

TLCD를 이용한 지진하중을 받는 3차원 비정형 건축구조물의 응답제어

RESPONSE CONTROL OF 3D IRREGULAR BUILDINGS UNDER SEISMIC EXCITATIONS USING TLCD

김 홍 진*
Hongjin Kim

김 형 섭**
Hyoung-Seop Kim

안 상 경***
Sang-Kyung Ahn

Keywords: TLCD(Tuned Liquid Column Damper), semi-active control (준능동 제어), irregular buildings(비정형 구조물)

ABSTRACT

The semi-active TLCD system is investigated for control of responses of 3D irregular buildings under seismic excitations. The TLCD system is a special type of TMD system providing a performance similar to a TMD system but offers a number of practical advantages over the traditional TMD system. The equations of motion for the combined building and TLCD system are derived for multistory building structures with rigid floors and plan and elevation irregularities. Simulation results for control of two multistory moment-resisting space structures with vertical and plan irregularities show clearly that the semi-active TLCD control system reduces the responses of 3D irregular buildings subjected to earthquake ground motions efficiently.

1. 서 론

최근들어 동적하중을 받는 건물의 능동, 수동, 준능동, 그리고 복합제어에 관한 많은 연구논문이 발표되었다. 하지만 대부분의 논문들에서 다루어지는 구조물은 2차원 구조물이거나 대칭성을 갖는 3차원 구조물에 국한되어 있다. 비틀림 거동을 하는 비정형구조물의 2차원적 해석의 경우 횡거동과 비틀림거동의 결합된 거동에 대하여 적게 평가하게 되는 경우가 생긴다.

이 논문에서는 지진하중을 받는 비정형구조물의 준능동 TLCD를 이용한 응답제어에 대하여 살펴보았다. TLCD는 TMD의 특별한 형태로서 TMD와 비슷한 제어성능을 발휘한다. 그러나 TLCD는 TMD에 비해 많은 실질적인 이점을 가지고 있어 최근들어 많은 주목을 받고 있다 (Kareem 1994, Won et al, 1996, and Yalla et al., 2001). 이 논문에서는 수동제어 시스템의 신뢰성과 능동제

어시스템의 제어효과를 활용하기 위해서 준능동 TLCD 시스템을 사용하였다.

준능동 TLCD 시스템을 이용한 비정형 구조물의 제어를 위해, 평면 비정형성과 입면 비정형성을 갖는 다층의 건물과 TLCD가 연계된 운동방정식은 유도하였다. 그리고 입면 비정형과 평면 비정형을 갖는 두개의 모멘트 저항 철골골조를 설계하여 준능동 TLCD를 적용하였다.

2. 수치해석 모델

2.1 비틀림 거동을 하는 3차원 비정형구조물

이 논문에서 고려된 N층의 3차원 건물은 평면 비정형과 입면비정형을 동시에 갖는 것으로 가정하였다. 바닥판을 강체거동을 하는 것으로 가정하였고 수평하중은 강체 바닥판을 통하여 기둥으로 전달되는 것으로 가정하였다. 이 경우 그림 1에서 보이듯이 질량의 중심, C_M , 과 강성의 중심, C_R , 은 층마다 서로 다르게 된다. 또한 각 층의 질량과 강성의 중심이 일직선상에 존재하지 않게되는 경우도 존재한다. 이러한 건물의 경우, 건물의 횡거동과 비틀림거동은 서로 연계된다. 구조적 모델은 각각의 층에 3개의

* 단국대학교 건축대학 건축공학과 초빙교수, 공학박사
E-mail : hongjinkim@cricmail.net
Tel : (02) 799-1082, Fax : (02) 799-1154

** 단국대학교 건축공학과, 석사과정

*** 삼성건설 기술연구소 선임연구원, 공학박사

자유도를 가지고 있다. 임의의 i 층($i = 1, 2, \dots, N$)의 x 와 y 방향의 변위와 질량의 중심을 통과하는 수직축, z ,를 기준으로 한 회전을 각각 u_i, v_i , 그리고 θ_i 라고 나타내면, 지진을 받는 3차원 구조물의 동적 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -Mr_g\ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서 M, C, K 는 각각 $3N \times 3N$ 의 구조물의 질량, 감쇠, 강성 행렬이다. 그리고 \ddot{u}_g 는 지반가속도이다. 변위 벡터 u 와 지반영향벡터 r_g 는 각각 식(2)와 식(3)과 같다.

$$u = [u_1^T \ u_2^T \ u_3^T \ \dots \ u_N^T]^T \quad (2)$$

$$r_g = [r_{g,1}^T \ r_{g,2}^T \ r_{g,3}^T \ \dots \ r_{g,N}^T]^T \quad (3)$$

여기에서,

$$u_i = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \theta_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$r_{g,i} = \begin{bmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

그리고 β 는 x 축과 이루는 지진방향의 각도이다(그림 1a).

