

주(主)-부(副)구조 시스템을 이용한 초고층 건물의 진동제어에 관한 연구

Study on the Motion Control of Tall Building Using Mega-Sub System

김진구* 송영훈**
Kim, Jin Koo Song, Young Hoon

국문요약

모듈시스템에 기초한 megastructure 시스템은 미래의 초고층건물에 적합한 효율적인 구조시스템이다. 이 시스템의 하나 또는 여러 모듈의 내부 프레임에 거대한 외부프레임으로부터 분리하면 추가적인 질량을 설치하지 않고도 질량동조 감쇠장치의 효과를 얻을 수 있다. 이러한 주-부구조시스템의 최적설계에 미치는 요소에 대한 연구를 위해 일반적으로 간단한 2자유도계(DOF) 시스템으로 모델링할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 시스템의 운동방정식을 유도하고 2DOF으로 모델링하기 위해 만족해야하는 전제조건에 대해 연구하였다. 또한 주어진 질량과 감쇠비에서 부구조물의 최적질량을 유도하고 이것을 바탕으로 지반진동에 의한 응답스펙트럼을 구하여 주-부구조시스템의 진동제어 효과를 검증하였다.

주요어 : 모듈시스템, 주-부구조, 진동제어, 최적설계

ABSTRACT

The megastructure combined with the modular concept is an efficient structural system adequate for ultra-tall buildings for the future. An ingenious structural control system can be developed by separating the internal subframe in one or many modules from the external megafame, thus taking advantage of the effect of tuned mass dampers without adding any additional mass. This so called mega-subcontrol system is generally modeled by a 2DOF system for parametric study and for finding optimal values of the parameters. In this study the equation of motion for the system is obtained first and the preconditions for the simplified modeling are investigated. Finally the optimal value for the substructure stiffness is computed with given mass and damping ratios and transfer functions for responses are obtained for white noise ground excitation to verify the effectiveness of the mega-subcontrol system.

Key words : modular system, mega-subsystem, motion control, optimum design

1. 서 론

20세기 구조공학의 눈부신 발전에 힘입어 1940년대 이미 Empire State Building의 건설로 초고층건물 건설의 가능성이 입증되었으며 이것을 필두로 70년대 이후 미국의 New York과 Chicago를 중심

으로 많은 초고층건물이 세워졌다. 이러한 일련의 고층건물들은 그 이전의 건물들과 달리 튜브시스템과 같이 효율적인 구조시스템을 이용하여 비교적 적은 양의 구조재료를 사용하되 구조적으로 안정한 초고층건물을 구현한 것이 특징이다. 최근 경제력이 급신장한 아시아를 중심으로 초고층건물의 건설이 다시 활기를 띄고 있는데 70년대의 초고층건물들이 최적화된 구조시스템에 기반을 둔 것이 특징이라면 현대의 초고층건물은 구조시스템뿐 아니

* 정희원, 삼성물산(주) 종합기술연구소 · 선임연구원

** 삼성물산 (주) 종합기술연구소 · 선임연구원

라 고강도 콘크리트와 같은 구조재료의 발전에 힘 있는 바 크다고 할 수 있다. 최근 시공된 말레이시아의 Petronas Tower와 중국의 Jin Mao Tower는 고강도 콘크리트로 시공된 외부기둥과 내부 전단벽을 outrigger로 연결하여 횡력에 의한 전도모멘트를 외부기둥에 작용하는 축력으로 작용하도록 하여 압축력에 대한 저항능력이 뛰어난 콘크리트의 장점을 최대한으로 이용하였다. 앞으로도 이러한 추세는 계속될 전망이다. 이에 더불어 추가적인 감쇠장치에 의해 감쇠성능을 향상시키거나 더 많은 중력하중을 외부기둥에 전달하여 전도모멘트에 대한 저항능력을 높힘으로써 더 높고 경제적인 초고층구조물이 세워질 것으로 예상된다.

Megaframe시스템은 이러한 추세에 부합하는 구조형식으로 건물의 외부, 특히 각 모서리부분에 대형기둥을 배치하고 약 15-25층 간격으로 설치된 전달층 (transfer floor)을 이용하여 모든 중력하중을 외부 대형기둥으로 전달함으로써 횡력에 대한 저항능력을 극대화한 시스템이다. 외부 대형기둥은 압축력에 강한 고강도콘크리트 또는 고강도콘크리트 충전 합성강관을 사용하고 대형 외부 가새를 설치하여 모든 횡력을 가새와 기둥의 압축력으로 작용하도록 유도하면 더욱 경제적인 설계가 될 것이다.

