

자가적응 화음탐색 알고리즘을 이용한 복합형 최적 구조제어 시스템 설계

박 원 석^{1*}

¹목포대학교 토목공학과

Optimal Design of a Hybrid Structural Control System using a Self-Adaptive Harmony Search Algorithm

Wonsuk Park^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Mokpo National University, Muan, 58554, Korea

Abstract

This paper presents an optimal design method of a hybrid structural control system considering multi-hazard. Unlike a typical structural control system in which one system is designed for one specific type of hazard, a simultaneous optimal design method for both active and passive control systems is proposed for the mitigation of seismic and wind induced vibration responses of structures. As a numerical example, an optimal design problem is illustrated for a hybrid mass damper(HMD) and 30 viscous dampers which are installed on a 30 story building structure. In order to solve the optimization problem, a self-adaptive Harmony Search(HS) algorithm is adopted. Harmony Search algorithm is one of the meta-heuristic evolutionary methods for the global optimization, which mimics the human player's tuning process of musical instruments. A self-adaptive, dynamic parameter adjustment algorithm is also utilized for the purpose of broad search and fast convergence. The optimization results shows that the performance and effectiveness of the proposed system is superior with respect to a reference hybrid system in which the active and passive systems are independently optimized.

Keywords : structural control, optimal design, hybrid control system, harmony search algorithm

1. 서 론

이 연구에서는 지진 및 풍하중에 대한 구조물의 진동제어를 위하여 능동 및 수동제어 시스템을 동시에 사용하는 복합제어 시스템 설계문제를 고려한다. 일반적으로 하나의 시스템만을 사용하는 단일 구조 진동제어 시스템은 하나의 목표 진동을 고려하여 설계한다. 예를 들어 대표적인 능동제어 시스템인 복합형 질량 감쇠기(hybrid mass damper, HMD) 또는 능동 동조 질량 감쇠기(active tuned mass damper, ATMD)는 사용성 증가를 위해 풍진동에 대한 구조물의 가속도 응답제어에 널리 사용된다(Spencer *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2009; Saeed *et al.*, 2015). 수동제어 시스템인

이력 감쇠기, 점성 감쇠기와 같은 에너지 소산 장치는 주로 지진 응답제어를 위해 사용된다(Soong *et al.*, 1997; Park *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2016).

이 연구에서 제안하는 복합제어 시스템은 수동 및 능동 시스템을 동시에 최적 설계하여 최대의 제어효과를 도출하도록 하였다(Kim *et al.*, 2005; Park *et al.*, 2015). 즉, 지진에 대한 수동제어와 풍하중에 대한 능동제어 시스템을 독립적으로 최적 설계하여 한 구조물에 설치하는 것이 아니라, 두 시스템이 동시 협력하여 지진과 풍진동을 모두 제어할 수 있도록 한다(Chulahwat *et al.*, 2017).

최적화 방법으로는 비선형 대규모 전역 최적화에 적합한 화음 탐색 알고리즘(harmony search algorithm)을 적용하였다.

* Corresponding author:

Tel: +82-61-450-2471; E-mail:wonsuk@mokpo.ac.kr
Received August 29 2018; Revised November 2 2018;
Accepted November 3 2018

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

화음탐색 알고리즘은 전역 최적화를 위한 메타 휴리스틱 방법의 하나로서 2001년에 처음 소개되었다(Geem *et al.*, 2001). 이 알고리즘은 합주를 하는 연주자들이 처음의 불협화음으로부터 자신의 기억하고 있는 화음 기억(harmony memory)에 기반하여 완벽한 화음(harmony)을 찾아가는 조율 과정이 최적해를 찾아가는 과정과 유사한 것에서 영감을 얻어 개발된 것으로 알려져 있다. 처음 소개된 이후, 알고리즘의 간결성과 높은 효율성 때문에 널리 활용되고 있으며, 구조최적화 분야에서 적용도 활발하게 이루어지고 있다(Lee *et al.*, 2004; Saka *et al.*, 2016).