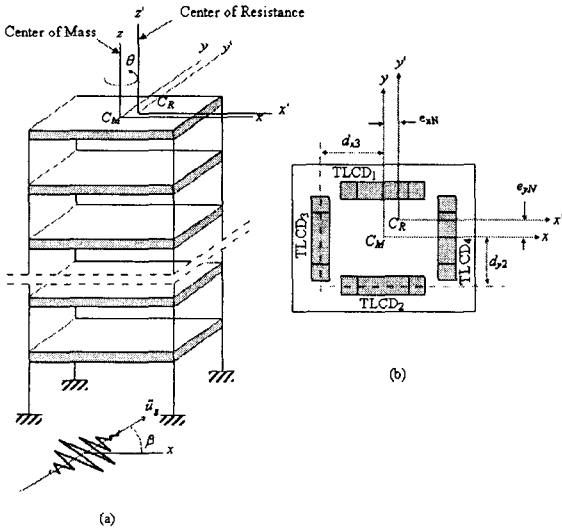


그림 1. 횡변위와 비틀림이 연계된 3차원 구조물의 옥상층에 설치된 TMLCD

2.2 TLCD의 동적 운동방정식

본 연구에서는, 두 쌍의 TLCD가 건물의 옥상에 설치되어 있고, 두 쌍의 TLCD가 그림 1b와 같이 각축에 대칭으

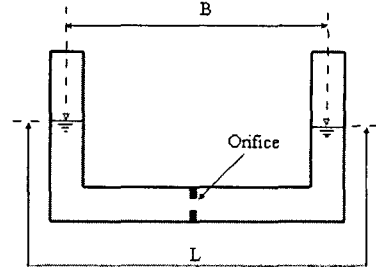


그림 2 Tuned Liquid Column Damper (TLCD)

로 배치되어 있는 경우를 살펴본다. 그러한 형태는 추가적인 비틀림 효과를 피하고 진동억제를 최대화하기 위해 선택되었다. 그림 2와 같이, N 층 건물의 옥상에 설치된 x 축과 y 축에 대한 각각의 TLCD 운동방정식은 다음과 같다. (Liang et al., 2000)

$$\begin{aligned} m_x \ddot{x}_i(t) + \frac{\rho A_x \xi_x(t) |\dot{x}_i(t)|}{2} \dot{x}_i(t) + k_x x_i(t) \\ = -\alpha_x m_x \ddot{u}_{N'}(t) + \alpha_x m_x d_y \ddot{\theta}_N(t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} m_y \ddot{y}_i(t) + \frac{\rho A_y \xi_y(t) |\dot{y}_i(t)|}{2} \dot{y}_i(t) + k_y y_i(t) \\ = -\alpha_y m_y \ddot{v}_N(t) - \alpha_y m_y d_x \ddot{\theta}_N(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 식(6)과 (7)의 우측부분의 마지막 부분은 비틀림을 나타내며, $\dot{\theta}_N, \ddot{\theta}_N$, 그리고 e_n 은 x 축과 y 축에 대하여 각각 i 번째 TLCD의 질량, 강성, 그리고 TLCD의 전체길이에 대한 수평길이비를 나타내고, 다음과 같다.

$$m_x = \rho A_x L_x, \quad m_y = \rho A_y L_y, \quad (8)$$

$$k_x = 2\rho g A_x, \quad k_y = 2\rho g A_y, \quad (9)$$

$$\alpha_x = \frac{B_x}{L_x}, \quad \alpha_y = \frac{B_y}{L_y}, \quad (10)$$

여기서 $\xi_x, \xi_y, \xi_x, \xi_y, \xi_x$, 그리고 ξ_y 는 x 축과 y 축에 대하여 각각 i 번째 TLCD의 단면적, 수평길이, 그리고 액체기둥의 길이를 나타낸다. x_i 는 x 축에 평행한 i 번째 TLCD 액체기둥의 변위이고, y_i 는 y 축에 평행한 i 번째 TLCD 액체기둥의 변위이다. 그리고 ρ, g 는 각각 액체의 밀도, 중력가속도이다. 또한 C_M 와 C_R 는 질량중심, C_M 을 기준으로 하여 i 번째 TLCD의 중심과의 거리이다.

