유도는 각각 z_{x0}, z_x 이다.

건물과 TMD를 통합하기 위하여 첫번째 작업으로 각각에 대한 운동에너지 T 와 변형에너지 V 를 다음과 같이 유도한다. 아래 식(15)와 (16)에서 우변의 첫번째 항은 건물에 관한 것이며 두 번째 항은 TMD에 관한 것이다.

$$T = \frac{1}{2}\alpha^T M \alpha + \frac{1}{2}z^T m z \quad (15)$$

$$V = \frac{1}{2}\alpha^T K \alpha + \alpha \frac{1}{2}(z - z_0)^T k_T (z - z_0) \quad (16)$$

위 에너지 식에서 M 과 k 는 건물의 질량과 강성행렬이며 m, z, k 는 다음과 같이 정의되는

TMD의 질량, 자유도, 강성행렬이다. 그리고 z_0 는 감쇠기가 설치되어 있는 곳의 자유도 행렬이다.

$$m = \begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \quad Z^T = [Z_x \ Z_y] \quad (17)$$

$$k_T = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \quad Z_0^T = [Z_{x0} \ Z_{y0}] \quad (18)$$

위의 에너지 식에 TMD가 설치된 곳의 건물의 자유도와 TMD의 자유도가 같다는데 제약조건을 다음과 같은 f 의 식으로 표현할 수 있다.

$$f = D^T \Phi_k \alpha - z_0 = 0 \quad (19)$$

위에서 D 는 다음과 같이 TMD의 설치 위치를 나타내는 행렬이다.

$$D^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -y^T \\ 0 & 1 & x^T \end{bmatrix} \quad (20)$$

그리고 Φ_k 는 감쇠기가 설치된 곳에 관계된 모드행렬이다. 에너지 T 와 V 그리고 제약조건 f 를 다음과 같은 라그랑지안(Lagrangian)을 이용하여 하나의 식으로 연결시킬 수가 있다.

$$L = T - V + \lambda^T f \quad (21)$$

위에서 λ 는 라그랑지 계수(Lagrangian multiplier)이다. 위의 라그랑지안 L 에 다음의 라그랑지 식(Lagrange's equation)에 적용하여 통합된 운동방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} + \frac{\partial V}{\partial q} - \lambda^T \frac{\partial f}{\partial q} = Q \quad (22)$$

위에서 Q 는 $\Phi F(t)$ 와 같으며 q 는 독립변수로서 α , z , z_0 , λ 에 해당된다. 독립변수에 대하여 라그랑지안을 수행하고 풍하중의 불규칙성을 반영하기 위하여 진동수영역으로 변환하던 건물의 모드 계수 α 의 후리에 변환인 $\bar{\alpha}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{\alpha} = \left[(-\omega^2 M + K) - \bar{D}^T m \omega^2 \text{diag} \left(\frac{1}{\omega^2 - \omega_i^2} \right) \bar{D} \right]^{-1} \times \Phi^T f \quad (23)$$

여기서 diag 는 대각행렬임을 의미하며 ω_i 는 i 번째 TMD의 고유진동수이다. 위 식우변의 역행렬 부분을 H_d 로 치환하면 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다.

$$\bar{\alpha} = H_d \Phi^T f \quad (24)$$

윗 식을 식 (10)에 대입하면 다음과 같이 건물 응답의 후리에 변환인 \bar{x} 를 표현할 수 있고

$$\bar{x} = \Phi H_d \Phi^T f \quad (25)$$

이를 응답 스펙트럼식에 대입하면 다음과 같이 TMD에 의한 건물의 스펙트럼 식을 구할수 있다.

$$S_{xx} = \Phi H_d \Phi^T S_{FF} \bar{H}_d \Phi^T \quad (26)$$

여기서 H_d 는 TMD가 없을 때에는 질량행렬 m 이 0이므로 다음과 같이 표현되어 건물만의 복소진동수 응답행렬인 식 (13)와 같다.

$$H_d = H = [-\omega^2 M + K]^{-1} \quad (27)$$

위 응답스펙트럼식을 적분하여 평균응답을 구할 수 있다.

