

복합구조제어시스템의 동시최적설계

Simultaneous Optimum Design of Hybrid Structural Control System

박 관 순* 고 현 무**
Park, Kwan Soon Koh, Hyun Moo

국문요약

복합구조제어시스템의 동시최적설계방법에 관하여 연구하였다. 여기에서는 수동제어장치 뿐만 아니라 능동제어장치의 배치와 용량, 제어기 등이 설계변수가 되어 설계인자들의 만족도를 나타내는 선호도함수를 정의하고, 이를 이용하여 최적화문제를 정식화한다. 또한 수동 및 능동제어장치의 설계변수로부터 동시에 최적해를 찾아내기 위한 수치적 방법으로 유전자알고리즘을 사용하였다. 지진하중을 받는 다자유도 구조물의 설계에 및 수치모사를 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하고자 하였다.

주요어 : 복합구조제어시스템, 동시최적설계, 선호도함수, 유전자알고리즘

ABSTRACT

In this paper, an integrated optimum design method for hybrid structural control system is studied. Not only the distribution and the capacity of passive devices but also those of active devices, and the controllers are treated as design variables in the proposed approach. Multi-objective optimization problem is formulated by using the preference function, which is newly defined in this study. Genetic algorithm is adopted as a numerical searching technique in order to simultaneously find the optimum solutions. The validity of the proposed method is verified through the example designs and the numerical simulations of an earthquake excited multi-degrees-of-freedom structure.

Key words : hybrid structural control system, simultaneous optimum design, preference function, genetic algorithm

1. 서 론

최근 들어 고층구조물이나 초장대교량 등의 대형구조물의 건설이 증가함에 따라서, 지진이나 바람과 같은 돌발적인 하중에 의한 바람직하지 못한 진동은 여러 기술자와 연구자들에게 해결해야 할 중요한 문제로써 부각되기 시작하였다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 구조물에 발생하는 바람직하지 못한 진동을 억제하기 위한 여러 가지 방법들, 즉, 수동제어, 능동제어, 반능동제어 그리고 복합제어 등의 방법들이 제시 및 연구되어오고 있다.⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾ 이 중에서도 능동제어방법은 구조물의 진동상태를 감지하고 진단하기 위한 센서 및 컴퓨터와 외부로부터 공급되는 에너지를 이용하여 진동을 억제하는 것으로서, 여러 개의 주파수성분을 갖는 동적하중인 지진이나 바람 등에 발생한 진동을 수동 또는 반능동적인 방법보다 효과적으로 제어할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그런데, 대부분의 대형구조물에의 적용에 있어서, 충분한 제어효과를 얻기에는 능동제어장치가 제공하는 제어력의 크기가 부족한 실정이다.

복합제어방법(hybrid control method)은 이러한 문제점에 좋은 해결책을 제시할 수 있다. 수동적인 방법과 능동적인 방법을 함께 사용함으로써, 제어력의 한계를 극복하고 보다 개선된 제어효과를 거둘 수 있는 것이다. 그런데 복합제어시

스템은 여러 개의 제어장치를 혼합하여 사용하게 되어, 그 배치와 설계방법에 따라서 제어효과가 달라질 수 있으므로 주어진 설계제한조건 내에서 최대의 제어효과를 갖는 설계방법이 필요하다. 고려할 수 있는 하나의 방법은, 수동제어장치들을 먼저 배치한 후, 수동제어장치가 포함된 운동방정식을 이용하여 최적의 능동제어장치를 설계하는 것이다. 이 방법은 개념과 적용이 간단한 반면, 제어장치들을 하나의 통합된 시스템으로 설계하는 것이 아니므로 만족스럽지 못한 효과를 보이거나, 반복적인 설계를 거쳐야 할 가능성이 있다.⁽⁸⁾ 이 논문에서는 수동제어장치와 능동제어장치, 즉 복합제어장치를 하나의 통합된 시스템으로 보고 동시에 최적설계를 수행하는 방법에 관하여 연구하였다. 제시하는 설계방법은 수동제어장치의 설치위치나 용량뿐 아니라 하중재하기의 설치위치 및 개수를 동시에 최적화한다.

