

다단계 목표계획법을 이용한 복합구조제어시스템의 통합최적설계

Integrated Optimal Design of Hybrid Structural Control System using Multi-Stage Goal Programming Technique

박관순^{*}
Park, Kwan Soon

고현무^{**}
Koh, Hyun-Moo

옥승용^{***}
Ok, Seung-Yong

국문요약

이 연구에서는 지진하중을 받는 빌딩구조물에 대한 복합구조제어시스템의 최적설계방법을 제시한다. 복합구조제어시스템의 설계는 구조물의 부재뿐만 아니라 수동 제어 시스템 및 능동제어시스템의 용량 및 위치 최적화 과정으로 정의된다. 최적설계는 이 연구에서 제안된 다단계 목표계획법(Multi-Stage Goal Programming)을 이용하여 최적화문제를 정식화하고 목표값신 유전자알고리즘(Goal-Updating Genetic Algorithm)을 적용하여 합리적인 최적화를 진행해가는 과정으로 구성된다. 다단계 목표계획법에서는 구조물의 층간 상대변위와 제어시스템의 용량에 대한 설계목표를 여러 단계로 선정하고, 각 물리량과 설계목표간의 정규화된 거리 합으로서 목적함수를 정의한다. 목표값신 유전자알고리즘은 각 단계별 설계목표를 만족하는 최적해를 검색하고, 현 단계의 모든 설계목표를 만족하는 최적해가 존재할 경우 설계목표를 순차적으로 갱신함으로써 보다 상위수준의 설계목표로 접근해 나아간다. 지진하중을 받는 9층의 빌딩구조물에 대한 수치 예를 통하여 복합구조제어시스템의 통합최적설계 과정을 기술하였고, 구조부재, 수동 및 능동제어시스템이 균등분포된 구조물과 최적 설계결과를 비교하여 제시하는 방법의 효율성을 검증하였다.

주요어 : 복합구조제어시스템, 통합최적설계, 다단계 목표계획법, 목표값신 유전자알고리즘

ABSTRACT

An optimal design method for hybrid structural control system of building structures subject to earthquake excitation is presented in this paper. Designing a hybrid structural control system may be defined as a process that optimizes the capacities and configuration of passive and active control systems as well as structural members. The optimal design proceeds by formulating the optimization problem via a multi-stage goal programming technique and, then, by finding reasonable solution to the optimization problem by means of a goal-updating genetic algorithm. In the multi-stage goal programming, design targets(or goals) are at first selected to correspond to several stages and the objective function is then defined as the sum of the normalized distances between these design goals and each of the physical values, that is, the inter-story drifts and the capacities of the control system. Finally, the goal-updating genetic algorithm searches for optimal solutions satisfying each stage of design goals and, if a solution exists, the levels of design goals are consecutively updated to approach the global optimal solution closest to the higher level of desired goals. The process of the integrated optimization design is illustrated by a numerical simulation of a nine-story building structure subject to earthquake excitation. The effectiveness of the proposed method is demonstrated by comparing the optimally designed results with those of a hybrid structural control system where structural members, passive and active control systems are uniformly distributed.

Key words : hybrid structural control system, integrated optimal design, multi-stage goal programming, goal-updating genetic algorithm

1. 서 론

최근 들어 세계 각지에서 빈번하게 발생하는 지진피해로 인하여 기존 대형구조물의 설계방법에 대한 문제점 및 한계점을 인식하고 이를 극복하기 위한 많은 시도가 이루어져 왔다. 특히, 고층빌딩이나 타워 등의 유연하면서 저감비를 갖는 구조물들에 대하여 안정성뿐만 아니라 가능성을 보장하는 방법들에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되어 왔다⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾. 이러한 연구의 일환으로 구조부재를 이용한 설계보강뿐만 아니라 부가적인 시스템, 즉 수동, 능동, 준능동 및 복합제어시스템 등을 이용한 진동제어기법이 제시되어 여러 구조물에 성공적으로 설치되기도 하였다.^{(6),(7)} 비록 실구조물의 적용을 통하여 각 제어시스템의 제어성능이 입증되었

으나, 각 제어시스템은 나름대로의 한계점을 갖고 있다. 즉, 수동제어시스템은 안정적인 거동을 보이는 장점으로 인하여 가장 보편적으로 적용되고 있으나, 구조물의 모델링 오차나 지진과 같은 외부하중의 불확실성에 대한 적응성이 떨어질 수 있으며 설치공간 등으로 인한 제어용량이 제한될 수 있는 단점을 갖는다. 한편, 능동제어시스템은 그 시스템이 갖는 제어성능으로 인하여 주목받아 토목구조물에 효과적으로 적용되어 왔으나, 높은 전력량을 갖는 추가적인 외부전원시스템을 필요로 하게 되므로 작동의 신뢰성이 문제가 될 수 있다. 이러한 제어시스템의 한계점을 보완하기 위한 방법으로 복합제어시스템(hybrid control system)을 고려할 수 있다.⁽⁸⁾ 복합제어시스템은 기존의 단일제어시스템만을 적용하여 제어목표를 달성하는 것보다 여러 가지 제어시스템을 동시에 적용함으로써 개별적 제어시스템이 갖는 단점들을 상호 보완하면서 구조물에 요구되는 제어시스템의 용량을 각 제어시스템의 제어특성에 따라 효율적으로 분산시켜서 제어목표를 달성할 수 있는 장점을 갖는다. 이 논문에서는 기존에 적용된 복합제어시스템을 보다 일반화하여, 수동 및 능동

^{*} 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 계약조교수 · 공학박사
(대표적자 : kspark@sel.snu.ac.kr)

^{**} 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수 · 공학박사

^{***} 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정 · 공학석사

본 논문이 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재 하겠습니까.
(논문접수일 : 2003. 7. 31 / 심사종료일 : 2003. 10. 2)

제어시스템뿐만 아니라 구조부재를 하나의 시스템으로 간주하여 최적화하는 방법을 제시한다. 따라서, 제시하는 방법에서는 구조부재, 수동형 댐퍼 및 능동제어시스템의 위치와 용량의 최적설계문제를 다룬다.

복합제어시스템의 설계문제는 구조부재의 사용량, 수동 및 능동제어시스템의 용량과 구조물의 응답을 동시에 최소화 대상으로 하는 다목적 최적화문제로 구성된다. 다목적 최적화문제는 각 목적함수들의 상충작용으로 인하여 무수히 많은 최적해(pareto optimal solutions)를 갖는다. 따라서, 다목적 최적화문제에 있어서 중요한 것은 많은 최적해로부터 설계의 관점에서 보다 합리적인 최적해를 어떻게 선정하는 것이다.^{(9),(10)} 하나의 방법으로서, 설계목표를 미리 선정하여 각 목적함수간 차이의 합을 목적함수로 구성하고 이를 최소화함으로써 설계목표를 만족하는 최적해를 구하는 목표계획법(goal programming : GP)을 고려할 수 있다. 하지만, 실제 공학문제에서는 하나의 최종적인 설계목표 값을 미리 결정하는 것은 쉽지 않다. 일반적인 목표계획법에서는 각 목적함수간의 중요도가 합리적인 설계목표를 표현할 수 있을 때까지 반복적인 설계를 필요로 한다. 이 연구에서는 여러 수준의 설계목표를 선정하고 각 단계별 설계목표들을 만족하는 최적해들을 점진적으로 검색해가는 다단계 목표계획법(multi-stage goal programming : MSGP)을 제시함으로써 이러한 문제점을 해결하고자 한다. 이 방법은 기 설정된 설계목표들을 만족하는 최적해를 단계별로 검색함으로써 보다 합리적인 최적해를 효과적으로 구할 수 있으며, 광범위한 해 영역(solution space)을 갖는 최적화문제에서 하위단계의 설계목표부터 검색함으로써 전역 최적해의 검색을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 장점을 갖는다. 이의 구현방법으로 설계목표를 단계적으로 갱신함으로써 상위단계의 설계목표로 진화해가는 목표갱신 유전자알고리즘(goal updating genetic algorithm : GUGA)을 적용하였다. 제시하는 방법의 효율성을 검증하기 위한 예제로서 빌딩구조물에 대한 복합구조제어시스템의 최적설계방법을 모사하는 수치해석을 수행하였다. 최적설계 과정을 통하여 제시하는 알고리즘이 효율적으로 수행되고 있는 과정을 제시하였으며, 동일한 용량으로 구조물에 등분포시킨 시스템과 제시하는 기법에 따라 설계된 시스템간의 제어성능을 비교하였다.

