

# 하중의 불확실성을 고려한 선형구조제어 시스템의 최적설계

## Optimal Design of a Linear Structural Control System Considering Loading Uncertainties

박원석<sup>1)</sup> · 박관순<sup>2)</sup>

Park, Wonsuk · Park, Kwan-Soon

**국문 요약** >> 불확실성을 가지는 하중의 변동성을 고려한 구조제어시스템의 최적설계방법에 관하여 연구하였다. 일반적인 제어시스템의 설계 문제가 구조물과 제어시스템간의 상호작용 고려하여 구조-제어 시스템을 최적화이나, 이 연구에서는 하중-구조물-제어 시스템간의 상호작용에 대한 최적설계방법에 관하여 다루었다. 구조물의 응답을 최대화하는 하중과, 이를 최소화하는 구조제어시스템을 동시에 구하는 최대-최소문제(Min-max Problem)를 정식화하고, 최적설계변수를 효율적으로 찾는 방법으로 병렬진화 알고리즘을 이용하여 불확실성이 존재하는 선형구조제어시스템의 최적설계방법을 제시하였다. 지진하중을 받는 구조물의 제진시스템 설계 예 및 수치해석을 통하여 연구한 방법의 타당성을 검증하였다.

**주요어** 불확실성, 구조제어시스템, 최대-최소문제, 최적설계, 병렬진화알고리즘

**ABSTRACT** >> An optimal design method for a structural control system considering load variations due to their uncertain characteristics is studied in this paper. The conventional design problem for a control system generally deals with the optimization problem of a structural control system and interaction between the structure and the control device. This study deals with the optimization problem of a load-structure-control system and the more complicated interactions with each other. The problem of finding the load that maximizes the structural responses and the structural control system that minimizes the responses simultaneously is formulated as the min-max problem. In order to effectively obtain the optimal design variables, a co-evolutionary algorithm is adopted and, as a result, an optimal design procedure for the linear structural control system with uncertain dynamic characteristics is proposed. The example design and simulated results of an earthquake excited structure validates the proposed method.

**Key words** Uncertainty, Structural control system, Min-max problem, Optimal design, Co-evolutionary algorithm

### 1. 서론

최근에 이르러 구조물의 건설에 창의적인 디자인 개념이 적극적으로 받아들여짐에 따라 과거에는 볼 수 없었던 새로운 독특한 형상의 구조물들이 건설되고 있다. 이러한 구조물들은 대부분 다양한 하중에 의한 동적 거동이 설계의 주요 지배 요소가 되는 경향을 보이게 되며 지진이나 바람과 같은 동적 하중으로 인한 진동에 대하여 사용성과 안정

성을 확보하는 것이 해결해야만 하는 주요한 문제로 대두되고 있다. 또한 진동문제를 해결하기 위한 방법으로서 다양한 진동제어시스템(Vibration Control System)이 개발 및 적용되고 있으며 꾸준한 연구가 이루어져 왔다.<sup>(1-6)</sup> 국내에서도 여러 진동제어 시스템의 개발과 모델링 및 제어알고리즘 분야의 연구를 수행해오고 있다.<sup>(7-12)</sup> 장치 개발 및 모델링의 경우 새로운 형식의 감쇠장치(Damping Devices)를 개발하고 이를 적절히 설계하기 위한 동역학적 수치모형을 개발하는 연구가 수행되고 있으며<sup>(13-20)</sup>, 제어알고리즘 분야는 주어진 구조물에 장착될 제어 장치의 최적 작동 및 운영 방법을 결정하는 제어법칙 개발에 대한 연구가 주류를 이룬다.<sup>(21-26)</sup> 그러나, 기존의 많은 제어시스템에 대한 연구들이 제어 목표의 설정 시에 특정 응답을 최소화 하는 데에 집중하고 있으며 다양한 하중이나 구조시스템에 존재하는 불확

<sup>1)</sup> 서울대학교 교량설계핵심기술 연구단 연구원

<sup>2)</sup> 정회원 · 동국대학교-서울캠퍼스 건축공학과 부교수  
(교신저자: kpark@dongguk.edu)

본 논문에 대한 토의를 2011년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 8. 10 / 수정일 1차: 2010. 9. 17, 2차: 2010. 9. 20 / 게재확정일 : 2010. 9. 20)

실한 동특성을 충분히 고려하지 못하여 고효율의 제어시스템을 설계하는 데에는 충분하지 않을 수 있다. 제어시스템의 설계문제에서 불확실성을 고려하기 위한 하나의 방법으로, 주어진 시스템의 최적화를 시도한 후 가능한 여러 개의 하중 조합에 대하여 설계된 시스템이 만족할 만한 성능을 나타내는 가를 조사하여 설계된 제어시스템의 강인성을 평가할 수도 있다. 그러나, 지진이나 강풍과 같은 자연계의 불확실한 하중들에 대해서는 다양한 변동성을 모두 검토하기 어렵다. 따라서, 설계된 제어시스템이 경우에 따라서는 특정한 하중성분에 대하여 충분한 성능을 발휘하지 못하거나 제어에 실패하는 경우가 발생할 수도 있다. 따라서 이 연구에서는, 불확실한 하중을 최적화 과정에 포함시켜서 구조물 응답을 최대화 하는 하중과, 이를 최소화 하는 구조 설계를 동시에 구하는 최소-최대화 문제(Min-max Problem)를 구성하고, 정식화한 최대-최소 문제의 해를 구하는 방법으로 병렬진화 최적화 알고리즘(Co-evolutionary Optimization Algorithm)을 적용하여 하중의 불확실성이 존재하는 선형 구조제어 시스템의 최적설계방법을 제시하였다.

2장에서는 지진하중을 받는 구조-제어 시스템의 운동방정식을 기술하고, 3장에서는 지반운동의 불확실성을 다루었으며, 4장에서는 최대최소문제 정식화 방법과 병렬 최적화 방법을 기술하였다. 5장에서는 지진하중을 받는 구조물의 제진 시스템 설계 예 및 수치해석을 통하여 연구한 방법의 타당성을 검증하고자 하였다.