고강도 재료의 개발과 사용에 의해 건물이 가벼워지고 세장화됨에 따라 동적 감쇠력이 저하되어 지진이나 바람과 같은 수평하중에 의해 과도한 진동을 받게 된다. 이러한 진동은 구조적 안전성뿐만 아니라 거주자의 사용성 문제를 야기시키게 된다. 구조적 안정성이 확보되었다 하더라도 사회의 발전과 더불어 생활의 질적향상에 따라 거주자의 사용성에 대한 문제가 중요한 설계 요소로 대두되고 있으며 건물이 고층으로 올라갈수록 진동에 의한 사용성 문제가 커지게 된다.

이러한 진동문제를 해결하기 위한 일반적인면서도 고전적인 방법은 구조시스템의 변화에 의해 구조물 자체의 강성을 높이는 것이다. 그러나, 이러한 방법들은 경우에 따라 비경제적일 수 있으며 최근에는 건물에 부가적인 진동제어장치를 설치하여 진동을 제어하는 연구가 활발하게 진행중에 있으며 일본과 같이 지진의 위험성이 큰 지역을 중심으로 실제 건물에 적용되는 사례가 늘고 있다. 일반적인 감쇠장치로는 점탄성감쇠기(viscoelastic damper)와 질량동조장치(tuned mass damper) 등이 사용되고 있는데 점탄성감쇠기는 건물이 전단모드로 변형이

일어날 때 진동에너지를 열에너지로 변화시켜 소산시키는 장치로 세장한 건물이나 초고층건물과 같이 기본 변형모드가 휨변형인 경우 감쇠효과가 적다.

질량 동조 감쇠기는 건물의 최상층에 부가적인 질량을 추가하여 제어하는 것으로 1차모드만을 제어하기 때문에 지진에 의해 발생할 수 있는 여러 진동모드에 효과적이지 못하다. 또한 건물이 높아지고 무거워질수록 부가되는 수동동조기의 질량도 커짐에 따라 보다 큰 관성력이 작용하게 되고 이러한 관성력은 구조적 안정성에 심각한 영향을 주게 될 수도 있다. 능동형 또는 조합형 감쇠기는 건물의 진동특성을 파악하여 작동기에 인위적인 힘을 가하여 저항하는 것으로 다양한 진동모드에 대한 제어가 가능하며 질량에 의한 관성력을 줄일 수 있으나 작동기(actuator)의 용량한계에 의해 제약을 받으며 천재지변에 의해 전원이 차단될 경우와 같이 신뢰성에 문제가 있다.

최근 megaframe시스템의 내부구조물을 외부프레임과 분리하여 진동을 제어하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며 그 효과는 이미 지반진동^{(2),(3)} 및 풍하중⁽⁴⁾에 대하여 이론적으로 검증된 바 있다.

이러한 주-부구조시스템(maga-sub structural system)에 있어 부구조물은 각 전달층 사이에 위치한 중층건물이며 주구조물은 부구조물을 지지하는 거대한 프레임 구조로 이루어져 있다(Fig. 1(a)). 주-부 구조시스템을 이용하여 진동을 제어하는 시스템의 장점은 부구조물이 자연적으로 질량동조장치(Tuned Mass Damper)의 역할을 하게 되어 다른 부가적인 제어장치 없이 진동제어효과를 얻을 수 있다는 것이다. 또한 부구조물은 거주자의 사용성이, 주구조물에서는 구조물의 안정성이 주요한 구조설계 기준으로 명확히 구별되어 효율적인 설계가 가능하다.

일반적으로 질량동조장치가 장치된 건물은 건물 및 감쇠기의 2DOF로 모델링하여 그 동적특성을 파악하고 응답을 구할 수 있다. 모든 모드가 분리된 주-부구조시스템에서도 최상부에 위치한 부구조물이 동적 거동에 가장 큰 영향을 미치게 되므로 주-부구조물을 주구조물 및 최상부의 부구조물로 단순화하여 모델링하기 위해서는 생략된 부구조물의 질량이나 강성에 의해 주구조물의 동적특성(고유진동수 및 모드형상)이 변하지 않아야 한다. 본 논문에서는 주-부 구조물을 통합된 하나의 시스템으로 해석하였을 경우의 고유진동수와 개별적으로 구한 고

유진동수를 질량비와 강성비에 따라 비교, 분석하여 상호작용에 의해 동적특성이 변화하지 않는 질량비와 강성비를 연구하였으며 이를 토대로 주-부 구조 시스템의 최적설계와 진동제어 효과를 검증하였다.