2. 상태공간방정식 및 능동제어알고리즘의 정식화

2.1 상태공간방정식

지진하중을 받는 n 개의 자유도를 갖는 구조시스템의 운동방정식은 일반적으로 식 (1)과 같은 2차의 미분방정식으로 표현된다.

$$M_s \ddot{q}(t) + C_s \dot{q}(t) + K_s q(t) = E_w \ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

여기서, M_s , C_s , K_s 는 각각 $[n \times n]$ 크기의 질량, 감쇠, 강성행렬이고, $\ddot{q}(t)$, $\dot{q}(t)$, $q(t)$ 는 $[n \times 1]$ 크기를 갖는 시

스템의 가속도, 속도, 변위벡터이며, $\ddot{x}_g(t)$ 는 지진가속도, E_w 는 외부하중의 작용위치벡터로서 지진하중에 대하여 $-M_s \cdot \vec{1}_{[n \times 1]}$ 이다.

복합구조제어시스템은 그림 1에서 보는 바와 같이 각각 k_p^i , c_p^i , u_a^i 로 표기되는 부가적인 구조부재와 수동형 댐퍼 및 능동제어시스템으로 구성되며, 구조물에 설치한 경우의 운동방정식은 아래의 식 (2)로 재구성된다.

$$M_s \ddot{q}(t) + (C_s + C_p) \dot{q}(t) + (K_s + K_p) q(t) = E_w \ddot{x}_g(t) + E_u u(t) \quad (2)$$

여기서, K_p 및 C_p 는 $\begin{bmatrix} k_p^i & -k_p^i \\ -k_p^i & k_p^i \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} c_p^i & -c_p^i \\ -c_p^i & c_p^i \end{bmatrix}$ 의 형태로, 설치되는 층에 해당하는 자유도별로 n 자유도 운동방정식 (2)에 삽입된다. 그리고, E_u 는 제어력의 위치행렬로서, m 개의 능동제어장치가 독립적으로 장착되는 경우, $[n \times m]$ 크기를 가지며, $u(t)$ 는 제어력벡터로서, $[u_a^1, u_a^2, \dots, u_a^m]^T$ 으로 표현된다.

상태벡터(state vector)를 식 (3)과 같이 시스템의 변위와 속도벡터로서 정의하면,

$$x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

전체 구조시스템의 운동방정식은 식 (4)와 같은 1차의 미분방정식으로 표현되는 상태공간방정식으로 변환된다.

$$\dot{x}(t) = A_s x(t) + B_w \ddot{x}_g(t) + B_u u(t) \quad (4)$$

여기서, $A_s = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_s^{-1}(K_s + K_p) & -M_s^{-1}(C_s + C_p) \end{bmatrix}$ 으로 표현되는 시스템행렬이고, $B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} E_w \end{bmatrix}$, $B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M_s^{-1} E_u \end{bmatrix}$ 는 각각 외란행렬과 제어행렬이다.

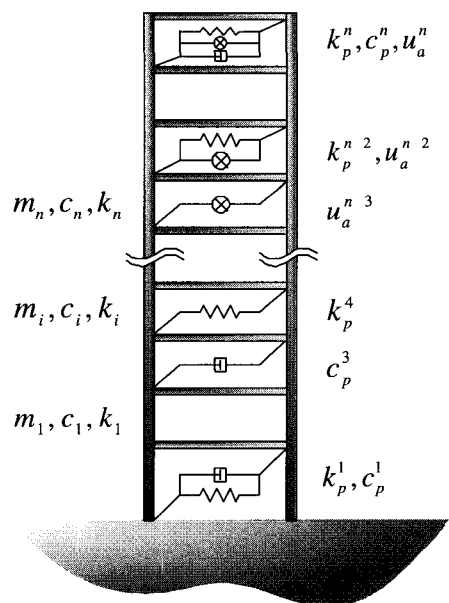


그림 1 복합구조제어시스템

2.2 제어알고리즘

복합구조제어시스템을 구성하는 능동제어시스템의 제어 알고리즘은 식 (4)의 상태공간방정식을 제한조건으로 가지며 식 (5)로 표현되는 성능지수를 최소화하는 LQR제어기법⁽¹¹⁾을 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [y(t)^T y(t) + u(t)^T R u(t)] dt \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)] dt \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서, $y(t)$ 는 제어변수로서, 각 층의 층간 상대변위로 정의하였으며, 이에 따라 $y(t) = [C_0 \ 0] \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = C_c x(t)$ 로 표현된다. 여기서, C_0 는 각 층의 변위를 층간 상대변위로 환산하는 행렬로서, $C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$ 이다. 그리고, $Q = C_c^T C_c$

는 $2r \times 2n$ 크기의 준양정치 가중행렬(semi-positive definite weighting matrix), $u(t)$ 는 제어력, $R = r \cdot I_{m \times m}$ 은 양정치 가중행렬(positive definite weighting matrix)이다.

최적제어이론에 의하면 식 (4)를 만족하면서 식 (5)의 성능지수를 최소화하는 최적제어력은 식 (6)으로 표현되며, 제어이득행렬 G 를 구성하는 S_r 행렬은 가중행렬 Q, R 에 대한 식 (7)의 Riccati 방정식을 만족하는 해이다.

$$u(t) = -Gx(t) = -R^{-1}B_u^T S_r x(t) \quad (6)$$

$$A_s^T S_r + S_r A_s - S_r B_u R^{-1} B_u^T S_r + Q = 0 \quad (7)$$

따라서, 식 (2), (6)에서 K_p, C_p, E_u, R 로 표현되는 부가적인 구조부재의 강성(k_p^i), 수동제어시스템의 감쇠계수(c_p^i), 능동제어시스템의 설치위치 및 가중치(r)는 복합구조제어시스템의 구성요소로서 최적화의 대상인 설계변수가 된다.