## 2. 지진하중을 받는 구조제어시스템

$n_f$ 개의 자유도를 갖는 구조제어시스템의 운동방정식은 상태변수(State Variable)를 도입 함으로서 1차의 벡터-행렬 미분방정식, 즉, 상태공간방정식(State Space Equation)으로 변환할 수 있다.

$n_f$ 개의 자유도를 가진 구조물이  $q$ 개의 지점에서 외부하중  $w(t)$ 를 받고 있다면 운동방정식은 다음 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{z}(t) = \mathbf{E}_1 w(t) \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{z}(t)$ 는  $(n_f \times 1)$ 의 변위벡터,  $w(t)$ 는  $(q \times 1)$ 의 외부하중벡터,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ 는 각각  $(n_f \times n_f)$ 의 질량행렬, 감쇠행렬, 그리고 강성행렬,  $\mathbf{E}_1$ 은 외부하중의 위치행렬( $n_f \times q$ )을 의미한다.

일반적인 수동적 제어방법(Passive Control Method)으

로서 강성을 조절하여 구조물의 고유진동수를 변화시키거나, 감쇠능력을 높이기 위하여 여러 가지 댐퍼를 고려할 수 있으며, 부가의 질량을 이용하기도 한다. 그리고 능동제어방법(Active Control Method)은 하중재하기를 이용하여 외부에서 공급되는 제어력을 직접 구조물에 전달하게 된다. 부가의 질량, 강성, 감쇠로 인한 효과를 각각  $\mathbf{M}_p$ ,  $\mathbf{C}_p$ ,  $\mathbf{K}_p$  그리고  $n_c$ 개의 하중재하기로부터 여러 형태로 전달되는 제어력을  $\mathbf{u}(t)$ 라 하면, 식 (1)의 운동방정식은 수동 및 능동제어장치의 효과로 인하여 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{z}}(t) + \mathbf{K}_i \mathbf{z}(t) = \mathbf{E}_1 w(t) + \mathbf{E}_2 \mathbf{u}(t) \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{M}_i = \mathbf{M} + \mathbf{M}_p$ ,  $\mathbf{C}_i = \mathbf{C} + \mathbf{C}_p$ ,  $\mathbf{K}_i = \mathbf{K} + \mathbf{K}_p$  이며,  $\mathbf{E}_2$  ( $n \times n_c$ )는 작용하는 제어력벡터  $\mathbf{u}(t)$ 의 위치를 나타내는 행렬이다. 그런데 동조질량감쇠장치(Tuned Mass Damper)와 같은 경우는, 시스템의 해석 및 설계에 있어서 거동을 표현하기 위한 필요한 자유도를 방정식에 추가 시켜야 하는 경우도 있다.

상태변수  $\mathbf{x}(t)$ 를 다음 식 (3)과 같이 정의하면,

$$\mathbf{x}(t) \equiv \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} z(t) \\ \dot{z}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

이제 구조제어시스템의 상태공간방정식은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 다음 식 (4)로 표현된다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}w(t) \quad (4)$$

여기서,  $\mathbf{A}$ 는 시스템행렬,  $\mathbf{B}$ 는 제어행렬,  $\mathbf{E}$ 는 외란행렬이며 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{K}_i & -\mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{C}_i \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{E}_2 \end{bmatrix}, \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_i^{-1}\mathbf{E}_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

이때, 외부에서 주어지는 하중이 지반으로부터 전달되는 지진이라면 위의 식 (4)는 다음 식 (6)과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \begin{bmatrix} [0 \quad \dots \quad 0]^T \\ \mathbf{M}^{-1}[1 \quad \dots \quad 1]^T \end{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \quad (6)$$

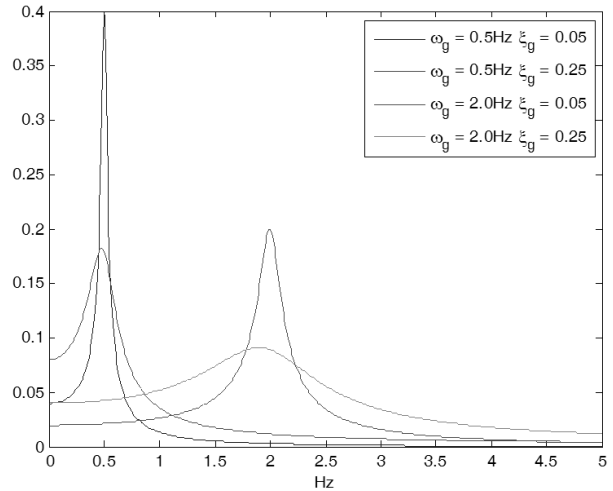
여기서  $\ddot{x}_g(t)$ 는 지진에 의한 지반 가속도이며 불확실한 동적 하중이 된다.

### 3. 지진하중의 불확실성

구조물의 지진응답 제어시스템을 설계할 때에 가장 큰 불확실성은 입력지반운동(Input Excitation Model) 자체의 불확실성이다. 자연 현상인 지진에 대한 완벽한 수학적 모델을 만드는 것은 불가능하지만 지진이 가지고 있는 특성에 기반하여 구조공학적으로 의미가 있는 여러 가지 지반운동 모형이 사용되고 있다. 가장 대표적인 방법은 현재 빌딩이나 교량 등의 내진 설계에 폭넓게 사용되고 있는 설계응답스펙트럼(Design Response Spectrum) 방법이 있다. 이 방법에서는 구조물의 고유진동수에 따른 가속도 계수 값을 설계응답 스펙트럼으로부터 결정하고 그에 따라 구조물에 작용하는 최대지진하중을 결정하여 내진설계를 가능하도록 한다. 구조물의 지진응답제어시스템의 설계에 사용할 수 있는 다른 지반운동모델로서 대표적인 방법은 입력지반운동을 하나의 동적 필터(Filter)로 표현하는 방법이다. 이 방법은 신호의 세기와 진동수 특성을 동적 시스템으로 표현하는 필터 시스템모델(Filter System Model)을 입력지반운동에 적용하는 방법으로서 진동수 영역에서 스펙트럼 표현이나 시간 영역에서 미분방정식 형태로 표현되는 것이 대표적이다. 이 방법은 특히 동적 시스템의 표현에 적합하고, 불규칙 진동 해석과 같은 확률적 해석에 매우 편리하기 때문에 풍하중, 파랑하중, 지진하중과 같이 동적인 하중에 대한 모델링에 많이 사용된다. 특히 이 방법에서는 동적 필터의 모델과 그 모델의 매개 변수에 따라 사실상 무한한 형태의 특성 표현이 가능하므로 적용성이 매우 높다. 또한 입력지반 운동의 여러 불확실성을 필터 모델의 매개 변수 불확실성으로 표현하고 해석에 사용할 수 있으므로 입력지반운동의 불확실성을 고려한 연구에 적합하다. 따라서, 이 연구에서는 입력지반운동의 모형으로서 다음과 같은 Kanai-Tajimi 필터<sup>(27-29)</sup>에 기반한 입력지반운동모델을 사용하여 구조물 지진응답 제어시스템을 설계하였다. 이 필터는 입력지반운동을 다음 식과 같은 스펙트럼 밀도함수를 가진 정상랜덤프로세스(Stationary Random Process)로 가정한다.

