

다중 능동형 동조질량감쇠기가 설치된 고층빌딩의 내진성능 평가

박관순 · 옥승용*

동국대학교 건축공학과 · *한경대학교 토목안전환경공학과
(2017. 8. 1. 접수 / 2017. 9. 28. 수정 / 2017. 12. 4. 채택)

Seismic Performance Assessment of High-Rise Building installed with Multiple Active Tuned Mass Dampers

Kwan-Soon Park · Seung-Yong Ok**

Department of Architectural Engineering, Dongguk University

*Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University

(Received August 1, 2017 / Revised September 28, 2017 / Accepted December 4, 2017)

Abstract : The tuned mass damper (TMD) system was first proposed as an efficient vibration control method for high-rise buildings, and multiple TMD (MTMD) system was then proposed for the purpose of improving the robust performance. Thereafter, the active TMD (ATMD) is proposed to improve the vibration control performance over the TMD and MTMD systems. However, this system may experience a system-instability problem in case of the actuator malfunction. In order to overcome such limitations of actuator malfunction causing the instability of the structural system, in this study, we investigate the feasibility of the multiple ATMD (MATMD) system that facilitates both advantages of the MTMD and ATMD. Numerical example demonstrates that, when the proposed system is designed to have the same capacity as the ATMD, it shows a similar control performance to the ATMD, but also has very good adaptive control performance against the emergency situations such as actuator failures.

Key Words : multiple active tuned mass damper, high-rise building, adaptive control performance, actuator failure, seismic performance

1. 서론

최근 들어 국내에서는 초고층 빌딩의 건설이 증가하고 있으며, 이것은 이미 세계적으로 유명한 대도시들의 특징이기도 하다. 현대의 내진·내풍 설계 기술은 높이가 800미터가 넘는 건축 구조물의 건설까지도 가능하게 했으며, 보다 더 높은 건물을 세우고자 하는 도전과 시도는 계속될 것이다. 이러한 고층건물을 지진이나 태풍과 같은 자연재해로부터 보호하기 위하여 많은 노력과 연구 및 다양한 시도가 이루어져 왔다^{1,2)}. 특히, 주파수 동조 질량체(frequency-tuned mass)를 이용한 건물의 안정성 및 사용성 확보에 관하여 수많은 연구가 이루어져 왔으며, 실제 적용도 다수 이루어졌다³⁻⁶⁾. 이는 일정한 크기의 질량체를 건물의 주기에 맞추어 건물의 상층부에 설치하고 건물에 발생하는 진동에너지를 부가 질량체의 움직임으로 흡수하는 방식으로서,

최적의 성능을 얻어내기 위한 많은 연구가 이루어졌다. Den Hartog⁷⁾는 질량, 감쇠 및 강성으로 이루어지는 동조질량감쇠기(tuned mass damper; TMD)의 최적 설계식을 제시한 바가 있으며, 이 후 여러 연구자들에 의하여 동조질량감쇠기의 적용성에 대한 연구가 다수 수행되기도 하였다^{8,9)}. 한편, 단일 동조질량감쇠기는 주파수의 동조 오차(off-tuning error)가 발생하는 경우 제어성능이 민감하게 저하되는 단점이 존재한다. 이러한 문제를 해결하고자 Abe와 Fujino¹⁰⁾는 여러 개의 작은 질량체들로 구성된 다중동조질량감쇠기(multiple tuned mass damper, MTMD)에 대한 설계식을 제시하기도 하였다. 또한, Park 등¹¹⁾은 76층 고층빌딩을 대상으로 구조물 주파수 변동에 대한 MTMD 강인성능의 매개변수연구를 수행하였으며, 그 결과로서 최적설계된 MTMD는 동일 질량을 갖는 단일 TMD(single TMD)에 비하여 주파수 변동에 대하여 우수한 강인성(robustness)을 보임

* Corresponding Author : Seung-Yong Ok, Tel : +82-31-670-5282, E-mail : syok@hknu.ac.kr

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, 327 Jungang-ro, Anseong, Kyonggi-do 17579, Korea

을 밝힌 바 있다.

이후, 보다 개선된 제어성능을 확보하고자, TMD에 하중재하기를 추가되고, 센서와 컴퓨터를 활용한 능동형 동조질량감쇠기(active tuned mass damper; ATMD)가 제시되어 고층 빌딩의 내풍성능 개선에 대한 적용성 연구가 진행된 바가 있다^{3,12)}. 또한, ATMD가 설치되어 있는 인접구조물의 내진성능 개선을 위한 방안으로 건물간 강성연결을 추가하는 시스템¹³⁾ 및 ATMD로 구성된 복합제어시스템의 최적 설계¹⁴⁾에 대한 연구도 진행된 바가 있다. 이러한 ATMD가 하중재하기로부터 생산된 제어력을 건물과 질량체에 전달함으로써 진동에너지가 더 많이 흡수할 수 있는 장점이 있음은 명확하나, 설치 공간에 따라 하중재하기의 용량이 제한되는 경우 대규모 고층빌딩에서 대용량 하중재하기의 설치 문제가 발생할 수 있다. 또한, 능동형이므로 전력 사용이 필수적인데, 전기 배전 시스템의 오류로 전력 차단 시 하나뿐인 하중재하기의 작동 불능이 발생할 수 있으며 이로부터 애초 설계된 제어성능을 충분히 발휘하지 못하는 단점이 존재한다. 이러한 한계를 극복하고자 이 연구에서는 기존 MTMD의 장점과 ATMD의 장점을 접목한 다중 능동형 동조질량감쇠기(multiple active tuned mass damper; MATMD)를 새롭게 고려하였으며, 고층 빌딩구조물의 내진성능 효과 및 일부 하중재하기의 작동 불능에 대한 적응성능(adaptive performance)을 살펴보고자 한다.