최적제어시스템의 설계는 적은 제어비용으로 최선의 제어효과를 얻기 위함이다. 그러므로 제어장치의 비용과 성능을 표현하는 함수들이 함께 정의 되어야 하며, 이 함수들간의 합리적인 가중관계를 알아야 최적화를 위한 비용함수(cost function)를 구성할 수 있다. 비용의 측면에서는 실질적인 장치들의 가격뿐 아니라 요구되는 제어력, 제어장치의 설치를 위한 공간 등이 포함될 수 있으며, 성능의 측면에서는 제어장치의 설치로 인하여 추정되는 응답의 감소 등을 고려할 수 있다. 그런데 각 함수들은 서로 다른 물리량을 가지고 나타내므로 합리적인 결과를 주는 함수간의 상대적인 가중계수를 얻기가 쉽지 않으며, 실질적인 최적화에 앞서 합리적인 가중계수들을 찾기 위한 수많은 시행착오가 필요하다

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 계약조교수, 공학박사
(대표전자 : kspark@sel.snu.ac.kr)

** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2002년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 7. 19 / 심사종료일 : 2002. 9. 30)

기도 하다.⁹⁾ 이 연구에서는 각 설계인자들의 만족도를 나타내는 선호도함수를 새롭게 정의하고, 이를 이용하여 최적화 문제를 정식화한다. 또한 수동 및 능동제어장치의 설계변수들로부터 동시에 최적해를 찾아내기 위한 수치적 방법으로 유전자알고리즘(genetic algorithm, GA)⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾을 사용하였다. 유전자알고리즘을 사용함으로써, 초기값의 가정에 따른 설계결과와 민감성을 배제할 수 있으며 바람직하지 않은 국부해(local optimum solution)를 찾을 가능성을 상당히 줄일 수 있다.

2장에서는 복합구조제어시스템의 상태공간방정식(state space equation)을 유도하고 제어알고리즘에 관하여 기술한다. 3장에서는 선호도함수와 유전자알고리즘을 이용한 동시최적설계방법을 제시하였으며, 4장에서는 예제로서 지진하중을 받는 9층건물의 복합구조제어시스템을 설계하고 수치모사를 통하여 제안한 방법의 적용성을 검증하고자 하였다.

2. 복합구조제어시스템

n_f 개의 자유도를 갖는 복합구조제어시스템의 운동방정식은 상태변수(state variable)를 정의함으로써 1차의 벡터-행렬미분방정식, 즉, 상태공간방정식으로 변환할 수 있다. 여기에서는 상태공간방정식으로 표현된 복합시스템의 제어알고리즘에 관하여 기술한다. 사용하는 제어방법은 LQR(linear quadratic regulator)⁽¹³⁾로서, 하중제하기의 용량을 고려하여 설계하중이 가해질 때 최대제어력을 제한하는 방법을 사용한다.

2.1 상태공간방정식

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

$$M\ddot{z}(t) + C\dot{z}(t) + Kz(t) = E_1 w(t) \quad (1)$$

여기서, $z(t)$ 는 $(n_f \times 1)$ 의 변위벡터, $w(t)$ 는 $(q \times 1)$ 의 외부하중벡터, M, C, K 는 각각 $(n_f \times n_f)$ 의 질량행렬, 감쇠행렬, 그리고 강성행렬, E_1 는 외부하중의 위치행렬 $(n_f \times q)$ 을 의미한다.

일반적인 수동적 제어방법으로서 강성을 조절하여 구조물의 고유진동수를 변화시키거나, 감쇠능력을 높이기 위하여 여러 가지 댐퍼를 고려할 수 있으며, 부가의 질량을 이용하기도 한다. 그리고 능동제어방법은 하중제하기를 이용하여 외부에서 공급되는 제어력을 직접 구조물에 전달하는 것으로, 부가의 질량, 강성, 감쇠로 인한 효과를 각각 M_p, C_p, K_p 그리고 n_c 개의 하중제하기로부터 전달되는 제어력을 $u(t)$ 라 하면, 식 (1)의 운동방정식은 수동 및 능동제어장치의 효과로 인하여 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$M, \ddot{z}(t) + C, \dot{z}(t) + K, z(t) = E_1 w(t) + E_2 u(t) \quad (2)$$

여기서, $M_t = M + M_p, C_t = C + C_p, K_t = K + K_p$ 이며, $E_2 (n \times n_c)$ 는 작용하는 제어력벡터 $u(t)$ 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 한다.