2. 운동방정식

n 개의 모듈로 구성된 주구조물에 지반진동이 가해질 때 i 모듈의 운동방정식은 식 (1)과 같으며 m_i, c_i, k_i 는 각각 주구조물의 질량, 감쇠, 강성이고 y_i 는 상대변위, \ddot{x}_g 는 지반가속도를 의미한다. 여기에 부구조물까지 고려하면 운동방정식은 식 (2)와 같이 된다. 여기서 m_i, c_i, k_i 는 각각 부구조물의 질량, 감쇠, 강성이며 z 는 부구조물의 상대변위이다. 또한 부구조물의 운동방정식은 독립적으로 표현하면 식 (3)과 같다.

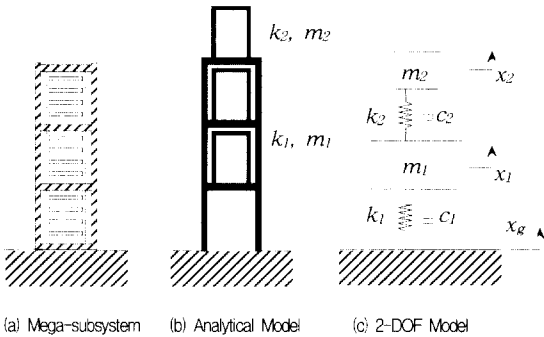


Fig. 1 Configuration of mega-subsystem structure and its analytical models

$$m_i \ddot{y}_i + (c_i + c_{i+1}) \dot{y}_i + (k_i + k_{i+1}) y_i - c_i \dot{y}_{i-1} - k_i y_{i-1} - c_{i+1} \dot{y}_{i+1} - k_{i+1} y_{i+1} = -m_i \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$\text{식(1)의 좌변} + c_{ii} \dot{y}_i + k_{ii} y_i - c_{ii} \dot{z}_i - c_{ii} \dot{z}_i = \text{식(1)의 우변} - m_i \ddot{x}_g \quad (2)$$

$$m_{ii} \ddot{z}_i + c_{ii} \dot{z}_i + k_{ii} z_i - c_{ii} \dot{y}_i - k_{ii} y_i = -m_{ii} \ddot{x}_g \quad (3)$$

이를 바탕으로 전체 구조시스템에 대하여 주구조물과 부구조물의 운동방정식을 각각 행렬식으로 나타내면 식 (4)와 (5)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} + \\ [B][C_i][B]^T\{\dot{y}\} + [B][C_i][B]^T\{y\} - \\ [B][C_i]\{\dot{z}\} - [B][K_i]\{z\} = -\{M_i\}\ddot{x}_g \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} [M_i]\{\ddot{z}\} + [C_i]\{\dot{z}\} + [K_i]\{z\} \\ - [C_i][B]^T\{\dot{y}\} - [K_i][B]^T\{y\} = -\{M_i\}\ddot{x}_g \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 i 를 설치된 부구조물의 수라고 할때 $[M_i], [C_i], [K_i]$ 는 부구조물과 관련된 $(l \times l)$ 의 대각행렬이고 $[B]$ 는 부구조물의 위치를 나타내는 $(n \times l)$ 행렬이다. 위 식들을 단순화하기 위해 주구조물의 변위를 주구조물의 모드형상 $[\Phi]$ 와 모드좌표계 $[Y]$ 로 치환하면

$$\{y\} = [\Phi][Y] \quad (6)$$

이 되고, 식 (6)을 식 (4)에 대입하고 $[\Phi]^T$ 를 양변에 곱하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} [\Phi]^T[M][\Phi]\{\ddot{Y}\} + [\Phi]^T[C][\Phi]\{\dot{Y}\} + [\Phi]^T[K][\Phi]\{Y\} + \\ [\Phi]^T[B][C_i][B]^T[\Phi]\{\dot{Y}\} + [\Phi]^T[B][C_i][B]^T[\Phi]\{Y\} - \\ [\Phi]^T[B][C_i]\{\dot{z}\} - [\Phi]^T[B][K_i]\{z\} = -[\Phi]^T[M_i]\ddot{x}_g \end{aligned} \quad (7)$$