5. 모델해석

그림 4와 5는 해석모델인 고층건물의 기준층 평면과 구조해석 프로그램인 ETABS의 결과인 골조도를 나타낸다. 건물은 102층의 철골건물로 상부로 갈수록 단면이 줄어들며 횡력에 대하여는 9미터 간격으로 배치된 외부기둥과 12층 높이의 대형가새로 저항한다. 그리고 지상층을 포함한

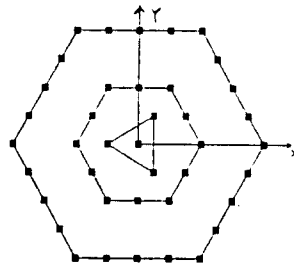


그림 4 건물의 구조평면

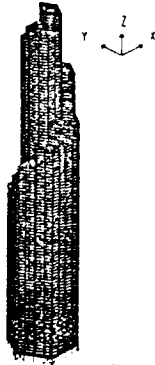


그림 5 건물의 3차원 그림

기준층 평면은 정육면체의 모양을 띠고 있으며 x 및 y 방향의 폭은 모두 87m이며 상부로 갈수록 폭이 감소하여 최상층인 102층에서는 14m이다. 또한 건물의 높이는 395m이다.

표 1은 건물의 고유치해석에 의해 구한 각 모드별 주기 및 진동수이고 표 2는 각 방향의 유효 질량계수(effective mass factors)를 나타낸다.

표 1에서 2차와 3차 모드가 인접하여 있는 것을 알 수 있고 표 2에서는 x , y , z 방향의 성분이 서로 연성되어 있어 횡과 비틀림 변위가 동시에 나타나는 비대칭 건물의 특성을 보여주고 있다.

첫번째 모드는 z 방향 회전, 두번째 모드는 x 방향 변위, 그리고 세번째 모드는 y 방향 변위가 주된 성분임을 확인할 수 있다.

그림 5에서와 같이 102층의 건물은 높이에 따라 바람을 받는 면적이 달라지는 형태를 띠고 있어 높이에 따른 평면의 변화를 고려하여 식 (5)

표 1 건물의 모드별 주기 및 진동수

모드	주기(sec)	진동수(Hz)
1	7.755	0.128
2	7.006	0.142
3	6.753	0.148
4	3.746	0.266
5	2.741	0.364
6	2.847	0.402
7	2.313	0.1432
8	1.774	0.563
9	1.522	0.656
10	1.451	0.689

표 2 건물의 유효질량계수

모드	x 변위 (% mass)	y 변위 (% mass)	z 변위 (% mass)
1	2.22	0.81	66.29
2	48.40	7.29	4.00
3	8.34	50.65	0.08
4	0.05	0.26	9.54
5	16.58	0.29	0.80
6	0.25	16.83	0.03
7	1.21	0.04	5.66
8	0.02	0.25	2.55
9	5.56	0.73	0.80
10	1.70	0.20	1.45

와 식 (7)에 있는 건물의 폭과 항력계수 C_D 와 C_L 결정하여야 한다. 그러나 본 연구에 일차적 관심은 비대칭 건물의 내풍해석의 방법과 TMD를 설치하였을 때의 응답특성의 파악에 있으므로 높이와 평면에 따른 변수의 변화는 다음과 같이 건물의 유효폭으로 대체하여 일정한 변수를 택하는 것으로 하였다.

건물의 유효폭은 다음과 같은 방법으로 구한다.

$$D_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i h_i \phi_i}{\sum_{i=1}^n h_i \phi_i} \quad (28)$$

여기서 n 은 건물의 층수, D_i 와 h_i 는 i 층의 폭과 높이, 풍방향이 건물평면의 x 방향이라면 2차 모드의 x 방향 성분이 가장 크므로 ϕ_i 는 2차모드이고 i 층에 해당하는 값이다. 위와 같은 방법에 의해 얻어진 건물의 유효폭은 48.5m이다.