이제 상태변수 $x(t)$ 를 다음 식 (3)과 같이 정의하면,

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

이제 복합구조제어시스템의 상태공간방정식은 식 (2)는 식 (3)을 이용하여 다음 식 (4)로 표현된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ew(t) \quad (4)$$

여기서, A 는 시스템행렬, B 는 제어행렬, E 는 외란행렬이며 각각 다음과 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_t^{-1}K_t & -M_t^{-1}C_t \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M_t^{-1}E_2 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 제어알고리즘

LQR제어법칙⁽¹³⁾은 주어진 상태공간방정식을 만족하며 정의된 성능지수를 최소화하는 최적의 제어이득행렬(control gain matrix)을 구하는 것이다. 제어기를 구하기 위해 성능지수 J 를 다음 식 (6)과 같이 정의한다.

$$J = \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (6)$$

여기서 Q 는 $2n \times 2n$ 의 반양정행렬(semi-positive definite matrix), R 은 $n_c \times n_c$ 의 양정대칭행렬(positive definite symmetric matrix)로서 설계변수가 되는 가중행렬이다. 이 연구에서는 $Q = I, R = \text{diag}(r_1, \dots, r_{n_c})$ 로 하였으며, 따라서 $r_i (i = 1, \dots, n_c)$ 가 설계변수가 된다.

제어력 $u(t)$ 는 상태피드백(state feedback)을 고려하여 제어이득행렬을 G 라 하면 다음 식 (7)로 쓸 수 있으며,

$$u(t) = -Gx(t) \quad (7)$$

여기서 제어이득행렬 G 는 대수Riccati방정식(algebraic Riccati equation, ARE)⁽¹⁴⁾이라고 불리는 식 (8)의 해인 P 를 구하면 다음 식 (9)와 같이 구해진다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (8)$$

$$G = -R^{-1}B^T P \quad (9)$$

그런데 하중제하기의 경우 공급가능한 제어력은 한정이 되어 있으므로 이를 고려해주는 것이 바람직하다. 이 연구에서는, 설계하중작용시 수치모사를 통하여 얻어진 실제로 얻어

진 \$i\$ 번째 하중재하기의 최대제어력을 \$u_i^{max}\$, 그리고 최대가 능제어력을 \$U_i^{max}\$라 할 때, \$r_i\$ 요소의 반복적인 조절을 통 하여 \$u_i^{max} \le U_i^{max}\$가 되도록 하였으며, 이 과정을 \$q\$ 개의 모든 하중재하기에 대하여 최대허용제어력 이내의 범위에 있도록 하는 방법⁽¹⁵⁾을 사용하였다.

제어이득행렬 \$\mathbf{G}\$는 변위되먹임행렬 \$\mathbf{G}_1\$와 속도되먹임행렬 \$\mathbf{G}_2\$로 나누어서 쓸 수 있으므로 제어력 \$\mathbf{u}(t)\$는 다음 식 (10) 과 같이 쓸 수 있으며,

$$\mathbf{u}(t) = -[\mathbf{G}_1 \quad \mathbf{G}_2] \begin{bmatrix} \mathbf{z}(t) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

식 (10)와 식 (3)를 이용하여 식 (4)를 다시 정리하면 다음 식 (11)을 얻는다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -(\mathbf{M} + \mathbf{M}_p)^{-1}(\mathbf{K} + \mathbf{K}_p + \mathbf{E}_2 \mathbf{G}_1) & -(\mathbf{M} + \mathbf{M}_p)^{-1}(\mathbf{C} + \mathbf{C}_p + \mathbf{E}_2 \mathbf{G}_2) \end{bmatrix} \mathbf{x}(t) + \mathbf{E} \mathbf{w}(t) \quad (11)$$

식 (11)에서 \$\mathbf{M}_p, \mathbf{K}_p, \mathbf{C}_p, \mathbf{E}_2, \mathbf{G}_1\$ 와 \$\mathbf{G}_2\$ 등은 복합구조제어 시스템의 구성요소로서 최적화의 대상이 된다.

3. 다목적최적화문제

복합제어시스템의 최적화에는 서로 다른 제어장치들의 비용적인 측면과 장치들의 추가로 얻어지는 제진성능등을 고려해야한다. 제진을 위해 사용되는 추가 강성량이나 댐퍼 용량, 하중재하기의 개수가 증가하고, 제어력이 커질수록 제 진효과는 좋아지나 비용과 설치공간 등의 문제로 인하여 주 어진 설계제한 조건을 만족하도록 최적의 제어시스템을 설 계하여야한다. 따라서 최적화를 위한 목적함수에는 각 제진 장치들의 비용요소, 제진성능 등이 포함되어야 하므로 여러 비용함수들이 포함된 다목적최적화문제가 된다. 일반적으로 다목적최적화문제의 경우, 비용함수들이 나타내는 물리량들 이 서로 다를 뿐 아니라, 설계변수의 변화에 따른 각 비용함 수들의 변화량 또한 서로 다르다. 그러므로 최적화문제를 구 성하기 위하여 각 비용함수들간의 상대적인 가중치를 정하 는 것이 쉽지 않아, 원하는 해를 얻기 위해서는 설계목적에 맞는 적절한 가중계수를 찾는 작업을 반복적으로 수행해야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 방법으로, 이 연구에서는 목적함수를 구성하는 여러 요소들에 대하여 선 호도함수를 정의함으로써, 선호도라는 통일된 척도를 가지 고 최적화를 수행한다.