2.3 TLCD시스템과 구조물의 연계운동방정식

TLCD시스템과 구조물이 결합된 운동방정식은 식(1), 식(6) 그리고, 식(7)의 조합에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M + M' & M_{DT} \\ M_{TD} & M_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{u}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & [0]_{3 \times 3N} \\ [0]_{3 \times 3N} & C_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{u}_T \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & [0]_{3 \times 3N} \\ [0]_{3 \times 3N} & K_T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ u_T \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} M r_f \\ M_T r_T \end{bmatrix} \ddot{u}_g \quad (11)$$

여기서, 행렬

$$C_T = \text{diag} \left(\frac{\rho A_x \xi_x(t) |\dot{x}_1(t)|}{2}, \frac{\rho A_x \xi_x(t) |\dot{x}_2(t)|}{2}, \frac{\rho A_y \xi_y(t) |\dot{y}_3(t)|}{2}, \frac{\rho A_y \xi_y(t) |\dot{y}_4(t)|}{2} \right) \quad (12)$$

$$M_T = \text{diag}(m_{x_1}, m_{x_2}, m_{y_3}, m_{y_4}) \quad (13)$$

$$K_T = \text{diag}(k_{x_1}, k_{x_2}, k_{y_3}, k_{y_4}) \quad (14)$$

는 각각 TLCD의 질량행렬, 등가 감쇠행렬, 강성행렬이고, $u_T = [x_1 \ x_2 \ y_3 \ y_4]^T$ 는 4개의 TLCD에서 액체의 수직변위를 나타내는 벡터이다. θ 는 영향행렬이다. TLCD와 연관된 지반영향벡터는 u 에 의해 나타내어진다.

$$r_f = [\cos \beta \ \cos \beta \ \sin \beta \ \sin \beta]^T \quad (15)$$

연계된 질량 행렬 M_{DT} , M_{TD} 와 TLCD의 질량의 구조물의 질량행렬에 대한 영향행렬 M' 은 다음과 같다.

$$M_{DT} = \begin{bmatrix} [0]_{(3N-3) \times 4} \\ \alpha_{x_1} m_{x_1} & \alpha_{x_2} m_{x_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{y_3} m_{y_3} & \alpha_{y_4} m_{y_4} \\ -\alpha_{x_1} m_{x_1} d_{y_1} & -\alpha_{x_2} m_{x_2} d_{y_2} & \alpha_{y_3} m_{y_3} d_{x_3} & \alpha_{y_4} m_{y_4} d_{x_4} \end{bmatrix}_{3 \times 4} \quad (16)$$

$$M_{TD} = M_{DT}^T \quad (17)$$

$$M' = \begin{bmatrix} [0]_{(3N-3) \times (3N-3)} & [0]_{(3N-3) \times 3} \\ [0]_{3 \times (3N-3)} & \begin{bmatrix} M'_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M'_{22} & 0 \\ 0 & 0 & M'_{33} \end{bmatrix}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서,

$$M'_{11} = m_{x_1} + m_{x_2} + m_{y_3} + m_{y_4} \quad (19)$$

$$M'_{22} = M'_{11} \quad (20)$$

$$M'_{33} = I_{x_1} + I_{x_2} + I_{y_3} + I_{y_4} \quad (21)$$

이며, \hat{x}_1 와 \hat{x}_2 는 지붕층의 질량중심에서 x 방향에 대응하는 TLCD1과 TLCD2내의 액체 관성모멘트이고, \hat{y}_3 와 \hat{y}_4 는 y 방향에 대응하는 TLCD3과 TLCD4내의 액체 관성모멘트이다 (그림 1b).