3. 다목적 최적화문제의 구성 및 최적화기법

3.1 다목적 최적화문제

복합제어시스템의 설계문제는 비용에 해당하는 제어시스템의 용량과 제어성능에 해당하는 구조물의 응답을 최소화 대상이 되는 목적함수로 고려할 수 있다. 그런데, 일반적으로 제어시스템의 비용과 성능은 설계변수에 대하여 서로 상충하는 특징을 가지므로, 여러 개의 목적함수들을 동시에 최소화하는 다목적 최적화문제를 구성하게 된다. 다목적 최적화문제에 대한 해법으로는 여러 가지 방법들이 제시된 바가 있다.⁽¹²⁾ 이러한 방법들의 대부분은 여러 개의 pareto 최적해를 구하고, 부가적인 설계기준이나 설계조건을 이용함으로써 단일한 최적해를 구하게 된다. 그림 2와 같이, 설계변수는 x 이고, 두 개의 목적함수의 가중합 $w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x)$ 를 최소화하는 문제를 고려하자. 그림에서 x 축과 y 축은 두

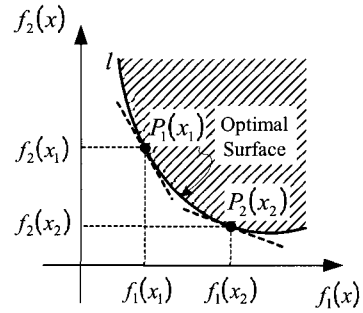


그림 2 Pareto optimal solutions

목적함수 값을 나타내며, 빗금친 영역이 목적함수에 대하여 검색 가능한 해 영역(feasible solution space)을 나타낸다. 이 문제에서는 가중치 w_1 과 w_2 에 따라 두 개의 최적해, $P(x_1), P(x_2)$ 가 결정된다고 할 때, 두 설계변수 x_1, x_2 는 아래의 식 (8)을 만족한다. 즉, 해 x_1 이 목적함수 $f_1(x)$ 에서는 x_2 보다 작은 값을 갖지만, 목적함수 $f_2(x)$ 에서는 x_2 보다 높은 값을 갖게 된다. 따라서, 두 해 x_1, x_2 는 서로에게 열등하지 않는 최적해이며, 아울러 두 점을 포함한 곡선 I 상의 모든 점들이 최적해로서 pareto(non-dominated, 또는 non-inferior) optimal solutions라고 한다.⁽¹³⁾

$$f_1(x_1) < f_1(x_2) \ \& \ f_2(x_1) > f_2(x_2) \quad (8)$$

결국, 단일한 최적해를 결정하는 것은 각 목적함수간의 가중치를 나타내는 w_1 과 w_2 가 되며, 이 계수가 앞서 언급한 설계기준이나 설계조건에 해당한다고 할 수 있다. 그러므로, 다목적 최적화문제에 있어서 가장 중요한 것은 설계기준이나 설계조건을 어떻게 선정하는가에 달려있다. 이러한 설계문제에 있어서 널리 적용되는 방법으로 목표계획법이 있다. 이는 설계목표(비용과 성능)를 미리 결정하고 각 목적함수간의 차이를 목적함수로 구성하고 이를 최소화함으로써 설계목표를 만족하는 최적해를 구하는 방법이다. 하지만, 실제 공학문제에서는 적절한 설계목표 값을 미리 결정하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 설계하기 전 선행연구를 통한 설계자의 공학적 직관에 따라 결정되는 것이 일반적이다. 이 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 MSGP를 이용하여 최적화문제를 구성하고, 해석기법으로 GUGA를 제시하고자 한다.

3.2 다단계 목표계획법(MSGP)

복합제어시스템의 최적설계를 위한 개별적 목적함수들은 제어시스템의 비용 및 제어성능을 나타내는 구조물의 응답을 이용하여 표 1로 정의하였다. 제어시스템의 비용은 구조부재의 사용량, 수동제어시스템의 사용량 및 능동제어시스템의 용량을 나타내는 최대제어력으로 표현될 수 있으며, 제어성능에 해당하는 구조물의 응답은 빌딩구조물의 안정성을 대표하는 층간 상대변위의 최대값으로 대표될 수 있다. 구조물의 응답은 각 층별 최대값으로 목적함수를 구성하므로 전체 목적함수를 구성하는 개별적 목적함수의 개수는 구조물

표 1 개별적 목적함수

목적함수	구조부재 사용량	수동제어시스템 사용량	능동제어시스템 최대제어력	각 층의 최대 층간 상대변위
$f_{obj}^k (k=1, \dots, n+3)$	$\sum_{i=1}^n k_p^i$	$\sum_{i=1}^n c_p^i$	$\sum_{i=1}^n \max_t \{u_a^i(t)\}$	$\max_t \{q_{rel}^i(t)\}, i=1, 2, \dots, n$

의 층 수 $(n)+3$ 개가 된다.

제안하는 MSGP는 표 1의 개별적 목적함수들에 대한 설계목표 값을 여러 개의 수준으로 분류하여 개별적 목적함수들과 각 수준에서의 목표설계 값의 정규화된 거리 합으로 각 단계별 목적함수를 구성한다. 그리고, 현 단계에서 정의된 목적함수에 대한 최적화 과정을 수행하여 개별적 목적함수를 모두 만족하는 최적해가 존재할 때, 다음 수준의 설계목표 값에 대한 정규화된 거리 합으로 재정의되는 목적함수에 대한 최적화 과정을 반복 수행한다. 이러한 과정을 통하여 가장 높은 수준의 제어목표를 만족하는 최적해를 검색하게 된다. MSGP에서 j 단계의 목적함수는 식 (9)로 정의된다.

$$F(x)_j = \sum_{k=1}^{n+3} \left\langle \frac{f_{obj}^k(x) - \{g_{desired}^k\}_j}{\{g_{desired}^k\}_j} \right\rangle \quad (9)$$

여기서, x 는 설계 변수이며, $F(x)_j$ 는 j 단계에서의 목적함수 값으로서, 설계목표 값에 대하여 정규화된 개별적 목적함수의 합을 의미하고, 연산자 $\langle z \rangle$ 는 $\max\{z, 0\}$ 로 정의된다. 따라서, $F(x)_j$ 는 영(zero) 이상의 값을 갖는다. f_{obj}^k 는 표 1에서 정의된 k 번째 목적함수이고, $\{g_{desired}^k\}_j$ 는 j 단계에서 정의된 k 번째 목적함수에 대한 설계목표 값을 의미한다. 따라서, $F(x)_j=0$ 은 j 단계에서 모든 설계목표 값을 만족하는 것을 의미하고, 이 때, $j+1$ 단계의 목적함수 $F(x)_{j+1}$ 를 재구성하여 최적화 과정을 반복 수행함으로써 보다 나은 최적해를 검색하게 된다.

제안하는 방법에서는 각 단계별 정의되는 설계목표 값을 만족하는 최적해를 검색하고 이를 모두 만족할 때, 다음 수

준의 설계목표 값을 만족하는 최적해를 향하여 검색이 진행된다. 제시하는 방법에 따른 최적화 과정의 개념도가 그림 3에 도시되어 있다. 그림 3의 (a)는 i 번째 단계에서의 최적화 과정으로서, 설정된 설계목표가 검색 가능한 해 영역에 존재하는 경우에는 $i-1$ 번째 최적해에서 i 번째 설계목표를 만족하는 최적해로 갱신된다. 각 단계에서 설계목표를 만족하는 최적해를 검색할 때, 그림 3의 (b)처럼 상위 수준의 설계목표를 만족하는 최적해로 진행되어 최종적인 설계목표에 가장 근접하는 최적해를 검색하게 된다. 따라서, 제시하는 MSGP는 적합한 최종 설계목표를 얻기 위한 반복적인 설계절차를 줄일 수 있는 장점을 갖는다.