이를 위해서 먼저 MATMD가 설치된 고층구조물의 상태공간방정식을 유도하고, 다중 하중재하기의 제어력을 결정하는 최적 제어기의 설계방법에 대하여 기술하고자 한다. 그리고 제안하는 MATMD 시스템의 제진성능을 살펴보고자, 50층 고층 건물에 실제 역사지진이 발생하는 경우를 대상으로 지진응답 수치시뮬레이션을 수행하였다. 비교 목적으로 기존 ATMD시스템에 대하여도 최적설계 및 수치모사를 실시하고 그 결과를 서로 비교하였다. 또한, 일부 ATMD가 고장난 비상 상황에 대한 시뮬레이션을 통하여 제시하는 MATMD 시스템의 효율성 및 활용성을 살펴보고자 한다.

2. 시스템 모델링

2.1. 운동방정식

이 연구에서 다루고자하는 ATMD 또는 MATMD 시스템이 빌딩에 설치된 개념도를 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 1의 구조시스템에 대하여, 전단 빌딩으로 모델링되어 n 개의 자유도를 갖는 건물에 ATMD가 설치되어 지진하중을 받는 시스템의 운동방정식은 식 (1)

과 같이 표현할 수 있다.

$$M_T \ddot{\mathbf{x}}_T + C_T \dot{\mathbf{x}}_T + K_T \mathbf{x}_T = -M_T \ddot{\mathbf{x}}_g + \mathbf{b}_u u \quad (1)$$

여기서, 전체 방정식은 구조물의 자유도 n 과 ATMD 질량체의 변위를 나타내는 자유도 1개를 포함하여 총 $n+1$ 개의 자유도를 갖는다. 따라서 M_T , C_T , K_T 는 각각 ATMD가 포함된 시스템의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 의미하며 크기는 $(n+1) \times (n+1)$ 이다. 또한, \mathbf{x}_T 는 지반으로부터의 상대변위를 나타내는 응답벡터로서 $(n+1) \times 1$ 의 크기를 갖는다. $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 는 지진으로 인한 지반가속도이며, $\mathbf{1}$ 은 모든 요소가 1로 구성된 $(n+1) \times 1$ 크기의 벡터이다. \mathbf{b}_u 는 ATMD의 위치를 나타내는 $(n+1) \times 1$ 크기의 벡터로서, 최상층에 설치된 경우 $\mathbf{b}_u = [0, 0, \dots, 0, 0, -1, +1]^T$ 이 된다. 제어력을 나타내는 u 는 제어알고리즘에 따라 설계되는 제어기로부터 구조물의 응답 정보에 따라 매 순간 실시간으로 결정된다.

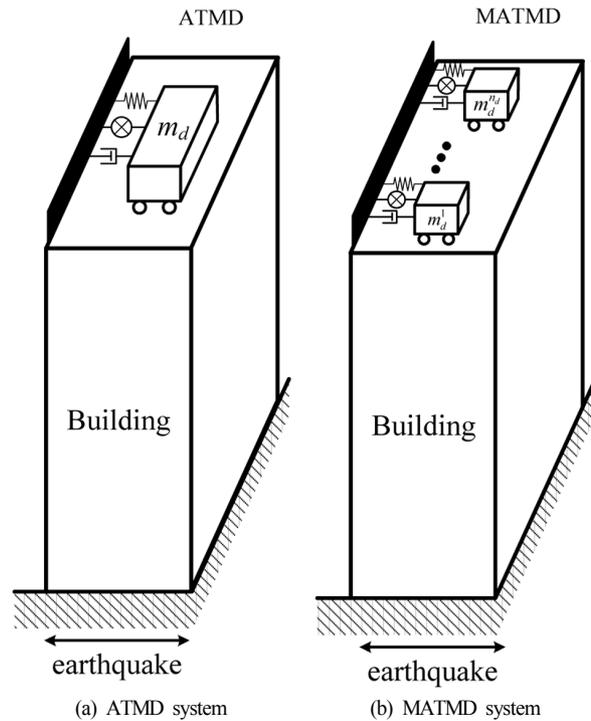


Fig. 1. High-rising building installed with TMD-type control system.

식 (1)에서 질량, 강성 및 감쇠 행렬은 구조물의 질량, 강성 및 감쇠 행렬에 ATMD의 질량, 강성 및 감쇠 계수가 추가되어 식 (2)와 같이 증대된 행렬(augmented matrix)로서 구성된다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_T &= \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & m_d \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{K}_T &= \begin{bmatrix} k_1+k_2 & -k_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & k_{n-1}+k_n & -k_n & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -k_n & k_n+k_d-k_d & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -k_d & k_d \end{bmatrix}, \quad (2) \\
 \mathbf{C}_T &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1(n-1)} & c_{1n} & 0 \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2(n-1)} & c_{2n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{(n-1)1} & c_{(n-1)2} & \cdots & c_{(n-1)(n-1)} & c_{(n-1)n} & 0 \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{n(n-1)} & c_{nm}+c_d-c_d & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -c_d & c_d \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