3. 준능동 TLCD 제어 시스템

만약 식(12)에 나타난 수두손실계수, ξ ,가 제어 가능한 통로(orifice)에 의해서 바뀔 수 있다면 구조물의 응답을 제어하는 수동제어력은 능동으로 전환될 수 있다. 준능동 TLCD시스템에서, 수두손실계수는 다음과 같이 표현되는 준능동제어알고리즘에 따라 결정된다.

$$\xi(t) = \begin{cases} \xi_{\min} & \xi^*(t) < \xi_{\min} \text{ or } f_c(t) \dot{u}_T(t) \geq 0 \\ \xi^*(t) & \\ \xi_{\max} & \xi^*(t) > \xi_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

여기에서 ξ_{\max} 와 ξ_{\min} 는 각각 수두손실계수의 최대와 최소 제한치 이고, $\xi^*(t)$ 는 적용된 알고리즘으로부터 계산된 최적 수두손실계수이다. 그로인한 제어력은 다음과 같다.

$$f_c(t) = -\frac{\rho A \xi(t) |\dot{u}_T(t)|}{2} \dot{u}_T(t) \quad (23)$$

실제 적용에 있어, 준능동 TLCD시스템에서 ξ 의 수치는 수동 TLCD에 대해 획득된 ξ 의 최적수치보다 일반적으로 더 큰 값을 사용한다. 이는 수동 TLCD에 대한 ξ 의 최적수치가 가정된 설계지진하중 하의 평균응답 제어관점에서 결정되기 때문이다.

4. 예제구조물

본 논문에서는 다층의 모멘트저항 구조물로서 International Building Code (IBC, 2000)에서 언급되어있는 각각 평면과 입면 비정형성을 갖는 두 가지 구조물의 사용하여 연구를 수행하였다. 구조물들은 미국 강구조협회 (AISC)에서 제시하는 LRFD 규준에 따라서 설계되었으며, 구조물에 적용된 횡하중은 IBC 2000의 등가선형정적하중법에 의하여 구하였다.

구조물의 동적 해석을 위하여, 건물은 유한요소법으로 모델링되었다. 기둥과 보는 두개의 절점을 가지는 3차원 프레임요소로, 바닥 슬래브는 네 개의 절점을 가지는 평면요소로 모델링 되었다. 바닥 요소들은 단지 바닥질량을 생성하기 위해 사용되었고, 그들의 강성은 초기에 언급한 강체 거동 가정에 의하여 무시된다. 프레임 요소와 평면요소의 각각의 절점은 6개의 자유도(3방향 변위와 3방향 회전)를 가지고 있다.

가진력으로는, 다음과 같은 Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀

도를 이용 인공으로 생성한 지반 가속도를 사용하였다 (Spencer et al., 1994).

$$S(\omega) = S_0 \left[\frac{4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2 + \omega_g^4}{(\omega^2 - \omega_g^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \right] \quad (24)$$

여기서 ζ_g , ω_g , 와 ω 는 각각 토양의 감쇠비, 지반의 진동수, 그리고 밀도크기이다. 이러한 변수들의 수치는 특정한 지리적 위치의 지반가속도의 밀도와 특성에 의존한다. 변수 ζ_g , ω_g , and ω 에는 각각 0.65, 18.85, 4.5×10^{-3} 이 사용되었다. 그리고 다음의 시간포락함수, $\psi(t)$, 를 이용하여 지반가속도의 형태와 지속시간을 특정화 하였다.

$$\psi(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t < t_1 \\ 1 & \text{for } t_1 \leq t < t_2 \\ \exp[-c(t-t_2)] & t > t_2 \end{cases} \quad (25)$$

본 예제에서는 $t_1 = 3 \text{ sec.}$, $t_2 = 13 \text{ sec.}$, 그리고 $c = 0.26 \text{ sec}^{-1}$. 을 사용하였다. 생성된 지진의 지반가속도의 시간이력은 그림 3에 나타내었다.