3.1 선호도함수 및 최적화문제의 구성

이 연구에서 제시하는 선호도함수는 각 설계기준에 대한 만족도를 4개의 영역으로 구분하고, 각 영역에서 주어지는 달리 주어지는 함수값은 그림 1에서와 같이 나타낸다. 그림 1 에서 \$x\$ 축을 나타내는 \$P_i\$는 \$i\$번째 목적함수를 의미하며 이 값은 설계변수 \$D_v\$의 함수, 즉, \$P_i = P_i(D_v)\$가 된다. \$y\$ 축을 나

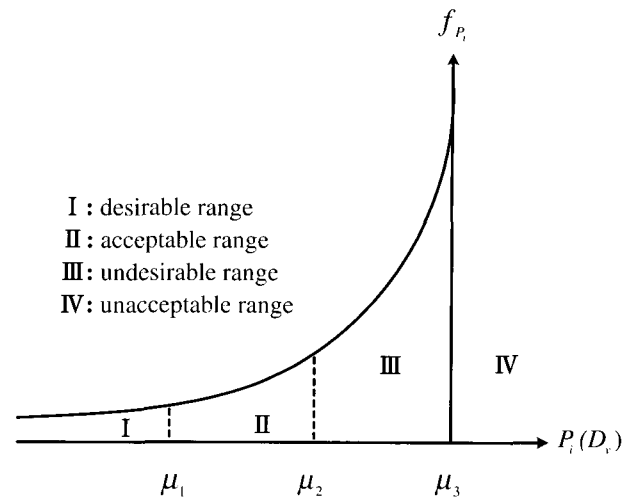


그림 1 \$i\$ 번째 목적함수에 대한 선호도 함수

타내는 \$f_{P_i}\$는 \$i\$번째 목적함수의 선호도 값이다. 그리고 \$\mu_j\$ 는 \$P_i\$에 대한 만족도를 구분하기 위하여 사용된 영역간의 경 계에서의 값을 나타낸다. \$P_i \le \mu_1\$인 영역-I는 '바람직한 영역', 영역-II (\$\mu_1 < P_i \le \mu_2\$)는 '허용가능한 영역', 영역-III (\$\mu_2 < P_i \le \mu_3\$)는 '바람직하지 않은 영역', 그리고 영역-IV는 '허용할 수 없는 영역' 등으로 구분한다.

합리적인 선호도함수를 얻기 위하여, 인접한 영역간의 경 계에서의 함수값은 충분히 커야 하며, 그 크기는 1보다 큰 실수인 \$\alpha\$ 배 만큼차이가 난다고 가정하며, 또한 영역이 바 꾸는 경계에서의 함수값은 연속적이어야 하며, 각목적함수 한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$f_{P_i}(\mu_{j+1}) = \alpha f_{P_i}(\mu_j), \quad 1 \ll \alpha \quad (12)$$

$$\lim_{P_i \rightarrow \mu_j} f_{P_i}(P_i(D_v)) = f_{P_i}(\mu_j) \quad \text{for } j = 1, 2, 3 \quad (13)$$

이러한 조건을 만족하는 함수는 여러 형태가 될 수 있으나, 이 연구에서는 간단히 함수 \$f_{P_i}\$가 \$y = x^n\$ (\$n\$은 정수)의 형태 로 가정하고, 선호도는 상대적인 비를 나타내는 값이므로 \$f_{P_i}(P(D_v) = \mu_3) = 1\$로 하여, 식 (12)와 식 (13)을 만족하는 함수를 구해보면 다음 식 (14)와 같다.

$$f_{P_i}(D_v) = \left(\frac{1}{\mu_1 \sqrt[n]{\alpha^2}} P(D_v) \right)^n \quad \text{for } P(D_v) \leq \mu_1$$

$$f_{P_i}(D_v) = \left[\frac{\sqrt[n]{\alpha^{j-3}} - \sqrt[n]{\alpha^{j-4}}}{\mu_j - \mu_{j-1}} (P(D_v) - \mu_{j-1}) + \sqrt[n]{\alpha^{j-3}} \right]^n$$

for \$\mu_j < P(D_v) \le \mu_{j+1}, j = 2, 3\$ (14)

위의 식 (14)에서, 주어진 \$n\$과 \$\alpha\$에 대하여, 각 영역에서 의 선호도값은 \$\mu_j\$에 따라서 크게 바뀌게 되므로 합리적인 선정이 중요하다. 그런데, 만족도에 따라서 분류된 각각의 영역의 선택에 있어서, 설계자는 제어장치의 특성, 설계제한

조건, 하중재하기의 용량, 요구되는 응답성능에 관한 정보를 반영할 수 있으므로, 임의로 가중값을 결정하는 방법보다는, 주어진 시스템에 적합한 최적화문제를 보다 효과적으로 구성할 수 있다.