Davenport가 제시한 풍하중의 스펙트럼인 식 (4)를 이용하기 위하여 다음과 같은 입력자료를 이용하였다.

공기밀도 : $0.00123(t/m^3)$, 10m 높이의 평균 풍속 : 30m/sec, 항력계수 : $C_D : 1.0$, 양력계수 $C_L : 0.0$, 풍의 입사각 : 0, 풍속의 고도분포지수 $\alpha : 0.3$, 기준경도풍고도 $Z_g : 450m$, 건물의 층밀도 : $1.02 t/m^2$

위의 변수들은 Davenport가 제시한 높이에 따른 풍속의 변화를 예측하는 파워법칙(power law)을 따르고 노풍도는 건물이 세워지는 지역을 고려하여 결정하였다. 그리고 식 (5)의 계산 시 필요한 공기동역학, 질량, 강성의 중심은 모

두 일치하는 것으로 가정하여 풍하중에 의한 비틀림 연성은 무시하였으며 다음의 수치해석에서는 건물의 최상층의 응답을 구하여 내풍 및 제진 특성을 파악하기로 한다.

그림 6, 7, 8, 9는 풍하중의 x축과 평행하게 작용할 때 응답의 스펙트럼을 나타낸다.

TMD의 질량은 건물 전체질량의 2%를 차지하도록 하였으며 x방향의 변위가 가장 지배적인 2차 모드에 동조시켰다. TMD의 감쇠비는 20%이며 건물의 최상층에서 질량중심의 위치에 x방향으로 설치하였다. 하부에 점선으로 표시된 곡선이 TMD에 의해 감소된 응답을 나타내며 x방향 주파수에 동조시켰으므로 x방향 응답에 대한 제어율이 매우 높고 y방향 응답은 제어율이 낮은 것을 알 수 있다. 그리고 x방향과 비틀림 방향모드 성분의 상관성 때문에 비틀림방향 응답의 제어율은 높은 것임을 확인할 수 있다.

그림 10, 11, 12는 TMD의 동조주파수를 여러 모드의 주파수로 변화시켰을 때의 응답을 비교한 것이다. x방향으로 풍하중이 작용하므로 x방향의 응답이 크게 나타나며 건물의 비대칭성으로 인하여 y방향 및 비틀림 방향의 응답도 나타는 것을 볼 수 있다. 또한 x방향으로 TMD를 설치하였으므로 모드중 x방향의 성분의 가장 큰 2차 모드에서 x방향의 응답이 가장 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이때의 y방향의 응답을 살펴보면 2차모드 보다는 1차모드에서 가장 작은 것을 알 수 있는데 이유는 1차모드의 비틀림 방향이 주 성분이어서 x방향의 TMD 거동이 y방향과 강하게 연관되었기 때문이다. 또한 그림 12에서 비틀림 방향의 응답도 TMD를 2차 모드에 동조시켰을 때 제일 작은 것임을 알 수 있다.

그림 13, 14는 TMD의 감쇠비의 변화에 따른 응답의 변화이며 감쇠비가 10% 이상일때 제어율의 변화가 거의 없는 것을 관찰할 수 있어 TMD의 감쇠비가 제어율에 직접적인 영향은 크지 않은 것임을 알 수 있다.