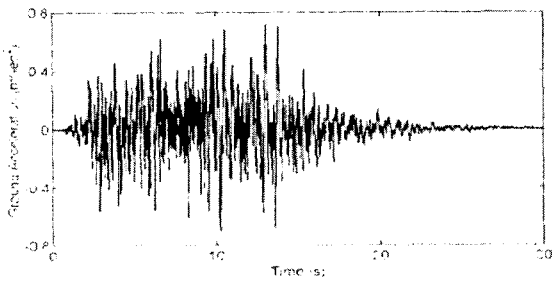


그림 3 인공지진의 가속도 시간이력

4.1 예제 구조물

이 구조물은 12층의 모멘트 저항 강골조로써, 그림 4에서 보는 것과 같이 5층에서 구조물의 평면형상이 줄어드는 형태를 취하고 있으며, 총 높이는 54m 이다. 구조물은 148개의 부재와 77개의 절점을 가지고 있으며, 경계조건, 강체 거동 제한조건, 그리고 동적응축을 부여하기에 앞서 총 462개의 자유도를 가지고 있다. 그러한 자유도는 수직 자유도들과 두 수평축에 관한 회전자유도의 Guyan 동적응축과정에 의하여 36개의 자유도로 줄어든다 (Craig, 1981).

건물의 설계에 사용된 정적하중은 슬래브에 각각 2.88 KPa (60 psf)과 2.38 KPa (50 psf)씩 균등하게 분포된 사

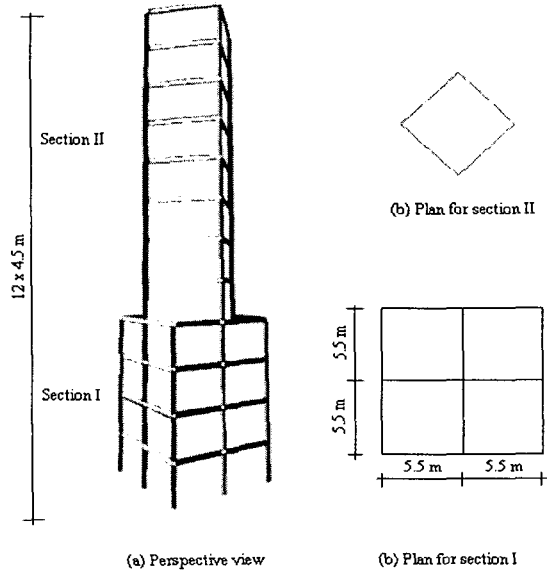


그림 4 예제구조물I : 12층 입면 비정형성을 가진 모멘트 저항 강골조

하중과 활하중으로 구성된다. IBC 2000의 등가선형 정적하중법을 사용하여 구조물의 높이에 따라 분배되는 횡하중은 측방향 힘은 총 243 KN이고 각 층 전단력은 절점질량에 비례하여 절점에 분배된다. 각 모드의 감쇠비는 2%로 가정하였다.

1차모드에서 5차모드의 모드형상을 그림 5에 나타내었다. 주기 0.583 Hz를 갖는 1차모드의 형태는 구조물의 평면대칭으로 인하여 주기 0.583 Hz인 2차모드와 방향을 제외하고는 거의 동일하다. 이와같은 1, 2차 모드는 그림 5a인 하나의 그림에 나타내었다. 마찬가지로, 4차와 5차 모드형상은 방향을 제외하고는 거의 똑같다. 그러한 형상을 그림 5c에 나타내었다. 비록 건물이 평면상에 대칭이더라도, 기둥에 사용된 H형강의 형태상 각 주축에 대하여 단면2차 모멘트가 서로 다르기 때문에 평면의 축을 이루는 두 방향의 층강성은 다르다. 이와 같이 각각의 방향에 대한 질량의 중심과 강성의 중심이 일치하지 않기 때문에 결과적으로, 횡방향 진동과 비틀림의 연계성이 발생한다. 이러한 비대칭성으로 발생하는 3차모드는 그림 5b에 나타내었다.

수치해석으로부터, x축과 y에 대해서 각각 β_a 가 -1.7과 88.1도 일때 각각의 방향의 최대 변위가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이러한 수치들은 구조물이 평면상 대칭이고 질량중심과 강성중심이 매우 가깝기 때문에 각각 0과 90도에 가깝다. 그러나 옥상층에서의 가장 큰 연계된 변위는 $\beta = -13.0$ 도 일 때 발생한다. 그 결과, 이 건물의 x 혹은 y 축에 대한 2차원 동적분석은 구조물의 최대응답을 과소평가 한다는 것을 알 수 있다. 따라서 3차원 분석은 더 정확