여기서, $m_i (i=1, \dots, n)$ 는 빌딩 i 층의 질량이며, m_d 는 ATMD의 질량이다. 또한, $k_i (i=1, \dots, n)$ 는 빌딩의 기동 강성을 나타내며, k_d 는 ATMD의 강성에 해당한다. 감쇠행렬 \mathbf{C}_T 은 구조물의 감쇠행렬 $\{c_{ij} (i, j=1, \dots, n)\}$ 과 ATMD의 감쇠계수 c_d 로부터 강성행렬과 유사하게 구성된다. 다만, 구조물의 감쇠행렬은 모달 감쇠비를 가정하여 구성되므로, 고유치해석으로부터 얻어지는 고유주파수와 감쇠비를 이용하여 산정된다¹⁵⁾. 참고로, 고유치해석 $\|\mathbf{K}-\omega_i^2\mathbf{M}\|=0$ 을 통하여 구조물의 고유주파수 ω_i 와 모드벡터 $\boldsymbol{\phi}$ 를 구할 수 있으며, 감쇠행렬은 식 $\mathbf{C}=\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}[\text{diag}(2\zeta_i\omega_i)]\boldsymbol{\phi}^{-1}$ 로부터 산정된다. 여기서, \mathbf{M} 은 식 (2)에 제시한 $n \times n$ 크기의 구조물 질량행렬이며, $\text{diag}(\cdot)$ 는 대각행렬을 의미한다. ζ_i 는 모달감쇠비이고, $\boldsymbol{\phi}$ 는 고유벡터를 나타낸다.

한편, Fig. 1(b)의 MATMD가 설치된 구조물을 고려하자. ATMD와 전체 질량을 동일한 값을 가지며, n_d 개의 질량으로 나뉜 MATMD가 설치된 구조시스템을 고려할 때, 두 시스템의 질량 관계식은 식 (3)과 같다.

$$m_d^1+m_d^2+\cdots+m_d^{n_d}=m_d \quad (3)$$

각 질량 $m_i (i=1, \dots, n_d)$ 에 연결된 강성과 감쇠계수를 각각 k_d^i 및 c_d^i 로 정의하고 그 합도 역시 ATMD의 강성과 감쇠계수와 같다고 가정하면, 식 (4)를 만족하게 된다.

$$\begin{aligned}
 k_d^1+k_d^2+\cdots+k_d^{n_d} &= k_d, \\
 c_d^1+c_d^2+\cdots+c_d^{n_d} &= c_d
 \end{aligned} \quad (4)$$

이 경우, Fig. 1(b)의 MATMD가 설치된 빌딩의 질량, 강성, 감쇠 행렬은 식 (5)와 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M}_{MT} &= \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ 0 & m_d^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & m_d^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & m_d^{n_d} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{K}_{MT} &= \begin{bmatrix} k_1+k_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & k_n + \sum_{i=1}^n k_d^i - k_d^1 - k_d^2 & \cdots & -k_d^{n_d} \\ 0 & \cdots & -k_d^1 & k_d^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & -k_d^2 & 0 & -k_d^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -k_d^{n_d} & 0 & 0 & \cdots & k_d^{n_d} \end{bmatrix}, \quad (5) \\
 \mathbf{C}_{MT} &= \begin{bmatrix} c_1+c_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & c_n + \sum_{i=1}^n c_d^i - c_d^1 - c_d^2 & \cdots & -c_d^{n_d} \\ 0 & \cdots & -c_d^1 & c_d^1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & -c_d^2 & 0 & -c_d^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -c_d^{n_d} & 0 & 0 & \cdots & c_d^{n_d} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

최종적으로, MATMD가 설치된 빌딩시스템의 운동 방정식은 식 (6)으로 표현된다.

$$\mathbf{M}_{MT}\ddot{\mathbf{x}}_{MT}+\mathbf{C}_{MT}\dot{\mathbf{x}}_{MT}+\mathbf{K}_{MT}\mathbf{x}_{MT}=-\mathbf{M}_{MT}\ddot{\mathbf{1}}x_g+\mathbf{B}_u\mathbf{u} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{M}_{MT} , \mathbf{C}_{MT} , \mathbf{K}_{MT} 는 $(n+n_d) \times (n+n_d)$ 크기의 행렬이며, \mathbf{x}_{MT} 는 구조물의 변위와 MATMD의 변위로 구성되는 $(n+n_d) \times 1$ 의 벡터이다. 앞서의 ATMD는 제어력이 1개이므로 위치벡터 \mathbf{b}_u 와 제어력 u 는 각각 $(n+d) \times 1$, 1×1 의 크기를 갖는 반면, MATMD는 n_d 개의 제어력을 가지므로 $(n+n_d) \times n_d$ 크기의 위치행렬 \mathbf{B}_u 와 $n_d \times 1$ 크기의 제어력 벡터 \mathbf{u} 로 표현되며 식 (7)과 같다.

$$\mathbf{B}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n-1) \times n_d} \\ -1 & -1 & \cdots & -1 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_{n_d} \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2. ATMD 및 MATMD의 제어기 설계

ATMD 및 MATMD의 운동을 조절하기 위한 제어기 설계는 다양한 제어알고리즘을 적용할 수 있으나, 본

연구에서는 새로운 시스템을 제안하는 것이 주목적이므로 가장 일반적으로 적용되는 LQR(linear quadratic regulator) 기법¹⁶⁾을 적용하였다. LQR 기법을 적용하기 위해서는 먼저 식 (1) 또는 (6)의 운동방정식을 상태공간방정식(state space equation)으로 변환할 필요가 있다. 이를 위해 상태벡터를 식 (8)로 정의하고,

$$\mathbf{z}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_T \\ \mathbf{x}_u \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{MT} \\ \mathbf{x}_{MT} \end{bmatrix} \quad (8)$$

이로부터 운동방정식을 상태공간방정식으로 변환하면 식 (9)를 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_w \ddot{x}_g(t) + \mathbf{E}_u \mathbf{f}_u(t) \quad (9)$$