그림 15, 16, 17은 TMD가 설치된 위치가 질량중심으로부터 멀어짐에 따른 응답의 변화를 나타낸다. 질량중심에서 멀어질수록 비틀림 응답의

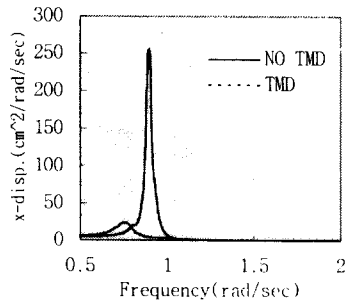


그림 6 x방향 변위의 응답 스펙트럼

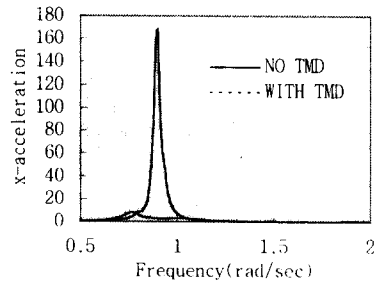


그림 7 x방향의 가속도 응답 스펙트럼

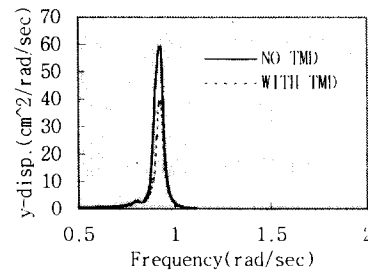


그림 8 y방향의 변위 응답 스펙트럼

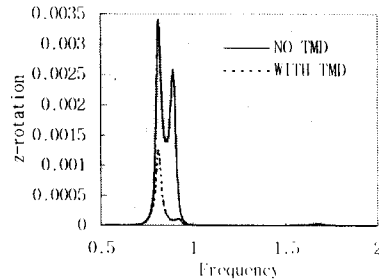


그림 9 z방향의 비틀림 응답스펙트럼

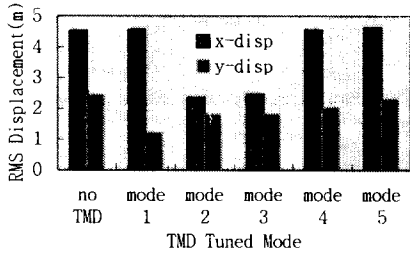


그림 10 TMD동조주파수에 따른 변위의 변화

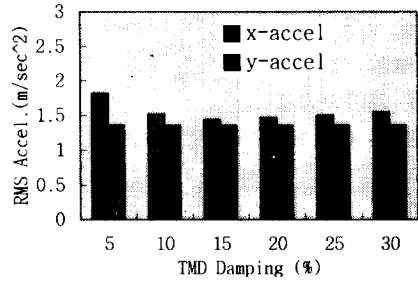


그림 14 TMD 감쇠비에 따른 가속도의 변화

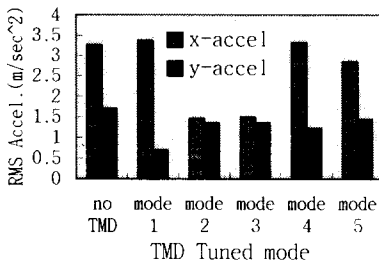


그림 11 TMD동조주파수에 따른 가속도의 변화

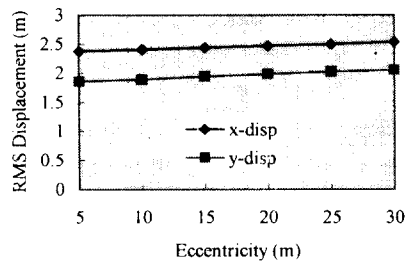


그림 15 질량중심으로부터 TMD위치에 따른 비틀림각의 변화

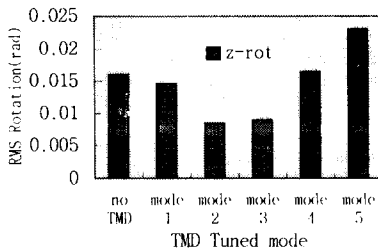


그림 12 TMD동조주파수에 따른 비틀림각의 변화

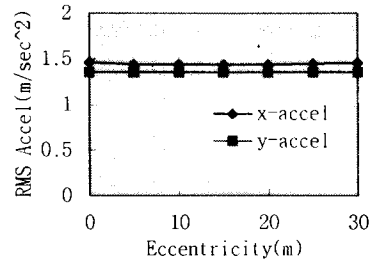


그림 16 질량중심으로부터 TMD위치에 따른 가속도의 변화

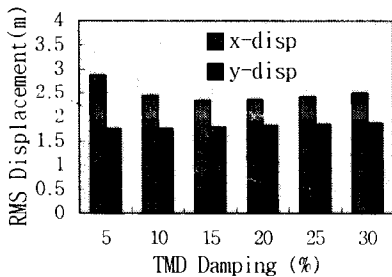


그림 13 TMD감쇠비에 따른 변위의 변화

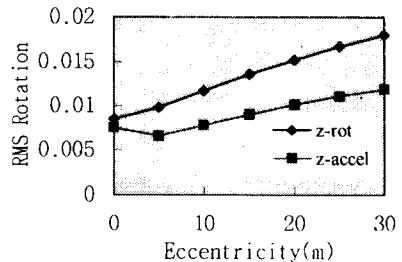


그림 17 질량중심으로부터 TMD 위치에 따른 비틀림각의 변화

크기가 증가하나 횡방향의 응답은 TMD의 위치에 큰 영향을 받지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 TMD가 질량 중심에 근접할수록 제어율이 향상되는 것을 알 수 있다.

그림 18, 19는 TMD가 설치된 위치에 따라 변화하는 횡방향 응답의 크기를 나타낸 것으로 알려진 바와 같이 최상층에 설치 하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

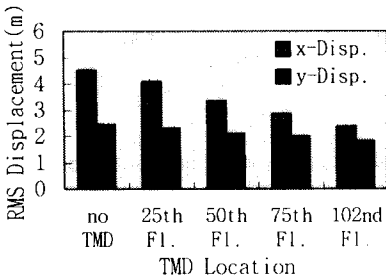


그림 18 TMD의 층별 위치에 따른 횡변위의 변화

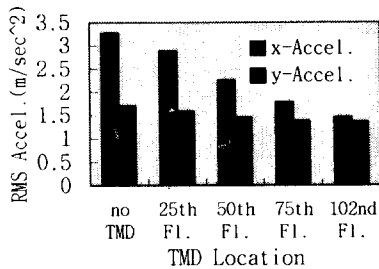


그림 19 TMD의 층별 위치에 따른 가속도의 변화