$$\Phi(\omega) = S_0 \frac{\omega_g^4 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_g \omega_g \omega)^2} \quad (7)$$

여기서  $S_0$ 는 백색잡음(White Noise)의 스펙트럼 밀도 상수이고,  $\omega_g, \xi_g$ 는 필터 매개변수(Filter Parameters)이다. 이 필터는 단자유도 운동계에 백색잡음을 입력으로 하는 출력으로 나타낼 수 있으며 다음과 같은 운동 방정식의



〈그림 1〉 Kanami-Tajimi Filter System의 주파수 응답 곡선

로 표현된다.

$$\ddot{G} + 2\xi_g \omega_g \dot{G} + \omega_g^2 G = 2\xi_g \omega_g \dot{R} + \omega_g^2 R \quad (8)$$

여기서  $R$ 은 입력 가속도를  $G$ 는 출력가속도를 나타낸다.

식 (7)과 (8)에 나타낸 바와 같이 이 필터의 동적 특성은 필터 매개 변수  $\omega_g, \xi_g$ 에 의해 결정되며 전체적인 신호의 세기는 입력 백색잡음상수  $S_0$ 에 따라 결정된다. 필터의 출력이 입력지반운동가속도가 되므로 입력지반운동의 세기(Intensity)는 이 필터 출력의 RMS 응답 또는 필터 시스템의  $H_2$  노름에 비례한다고 할 수 있다. 필터 시스템  $F(\omega)$ 의  $H_2$  노름  $\|F(\omega)\|_2$ 는 다음 식 (9)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\|F(\omega)\|_2^2 = S_0 \frac{\omega_g}{4\xi_g^2 + \omega_g \xi_g} \quad (9)$$

이 연구에서는 입력지반운동의 불확실성을 필터 매개 변수  $\omega_g, \xi_g$ 의 불확실성으로 표현하여 제어시스템 설계문제를 구성하였으며, 이 때 설계 목적상 고려하는 입력지반운동의 세기는 고정된 값으로 하여 식 (9)에 의해 입력 백색잡음 상수  $S_0$ 를 필터 매개 변수  $\omega_g, \xi_g$ 의 변화에 따라 결정하였다. 그림 1에 필터 시스템의  $H_2$  노름  $\|F(\omega)\|_2$ 이 일정할 때 몇 가지 매개변수  $\omega_g, \xi_g$ 에 대한 필터 시스템의 주파수 응답 곡선을 나타내었다.

### 4. 최대-최소문제 및 병렬 최적화 방법

기존의 통합 시스템 설계 문제가 구조물과 제어시스템간

의 상호작용 고려하여 구조-제어 시스템을 최적화하기 위한 연구이나 이 연구에서는 하중-구조물-제어 시스템 간의 상호작용에 대한 최적화 문제를 다룬다. 여기에서는, 구조물 응답을 최대화 하는 하중과, 이를 최소화 하는 구조 설계를 동시에 구하는 최소-최대화 문제(Min-max Problem)를 통합 시스템에 대하여 정식화하고 해를 구하는 방법의 하나로서 병렬진화 알고리즘<sup>(30)</sup>을 불확실성이 존재하는 하중-구조-제어 시스템의 최적설계문제에 적용한다.

구조물에 작용하는 하중의 불확실성과 제어시스템의 설계변수를 동시에 고려함으로써, 구조물의 응답을 최대화 하는 하중의 매개변수와 그 하중이 작용할 때 구조물의 응답을 최소화하는 제어시스템을 찾아내는 문제는 최소최대문제로 정식화할 수 있다.

제어시스템의 매개변수를  $q$ ,  $q$ 의 검색영역을  $Q$ , 하중의 매개변수를  $p$ ,  $p$ 의 모든 변동가능성을 포함한 집합을  $P$ , 구조제어시스템의 성능지수를  $J$ 라 하면, 다음과 최소-최대 문제를 정식화 할 수 있다.

Find The Solution of the Min-max Problem ( $Q^*$ ,  $P^*$ )  
Which,

$$\min_{q \in Q} \cdot \max_{p \in P} J(q, p) \quad (10)$$

$$g_i(q^*, p) \leq 0, \quad \forall p, i = 1, 2, \dots, n$$

위 식에서  $\{g_i\}$ 는 제한조건을 나타내며  $n$ 은 조건식의 개수를 나타낸다. 예로서, Kanami-Tajimi Spectrum의 불확실성이 존재하는 시스템에 수동제어방법으로 가세의 강성과 점성감쇠기(Viscous Damper)의 용량을 결정하는 경우, 구조물의 최대 응답을 일으키는 입력지반운동 모델의 매개변수는 구조물 고유진동수에 따라 결정되는데 구조물 고유진동수는 또한 제어시스템 가세 강성의 함수가 되므로 서로 독립적으로 결정될 수 없다. 따라서 이를 동시에 고려하기 위해서는 다음 식 (11)과 같은 최소-최대 문제를 구성해야 한다.

$$\min_{\mathbf{k}, \mathbf{c}} \max_{\mathbf{w}} J(\mathbf{k}, \mathbf{c}, \omega_g, \xi_g) \quad (11)$$

subject to  $g_i(\mathbf{k}, \mathbf{c}, \omega_g, \xi_g) \leq 0 \quad i = 1, \dots, q$

여기서, 설계 변수  $\mathbf{k} = [k_1, \dots, k_n]$ ,  $\mathbf{c} = [c_1, \dots, c_n]$ 는 각각 각 층에 설치될 가세의 강성 및 점성감쇠기의 감쇠계수벡터,  $\omega_g, \xi_g$ 는 Kanai-Tajimi Filter로 표현되는 입력지반운동모델의 파라미터이며, 식 (10)에서 정의된 제어시스템 매개변수와 하중의 매개변수는 각각  $q = q(k, c)$ ,  $p = p(\omega_g, \xi_g)$ 로

표현된다.