여기서, 시스템 행렬 \mathbf{A} 는 각 시스템별로 식 (10)으로 정의되며, 하중위치벡터 \mathbf{B}_w 및 제어력 위치행렬도 각각 식 (11)과 (12)로 정의된다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_T^{-1}\mathbf{K}_T - \mathbf{M}_T^{-1}\mathbf{C}_T & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (10)$$

or

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_{MT}^{-1}\mathbf{K}_{MT} - \mathbf{M}_{MT}^{-1}\mathbf{C}_{MT} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} \end{bmatrix}_{2(n+1) \times 1} \text{ or } \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{1} \end{bmatrix}_{2(n+n_d) \times 1} \quad (11)$$

$$\mathbf{E}_u = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{b}_u \end{bmatrix} \text{ or } \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{B}_u \end{bmatrix} \quad (12)$$

$\mathbf{f}_u = u$ or \mathbf{u}

ATMD와 MATMD의 상태공간방정식에 대하여 최적 제어기 설계는 식 (13)의 성능지수 J 를 최소화하는 해로부터 구성된다.

$$J = \int_0^\infty \{ \mathbf{z}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{z}(t) + \mathbf{f}_u^T(t)\mathbf{R}\mathbf{f}_u(t) \} dt \quad (13)$$

여기서, \mathbf{Q} 와 \mathbf{R} 은 각각 상태벡터와 제어력에 대한 가중행렬로서 설계자에 의하여 결정되는 설계변수이다. 이 연구에서는 \mathbf{Q} 행렬은 단위행렬을 사용하였으며, \mathbf{R} 행렬은 r 로 설정하였다. ATMD의 경우, 제어력은 1개이므로 \mathbf{R} 행렬은 결국 $\mathbf{R} = r\mathbf{I}_{1 \times 1} = r$ 이 되며, MATMD의 경우에는 식 (14)와 같이 독립된 매개변수로 설계할 수 있으나 본 연구에서는 소규모 ATMD가 모두 동일한 가중치를 갖는다고 가정하여 $\mathbf{R} = r\mathbf{I}_{n_d \times n_d}$ 를 적용하였다.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_{n_d} \end{bmatrix} \quad (14)$$

따라서, 제어기 설계는 r 값을 일정 범위 내에서 변화시켜가면서 제어성능을 살펴본 후에 최종적으로 결정하게 된다. 주어진 \mathbf{Q} 와 \mathbf{R} 에 대하여 최종적인 제어력 \mathbf{f}_u 는 식 (15)의 대수 Riccati 방정식(algebraic Riccati equation)의 해 \mathbf{S} 를 구한 후 식 (16)으로 구해진다.

$$\mathbf{A}^T\mathbf{S} + \mathbf{S}\mathbf{A} - \mathbf{S}\mathbf{E}_u r^{-1}\mathbf{E}_u^T\mathbf{S} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (15)$$

$$\mathbf{f}_u(t) = -\mathbf{G}\mathbf{z}(t) = -r^{-1}\mathbf{E}_u^T\mathbf{S}\mathbf{z}(t) \quad (16)$$

3. 제어시스템 최적 설계

예제 구조물로 50층의 건물을 고려하였으며, 물성치는 Table 1에 제시되어 있다. 한편, 기존 연구들에서 이러한 TMD 형식의 제진장치는 최상층부에 설치되는 것이 제진 효율성이 가장 높다고 알려져 있으므로 이 연구에서도 ATMD 또는 MATMD를 50층에 설치하도록 구성하였다.

Table 1. Dynamic properties of building

buildings	property values
floors (n)	50
floor mass ($m_i, i = 1, \dots, 50$)	155.0 tons per floor
column stiffness ($k_i, i = 1, \dots, 50$)	4.287×10^9 N/m
1 st natural frequency ($\omega_1/2\pi$)	0.82 Hz
damping ratio ($\zeta_j, j = 1, 2$)	1% Rayleigh damping for 1 st & 2 nd modes

ATMD의 최적설계를 위하여 기본적인 TMD의 물성치는 Den Hartog 공식⁷⁾을 적용하여 Table 2와 같이 선정하였다. LQR 제어기 설계는 상태벡터에 대한 가중치 행렬 $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$ 를 사용하고 제어력에 대한 가중치 행렬

Table 2. Design of ATMD

ATMD	property values
installation location	50 th floor
mass (m_d)	195.73 tons (5% of 1 st modal mass)
frequency ($\omega_d = \sqrt{k_d/m_d}$)	0.78 Hz
damping ratio ($\zeta_d = c_d/2\sqrt{k_d m_d}$)	12.73%
weighting r	$r = 5.0 \times 10^{16}$

Table 3. Design of MATMD

MATMD	property values
installation location	50 th floor
number of ATMD (n_d)	9
mass ($m_d^k, k = 1, \dots, n_d$)	195.73/9 = 21.75 tons
frequency ($\omega_d^k, k = 1, \dots, n_d$)	equally spaced in a range of 0.71~0.86 Hz
damping ratio ($\zeta_d^k, k = 1, \dots, n_d$)	12.73%
weighting \mathbf{R}	$\mathbf{R} = 5.0 \times 10^{-16} \cdot \mathbf{I}$

$\mathbf{R} = r\mathbf{I}$ 을 변화시켜가면서 매개변수연구¹⁷⁾를 수행하여 최종적으로 $r = 5.0 \times 10^{-16}$ 으로 선정하였다.