이제, 고려해야 하는 목적함수들의 개수가 N 이라고 하면 식 (14)로 주어지는 N 개의 선호도함수들의 합을 이용하여, 다음 식 (15)로서 나타나는 하나의 스칼라함수를 최소화 하는 것으로서 최적화문제를 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } J_p = \sum_{i=1}^N f_{p_i}(D_v) \\ &\text{subject to } P_i(D_v) < \mu_3 \text{ and } D_{v,\min} \leq D_v \leq D_{v,\max} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $D_{v,\min}$ 과 $D_{v,\max}$ 는 각각 설계변수 D_v 의 최소 및 최대 허용값을 의미한다.

3.2 유전자알고리즘을 이용한 동시최적설계

유전자알고리즘⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾은 정해진 목적함수의 적합도에 따라 최적해를 추계학적으로 찾아가는 진화론적 최적화방법(evolutionary optimization method)의 하나이다. 이 연구에서는 설치될 제어장치들에 해당하는 설계변수들은 2진부호(binary code)의 기호열(string)로 할당한 뒤, 아래와 같이 설계변수벡터를 의미하는 하나의 염색체를 구성한다.

Chromosome ; 010110011011.....11101000111

유전자알고리즘에서는 이러한 염색체를 다수 생성하여 하나의 개체군(population)을 이루고, 형성된 개체군에 대하여 양의 값을 갖는 적합도가 높은 소수의 개체가 높은 확률로 선택되어 재생산(reproduction)된다. 또한 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등의 과정을 통하여, 새로운 세대(generation)의 개체군을 형성하는 반복계산에 의하여 최적해를 검색한다. 개체생존의 지표가 되는 적합도 함수(fitness function)는 식 (15)의 목적함수를 사용하여 다음 식 (16)으로 정의할 수 있다.

$$F_i = \left[\max_{j=1, \dots, N_g} (J_p^i) + \min_{j=1, \dots, N_g} (J_p^i) \right] - J_p^i \quad (16)$$

여기서, F_i 와 J_p^i 는 각각 i 번째 개체에 대한 적합도와 목적함수의 선호도값이고, N_g 는 개체군을 이루는 염색체의 개수, 즉, 개체수(population size)를 의미한다.

적합도함수값은 개체수(population size) N_g 개의 염색체를 가지고 각 세대별로 개체에 따라서 계산되어지고, 유전연산과정을 통하여 더 나은 해를 찾기 위한 코드들로 확정된다. 이러한 작업을 통하여 산정된 적합도함수 값이 동일한 값으로 일정 횟수이상 반복될 때 진화과정은 끝나고 그 때 가장 높은 적합도 값을 갖는 개체가 최적해로 결정된다. 이런 과정을 통하여 복합구조제어시스템의 설계변수들은 동시에 검색되어 결정된다.

4. 설계에

지진하중에 대한 복합제어시스템의 최적설계를 위하여 다음 그림 2와 같은 9층의 빌딩구조물을 고려하였으며, 구조물은 수평자유도만을 고려하여 9자유도로 모델링 하였다. 구조물의 특성값은 표 1에 정리하였다.

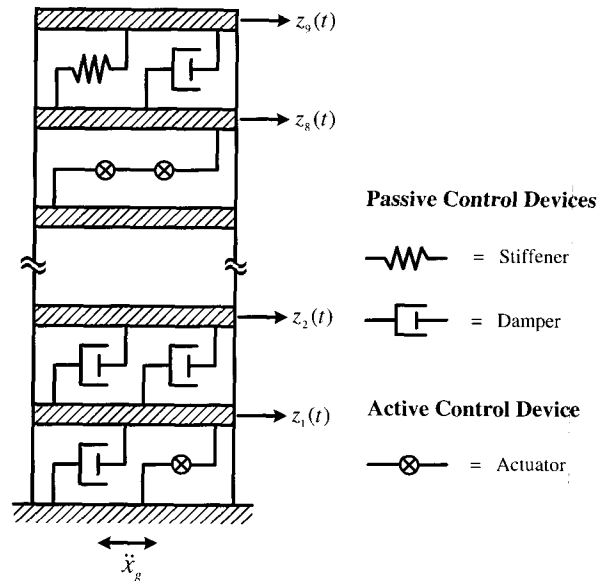


그림 2 예제구조물

표 1 예제구조물의 특성값

Floor	Mass	Stiffness	Damping	층간높이
1 st floor	612.2 ton	2.1×10^8 N/m	1, 2차 모드에 대하여 1% Rayleigh 감쇠를 적용	3m로 전층간 균일
2 nd ~6 th floor	530.6 ton	2.1×10^8 N/m		
7 th ~9 th floor	510.2 ton	1.7×10^8 N/m		