이 최대-최소 문제의 해를 찾는 것이 어려운 것은 최대화, 최소화 문제를 독립적으로 풀 수 없는 것에 기인한다. 예를 들어 최소화 문제의 해  $\mathbf{k}, \mathbf{c}$ 를 구하고, 이 가세와 감쇠기를 시스템을 적용한 구조물에 대해 식 최대화 문제의 외란 변수 해  $\omega_g, \xi_g$ 를 구한 것과, 반대로 최대화 문제의 해  $\omega_g, \xi_g$ 를 적용한 시스템에 대하여 최소화 문제의 해  $\mathbf{k}, \mathbf{c}$ 를 구한 것은 서로 다른 것이 일반적이다.

일반적인 최소-최대문제를 풀기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 모든 문제에 효과적으로 적용될 수 있는 일반적인 해법은 없으며, 구성된 문제의 특성에 따라 효율적인 해법의 적용이 필요하다. 하나의 방법으로서 매개변수의 변동을 모두 고려한 전역검색방법(Domain Searching Method)을 고려할 수 있다. 그러나, 이 방법은 매개변수의 개수가 조금만 증가하여도 검색영역이 매우 넓어져서 검색시간이 지나치게 증가하여 비실용적이라 할 수 있다. 그런데, 해법으로서 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)<sup>(31),(32)</sup>을 응용하여 제안된 병렬진화 알고리즘<sup>(30)</sup>을 도입하면 효율적으로 해를 근사할 수 있다. 이를 적용하기 위하여 각각 다른 두 개의 성능지수 (Performance Index)  $J_p, J_q$ 를 식 (12), (13)과 같이 도입한다.

$$J_p = J(q, p) + W(q, p) \quad (12)$$

$$J_q = J(q, p) - W(q, p) \quad (13)$$

여기서,  $W = \sum_i^n w_i \max\{0, g_i(q, p)\}$ 로서 가중함수(Weighting Function)가 된다.

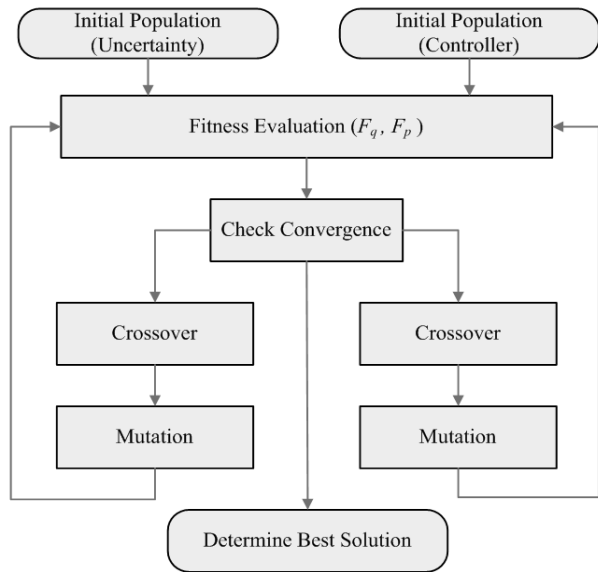
이제 나누어진 성능지수에 대하여 제어시스템은  $J_q$ 를 최소화시키며, 외부하중은  $J_p$ 를 최대화하는 문제가 된다. 제어기의 설계변수벡터  $\tilde{Q}$ , 외부하중의 매개변수벡터  $\tilde{P}$ 를 다음 식 (14) 및 (15)와 같이 이산화하고,

$$\tilde{Q} = \{q_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (14)$$

$$\tilde{P} = \{p_j\}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

제어기의 변수들에 대한 적합도함수  $F_q$ 를 다음 식 (16)와 같이 정의한다.

$$F_q = \max_j J_q(q_s, p_j), \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (16)$$



〈그림 2〉 병렬 진화 알고리즘

이때,  $F_q$ 가 적은 값을 가질수록 변수  $q_i$ 는 높은 적합도 (Fitness)를 가진다.  $q_i$ 들에 대한 적합도를 먼저 결정하고, 이중 가장 적합도가 높은 개체를  $q_s$ 라 하면,  $q_s$ 를 이용하여 외부 매개변수에 대한 적합도를 다음 식 (17)과 같이 정의한다.

$$F_p = J_q(q_s, p_j), \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

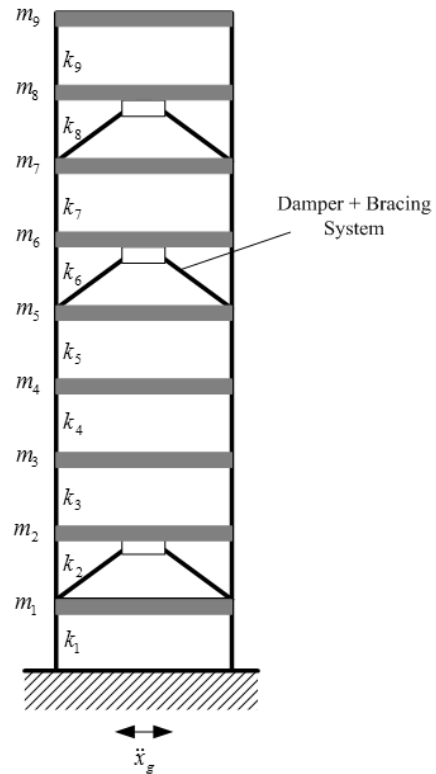
여기서,  $F_q$ 가 큰 값을 가질수록 변수  $p_j$ 는 높은 적합도를 가진다.