MATMD의 최적설계는 동일 용량 하의 제어성능 비교를 위하여 앞서 최적 설계된 ATMD의 물성치로부터 식 (3)~(4)를 만족하도록 Table 3과 같이 선정하였다. 이 때, 질량은 동일 질량($m_d^1 = m_d^2 = \dots = m_d^{n_d}$) 9개를 사용하였으며, 강성은 ATMD 설치 시 주파수 0.78 Hz를 포함하는 범위 [0.71~0.86] Hz 내에서 균등분포되도록 구성하였다. 감쇠비는 모든 소규모 ATMD가 동일한 12.73%를 갖도록 선정하였다. 주어진 물성치에 대하여 LQR 제어기 설계는 ATMD와 동일한 방식으로 $\mathbf{Q} = \mathbf{I}$ 및 $\mathbf{R} = r\mathbf{I}$ 에 대한 매개변수연구를 수행하여 최종적으로 $r = 5.0 \times 10^{-16}$ 으로 선정하였다.

4. 제어성능 평가

제어성능 평가는 불규칙 가진(random excitations)에 대한 주파수응답해석과 실제 역사 지진 데이터를 입력 하중으로 가진하는 시간이력해석을 수행하였으며, 해석 프로그램으로는 MATLAB을 이용하였다. 시간이력 해석을 위한 지진하중은 El Centro 및 Kobe 지진¹⁸⁾의 2개 지반 가속도를 PGA(peak ground acceleration) 0.4 g로 스케일링하였다.

설계된 ATMD 및 MATMD가 설치된 빌딩구조물의 최종적인 운동방정식은 식 (16)을 식 (9)에 대입하여 식 (17)로 표현된다.

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = [\mathbf{A} - \mathbf{E}_u \mathbf{G}] \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_w \ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (17)$$

식 (17)의 상태공간방정식에 대하여 주파수 응답 함수(frequency response function; FRF)는 가진 주파수 ω 에 대하여 식 (18)로 산정될 수 있다.

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{C}_y [(i\omega)\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1} \mathbf{B}_w + \mathbf{D}_y \quad (18)$$

여기서, \mathbf{C}_y 와 \mathbf{D}_y 는 출력 행렬로서 FRF를 구하고자 하는 응답에 따라 결정되는 행렬이다. 꼭대기층의 변위 응답 FRF를 구하고자 하는 경우, ATMD가 설치된 구조시스템에 대하여는 식 (19)를, MATMD 시스템에 대하여는 식 (20)으로 정의된다.

$$\mathbf{C}_y = [\mathbf{0}_{1 \times (n-1)}, \mathbf{1}, \mathbf{0}]_{1 \times (n+1)} \quad \& \quad \mathbf{D}_y = \mathbf{0} \quad (19)$$

$$\mathbf{C}_y = [\mathbf{0}_{1 \times (n-1)}, \mathbf{1}, \mathbf{0}_{1 \times n_d}]_{1 \times (n+n_d)} \quad \& \quad \mathbf{D}_y = \mathbf{0} \quad (20)$$

4.1. 주파수 영역에서의 제어성능

불규칙 가진(random excitation)에 대한 최상층 변위의 주파수별 응답 특성을 보여주는 FRF 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 좌측 그림은 제어장치가 설치되지 않은(uncontrolled) 구조물과 ATMD 또는 MATMD가 설치된 구조물의 50층 변위응답의 FRF이다. 여기서 ATMD와 MATMD는 능동제어력을 발휘하지 않고 TMD로만 진동제어를 하는 수동 모드의 FRF에 해당한다. 그림에서, 빌딩의 고유진동수에 해당되는 0.82(Hz) 부근에서 공진으로 응답이 크게 증폭되는 것을 알 수 있다. 비제어시와 비교하여 볼 때, 두 시스템 모두 수동 모드에서도 큰 폭으로 진폭을 감소시킴을 알 수 있다. ATMD시스템과 MATMD시스템 간의 성능차이는 거의 없으며 비슷한 피크(peak) 값을 가진다. ATMD시스템에서는 두 개의 피크 값이 명확하나, MATMD에서는 9개로 나뉘어진 질량으로 인하여 피크가 뚜렷하지 않고 분산되어 평활화되는 특징을 보인다. 이러한 평활화되는 특징은 다양한 주파수 영역에서 주파수 동조 오차로 인한 응답의 증폭(제진성능 저감)이 민감하게 발생하지 않음을 나타내므로, MATMD시스템의 강인성능(robust performance)을 보여주는 결과라 할 수 있다. 우측 그림은 두 시스템이 좌측 그림에서 제시한 수동 모드와 능동 모드로 작동될 때의 FRF를 비교 도시

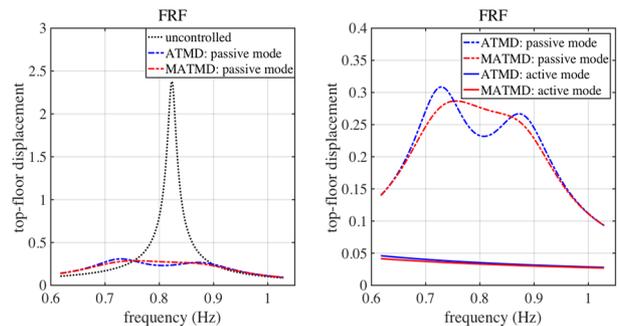


Fig. 2. Comparative top-floor FRF between uncontrolled, ATMD- and MATMD-controlled systems.

한 결과이다. 비록 수동 모드에서 큰 폭의 응답 감소 효과가 있었으나, 능동 모드에서는 수동 모드보다 더욱 큰 응답의 감소 효과를 보이고 있음을 알 수 있다. 능동 모드에서의 ATMD와 MATMD 두 시스템 간 성능 차이는 거의 없는 것으로 관측된다.