지반운동은 UBC에서 규정된 응답스펙트럼을 만족하는 가속도시간이력을 20개 생성하여 사용하였으며,^{(16),(17)} 그림 3에 생성된 시간이력의 예를 나타내었다.

그림 2에 나타난 구조물의 제진을 위하여, 각 층간에 추가의 강성, 선형댐퍼 등의 설치하는 수동제어방법과 하중재하기(actuator)를 설치하는 능동제어방법을 혼합한 복합제어시

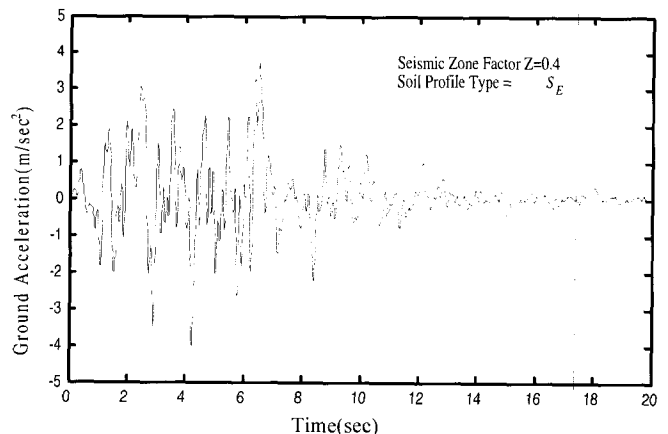


그림 3 생성된 가속도시간이력 예

시스템을 사용한다. 따라서 각층의 추가강성, 댐퍼의 용량, 그리고 하중재하기의 개수뿐 아니라 설치위치 등이 설계변수가 된다. 하중재하기의 경우 개당 최대공급가능 제어력은 500kN으로 하였다. 지진시 구조물에 발생하는 모멘트, 전단력 등의 부재력들이 허용범위내에 있기 위해서는 층간상대변위를 효과적으로 줄여야 한다. 따라서 이 연구에서는 제어 성능의 평가를 위하여 각 층의 층간변위비(story-drift ratio)를 사용하였다. 그러므로 사용되는 추가강성량, 댐퍼용량, 하중재하기의 개수 그리고 각 층간변위비에 관한 선호도함수를 각각 f_{Pk} , f_{Pc} , f_{Pac} , f_{Pdr} 라고 하면 식 (15)에서 정의된 J_p 는 다음 식 (17)과 같으며, 각 선호도함수에 사용된 값들을 표 2에 정리하였다.

$$J_p = f_{Pk} + f_{Pc} + f_{Pac} + f_{Pdr} \quad (17)$$

표 2 선호도함수에 사용된 계수값

선호도함수	μ_1	μ_2	μ_3	n	α
f_{Pk} (kN/m)	1.6×10^6	4.0×10^6	8.0×10^6	2	3
f_{Pc} (kN sec/m)	35,000	90,000	150,000		
f_{Pac}	7	20	40		
f_{Pdr} (%)	0.2	0.7	1.5		

최적화문제는 식 (17)의 J_p 를 최소화하는 강성(k_i), 댐퍼(c_i), 하중재하기(a_i) 등의 총용량과 각 층에 따른 배치상태를 결정하고 최적제어기를 설계하는 것이다. 이때, 제어장치 설치공간 등의 제약을 고려하여 한 층에 설치가 가능한 추가강성의 최대값은 기동강성의 30%이내, 선형댐퍼의 최대용량은 6000kNsec/m, 최대용량 500kN의 하중재하기는 7개 이내로 하였으며, 제어기설계시 각층의 층간변위를 제어변수로 하였다.

유전자알고리즘을 이용하여 복합제어시스템의 최적화를 수행하였으며, 그림 4에 세대가 진행됨에 따라서 변화하는 목적함수들의 평균값과 최소값을 나타내었다. 이때, 교배법으로는 2점교배(two point crossover), 교배확률은 0.85, 변이확률은 0.02, 각 세대의 개체수는 40으로 하였다.