식 (5)와 식 (7)을 합하여 행렬식으로 나타내면 식 (8)과 같은 주-부구조물의 변수가 각각 분리한 하나의 통합된 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & M_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{Y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi^T(C+BC_iB^T)\Phi & -\Phi^TBC_i \\ -C_iB^T\Phi & C_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ z \end{pmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \Phi^T(K+BK_iB^T)\Phi - \Phi^TK_i \\ -K_iB^T\Phi & K_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y \\ z \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \Phi^TM \\ M_i \end{pmatrix} \ddot{x}_g \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 주구조물의 거동은 모드변수로 표현되어 있으므로 필요한 소수의 모드만을 이용하여 동적특성을 쉽게 파악할 수 있는 장점이 있다.

3. 질량비와 강성비에 따른 고유진동수의 변화

구조물의 동적특성은 구조물 자체의 고유진동수에 큰 영향을 받게 된다. 즉, 고유진동수를 가지고 구한 진동모드가 전체적인 구조물의 거동을 지배하는 주요 요소로 작용하게 된다. 질량동조장치를 건물의 최상층에 설치하는 것이 가장 큰 효율을 얻을 수 있듯이 일반적으로 최상부에 위치한 부구조물이 가장 큰 영향을 미치게 된다. Fig. 1의 (a)와 같은 주-부 구조시스템을 (c)와 같이 주구조물(1차모드) 및 최상부 부구조물의 2DOF 시스템으로 단순화하기 위해서는 주구조물의 고유진동수가 생략된 중간

부구조물들에 의해 큰 영향을 받아 전체적인 진동 모드가 변화되지 않아야 한다. 이러한 조건을 만족하는 주-부 구조시스템은 주구조물과 부구조물에 대한 모드해석을 통하여 1차모드에 대한 질량(m_1, m_2)과 강성(k_1, k_2)을 구한 후(Fig. 1(b)), 이를 이용하여 2DOF의 단순화된 모델링을 통하여 동적특성을 파악하고 최적설계를 위한 파라미터를 결정할 수 있다(Fig. 1(c)).

고유진동수 ω_1 을 갖는 주구조물 위에 고유진동수 ω_2 를 갖는 부구조물이 설치되어 있는 경우 Fig. 1(c)와 같이 2자유도계로 모델링한 통합시스템의 특성방정식은 식 (9)와 같다.

$$\begin{vmatrix} k_2 - \omega^2 m_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_1 + k_2 - \omega^2 m_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

식 (9)에 대한 해를 구하게 되면 식 (10)과 같이 두개의 해가 구해지게 된다.

$$\omega^2 = \frac{m_2(k_1 + k_2) + m_1 k_2 \pm \sqrt{(m_2(k_1 + k_2) + m_1 k_2)^2 - 4m_1 m_2 k_1 k_2}}{2m_1 m_2} \quad (10)$$

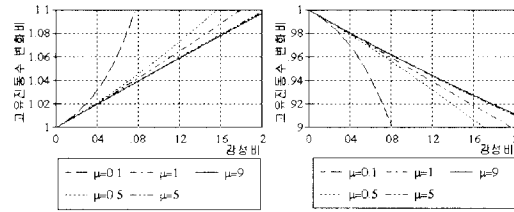
일반적으로 주구조물의 고유진동수가 부구조물의 고유진동수보다 크므로 식 (10)의 +항은 주구조물의 고유진동수를, -항은 부구조물의 고유진동수를 의미하게 되며 이를 각각의 고유진동수비와 질량비, 강성비로 표현하면 식 (11)의 (a), (b)가 된다.

$$\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 = \frac{1}{2\mu} \{ \mu(1+\alpha) + \alpha + \sqrt{\mu^2(1+\alpha)^2 + \alpha^2 + 2\mu\alpha(\alpha-1)} \} \quad (11a)$$

$$\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2 = \frac{1}{2\alpha} \{ \mu(1+\alpha) + \alpha - \sqrt{\mu^2(1+\alpha)^2 + \alpha^2 + 2\mu\alpha(\alpha-1)} \} \quad (11b)$$