3.3 목표갱신 유전자알고리즘(GUGA)

복합구조제어시스템은 장착되는 수동제어시스템과 구조물간의 상호작용으로 인하여 구조시스템의 동특성이 달라지므로, 수동제어시스템의 위치 및 용량에 따른 구조물과의 상호작용을 고려하여 능동제어시스템의 최적설계, 즉 제어이득(식 (6))이 결정되어야 한다. 또한, 능동제어기 자체의 설치위치 및 개수에 따라서도 최적의 제어이득(식 (6))은 조정되어야 한다. 따라서, 매 순간 제어기의 용량한계를 고려한 최적의 제어이득행렬을 구하기 위해서는 많은 반복과정이 필요하게 된다. 특히, 각 시스템의 최적 위치를 얻기 위해서는 이산량(discrete number)으로 표현되는 설계변수를 갖게 되므로, 최적화 문제는 더욱 복잡해지게 된다. 일반적으로 이러한 최적화문제에는 유전자알고리즘이 효율적으로 적용될 수 있다.⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾

MSGP에 따라 구성된 최적화문제의 해석기법으로 개발된 GUGA는 그림 4와 같은 두 단계의 계층적인 구조로 구성된다.

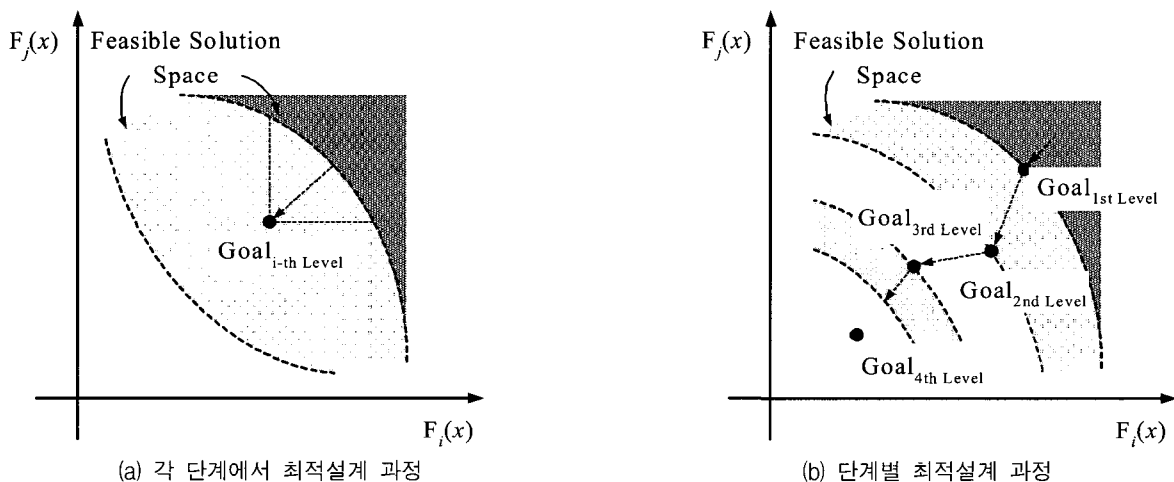


그림 3 MSGP의 최적화 과정

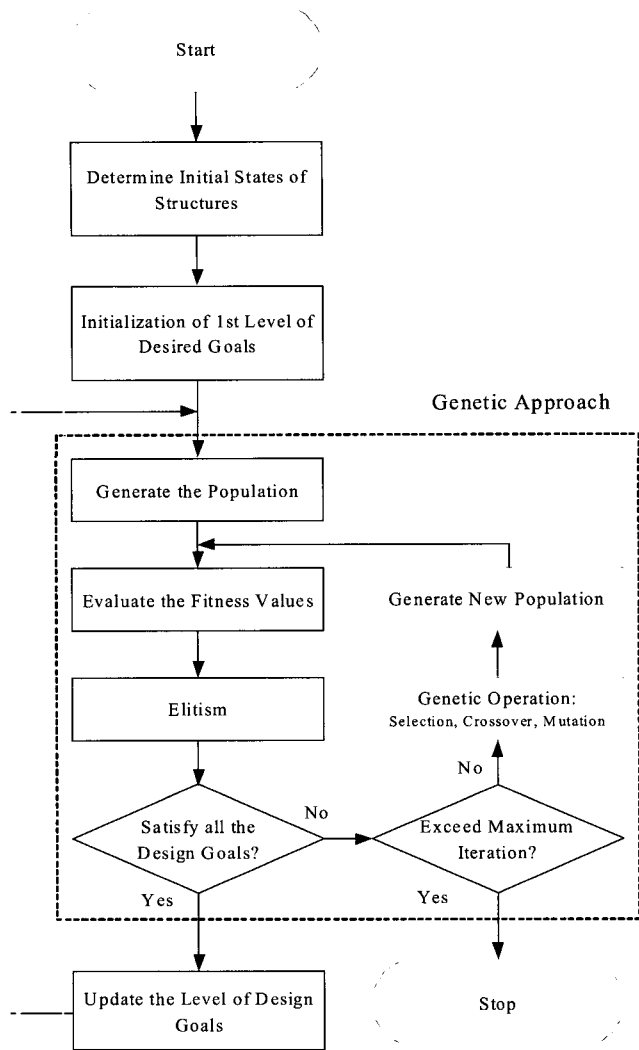


그림 4 GUGA의 Flowchart

상위계층에서는 각 단계별 설계목표를 설정하고, 하위계층에서는 설정된 설계목표를 만족하는 최적해를 검색하는 유전자알고리즘을 이용한 최적화 과정으로 이루어진다. 유전자알고리즘은 기존의 단일목적함수에 대한 유전자알고리즘과 동일한 방식으로 진행된다. 먼저, 설계변수의 이진코딩인 임색체(chromosome)로 구성된 개체군(population)을 생성한다. 다음으로 생성된 개체군에 대한 적합도(fitness)를 목적함수 값으로부터 산정한다. 산정된 적합도에 따라 우수한 임색체를 보존하고, 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation) 등의 유전연산을 통해 새로운 세대(generation)의 진화된 개체군을 구성하는 과정을 반복하여 점점 우수한 유전자(gene), 즉 설계변수를 얻게 된다. 우수한 임색체를 보존하는 엘리티즘(elitism)단계에서 검색된 최적해가 설계목표를 만족하는지를 판단하여 상위 수준의 설계목표의 개선 여부를 결정한다.

표 2 유전자알고리즘의 매개변수

세대별 개체 수	교배확률	돌연변이확률	비트 수	검색회수	최적해 판별 반복회수
100	0.9	0.1	8 bits	100,000	500

4. 수치 예제

수치예제로서 9층의 빌딩구조물을 고려하였다. 각 층의 질량은 120(1층), 100(2~6층), 80(7~9층)(ton), 모든 층의 초기 강성은 50(MN/m), 9개 모드에 대한 감쇠비는 [1.0, 1.0, 1.37, 1.77, 2.11, 2.45, 2.71, 2.92, 3.13]^T(%)로 가정하였다. 초기 3개 모드에 대한 구조물의 고유주파수는 [0.62, 1.81, 2.90]^T(Hz)이다. 복합형 구조제어시스템을 구성하는 수동제어시스템은 일반적인 유압식 선형감쇠기를 고려하였으며, 능동제어시스템으로는 active tendon 형식의 제어시스템을 적용하였다. 설계지반운동으로는 인공지진생성방법⁽¹⁷⁾에 의하여 얻어진 50개의 지진파를 사용하였다. 이 때, 지반운동 지속시간은 20초, 강진지속시간은 6.6초, 최대 지반가속도는 0.42g로 가정하였으며, 그림 5는 지반가속도의 생성 예를 나타낸다.