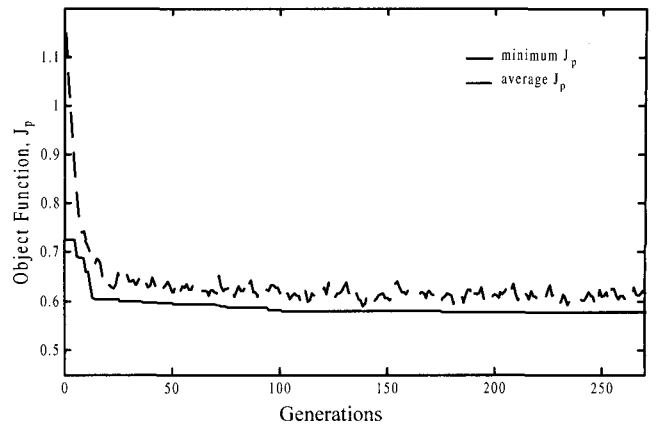


그림 4 목적함수 J_p 의 반복이력

평균값은 초기에 급격히 감소하다가 25회를 넘어서는 크게 변화하지 않으며, 작은 폭의 진동이 최종해를 확정할 때까지 계속된다. 한편, 최소값 또한 초기 10여회까지는 급격히 감소하나 그 이후에는 감소율이 떨어지며, 92세대, 172세대에서 함수값에 영향을 주는 변이가 발생한 뒤 최적해로 수렴하는 것으로 판단되어 이때의 값을 최적해로 확정하였다. 최적해로 확정된 값들을 표 3에 정리하였다.

표 3의 결과에서, 감쇠장치는 불연속적으로 배치되어 있음을 알 수 있으며, 능동제어기는 주로 저층부에 배치되고 있다. 한편 추가강성은 어느 층에도 사용되지 않는 것으로 나왔는데, 이것은 강성에 의한 복합제어시스템의 성능개선 효과가 감쇠장치와 능동제어기보다 상대적으로 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 각 능동제어장치에 요구되는 제어력도 한계값인 500kN이하로 나타났으며, 능동제어기의 최적화가 잘 이루어진 것으로 판단된다.

표 4는 식 (17)에서 정의된 함수들인 f_{Pk} , f_{Pc} , f_{Pac} , f_{Pdr} 의 선호도를 살펴본 것이다. 초기단계에서는 약간의 추가강성을 사용하며, 감쇠기와 능동제어장치의 경우 과도한 양을 사용하여, 바람직하지 않은 영역에 존재한다. 그러나 최적화가 이루어진 후에는 감쇠기와 하중재하기의 사용량 뿐만 아니라 층간변위응답도 허용가능한 영역 내에 존재하며 복합제어시스템의 최적화가 성공적으로 이루어졌음을 보여준다.

표 3 예제구조물의 최적설계값

Floor	Added stiffness(kN)		Passive damper(kNsec/m)		Actuator		
	binary code	final value	binary code	final value	binary code	final value	Max. control force/actuator
1	000000	0	001010	1000	011	3	498.91 kN
2			000000	0	011	3	496.22 kN
3			000000	0	011	3	476.69 kN
4			000100	400	010	2	497.20 kN
5			000000	0	011	3	491.71 kN
6			010111	2300	000	0	-
7			101001	4100	000	0	-
8			000110	600	000	0	-
9			000000	0	000	0	-

표 4 목적함수들의 선호도

Preference :	Desirable	Acceptable	Undesirable	Unacceptable
f_{P_1}	○ ← ●			
f_{P_2}			○ ← ●	
f_{P_3}		○ ← ●		
f_{P_4}		○ → ●		

○ : initial value, ● : final value

그림 5는 각층의 최대변위응답을 비제어시 및 타설계방법, 즉, 동일한 양의 댐퍼와 동일개수의 하중재하기를 순차적으로 배치한 방법과 비교하였다. 최상층의 변위응답의 경우, 비제어시의 응답과 비교하여 약 70%의 응답감소효과를 보이며, 기존의 설계방법보다 약 31.6%의 변위응답감소효과를 보인다. 한편, 이때 요구되는 최대제어력은, 동시설계방법의 경우 6880kN과 기존설계방법은 6194kN으로 약 10% 정도의 제어력이 더 필요한 것으로 나타났다. 이는 제안하는 방법이 하중재하기가 최대의 능력을 발휘하도록 설치위치를 선정하였기 때문인 것으로 판단된다. 설계결과와 수치모사 결과로부터 제시하는 방법은 여러 개의 비용함수들을 동시에 고려해야 하는 복합제어시스템의 설계에 있어서, 합리적인 방안을 제시하고 있음을 보여준다.