식 (16)과 식(17)을 이용하여 각각의 적합도 함수에 대하여 유전자 알고리즘을 병렬적으로 적용한다. 즉,  $F_q$ 를 최소화하는 개체가 높은 적합도를 갖도록  $q_i$ 의 순위를 결정하고, 이를 이용하여  $F_p$ 를 최대화하는 개체가 높은 적합도를 갖도록  $p_j$ 의 순위를 결정한 후, 적합도가 높은 개체들을 중심으로 다음 세대를 구성하고 교배(Crossover), 변이(Mutation), 우수개체의 보존 (Elitism) 등의 유전연산 (Genetic Operation)을 반복해 나아가는 병렬적 최적화 과정을 통하여, 식 (10)으로 주어진 문제에 대한 해 ( $q^*, p^*$ )를 근사적으로 구할 수 있다. 이 과정을 흐름도로 간략하게 표현하면 다음 그림 2와 같다.

## 5. 설계 예

### 5.1 대상 구조물

설계 예로서 빌딩 구조물의 지진응답 제어를 위한 감쇠기 시스템의 최적설계를 수행한다. 제어 시스템이 설치 될 때



〈그림 3〉 설계 대상 전단 빌딩 모델과 제어 시스템

〈표 1〉 설계 대상 전단 빌딩의 제원

| 층   | 질량(ton) | 횡방향 층강성(kN/m) |
|-----|---------|---------------|
| 1   | 6000    | 2*2.1E5       |
| 2~6 | 5200    | 2*2.1E5       |
| 7~9 | 5000    | 2*1.7E5       |

상 구조물은 9층의 빌딩 구조물로서 설계의 편의를 위해 층 질량과 횡방향 강성으로 모델링 되는 선형 전단 빌딩 모형을 사용하였다. 그림 3과 표 1에 설계 대상 구조물과 그 제원을 각각 나타내었다. 구조물의 감쇠는 1차 모드와 2차 모드의 감쇠비가 각각 1%인 Rayleigh 감쇠를 적용하였고, 1차 고유진동수는 약 0.74Hz, 2차 고유진동수는 약 2.1Hz로 계산되었다. 이 설계에서 고려하는 제어시스템은 빌딩 구조물의 층간에 설치하여 추가적인 횡 방향 강성을 제공하는 가새(Bracing) 시스템과 동적 에너지를 소산하는 점성감쇠기(Viscous Damper)로 구성된 수동형 에너지 소산시스템으로 각 층에 설치될 강성과 감쇠기의 용량이 설계변수가 된다. 입력지진은  $\omega_g = 5\pi \text{ rad/s}$ ,  $\xi_g = 0.25$ 를 공칭값으로 하고, 불확실한 변동성을 고려하여  $\omega_g$ 와  $\xi_g$ 는 각각  $0.2\pi \sim 10\pi$ ,  $0.05 \sim 0.4$ 까지 변화할 수 있는 것으로 하였다.

### 5.2 설계결과

설계에 있어서 추가되는 강성과 감쇠기의 감쇠용량의 총

〈표 2〉 최적 가새 강성 및 감쇠계수 해

| Floor | Stiffness ( $10^5$ kN/m) | Damping Capacity ( $10^3$ kN s/m) |
|-------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1     | 1.1763                   | 3.7877                            |
| 2     | 4.0483                   | 2.1585                            |
| 3     | 0.7797                   | 4.0000                            |
| 4     | 2.8055                   | 1.1287                            |
| 5     | 1.8167                   | 0.6278                            |
| 6     | 0.3890                   | 2.3003                            |
| 7     | 1.4420                   | 2.2765                            |
| 8     | 2.0442                   | 2.4021                            |
| 9     | 1.0735                   | 1.1171                            |

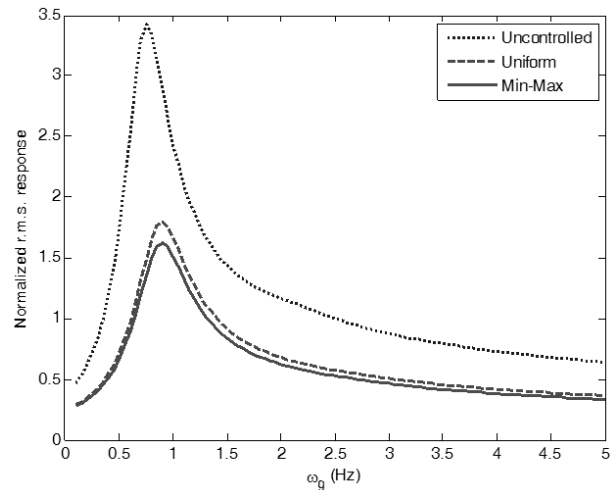
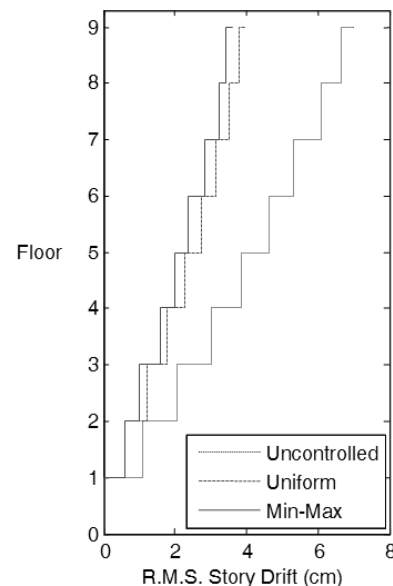
합이 일정한 제약조건을 갖도록 하여 병렬최적화를 수행하였으며 그 결과는 다음 표 2와 같다.