4.2. 시간 영역에서의 제어성능

2가지 지진에 대한 성능결과가 유사한 경향을 보이므로 본 절과 다음 절에서는 지면 관계상 하나의 지진에 대한 결과만을 수록하고자 한다. 시간이력해석 결과로서 0.4 g로 스케일된 Kobe 지진에 대한 건물 최상층의 변위응답을 Fig. 3에 도시하였다. 비교 대상으로는 비제어시스템과 MATMD의 수동 모드 및 능동 모드의 결과를 고려하였다. 그림에서 제어시스템에서 응답저감효과를 확연히 확인할 수 있으며, 최대값 측면에서는 수동 모드에서 약 23.56%, 능동 모드에서 약 72.77% 정도의 응답 감소 효과가 있는 것으로 나타났다. 특히, 수동 모드에서는 피크 이후의 진동에 대해서는 충분한 제진효과를 발휘하지만 초기 진동의 증폭은 충분히 억제하지 못하는 반면, 능동 모드에서는 초기 진동에 대해서도 응답을 급속히 감소시킴으로써 우수한 제어성능을 보이는 결과를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 ATMD와 MATMD의 변위응답시간이력을 비교 도시한 결과이다. 각각 수동 모드와 능동 모드의 응답 이력곡선을 보여주는데, 두 시스템이 일부 미세한 차이만 보일 뿐 거의 비슷한 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 비제어시 응답(26.41 cm)에 대한 저감율을 살펴볼 때, ATMD 시스템은 수동 모드에서 23.70%(20.15 cm), 능동 모드에서 72.30%(7.32 cm)의 응답 저감율을 보임으로써 MATMD의 23.56%(20.19 cm)와 72.77%(7.19 cm)와 매우 유사한 수준임을 알 수 있다.

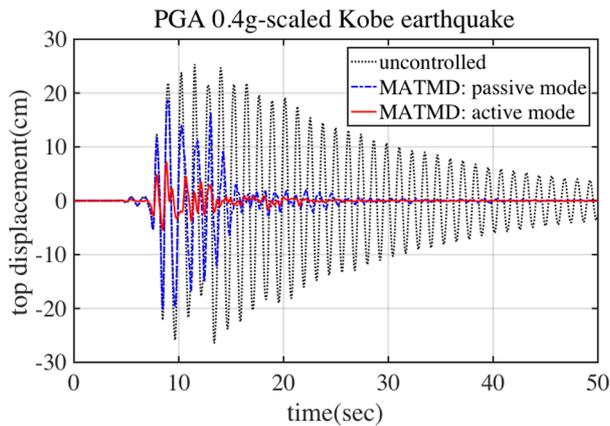


Fig. 3. Time history curves of top displacement between uncontrolled & passive/active MATMD systems.

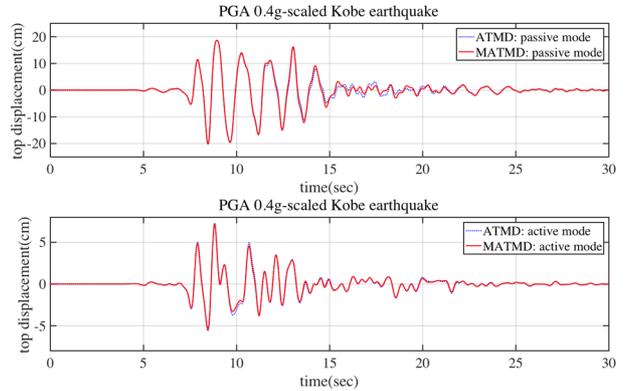


Fig. 4. Time history curves of top displacement between ATMD and MATMD systems.

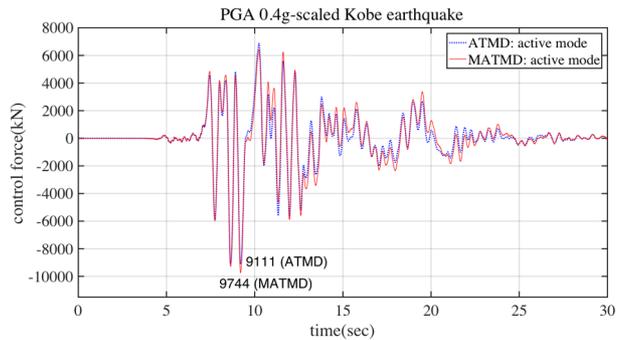


Fig. 5. Time history curves of control forces of ATMD and MATMD systems.

Fig. 5에서는 ATMD시스템과 MATMD시스템에서 사용한 제어력의 시간이력을 도시하였다. 여기서 MATMD의 경우는 9개 질량체의 운동을 조절하기 위한 9개의 하중재하기에서 매 순간 필요한 제어력을 발휘하므로, MATMD 제어력은 매 순간 9개 제어력의 합을 도시한 결과이다. 두 시스템의 제어력이 전반적으로 비슷한 경향을 보이나, 최대값을 기준으로 비교하면, ATMD가 9,111 kN의 제어력을 소요하는 반면 MATMD는 9,744 kN으로 약 6.4% 정도 높은 값을 나타내고 있다. 그러나, 9개의 질량에 요구되는 최대 제어력은 평균 1098.8 kN(1,030~1,234)으로 나타났다. 즉, 하나의 하중재하기로만 움직이는 ATMD시스템은 큰 용량의 하중재하기가 필요한 반면, MATMD시스템에 요구되는 하중재하기는 상대적으로 매우 작은 값의 제어력만을 필요로 하는 것으로 나타났다. 따라서, 큰 용량의 하중재하기를 적용하기가 부담스럽거나 용량의 한계로 인하여 불가능한 경우, MATMD가 상대적으로 유리하게 적용될 수 있는 장점을 가진다고 할 수 있다.