이 논문의 구성은 먼저 능동 및 수동제어 시스템이 동시에 적용되는 구조물에 대한 복합제어 시스템의 최적 설계문제를 2장에서 정식화하고, 3장에서 최적화 문제를 풀기위한 자가적응 화음탐색 알고리즘을 제시한다. 이어 4장에 최적화 결과 및 분석을 기술하고 5장에 결론을 기술한다.

2. 복합제어 시스템 설계문제

이 장에서는 제어 시스템 설계 대상 구조물 및 하중 모형을 소개하고, 최적제어 시스템 설계를 위한 최적화 문제의 설계 목적 함수 및 설계 변수를 정의한다.

2.1 대상 구조물 및 하중 모형

제어 대상 구조물은 30층 빌딩 구조로서 제어기 설계를 위해 1축 횡방향 진동을 모사할 수 있는 평면 전단 빌딩 모형을 고려한다(Fig. 1). Table 1에 전단 빌딩 모형의 주요 제원을 제시하였다. 이 모형의 고유진동수는 1차 및 2차 모드가 각각 0.923, 2.777Hz이고, 감쇠비는 1,2차 모드에서 각각 2%의 감쇠비를 갖는 Rayleigh 감쇠를 적용하였다.

제어기 설계를 위한 하중 모형은 한 개의 풍하중 시간이력과 세 개의 입력 지반 가속도를 사용한다. 풍하중은 $V_{10}=30\text{m/s}$ 의 Davenport 파워 스펙트럼 모형(Li *et al.*, 2000)에 부합하는 600초의 변동 풍속 시간이력을 생성하고, 각 층의 풍속을 지수 법칙에 따라 작용하여 풍하중 시간이력을 생성하였다. 파워 스펙트럼 모형은 다음 식 (1)과 같다.

$$S_v(\omega) = 4KV_{10}^2 \frac{\zeta^2}{\omega(1+\zeta^2)} \quad (1)$$

$$\zeta = 600 \frac{\omega}{\pi V_{10}}$$

여기서, ω 는 각진동수(rad/s)이고, K 는 지표 조도 상수로서 0.008을 사용하였다. 이 파워 스펙트럼으로부터 생성한 변동 풍속 시간이력 $v(t)$ 를 사용하여 i 층에 작용하는 풍하중 시간

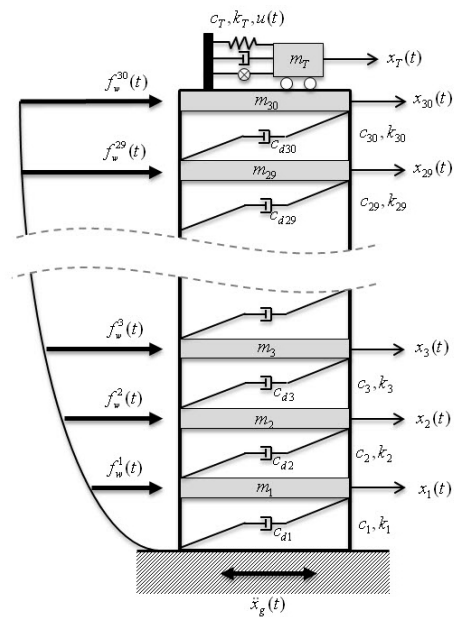


Fig. 1 Model of a 30 story building structure with a hybrid mass damper and viscous dampers under seismic and wind excitation

Table 1 Properties of the 30-story building structure

Floor	Mass (10 ³ kg)	Stiffness (10 ⁶ kN/m)	Height (m)	Width (m)
1-3	665.1	7.86	3.5	40
4-23	630.4	7.86	3.5	40
24-30	571.9	5.18	3.5	40

이력 $f_w^i(t)$ 은 다음 식과 같이 결정한다.

$$f_w^i(t) = \frac{1}{2} \rho A_i (1.2) (0.1 h_i)^{2\alpha} V_{10} v(t) \quad (2)$$