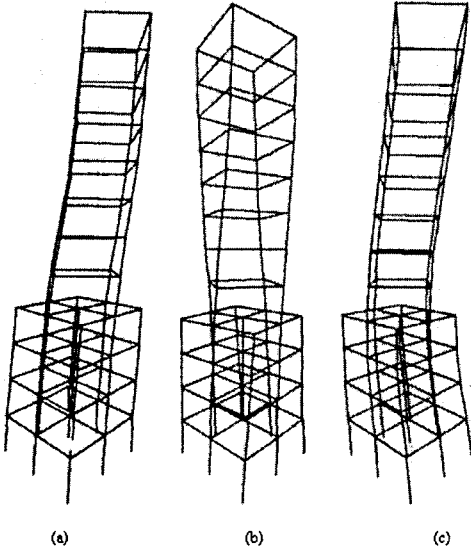


그림 5 모드형상 (예제구조물1): (a) 1차모드 (주기=0.564 Hz)와 2차모드 (주기=0.583 Hz), (b) 3차모드 (주기=0.690 Hz) (c) 4차모드 (주기=1.25 Hz)와 5차모드 (주기=1.30 Hz)

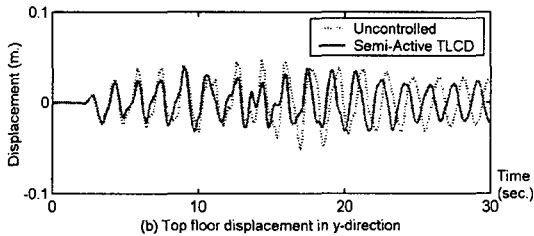
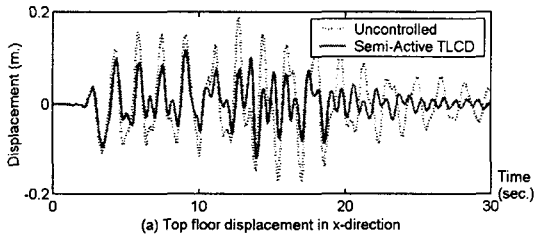


그림 6 지진을 받는 예제구조물1의 옥상층 변위 ($\beta=-13.0^\circ$)

한 결과를 얻기 위해서 수행되어야 한다.

3차원 건물에 대하여 준능동-TLCD를 설계하기 위해서는 그림 1에서 같이 두 쌍, 모두 네개의 TLCD를 평행하게 두었다. 한 방향의 한쌍은 똑같은 TLCD가 사용되었으나, 수직방향에 대한 TLCD는 다른 변수를 갖는 TLCD가 사용되었다. x방향의 TLCD는 질량비는 0.02, 진동수 비는 0.975, 최대 수두손실계수는 30, 그리고 TLCD 전체길이에 대한 수평길이비는 0.8이 사용되었다. x방향의 두 TLCD의 총질량비는 0.04이고, 이는 건물의 총질량에 1%에 해

당한다.

3차원구조물의 제어에 대하여, y방향에 대한 TLCD 시스템의 설계변수는 x축과 비슷하게 선택되었다. 이는 구조물이 평정상 대칭이기 때문이다. 그러나 x축과 y축에 대하여 강성의 차이를 감안하여 TLCD 질량과 동조진동수비는 약간씩 다르게 선택되었다. 지진을 받는 예제구조물의 옥상층 변위응답결과는 그림 6에 나타내었다.

4.2 예제구조물 II

본 예제구조물은 그림 7에서 보는 바와 같이 평정상외의 비정형성을 가진 8층의 모멘트 저항 강골조이다. 이 건물은 208개의 부재와 99개의 절점, 그리고 경계조건, 강체거동 제한조건, 그리고 동적 응축을 부여하기 전에 총 594개의 자유도를 가지고 있다. 그것들은 수직자유도와 두 축에 관하여 회전자유도의 Guyan 응축과정에 의해 24개의 자유도로 줄어든다.