4.3. 하중재하기 파괴에 따른 적응제어성능

하중재하기가 작동하지 않는 비상 상황에서 ATMD

와 MATMD에 의하여 제어되는 각 층별 최대 변위 응답을 Fig. 6에 도시하였다. 그림에서 수직축은 빌딩의 층을, 수평축은 각 층별 최대 변위응답을 나타낸다. 하중재하기의 파괴가 없는 정상상태에서의 ATMD와 MATMD의 제어성능은 앞선 결과들에서 나타난 바와 같이 그 차이가 크지 않으므로 ATMD의 정상상태 응답 결과는 생략하고, MATMD의 정상상태 응답 결과만을 비교 목적으로 제시하였다. 참고로, MATMD 시스템에서 하중재하기 파괴 경우는 4개의 질량체에 대한 하중재하기가 작동하지 않는 경우(총 9개중 1, 4, 5, 8 번째 하중재하기 작동불능)를 임의로 선정하고 응답을 조사하였다. 임의로 선정한 이유는 MATMD 시스템에서 하중재하기의 순서에 따른 성능 변화는 크지 않으므로 작동하지 않는 하중재하기의 선정이 전체 시스템의 제어성능 변화에 미치는 영향도 거의 유사하기 때문이다. 또한, ATMD 시스템에서는 하중재하기가 하나 뿐이므로 하중재하기가 작동하지 않는 경우 수동 모드로 움직이게 된다. Fig. 6은 El Centro 지진이 작용하는 경우로서, ATMD에서 하중재하기가 작동하지 않는 경우 수동 모드의 제어성능을 보임으로써 정상상태의 능동 모드 MATMD에 비해 제어성능이 현저히 떨어지는, 즉 층별 최대 변위가 큰 폭으로 증가하는 결과를 확인할 수 있다. 이 경우라도 비제어시 응답보다는 약 24%의 저감 효과를 가짐을 명심할 필요가 있다. 그에 반해, MATMD의 경우에는 4개의 하중재하기가 작동불능인 상태에서도 정상상태와 비교해서 제어성능의 저하가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

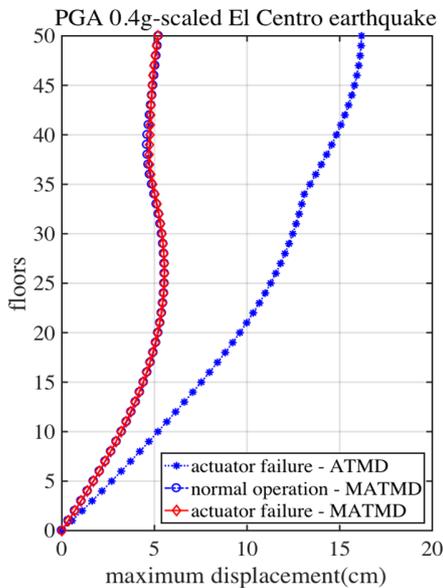


Fig. 6. Maximum floor displacement distribution in case of actuator failure.

Table 4. Maximum control forces of ATMD and MATMD systems in normal and emergency cases

System	normal operation		emergency (4 actuators failed)	
	ATMD	MATMD	ATMD	MATMD
Maximum Control Force (kN)			1,529	-
			1,489	2,958
			1,453	2,888
			1,420	-
	11,766	12,595	1,391	13,795
			1,364	2,714
			1,339	2,665
			1,316	-
			1,295	2,579

Table 4에서는 정상 운영 상태 및 비상 상황에서의 두 제어시스템이 필요로 하는 최대 제어력을 제시하였다. 정상 작동 시에는 ATMD에 비해 MATMD 시스템이 약 7% 증가된 제어력을 필요로 하는 반면, 비상 상황에서는 약 17%로 더 큰 제어력을 필요로 한다. 이처럼 17%의 제어력 증가로 Fig. 6에서 도시한 바와 같이 제어성능의 저하가 거의 발생하지 않는 것은 제시하는 MATMD 시스템의 하중재하기 파괴와 같은 비상 상황에 대한 적응제어성능을 보여주는 결과라 할 수 있다.

Table 5. Adaptive control performance of MATMD against actuator failures

actuator failure scenario	top-floor peak displacement (cm)	peak control forces (kN)	instantaneous peak power (kW)	total power (kW)
normal operation	5.22	12,594	4.58×10^4	1.15×10^5
no. 3	5.20	12,540	5.14×10^4	1.31×10^5
no. 3,7	5.17	12,461	5.85×10^4	1.49×10^5
no. 3,7,5	5.13	12,691	6.78×10^4	1.78×10^5
no. 3,7,5,2	5.05	13,814	9.24×10^4	2.32×10^5
no. 3,7,5,2,8	5.00	14,425	1.32×10^5	3.07×10^5
no. 3,7,5,2,8,1	5.08	17,536	2.70×10^5	7.24×10^5
no. 3,7,5,2,8,1,9	8.23	27,762	9.91×10^5	2.02×10^7
no. 3,7,5,2,8,1,9,4	5.13×10^4	1.39×10^8	6.43×10^{13}	1.01×10^{14}

다음으로, MATMD에서 정상적으로 작동하는 하중재하기의 개수를 바꾸어가며 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과로서 최상위층 최대변위응답, 최대제어력, 순간최대전압 그리고 전체전압소요총합의 변화를 Table 5에 도시하였다. 하중재하기 작동불능 시나리오는 Table 5에 제시한 바와 같이, 3-7-5-2-8-1-9-4의 순으로 가정하였다. 그리고, 순간최대전압은 각 하중재하기