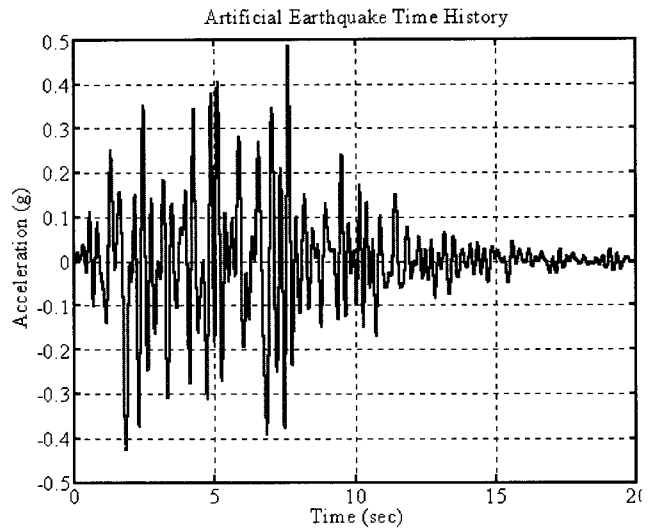


그림 5 입력지반가속도의 시간이력곡선

4.1 유전자알고리즘의 적용

유전자알고리즘에서 적용되는 각 세대별 생성되는 개체 수, 교배확률, 돌연변이 확률, 유전자의 비트(bits) 수 및 최적해 판별의 반복회수 등의 매개변수 값이 표 2에 제시되어 있다.

설계변수들인 각 층의 강성(k_b^i), 감쇠계수(c_b^i) 및 능동제어시스템의 설계를 위한 가중치(r)는 각각 8 비트로 이진코딩화(encoding)하였으며, 능동제어기의 설치층 수만큼의 비트 수를 사용하여 각각 설치여부(1=설치함, 0=설치안함)를 결정하였다. 따라서, 전체 설계변수에 대한 비트 수는 9개 층에 배치되는 강성 및 감쇠계수에 대하여 각각 8 비트와 가중치(r) 및 설치여부를 결정하는 9개의 비트 수를 포함해서 총 161(=9×8+9×8+8+9) 비트이며, 이 때, 유전자알

고리즘의 개체는 아래와 같은 이진코드로 표현된다.

$$\underbrace{10110001}_{k_p^1} \cdots \underbrace{0101001101011001}_{c_p^2} \cdots \underbrace{1100101000110101010001100}_{r_a^3}$$

4.2 설계변수의 검색영역 및 설계제한조건

설계변수들의 검색영역은 최적해를 검색할 수 있도록 충분히 넓은 해 영역에 대하여 합리적으로 결정되어야 한다. 각 설계변수들의 검색영역은 식 (10)으로 정의되며, 각 변수들의 영역을 나타내는 최대·최소값을 표 3에 나타내었다.

$$0 \leq k_p^1 \leq k_{p, \max}, \quad 0 \leq c_p^i \leq c_{p, \max}, \quad r_{a, \min} \leq r \leq r_{a, \max} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

표 3 각 설계변수의 검색영역의 최대·최소값

$k_{p, \max}$	$c_{p, \max}$	$r_{a, \max}$	$r_{a, \min}$
50(MN/m)	63(MN·s/m)	10^{20}	10^{-10}

또한, 각 층의 강성 값은 과도한 가분수 형태의 강성분포를 방지하기 위하여 아래의 식 (11)과 같이 상위 층의 강성이 하위 층보다 크지 않도록 제한조건을 두었다.

$$0 \leq k_p^j \leq k_p^{j-1} \quad j = 2, 3, \dots, n \quad (11)$$

4.3 단계별 설계목표

MSGP를 위한 설계목표는 상위 수준으로 갈수록 비용은 감소하고, 제어성능은 증가하도록 설정하였다. 따라서, 제어시스템의 사용량은 점진적으로 감소시키고, 제어성능에 해당하는 구조물의 층간 상대변위의 목표 값도 상위수준으로 갈수록 감소시켰다. 구조부재의 사용량에 대한 설계목표 ($g^1_{desired}$)는 기본 설계된 구조물의 강성량에 대하여 10%씩 감소되도록 식 (12)로 정의하였고, 감쇠량의 설계목표($g^2_{desired}$)는 초기 감쇠계수 값을 6.3(MN·s/m)으로 결정하고 매 단계마다 전 단계 목표값의 15%씩 감소되도록 식 (13)과 같이 설정하였다. 능동제어시스템 용량에 대한 설계목표($g^3_{desired}$)는 2000kN 용량의 가진기를 총 수인 9개만큼 적용할 수 있는 양부터 각 단계별로 한 개씩 줄여나가도록 식 (14)와 같이 설정하였다. 그리고, 구조물의 층간 상대변위에 대한 설계목표 ($g^{4}_{desired} \sim g^{3+n}_{desired}$)는 모두 동일한 값으로 층간 상대변위비에 대하여 1.2%에서 0.1%씩 줄여나가도록 식 (15)로 정하였다.

$$[g^1_{desired}]_j = \sum_{i=1}^n k_p^i = (1 - 0.1 \times j) 50 (MN/m) \times 9 (\text{층}) \quad (12)$$

$$[g^2_{desired}]_j = \sum_{i=1}^n c_p^i = 0.85^j \times 6.3 (MN \cdot s/m) \times 9 (\text{층}) \quad (13)$$

$$[g^3_{desired}]_j = \sum_{m=1}^{m_{sa}} u_a^m = (n - j + 1) \cdot 2000 (kN) \quad (14)$$

$$[g^{3+i}_{desired}]_j = \max_t \{q^i_{rel}(t)\} = (0.012 - 0.001 \cdot j) \cdot H (= 3m) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

식 (12)~(15)에서 하첨자 j 는 설계목표의 j 번째 단계를, i 는 i 번째 층을 의미한다. 그리고 식 (14)에서 m_{sa} 는 능동 제어시스템이 설치된 개수를 나타낸다.

4.4 최적화 및 설계 결과

그림 6은 각 단계별 설계목표를 만족하는 최적해들이 갱신되는 최적화 과정을 나타낸다. x 축은 유전자알고리즘에서 최적해를 검색하는 반복회수를 나타내고, y 축은 표 1에서의 개별적 목적함수 값을 나타낸다. 각 그림들에서 점선은 각 목적함수에 대한 단계별 설계목표 값, 실선은 최적설계 결과를 의미한다. 즉, 그림 (a)는 설계된 구조부재 및 감쇠기의 사용량의 전체 합, 그리고 능동제어시스템이 발휘하는 최대 제어력의 합이 갱신되는 최적화 과정을 나타낸다. 초반의 최적화 과정에서는 구조물의 층간 상대변위에 대한 제한조건 (설계목표)이 높은 값으로 설정되어 있고 제어시스템의 허용 사용량도 높은 값이므로, 설계목표를 만족하는 최적설계가 목표수준과 많은 차이를 갖는 것을 알 수 있다. 최적화 과정이 진행됨에 따라 설계목표 수준이 높아지므로(각 단계별 설계목표 값이 작아지므로), 최적설계 결과가 설계목표 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 제어시스템의 사용량을 최소화하면서 구조물의 층간 상대변위를 최소화하는 최적설계 과정을 나타내고 있다.