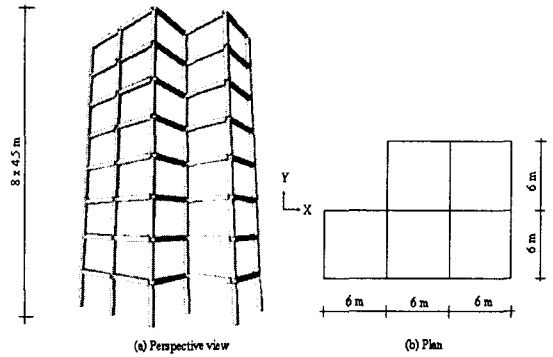


그림 7 예제구조물 2: 평면 비정형성을 가진 8층 모멘트 저항 강골조

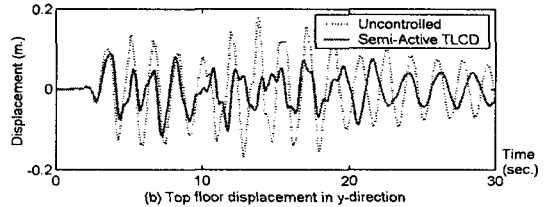
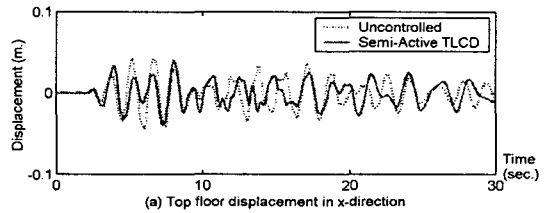


그림 8 지진을 받는 8층 건물의 옥상층 변위응답 ($\beta=83.4^\circ$)

균등하게 분포된 구조물의 정적하중인 사하중과 활하중은 각각 4.78 Kpa (100 psf)과 3.35 Kpa (70 psf)이다. 총 하중은 963 KN이고, IBC (2000)에서 제시하는 등가 선형 정적하중법을 사용하여 절점질량에 비례하여 각층에 분포한다.

평면의 비정형성으로 인하여 실질적으로 앞서 예제와 비교하여 더 비틀림이 많이 발생하는 것을 예상할 수 있다. x 와 y 방향 최대 변위는 β 가 각각 22.4, 85.6도에서 발생하였고, 반면에 연계된 옥상층의 변위는 β 가 -83.4도 일 때 가장 크게 발생한다.

TLCD들에 대한 설계변수는 예제구조물1의 수치와 비슷하게 선택하였다. β 가 -83.4도인 인공지진 EQ-I을 받는 건물에 대한 x 와 y 축의 변위응답을 그림 8에 나타내었다.

5. 결 론

지진을 받는 3차원 비정형 구조물의 응답제어를 위해 준능동 TLCD 시스템이 연구되었다. TLCD는 TMD의 특별한 형태로써 TMD와 비슷한 제어성능을 보이나 TMD에 비해 많은 실질적인 이점을 제공한다. 건물과 TLCD시스템의 연계된 운동방정식은 강체바닥과 평면과 입면의 비정형성을 가진 다층건물에 대해서 유도된다. 수직과 평면에 대하여 각각 비정형성을 가진 두 다층 모멘트 저항 강골조의 응답제어에 관한 수치해석 결과들은 준능동 TLCD제어시스템이 지진을 받는 3차원 비정형 건물의 응답을 효과적으로 줄이는 것을 보여준다.

감사의 글

이 연구는 삼성물산(주)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) AISC (1998), Manual of Steel Construction - Load and Resistance Factor Design, Vol. I, Structural Members, Specifications, and Codes, 2nd Ed., 2nd Revision, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- (2) Christenson, R. E., Spencer, B. F., Jr., Hori, N., and Seto, K. (2003), "Coupled Building Control Using Acceleration Feedback", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 18, No. 1.
- (3) Connor, J. J. (2003), Introduction to Structural Motion Control, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- (4) Craig, R. R., (1981), Structural Dynamics: an Introduction to Computer Methods, Wiley, New York.
- (5) IBC (2000), International Building Code 2000, International Code Council, Falls Church, Virginia.
- (6) Liang, S., Li, Q., and Qu, W., (2000), "Control of 3-D Coupled Responses of Wind-Excited Tall Buildings by a Spatially Placed TLCD System", Wind & Structures, Vol. 3, No. 3, pp. 193-207.
- (7) Soong, T. T. (1990), Active Structural Control: Theory and Practice, Wiley, New York. NY.
- (8) Spencer Jr., B. F., Suhardjo, J., and Sain, M. K. (1994), "Frequency Domain Optimal Control Strategies for Aseismic Protection", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 1, pp. 135-158.