에서 매 순간 사용하는 전압을 합산하여 전체 하중재하기가 사용하는 총 전압 소요량 중 가장 큰 값을 산정하였으며, 전체전압소요총합은 각 하중재하기가 전체 지진 발생시간 동안 소요하는 전체 전압의 합산 총량을 의미한다. Table 5에서 일부 하중재하기가 작동하지 않더라도 제시하는 시스템은 남은 하중재하기만으로 최대한 제어성능을 유지하고 있음을 알 수 있다. 7개 이상 파괴되는 경우에는 응답 및 제어용량이 비정상적으로 증가하면서 시스템이 불안정해지는 것을 알 수 있다. 다수의 하중재하기에 문제가 있는 경우 시스템이 불안정해질 수는 있으나, 이런 경우에는 하중재하기의 전력을 차단함으로써 수동모드로 전환하면 이러한 불안정성 문제를 방지할 수 있다. 다만, 제안하는 시스템에서 6개의 TMD 파괴에 대하여도 일정 수준의 성능을 보장함은 주어진 문제에 국한될 뿐이며 대상 구조물 및 하중에 따라 그 개수는 달라질 수 있을 것이다.

5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 기존 MTMD와 ATMD의 장점만을 고려한 MATMD 시스템을 제시하고, 제시하는 시스템의 최적설계 및 제진성능 평가를 다루었다. 대상 구조물로는 50층 고층 빌딩구조물을 고려하였으며, 제진성능을 주파수응답해석과 시간이력해석을 통하여 평가하였다. 수치해석 결과, 기존 ATMD 시스템과 유사한 제어성능으로 설계된 제안 MATMD 시스템이 하중재하기의 작동 불능과 같은 비상 상황에서도 정상 운영 상태에 근접하는 제진성능을 확보함으로써 적응성을 갖는 반면, 기존 ATMD 시스템은 하중재하기의 작동 불능에 대하여 급격한 성능저하를 유발함으로써 여유도가 없음을 확인하였다. 따라서 제안하는 시스템은 하중재하기의 오작동으로 인하여 제어력을 설계대로 발휘하지 못하는 비상 상황에서도 일정 수준 이상의 제어성능을 보장해줌으로써 보다 신뢰성 있는 시스템으로 그 효용성이 높다고 판단된다.

감사의 글 : 이 논문에서 교신저자는 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원(2017R1D1A1B04031418)을 받아 연구를 수행하였으며 이에 감사드립니다.

References

1) B. F. Spencer Jr. and M. K. Sain, "Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback", IEEE Control Systems

Magazine on Emerging Technology, Vol. 17, No. 6, pp. 19-35, 1997.

2) A. Kareem, T. Kijewski and Y. Tamura, "Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications", Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, pp. 201-251, 1999.

3) S. Ankireddi and H. T. Y. Yang, "Simple ATMD Control Methodology for Tall Buildings Subject to Wind Loads", Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 1, pp. 83-91, 1996.

4) Q. S. Li, L. H. Zhi, A. Y. Tuan, C. S. Kao, S. C. Su & C. F. Wu, "Dynamic Behavior of Taipei 101 Tower: Field Measurement and Numerical Analysis", Journal of Structural Engineering, Vol. 137, No. 1, pp. 143-155, 2010.

5) A. Nishitani and Y. Inoue, "Overview of the Application of Active/Semiactive Control to Building Structures in Japan", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, No. 11, pp. 1565-1574, 2001.

6) S.Y. Ok and S. M. Kim, "New Vibration Control Approach of Adjacent Twin Structures using Connecting Tuned Mass Damper", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 3, pp. 92-97, 2017.

7) J. P. Den Hartog, "Mechanical Vibrations", 4th ed., McGraw Hill, Inc., New York, 1956.

8) R. Villaverde, "Reduction in Seismic Response with Heavily-damped Vibration Absorbers", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 13, pp. 33-42, 1958.

9) F. Sadek, B. Mohraz, A. W. Taylor and R. M. Chung, "A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, pp. 617-635, 1997.

10) M. Abe and Y. Fujino, "Dynamic Characterization of Multiple Tuned Mass Dampers and Some Design Formulas", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, No. 8, pp. 813-835, 1994.

11) K. S. Park, H. M. Koh, W. Park and S. Y. Ok, "Optimal Design of Multiple Tuned Mass Damper Considering Model Uncertainty of Structural System", Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 22, No. 3-A, pp. 533-543, 2002.

12) N. Yan, C. M. Wang and T. Balendra, "Optimal Damper Characteristics of ATMD for Buildings under Wind Loads", Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 12, pp. 1376-1383, 1999.

13) K. S. Park and S. Y. Ok, "Seismic Response Enhancement

- through Stiffness Connection of Two Adjacent Buildings Equipped with ATMD”, Journal of The Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 5, pp. 47-53, 2017.
- 14) K. S. Park and S. Y. Ok, “Optimal Design of Hybrid Control System through Inter-building Connection”, Journal of The Korean Society of Safety, Vol. 32, No. 5, pp. 47-53, 2017.
- 15) A. K. Chopra, “Dynamics of Structures-theory and Applications to Earthquake Engineering”, Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, 1995.
- 16) F. L. Lewis, “Applied Optimal Control and Estimation”, Prentice Hall PTR, 1992.
- 17) K. S. Park, H. M. Koh, S. Y. Ok and C. W. Seo, “Fuzzy Supervisory Control of Earthquake-excited Cable-stayed Bridges”, Engineering Structures, Vol. 27, pp. 1086-1100, 2005.
- 18) M. S. Kim, S. Y. Ok and K. S. Park, “Seismic Response Control of Adjacent Structures by Semi-active Fuzzy Control of Magneto-rheological Damper”, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 13, No. 3, pp. 39-50, 2009.