최적화 과정 도중에 부분적으로 목표설계를 만족하지 못하는 최적설계 결과를 보이지만, 최적화 과정이 반복적으로 진행됨에 따라 보다 나은 최적해를 검색함으로써 다음 단계의 설계목표를 향하여 진행하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 유전자알고리즘이 교배, 돌연변이 등의 유전연산에 의하여 보다 진화된 우수한 개체를 효과적으로 검색하고 있음을 알 수 있다.

이 연구에서 수행된 최적화 과정은 총 1970회의 반복계산이 소요되었으며, 그 결과 최적 설계된 복합형 구조제어시스템을 표 4에 도시하였다. 능동제어기는 1, 4, 5, 9층에 할당되었으며, 0.42g의 최대 가속도 값을 갖는 설계지진에 대하여, 각각 1418, 1272, 1023, 289(kN)의 최대 제어력을 발휘하였다. 따라서, 1, 4층에는 1500(kN) 용량의 능동제어기를, 5층에는 1000(kN), 9층에는 300(kN)용량의 제어시스템을 장착하도록 설계안을 제시할 수 있다.

4.5 제어성능 비교

제진성능을 평가하기 위한 지진입력으로는 표 5와 같은 다양한 주파수성분과 최대 지진크기 및 지반특성을 갖는 Northridge 지진(1994), Kobe 지진(1995), Gebze 지진(1999), Mexico 지진(1985), El Centro 지진(1940), Hachinohe 지진(1968) 등의 6개 실제 지진기록을 사용하였다.

설계된 최적제어시스템의 제진성능을 평가하기 위한 비교예제로서, 동일한 용량의 제어시스템을 균등분포한 제어시스템을 고려하였다. 즉, 표 4에서 설계된 강성과 감쇠계수의

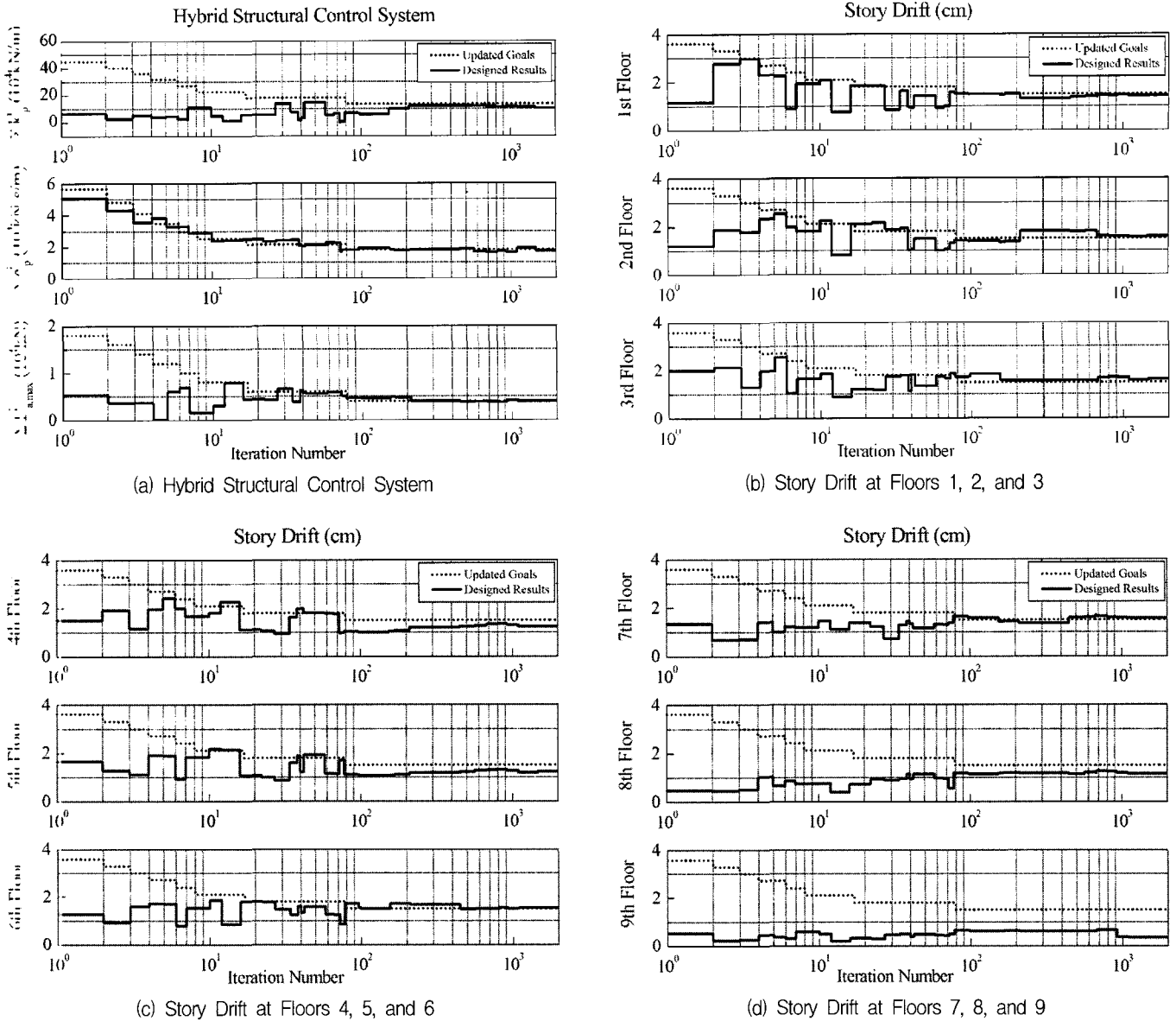


그림 6 각 단계별 설계목표를 갱신하는 최적화과정

표 4 최적설계결과

층	1층	2층	3층	4층	5층	6층	7층	8층	9층
k_p^i (MN/m)	32.75	32.62	29.68	6.05	0.90	0.82	0.05	0.02	0.00
c_p^i (MN-s/m)	1.24	5.53	1.93	0.15	1.19	5.39	1.33	0.05	0.74
능동제어기	有	無	無	有	有	無	無	無	有
u_c^i (kN)	418	-	-	1272	1023	-	-	-	289

표 5 입력 지진기록

Earthquakes	PGA(g)	Closest distance to fault rupture(km)	Soil type
Northridge(1994)	0.84	37(near field)	Rock
Kobe(1995)	0.83	14(near field)	Soft soil
Gebze(1999)	0.27	7.74(near field)	Rock
Mexico(1985)	0.14	400(far field)	Soft soil
El Centro(1940)	0.35	145(far field)	Soft soil
Hachinohe(1968)	0.23	180(far field)	Soft soil

총 합을 전 층(1~9층)에 균등하게 분포하여 각 층별 11.43MN/m의 강성과 1.95MN-s/m의 감쇠계수를 가지며, 능동제어시스템도 2, 4, 6, 8층에 균등하게 배치하였으며, LQR 제어기법을 적용하여 4.3절에서 정의한 설계목표들에 대하여 최적설계하였다.