여기서, $\frac{m_2}{m_1} = \mu, \frac{k_2}{k_1} = \alpha$ 이다. 상호작용에 의한 고유진동수의 변화가 없다면 식 (11)의 좌변항들은 1이 될 것이다. 식 (11)에 의한 고유진동수의 변화를 질량비와 강성비에 따라 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같이 된다. 주구조물의 고유진동수는 통합된 시스템에서 구할 경우 고주파수 영역으로, 부구조물의 고유진동수는 저주파수 영역으로 이

동하고 이러한 현상은 강성비가 커지고 질량비가 작아질수록 심화된다. 부구조물의 질량이 주구조물의 질량보다 작을 경우는 강성비에 따라 고유진동수의 변화가 크게 나타났으나 부구조물의 질량이 커질수록 이러한 현상은 둔화되는 경향을 띠고 있다.



(a) Mega Frame (b) Sub Frame

Fig. 2 Variation of natural frequencies

앞에서 설명한 바와 같이 구조물의 동적 거동 특성은 고유진동수에 의해 큰 영향을 받게 되므로 고유진동수의 변화를 어느 정도 허용하는 가가 중요한 관점이 되며 이는 질량비와 강성비에 크게 의존하게 된다. 주-부 구조시스템의 경우, 질량비는 1보다 크고 강성비는 1보다 작게 되는 것이 일반적인 현상이므로 단순한 2DOF 시스템으로도 전체 구조물의 1차모드와 관련된 동적 특성을 잘 표현할 수 있다고 할 수 있다.

4. 주-부 구조시스템의 진동제어 효과

일반적으로 건물이 낮은 크기의 풍하중이나 긴주기의 지진하중을 받는다면, 사용자의 거주성을 위해서 부구조물의 절대가속도 크기를 줄이는 것이 제어기준이 된다. 그러나, 풍하중의 크기가 커지거나 강한 지진하중을 받는다면, 구조물 자체의 안정성을 위해서 주구조물의 변위를 줄이는 것이 첫째 제어기준이 되어야 한다. 따라서, 주구조물의 변위와 부구조물의 절대가속도를 최소화하는 것이 주-부 구조시스템의 진동제어기준이 된다.

Mean Square Responses

2DOF의 해석 모델을 이용하여 크기가 S_0 인 지진하중의 백색잡음에 대한 응답 x 의 제곱의 평균 $E[x^2]$ 을 구하면 식 (12), (13)과 같다.⁽¹⁾

$$E[x_1^2] = \pi S_0 \times \frac{\begin{matrix} 2\xi_1\beta^2\omega_1^2\{\mu^2 + \mu(1+\mu)^2\beta^2\} \\ + 2\xi_2\beta\omega_1^2\{1 - (1+\mu)^2\beta^2\} + \mu(1+\mu)^2\beta^2\} \\ + 8\xi_1\xi_2\beta^2\omega_1^2(1+\mu)^2(1+(1+\mu)\beta^2) \\ + 8\xi_2^2\omega_1^2\beta^2(1+\mu)^2\{(1+\mu) + (\frac{\xi_1}{\xi_2})^2\} \end{matrix}}{D} \quad (12)$$

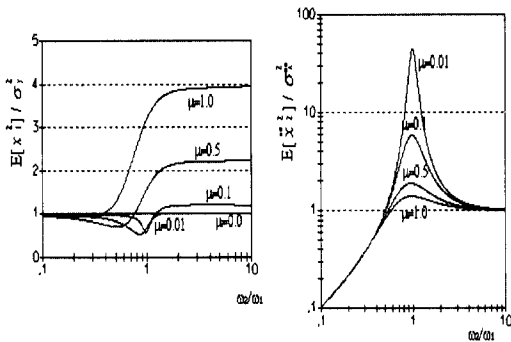
$$E[x_2^2] = 2\pi\beta^2\omega_1^2 S_0 \times \frac{\begin{matrix} \xi_1\omega_1^2(1+\mu\beta^2) + \xi_2\beta\omega_1^2(\mu + (1+\mu)^2\beta^2) \\ + 4\omega_1^2[\xi_1\beta^2 + \xi_1\xi_2(\beta + (1+\mu)\beta^2) \\ + \xi_1\xi_2^2(1+(1+\mu)\beta^2) + \xi_2^2(1+\mu)\beta] \\ + 16\xi_1\xi_2\beta\omega_1^2(\xi_1\beta + \xi_2) \end{matrix}}{D} \quad (13)$$

여기서, $\beta = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ 이고

$$D = 4\beta\omega_1^6[\mu\beta(\xi_1\beta + \xi_2)^2 + \xi_1\xi_2\{1 - (1+\mu)\beta^2\}^2 + 4\xi_1\xi_2\beta\{\beta(\xi_1^2 + (1+\mu)\xi_2^2) + \xi_1\xi_2(1+(1+\mu)\beta^2)\}]$$

이다.