또한 이 최적설계변수에 대응되는 입력지반운동의 최대화 설계변수 중  $\xi_g$ 는 다른 변수에 상관없이 작은 값일수록 큰 응답을 나타내는 방향성을 보였는데 이는 그림 1에 나타난 바와 같이  $\xi_g$ 가 줄어들수록 해당 진동수에 전체 에너지가 집중되기 때문인 것으로 파악되었다. 따라서 이 예제에서는  $\xi_g=0.25$ 의 공칭 값을 사용할 때의 최적설계변수에 대응하는 최대화 설계 변수를 구하였으며 그 값은  $\omega_g=0.9$ Hz로 구해졌다. 최적화된 가새를 설치한 경우 빌딩의 1차 고유진동수는 설치전 0.74Hz에서 설치 후 0.88Hz로 변화하게 되는데, 최대화 설계 변수의 가진 진동수  $\omega_g=0.9$ Hz값과 비교하면 최대화 설계변수가 추가된 가새 강성으로 인해 변동된 고유진동수에 상응하여 결정됨을 알 수 있다. 이 해는 구조물의 응답을 최대화 시키는 입력운동에 대하여 응답을 최소화 하는 강성과 감쇠기의 값을 구한 것이다. 따라서, 입력지반운동의 매개변수 값에 대하여 강인한 성능을 갖는 제진 시스템을 설계 한 것으로 이해 할 수 있다.

### 5.3 수치모사를 통한 성능평가

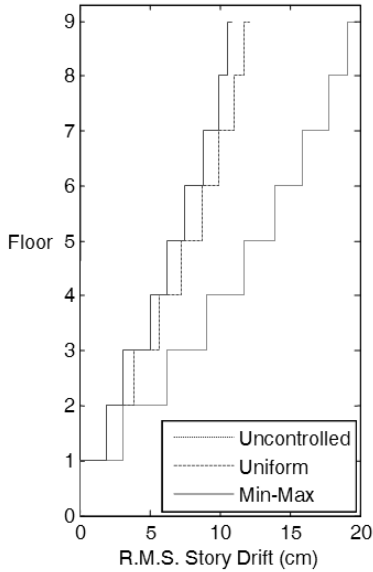
최적화된 제진시스템의 성능평가를 위하여 각 층에 균일하게 강성과 감쇠기를 배치하여 수치모사를 수행하고 그 결과를 비교하였다. 비교를 위하여 각 층에 균등 배치한 시스템의 경우, 추가되는 강성과 감쇠기의 용량의 총합이 표 2에 나타난 강성의 총합과 감쇠용량의 총합과 각각 같도록 하였다.

비제어시, 균등분포 시스템 및 병렬 최적화된 제진 시스템에 대하여  $\omega_g$ 의 변화에 따른 각 층간상대변위 R.M.S. (Root Mean Square) 응답 총합의 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서는 공칭값에 해당하는  $\omega_g=2.5$ Hz일 때 비제어 시스템의 응답을 1로 하여 정규화하고 그 값에 대한 비를 이용하여 결과를 비교하였다. 그림 4의 해석 결과에서

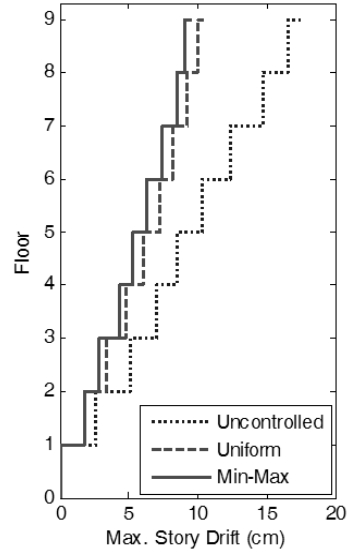
〈그림 4〉  $\omega_g$ 의 변화에 따른 층간 상대 변위 R.M.S. 응답 총합 변화〈그림 5〉  $\omega_g=2.5$ Hz,  $\xi_g=0.25$ 인 경우 R.M.S. 변위응답 비교

확인되는 바와 같이 응답이 최고점을 나타내는 매개변수 값과 제시한 알고리즘으로 구한 최대화 설계 변수 값  $\omega_g=0.9$ Hz,  $\xi_g=0.25$ 이 일치하므로 Worst-case에 대한 설계가 이루어졌음을 알 수 있다.

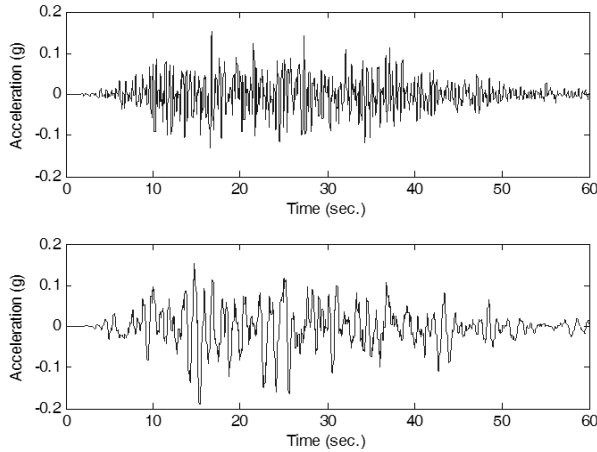
그림 5에는 공칭값으로 정한  $\omega_g=2.5$ Hz,  $\xi_g=0.25$ 인 지반운동에 대한 비제어시, 균등분포된 제진시스템, 최적화된 제진 시스템에 대한 각 층의 R.M.S. 변위응답을 도시하였다. 균등분포 시스템의 경우, 최상층의 변위응답이 비제어시에 비하여 약 56.5% 수준으로서, 각 층 모두 효과적으로 제어되고 있음을 확인하였다. 이 연구에서 제안한 병렬최적화된 제진시스템의 경우, 최상층의 변위 응답이 비제어시에 비하여 약 51.6% 로서 균등분포된 제어시스템보다 우수한 제진 성능을 나타내고 있으며, 이러한 경향은 모든 층에 걸쳐서



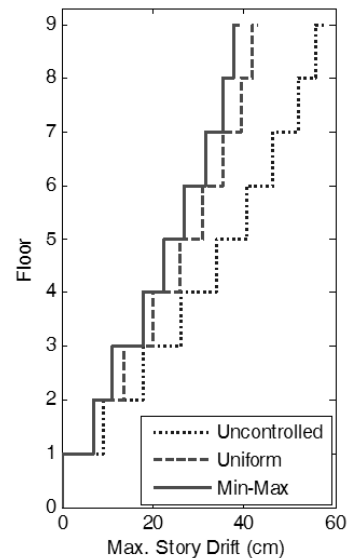
〈그림 6〉  $\omega_g=0.9\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ 인 경우 R.M.S. 변위응답 비교