여기서, $\rho=1.25\text{N/m}^3$ 인 공기밀도, A_i, h_i 는 i 층의 수평

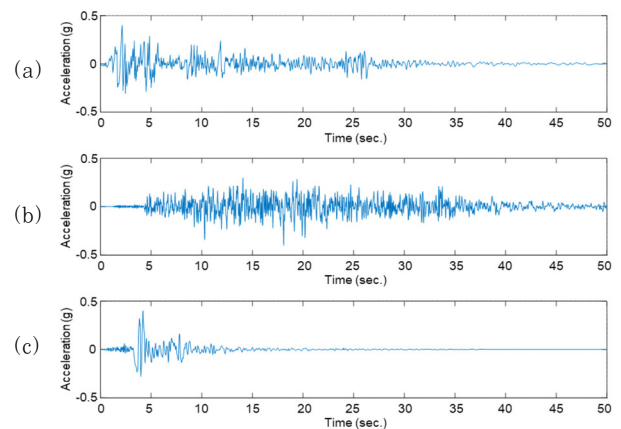


Fig. 2 Time histories of the Input ground accelerations (PGA 0.4g scaled); 1940 El Centro(upper), 1985 Mexico City(middle), and 1994 Northridge earthquake (lower)

단면적 및 높이이고, 풍속 고도분포 지수 α 는 0.16을 사용하였다.

구조물에 작용하는 지진하중으로는 PGA 0.4g로 강도를 일정하게 한 El Centro, Mexico City, Northridge 지진에 대한 지반 가속도 시간이력을 고려하였다(Fig. 2).

2.2 최적제어 시스템 설계 목적 함수

최적 진동제어 시스템 설계문제는 구조물의 동적 응답 및 설계 조건을 표현할 수 있는 목적 함수를 구성하고, 그 목적 함수를 최소화하는 설계변수를 찾는 최적화 문제로 나타낼 수 있다. 이 연구에서는 Table 2에 나타낸 10가지의 개별 목적 함수를 고려하여 이들의 평균 값을 나타내는 다음 식 (3)의 최소화 목적 함수 $F_p(\mathbf{d})$ 를 구성하였다.

$$F_p(\mathbf{d}) = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} f_p^i(J^i(\mathbf{d})) \quad (3)$$

여기서, $f_p(\cdot)$ 값은 선호도 함수(preference function)를 사용하여 정규화한 개별 목적 함수의 값이고, $J^i(\mathbf{d})$ 는 개별 물리적 목적함수 값, \mathbf{d} 는 설계 변수 벡터이다(Messac *et al.*,

Table 2 Objective functions for the optimal control design

No.	Function output	Category
1	Wind - Max. acceleration(cm/s ²) $J^1 = \max_{i,t} \ddot{x}_i(t) $	Wind induced responses
2	Wind - Max. r.m.s. acceleration(cm/s ²) $J^2 = \max_i \ \ddot{x}_i(t)\ _2$	
3	Earthquake - Max. drift(cm) $J^3 = \max_{i,t} x_i(t) - x_{i-1}(t) $	Seismic responses
4	Earthquake - Max. base shear(kN) $J^4 = \max_t F_{bs}(t) $	
5	Earthquake - Max. base moment(kN-m) $J^5 = \max_t F_{bm}(t) $	
6	HMD - mass ratio(%) $J^6 = m_f / M_{st}$	Active control system
7	HMD - mass stroke(cm) $J^7 = \max_t x_f(t) $	
8	HMD - control force(kN) $J^8 = \max_t u(t) $	
9	HMD - control power(kW) $J^9 = \max_t u(t)\dot{x}_f(t) $	
10	Viscous damper - sum. of coeff.(kN-s/m) $J^{10} = \sum_{i=1}^{30} c_{di}$	Passive control system

1998; Park *et al.*, 2004).