이를 이용하여 주구조물과 부구조물의 감쇠비를 0.02로 가정한 후, 각 응답에 대한 제곱의 평균을 부구조물이 없을 때의 응답에 대한 제곱의 평균으로 나누어 질량비와 진동수비에 따라 나타내면 Fig. 3과 같다. 그림에 따르면 주구조물의 변위는 질량비가 클수록 커지는 반면에 부구조물의 가속도는 작아지는 경향을 보이고 있다. 또한 진동수비가 작아질수록 주구조물의 변위 및 부구조물의 가속도가 작아지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 진동 제어의 최적화 과정에서 질량비와 진동수비가 주요한 파라미터로 작용함을 알 수 있다.



(a) Ratio of displacement (b) Ratio of acceleration

Fig. 3 Mean square responses of the 2-DOF system for white noise ground excitation

최적화 과정

주구조물과 부구조물의 진동수비를 최적화 매개 변수로하여 최적화 방정식인 식 (14)와 (16)을 사용하여 β_{opt} 을 구하면 식 (15)와 (17)과 같다.

$$\frac{\partial E[x_1^2]}{\partial \beta} = 0 \quad (14)$$

$$\beta_{opt}^2 = \frac{-\mu + 2 - 4\xi_2^2(1+\mu) + \sqrt{A}}{6(1+\mu)^2} \quad (15)$$

단, $A = 16(1+\mu)^2\xi_2^2 - 8(1+\mu)\xi_2^2(2-\mu) + \mu^2 - 4\mu + 12$

$$\frac{\partial E[x_2^2]}{\partial \beta} = 0 \quad (16)$$

$$\beta_{opt}^2 = \frac{-\mu - 4\xi_2^2(1+\mu)}{3(1+\mu)^2} \quad (17)$$

최적화 방정식에서 ξ_1 의 영향을 분리하기 위하여 0으로 가정하였으며 외력이 정상백색잡음으로 가정하였다. 식 (15), (17)과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 질량비가 커짐에 따라 고유진동수비가 작아질수록 유리함을 알 수 있다. 따라서, TMD의 경우는 질량비가 구조물에 비해 매우 작으므로 구조물의 진동수에 공조시키는 것이 유리하나, 주부 구조시스템의 경우처럼 질량비가 커질 경우는 고유진동수비를 작게 하는 것이 유리하다.

수치 해석

모달시스템으로 설계된 초고층 건물을 질량집중(Lumped) 모델로 이상화한 시스템(Fig. 4(a))과 주구조물의 층간강성과 집중질량이 원래 모델의 1/2이고 나머지 질량을 부구조물로 치환한 주부시스템(Fig. 4(b))을 대상으로 백색잡음 지진하중에 대한 변위와 가속도의 전달함수를 구하여 비교 검토하였다.

$\mu = 1$ 을 이용하여 최적화된 진동수비를 구하고 차례로 부구조물의 고유진동수와 강성을 구하면 다음과 같다.

$$\beta = 0.41$$

$$\omega_2 = \beta \times \omega_1 = 1.4898, f_2 = 0.2371 \text{ Hz}$$

$$k_2 = \omega_2^2 \times m_2 = 16,646 \text{ kN/m}$$

이때 강성비 $\alpha = \frac{k_2}{k_1} = 0.033$ 이다. 이와 같은 결과를 이용하여 고유진동수를 주-부 구조시스템으로 각각 분리하여 구하였을 경우와 전체시스템으로 통합하여 구하였을 경우를 비교하면 Table 1과 같다.