제시하는 기법에 따라 최적 분포된 제어시스템(optimally distributed control system, ODCS)과 강성 및 감쇠 용량은 동일하면서 위치최적화를 고려하지 않은 시스템(uniformly distributed control system, UDCS)에 대한 수치모사를 수행하고 비교결과를 그림 7, 8에 도시하였다. 그림 7은 각 지진에 대하여 능동제어시스템에 요구되는 최대 제어력을 나타내고 있는데, 두 방법간 층별로 크고 작음의 차이가 있으나, 최대 용량의 관점에 있어서는 제안하는 방법이 다소 작은 제어력이 필요한 것으로 나타났다. 한편, 그림 8은 최대 층간 상대변위를 비교한 결과로서, ODCS가 UDCS에 비교하여 응답들을 효과적으로 감소시키고 있으며, 특히 1층의 경우는 54.5~64.7%의 감소효과가 있는 것으로 나타났다. 따라

서, 복합구조제어시스템을 구성하는 여러 제어장치들의 적절한 배치는 제어시스템의 성능에 직접적 효과를 가지므로 설계단계에서 고려가 필요하며, 해석결과로부터 제시하는 설계방법이 복합구조제어시스템의 설계에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

구조제어시스템의 설계에 있어서 구조부재, 수동 및 능동 제어시스템을 동시에 고려한 복합구조제어시스템의 용량 및 위치 최적화기법을 연구하였다. 이 연구에서는 구조부재의 사용량, 수동 및 능동제어시스템의 용량과 각 층의 층간 상대변위응답의 최대값들에 대한 설계목표를 다단계로 선정하고, 각 단계별 설계목표들을 만족하는 최적의 구조부재와 제어시스템의 용량 및 위치검색을 순차적으로 수행함으로써 보다 합리적인 최적해로 진행해가는 MSGP를 제시하였다. 이의 구현방법으로, 설정된 설계목표들을 만족하는 최적해