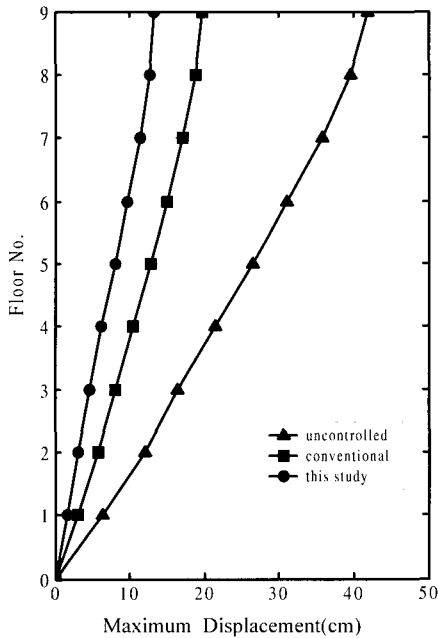


그림 5 각층의 최대변위응답

5. 결 론

이 연구에서는 구조물의 진동성능 향상을 위한 복합제어시스템의 최적설계방법을 제시하였다. 이 방법은 수동제어 장치의 배치 후 능동제어기를 설계하던 기존의 순차적인 설계개념과는 달리, 복합제어장치를 하나의 통합된 시스템으로 보고 동시에 최적설계를 수행하는 것으로 수동제어 장치의 설치위치나 용량뿐 아니라 하중재하기의 설치위치 및 개

수를 동시에 최적화할 수 있다. 제어비용과 제어성능을 구성하는 여러 가지 목적함수로부터 다목적 최적화문제를 합리적으로 구성하기 위하여 선호도함수를 유도하였으며, 설계인자들에 대한 최적화방법으로 유전자알고리즘을 사용하였다.

예제로서 지진하중을 받는 9자유도 빌딩구조물의 수치모사를 통하여 제안하는 동시최적설계방법의 타당성 및 효율성을 검증하였다. 동일한 제어비용을 사용하는 기존설계방법을 통해 얻어진 응답과 비교한 결과, 제안하는 동시최적설계방법이 보다 우수한 진동제어효과를 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 2002년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Koh, H. M., Park, K. S., Park, W., Park, K. S., and Kim, Y. S., "Active vibration control of air traffic control tower at Incheon international airport under wind excitation," *Proceedings of 2nd World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, 1998.
2. 고현무, 박관순, 박원석, "질량감쇠기가 설치된 고층구조물의 풍하중에 대한 사용성평가", *대한토목학회논문집*, 제21권, 제1-A호, 2001, pp. 53-64.
3. Cao, H., Reinhorn, A. M., and Soong, T. T., "Design of an active mass damper for wind response of Nanjing TV tower," *Journal of Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 1997, pp. 134-143.
4. 고현무, 박관순, 박원석, 조익선, "고차모우드 불확실성을 고려한 지진응답의 강인제어", *한국지진공학회논문집*, 제4권, 제2호(통권 제14호), 2000. 6, pp. 99-108.
5. Abe, M., Erkus, B., Fujino, Y., and Park K. S., "Applicability of semi-active control for seismic protection of elevated bridges," *第55回年次學術講演會講演概要集*, 日本土木學會, 2000. 9.
6. Kobori, T., "Mission and perspective towards future structural control research," *Proceedings of the Second*

- World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, 1998.
7. 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, 1999, pp. 37-60.
 8. Niewoehner, R. J. and Kaminer, I. I., "Integrated aircraft-controller design using linear matrix inequalities," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 19, No. 2, 1996, pp. 445-452.
 9. Messac, A., "Physical programming: effective optimization for computational design," *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 2, 1996, pp. 149-158.
 10. Goldberg, D. E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading Mass, 1989.
 11. Holland, J. H., *Adaption in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
 12. Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C. S., "Discrete optimization of structures using genetic algorithm," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1233-1250.
 13. Kirk, D. E., *Optimal Control Theory - An Introduction*, Prentice Hall, 1970.
 14. Adnerson, B. D. O. and Moore, J. B., *Optimal Filtering*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1979.
 15. Khot, N. S., "Multicriteria optimization for design of structures with active control," *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 11, No. 2, 1998, pp. 45-51.
 16. Shinozuka, M. and Deodatis, G., "Simulation of stochastic processes by spectral representation," *Applied Mechanics Review*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 191-203.
 17. 고현무, 박관순, 송준호, "유체-구조물 상호작용을 고려한 지진격리 수조구조물의 비용효율성 평가", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권, 제2-A호, 2000b, pp. 201-215.