〈그림 8〉 인공지진( $\omega_g=2.5\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ ,  $\text{PGA}=0.154\text{g}$ )에 대한 각 층별 최대변위응답



〈그림 7〉 Kanai-Tajimi Filter로부터 생성된 인공지진 시간이력  
(위:  $\omega_g=2.5\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ ,  $\text{PGA}=0.154\text{g}$ ,  
아래:  $\omega_g=0.9\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ ,  $\text{PGA}=0.154\text{g}$ )



〈그림 9〉 ( $\omega_g=0.9\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ ,  $\text{PGA}=0.154\text{g}$ )에 대한 각 층별 최대 변위응답

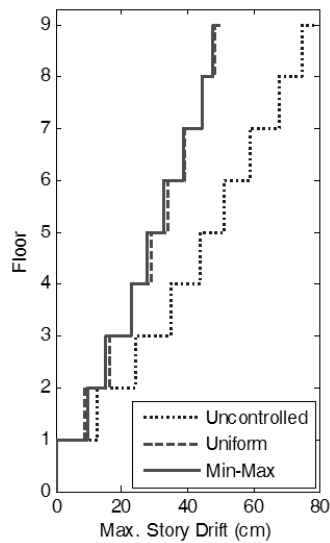
유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 6에는 제어시에 Worst-case로 파악된 최대화 입력 지반운동인 매개 변수  $\omega_g=0.9\text{Hz}$ 에 대한 제어 성능 비교결과를 나타내었다. 이 경우 비제어시 최상층의 변위응답이 그림 5에 나타난 공칭지반운동의 경우보다 약 2.8배 증가하였으며, 각 층의 변위응답도 비슷한 수준으로 증가됨을 알 수 있다. 최상층의 응답을 기준으로 비교해보면, 병렬 최적화된 제진시스템은 비제어시에 비하여 55.6%의 응답수준을 보이며 균등분포 시스템에 대하여도 약 9.8% 응답이 감소하였고 모든 층에서 가장 적은 응답을 나타내므로 각 층 모두 효과적으로 강인한 제어 성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다.

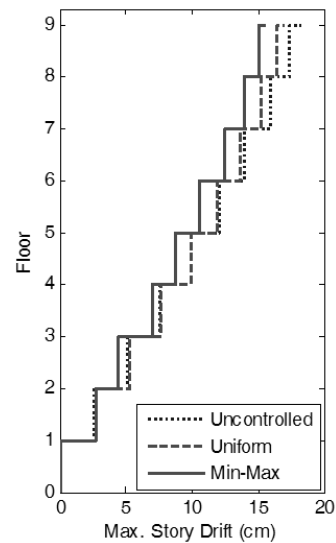
또한, 시간이력해석을 수행하고 최대응답을 비교하기 위

하여  $\omega_g=2.5\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ 인 경우와  $\omega_g=0.9\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ 인 경우에 대하여 인공지진시간이력을 생성하고 수치모사를 수행하였다. 그림 7은 생성된 시간이력의 예를 나타내며, 그림 8과 그림 9는 각각 생성된 인공지진 시간이력을 입력으로 하여 얻어진 각 층의 최대변위를 비교한 것이다.

그림 8에서  $\omega_g=2.5\text{Hz}$ ,  $\xi_y=0.25$ 인 설계 공칭 지반 운동에 대하여, 균등분포 시스템의 경우, 최대 변위의 평균 응답이 비 제어시에 비하여 약 59.1% 이며, 병렬최적화된 제진시스템의 경우, 최대 변위의 평균 응답이 비제어시에 비하여 약 54.2% 로서 균등분포된 제어시스템보다 우수한 제진 성능을 나타낸다. 제어시스템이 장착된 경우의 Worst-case에 해



〈그림 10〉 Northridge 지진에 대한 각 층별 최대변위응답



〈그림 11〉 Hachinohe 지진에 대한 각 층별 최대변위응답

당하는,  $\omega_g=0.9\text{Hz}$ ,  $\xi_g=0.25$ 인 지반 운동에 대해서도 비슷한 경향을 나타내며, 제시한 시스템이 보다 우수한 제진 성능을 보임을 확인할 수 있다. 즉, 그림 9에서, 최대 변위의 전층 평균응답으로 비교하면, 병렬 최적화된 제진시스템은 비제어시에 비하여 67.8%의 응답수준을 보이는데 이는 균등분포 시스템의 응답수준이 비제어시의 74.9% 응답수준을 보임에 비하여 볼 때 제시한 시스템이 보다 강인한 제어 성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다.

지반운동의 다양한 특성에 대한 응답특성을 알아보기 위하여 역사지진들에 대하여 시간이력해석을 수행하고 그 결과를 그림 10, 그림 11에 나타내었다. 역사지진으로는 Northridge 지진, Hachinohe 지진 등이 사용되었다. Northridge 지진의 경우 두 제진시스템이 전반적으로 비슷한 제어효과를 보이고 있으나, 2층과 4층에서 병렬최적화를 수행한 경우가 미소하나마 적은 응답을 나타낸다. 한편, Hachinohe 지진의 경우, 병렬 최적화된 제진시스템이 균등분포시스템에 비하여 전층에서 우수한 제진결과를 보이고 있으며, 최상층의 응답에 있어서는 약 8.5% 정도의 응답저감 효과가 있음을 나타내고 있다.