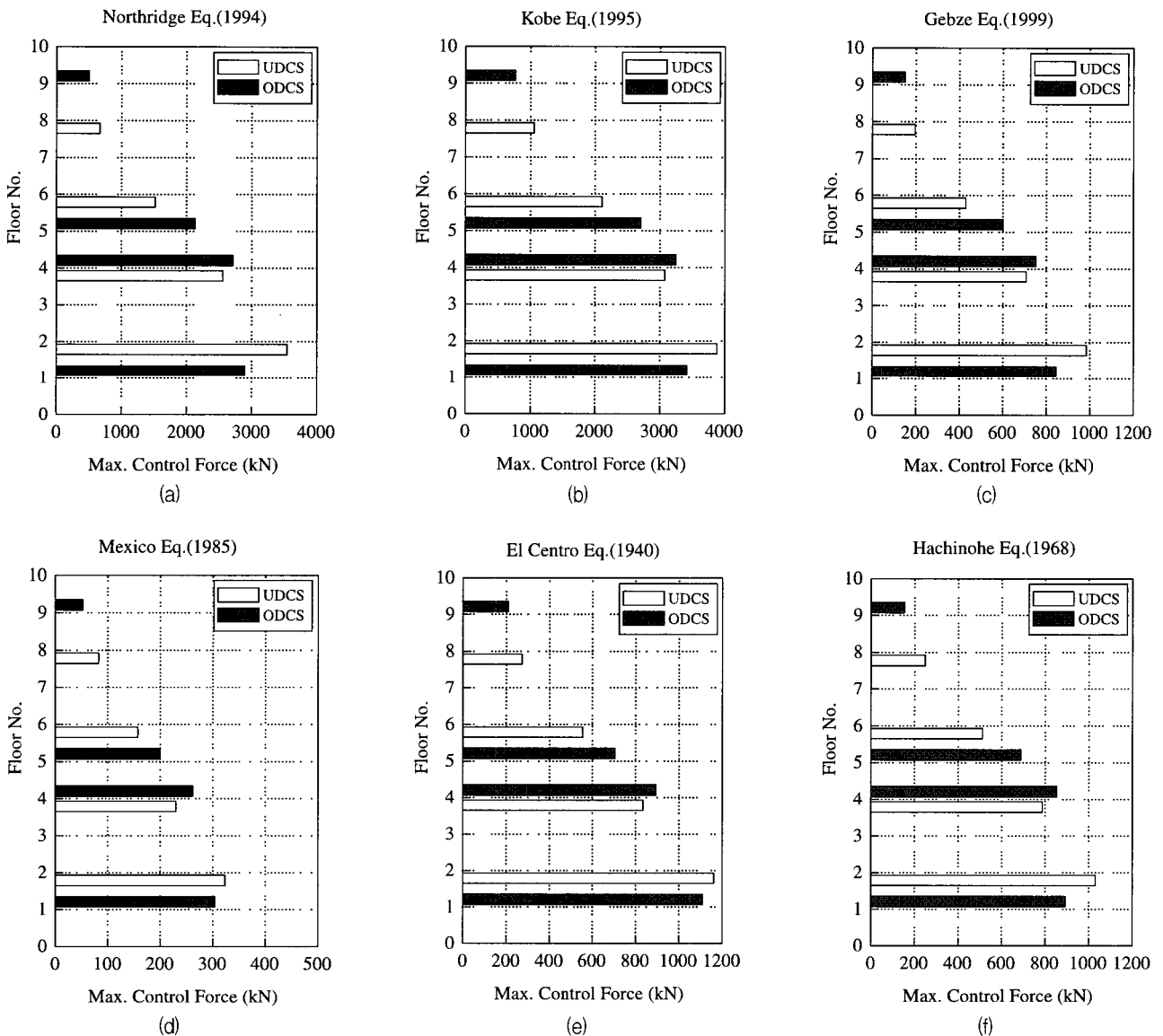


그림 7 지진별 능동제어시스템의 최대 제어력

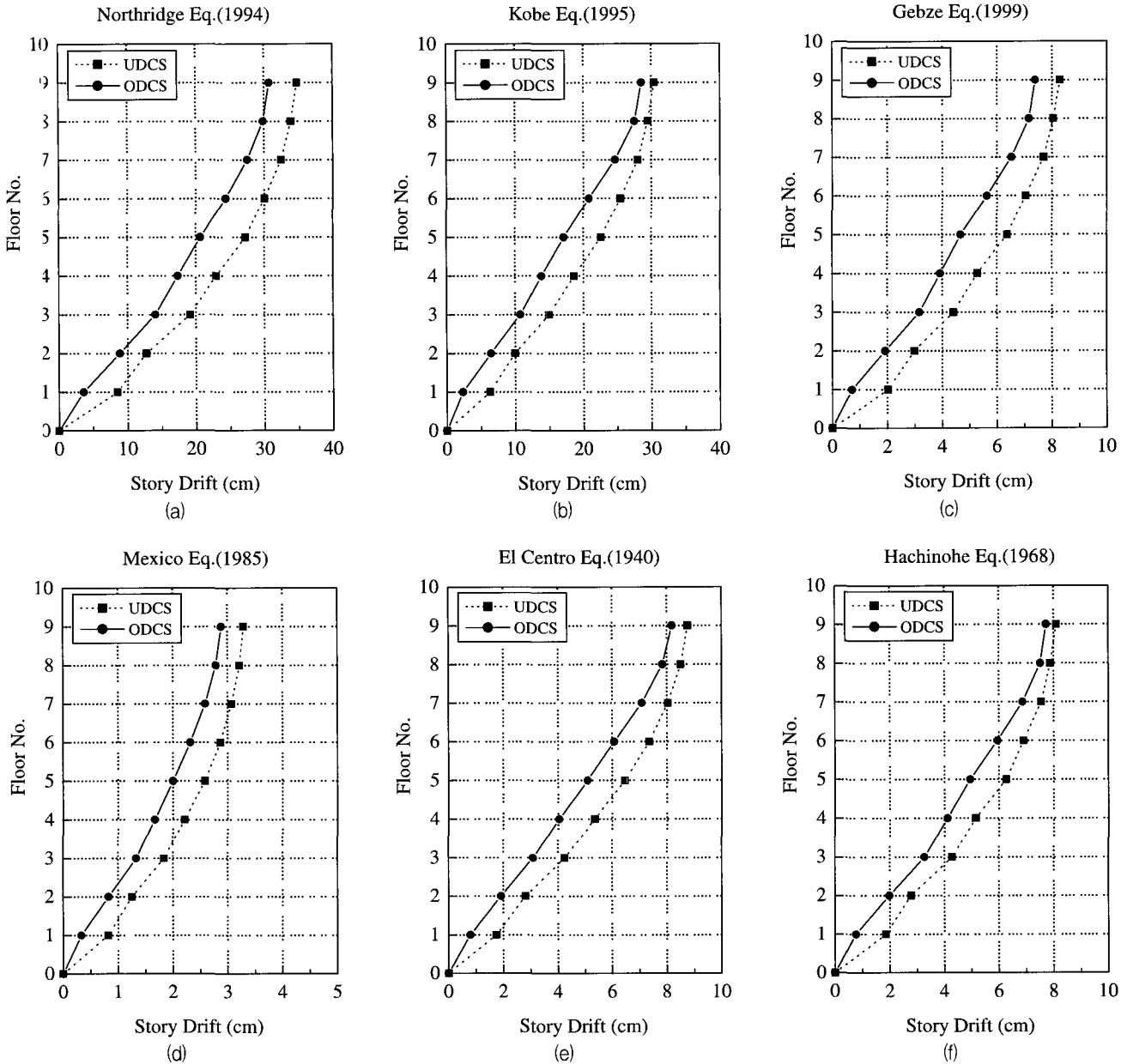


그림 8 지진별 최대 층간 상대변위

를 검색하고 설계목표를 단계적으로 갱신함으로써 상위수준의 설계목표로 진행해가는 GUGA를 제안하였다. 적절한 수준의 합리적인 설계목표 결정을 위하여 반복적인 설계가 필요한 GP 방법과 달리, 제시하는 기법은 설계자에 의하여 선정된 여러 수준의 설계목표를 만족하는 단계별 최적해를 순차적으로 검색함으로써 상위 수준의 최적해로 접근해가는 장점을 갖는다. 지진하중을 받는 9층 전단빌딩구조물에 대한 설계 예를 통하여 각 단계별 설계목표를 만족하는 최적화의 검색을 효율적으로 진행해 가는 것을 확인하였으며, 최적설계된 복합구조제어시스템과 동일한 용량을 균등하게 분배한 구조시스템에 대하여 6개의 실제 지진에 대한 제어성능을 비교하였다. 그 결과, 제시하는 기법은 제어장치들의 최적 배치를 통하여 개선된 제어성능을 발휘하므로 복합구조 제어시스템의 설계에 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2003년도 BK21사업 핵심분야 지원사업 및 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단의 우수연구센터 지원금에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. Kobori, T., Ban, S., Yamada, T., Muramatsu, S., Takenaka, Y., Arita, T., and Tsujimoto, T., "Earthquake and Wind Resistant Design of Shinjuku Park Tower," *Proceedings of the 2nd Conference on Tall Buildings in Seismic Regions*, Los Angeles, 1991.
2. Miyashita, K., Ohkuma, T., Tamura, Y., and Itoh, M.

- "Wind-induced Response of High-rise Buildings: Effects of Corner Cuts or Openings in Square Buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 50, 1993, pp. 319-328.
3. Koike, Y., Tanida, K., Mutaguchi, M., Murata, T., Imazeki, M., Yamada, T., Kurokawa, Y., Ohru, S., and Y. Suzuki., "Application of V-shaped hybrid mass damper to high-rise buildings and verification of damper performance," *Proceedings of Structural Engineers World Congress*, San Francisco, 1998, CD-ROM: T198-4.
 4. Park, K. S., Koh, H. M., and Ok, S. Y., "Active Control of Earthquake Excited Structures using Fuzzy Supervisory Technique," *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, No. 11-12, 2002, pp. 761-768.
 5. 고현무, 박관순, 박원석, "질량감쇠기가 설치된 고층구조물의 풍하중에 대한 사용성 평가", 대한토목학회논문집, 제21권, 제1-A호, 2001, pp. 53-63.
 6. Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y., "Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications," *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, 1999, pp. 132-184.
 7. Park, W., Koh, H. M., Kim, N. H., Ha, D. H., and Kim, Y. S., "Application and R&D of Active, Semi-Active and Hybrid Vibration Control Techniques for Civil Structures in Korea," *7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures*, Assisi, Italy, 2001. 10, pp. 71-74.
 8. Ahlawat, A. S. and Ramaswamy, A., "Multi-objective optimal design of FLC driven hybrid mass damper for seismically excited structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 7, 2002, pp. 1459-1479.
 9. Fonseca, C. M. and Fleming, P. J., "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization : Formulation, Discussion and Generalization," *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, Stephanie Forrest(Ed.), San Mateo, CA: Morgan Kaufman, 1993, pp. 416-423.
 10. Horn, J., Nafpliotis, N., and Goldberg, D. E., "A Niche Pareto Genetic Algorithm for MultiObjective Optimization," *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, 1994, pp. 82-87.
 11. Kirk, D. E., *Optimal control theory - an introduction*, Prentice Hall, 1970.
 12. Rao, S. S., *Engineering optimization : theory and practice*, John-Wiley, 3rd ed., 1996.
 13. Kursawe, F., "A Variant of Evolution Strategies for Vector Optimization," In H. P. Schwefel and R. Manner (Ed.), *Parallel Problem Solving from Nature, Proceedings of the First Workshop PPSN*, Vol. 496 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, Berlin, 1991, pp. 193-197.
 14. Li, Q. S., Liu, D. K., Zhang, N., Tam, C. M., and Yang, L. F., "Multi-Level Design Model and Genetic Algorithm for Structural Control System Optimization," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 6, 2001, pp. 927-942.
 15. Liu, X., Begg, D. W., and Fishwick, R. J., "Genetic Approach to Optimal Topology/Controller Design of Adaptive Structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 41, 1998, pp. 815-830.
 16. 박관순, 고현무, 박원석, 옥승용, "구조시스템의 불확실성을 고려한 다중동조 질량감쇠기의 최적설계", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제3-A호, 2002, pp. 533-543.
 17. 박관순, 고현무, 함대기, "점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제2-A호, 2002, pp. 413-422.