Table 1 Comparison of natural frequencies

주구조물의 고유진동수(Hz)		부구조물의 고유진동수(Hz)	
분리	통합	분리	통합
1 0.5783	1 0.6324		1 0.2168
2 1.6204	2 1.6381	0.2371	2 0.2346
3 2.3416	3 2.3537		3 0.2359

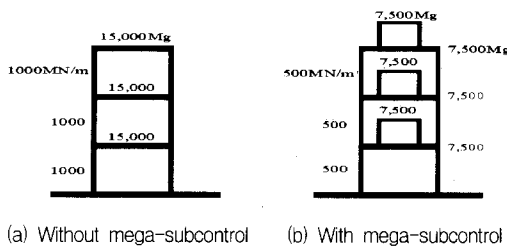


Fig. 4 Numerical example of three-module megastructures

결과에 의하면 주어진 조건하에서 각각 3자유도 및 1자유도계로 분리하여 구한 결과와 통합된 6자유도계에서 구한 결과가 매우 유사한 것을 알 수 있으며 본 연구의 의도대로 부구조에 의해 주구조의 고유진동수가 크게 변하지 않으므로 간단한 모델에 의한 본 구조물의 거동특성 파악 및 최적설계가 정당화될 수 있다고 할 수 있다.

Fig. 5는 일반적인 모듈시스템의 지반에 대한 최상층의 상대변위 및 절대가속도의 전달함수와 주-부 구조시스템에서 주구조의 지반에 대한 최상층 응답의 전달함수를 비교한 것이다. 이를 통하여 주-부 구조시스템의 최적설계를 통하여 변위 및 가속도를 상당수준 저감할 수 있음을 알 수 있다.

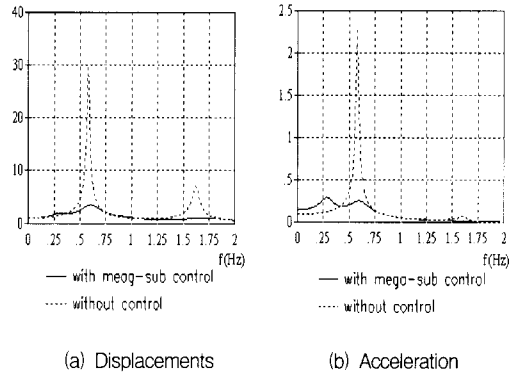


Fig. 5 Comparison of transfer functions with and without mega-sub control

5. 결 론

주-부구조는 초고층 건물의 설계를 위한 매우 경제적인 구조시스템이다. 본 연구에서는 주-부구조 건물의 운동방정식을 주구조물과 부구조물의 자유도를 각각 분리하여 구하고 동적응답특성을 파악하고 최적 설계조건을 구하기 위해 주구조물과 부구조물을 2DOF로 간략히 모델링을 하는 방법에 대해 연구하였다. 또한 주어진 질량비와 감쇠비를 바탕으로 최적 강성비를 구하고 일반적인 건물의 거동과 비교하여 주-부구조시스템의 효과를 검증하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 주-부 구조시스템을 2DOF로 모델링하기 위해서는 부구조물이 주구조물의 고유진동수, 즉 진동 모드에 큰 영향을 미치지 않아야 한다. 주구조물에 대한 부구조물의 질량비는 커질수록, 강성비는 작아질수록 영향을 미치지 않게 된다.
- 2) 주구조물에 대한 부구조물의 고유진동수비는 질량비가 커질수록 강성비는 작아질수록 감소하게 된다.
- 3) 주구조물의 변위는 질량비에 비례하고 부구조물의 가속도는 질량비에 반비례하는 경향을 나타내고 있으며 전체적으로 주구조물에 대한 부구조물의 고유진동수비가 작아질수록 감소하게 된다.
- 4) 부구조물의 TMD 효과에 의해 구조물의 상대변위 및 절대가속도가 현저히 줄어들음을 알 수 있으며, 전체적으로 같은 질량에 대해 강성을 줄임으로써 경제적인 설계를 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Crandall, H. H., and Mark, W. D., *Random Vibration in Mechanical Systems*, Academic Press, Inc. 1963.
2. Feng, M. Q., and Mita, A., "Vibration Control of Tall Buildings Using Mega- Subconfiguration," *Journal of Engineering Mechanics*, No.10, October, 1995, pp. 1082-1088.
3. Kim, J. K., "Floor Isolation System for Motion Control of Tall Buildings," Masters Thesis, MIT, 1992.
4. Zhang, R., "Optimal Structural Design for Mega-sub Buildings," *7th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 1997, Seoul, Korea.