6. 결 론

본 연구에서는 건물의 질량과 강성중심이 서로 일치하지 않아 횡방향과 비틀림방향의 모드성분이 서로 상관관계를 가지는 비대칭 건물의 경우, 내풍해석 및 TMD를 설치하였을때의 진동응답의 해석방법을 다루었다.

Davenport가 제시한 풍하중 모형을 3차원모델

로 변환하여 비대칭 건물인 102층 모델에 적용하여 결과를 검증하였다. TMD는 비대칭 건물인 경우 횡 방향 뿐만 아니라 비틀림 방향의 진동에도 제어효과가 좋은 것으로 나타났으며 TMD의 동조 주파수 결정시 비틀림이 응답에 의한 횡 방향 응답이 연성되어 나타나는 모드의 성분을 파악하는 것이 중요하다. 위와 같은 해석과정을 이용하게 되면 초기설계 단계에서 고층건물의 내풍해석과 진동제어해석을 수치실험으로 다양하게 검토할 수 있게 되며, 향후 건물의 높이에 따른 풍하중 및 건물 특성 자료 등을 추가, 보완하면 현재 풍동실험에 의존하는 건물의 내풍해석에 대응되는 보다 현실적인 수치해석적 방법으로 발전이 가능하다.

참 고 문 헌

1. Islam, M. S., Ellingwood, B and Corotis, R. B., "Dynamic response of tall building to stochastic wind load", *Journal of structural Engineering*, Vol. 116, No. 11, 1990
2. Yang, J. N., Lin, Y. K. and Samali, B., "Coupled motion of wind-loaded multistory building", *Journal of the Engineering Mechanics*, Vol. 107, No. Em6, 1981
3. Isyumov N., "The aeroelastic modeling of tall buildings", *International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques*, Gaithersburg, Maryland, 1982
4. Isyumov N., Fediw A., Colaco J., "Performance of tall buildings under wind action", *8th International Conference on Wind Engineering*, London, Ontario, 1991
5. Yang J. N. and Lin, Y. K., "Along-wind motion of multistory building", *Journal of the Engineering Mechanics*, Vol. 107, No. EM2, 1981

(접수일자 : 1997. 1. 31)