## 6. 결론

이 논문에서는 지반운동의 불확실성을 고려한 구조제어 시스템의 최적설계방법을 개발하였다. 제안한 방법에서는, 구조물의 제어를 위한 시스템의 설계를 수행한 후 불확실한 하중에 대한 성능평가를 수행하던 기존의 방법과는 달리 구조계에 최대응답을 유발하는 하중과 구조계의 응답을 최소

화하는 제어시스템을 동시에 찾고자 하는 최대-최소문제로 정식화 하고 최적화를 수행함으로써, 보다 강인한 제어시스템을 구축할 수 있게 된다. 최대-최소문제를 풀기 위한 방법으로 일반적인 유전자 알고리즘을 변형시킨 병렬진화알고리즘을 적용하였으며, 제안하는 방법의 타당성을 검증하기 위하여 예제 구조물에 대한 수동형 제어시스템의 최적설계를 수행하고 균등하게 배치된 제진 시스템과 비교하였다. 수치모사 결과, 제안하는 방법은 우수하고 안정적인 제어 성능을 나타내었으며, 불확실한 지진특성에 대하여 강인한 선형제어시스템 설계법의 하나로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-D01048)

## 참고 문헌

1. Yao J.T.P., "Concept of structural control," *Journal of Structural Division ASCE* 98, 1567-1574, 1972.
2. Housner G.W., Bergman L.A., Caughey T.K., Chassiakos A.G., Claus R.O., Masri S.F., Skelton R.E., Soong T.T., Spencer Jr. B.F., and Yao J.T.P. "Structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9: 897-971, 1997.
3. Kobori T., "Past, present and future in seismic response control of civil engineering structures," *Proceedings of the*



- Third World Conference on Structural Control*, Como, Italy, Vol. 1, 9-14, 2002.
4. Yang J.N., and Soong T.T., "Recent advances in active control of civil engineering structures," *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 3, No. 4, 179-222, 1998.
  5. Chu S.Y., Soong T.T., Reinhorn A.M., Helgeson R.J., and Riley M.A., "Integration issues in implementation of structural control systems," *Journal of Structural Control*, Vol. 9, No. 1, 31-58, 2002.
  6. Soong T.T., "Active structural control: theory and practice," Wiley, New York, 1990.
  7. 정찬국, 정형조, 최강민, 이인원, "스마트 수동 제어 시스템을 이용한 면진 건물의 내진 성능 개선," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제6호, 37-46, 2006.
  8. 김현수, P. N. Roschke, "MR 감쇠기와 FPS를 이용한 하이브리드 면진장치의 수치해석적 연구," 한국지진공학회 논문집, 제9권, 제2호, 7-16, 2005.
  9. 박규식, 정형조, Spencer, B. F., Jr., 이인원, "수동, 능동, 반능동 및 복합 시스템을 이용한 사장교의 지진응답 제어," 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제1호, 17-30, 2003.
  10. 임채욱, 문석준, 박영진, "AMD를 이용한 건물의 능동 진동 제어를 위한 강인 포화 제어기의 유용성에 관한 실험적 검증," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제2호, 83-90, 2006.
  11. 이상현, 박은천, 윤경조, 이성경, 유은종, 민경원, 정 란, 민정기, 김영찬, "실물 크기 구조물의 강제진동실험 및 지진응답 모사를 위한 HMD제어기 설계," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제6호, 103-114, 2006.
  12. 옥승용, 박관순, 송준호, 고현무, "목표신뢰성을 만족하는 구조물-감쇠기 복합시스템의 다목적 통합최적설계," 한국지진공학회 논문집, 제12권, 제2호, 9-22, 2008.
  13. Symans, M.D., and Kelly, S.W., "Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-Active Seismic Isolation Systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 37-60, 1999.
  14. Yoshida, O., and Dyke, S. J., "Seismic Control of a Non-linear Benchmark Building Using Smart Dampers" *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 130, No. 4, 386-392, 2004.
  15. Tamura, Y., Kousaka, R., and Modi, V.J., "Practical application of nutation damper for suppressing wind-induced vibrations of airport towers," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41-44, 1919-1930, 1992.
  16. Cao, H., Reinhorn, A.M., and Soong, T.T., "Design of an active mass damper for a tall TV tower in Nanjing, China," *Engineering Structures*. Vol. 20, No. 3, 134-143, 1998.
  17. Yang, G., Spencer, B.F., Carlson, J.D., and Sain, M.K., "Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations," *Engineering Structures*, Vol. 24, No. 3, 309-323, 2002.
  18. Golafshani, A.A., Rahani, E.K., and Tabeshpour, M.R., "A new high performance semi-active bracing system," *Engineering Structures*. Vol. 28, No. 14, 1972-1982, 2006.
  19. Song, G., Sethi, V., and Li, H.N., "Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review," *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 11, 1513-1524, 2006.
  20. Spencer, B.F., Dyke, S.J., Sain, M.K., and Carlson, J.D., "Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, No. 3, 230-238, 1997.
  21. Suhardjo, J., Spencer, B.F., and Kareem, A., "Frequency domain optimal control of wind-excited buildings," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 118, No. 12 2463-2481, 1992.
  22. Chung, L.L., Wu, L.Y., and Jin, T.G., "Acceleration feedback control of seismic structures," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 1-2, 62-74, 1998.
  23. Wu, J.C., Yang, J.N., and Schmitendorf, W.E., "Reduced-order and LQR control for wind-excited tall buildings," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 222-236, 1998.
  24. Zhu, W.Q., Luo, M., and Ying, Z.G., "Nonlinear stochastic optimal control of tall buildings under wind loading," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 11, 1561-1572, 2004.
  25. Alli, H., and Yakut, O., "Fuzzy sliding-mode control of structures," *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 2, 277-284, 2005.
  26. Symans, M.D., and Kelly, S.W., "Fuzzy Logic Control of Bridge Structures Using Intelligent Semi-Active Seismic Isolation Systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 37-60, 1999.
  27. Kanai, K., "Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol. 35, 308-325, 1957.
  28. Tajimi, H., "A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake," *Proceedings of the Second World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 781-797, 1960.
  29. 김진만, "RMS 가속도에 의한 인공 지진파 생성기법," 한국지진공학회 논문집 제7권 제1호, 31-40, 2003.
  30. Hur, J., Lee, H., Tahk, M., "Parameter robust control design using bimatrix co-evolution algorithms," *Engineering Optimization*, Vol 35, No. 4, 417-426, 2003.
  31. Goldberg, D. E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley," Reading Mass, 1989.
  32. Holland, J. H., "Adaption in Natural and Artificial Systems," University of Michigan Press, Ann Arbor, MI., 1975.