선호도 함수는 임의의 물리적 함수 값을 정규화된 선호도 값으로 변환하는 비선형 함수로 정의할 수 있다. 최소화 문제의 경우 선호도 값은 값이 작을수록 설계자가 원하는 값이 되도록 함으로써 최적화 문제의 목적함수를 구성할 수 있다. 이 연구에서는 선호도 값 0.04 이하의 '매우 선호', 0.2 이하의 '선호', 1.0 이하의 '비선호', 및 1.0 초과 '부적합' 4개 구간으로 연속 선호도 함수를 구성하고, 각 구간별 경계 값이 서로 다른 물리 값을 갖는 함수 사이에 같은 값을 가지도록 함으로써 정규화 효과를 갖도록 하였다. 선호도 함수의 인수가 되는 물리적 목적 함수를 Table 2에 나타내었다.

2.3 최적제어 시스템 설계 변수

이 연구에서는 능동형 진동제어 시스템으로 최 상층부에 복합형 질량 감쇠기(HMD)를, 수동형 제어 시스템으로 각 층간에 선형 점성 감쇠기(linear viscous damper)를 고려한다. 수동형 제어 시스템의 설계 변수는 점성 감쇠기의 감쇠 정수를 선정하였다. 점성 감쇠기는 설치된 층간 상대 속도와 감쇠정수의 곱에 비례하는 감쇠력을 발휘 하므로 감쇠정수는 감쇠기의 용량을 결정한다. 능동형인 복합형 질량 감쇠기의 설계 변수는 이동 질량, 스프링 강성, 감쇠비가 있다. 일반적으로 이동 질량이 클수록 구조물에 가하는 제어력도 커지나 구동력도 커져 비용이 증가할 수 있다. 이동 질량이 작으면 제어력은 줄어들지만 이동 거리가 커지므로 설치공간이 제한된다. 이 연구에서는 최대 구동력과 이동 질량 변위를 최소화하도록 하였다.

또한 적절한 제어 이론에 의거하여 질량 감쇠기를 구동하기 위한 제어 법칙의 설계가 필요하다. 이 연구에서는 제어 법칙으로 출력 가중 LQR(output weighted Linear Quadratic Regulator)제어 이론을 적용하였다(Tewari, 2002), 이 연구에서 사용한 출력 가중 LQR에서는 각 층의 가속도 응답을 출력 변수 벡터 $\mathbf{y}(t)$ 로 하여 다음 성능지수 J 를 최소화하는 HMD의 최적 제어력 $u(t)$ 를 구한다.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{y}^T(t)\mathbf{Q}\mathbf{y}(t) + u^T(t)\mathbf{R}u(t))dt \quad (4)$$

식 (4)에서 \mathbf{Q}, \mathbf{R} 행렬은 각각 출력 및 제어력에 대한 가중 행렬로서, 제어기 설계의 설계변수가 된다. 이 연구에서는 출력 가중 행렬 \mathbf{Q} 는 30×30 단위 행렬로 고정하고, 제어력의 상대적 크기 조절을 위해 제어력 가중 행렬을 다음과 같이 정의하였다.

$$\mathbf{R} = r_a \times 10^{r_b} \quad (5)$$

여기서, r_a, r_b 는 설계 변수로서 최적화 과정에서 결정된다.

수동형인 선형 점성 감쇠기의 제어 시스템 설계는 각층에 설치하는 감쇠기의 감쇠정수 값이 주요 설계 변수가 되며, 최대 감쇠력이 설계 제한조건이 될 수 있다.

30개의 층별 점성 감쇠기 감쇠정수를 포함한 총 35개의 설계 변수를 사용하였으며 이를 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Design variables for the optimal control design

No.	Design variables	Min., Max. values
1-30	Damping coefficient for each floor(106kN-s/m)	[0 , 2000]
31	Mass ratio of HMD(%)	[0.05 , 1]
32	Frequency ratio of HMD(%)	[70 , 130]
33	Damping ratio of HMD(%)	[1 , 20]
34	LQR parameter $r_a : \mathbf{R} = r_a \times 10^{r_a}$	[0.1 , 1.1]
35	LQR parameter $r_b : \mathbf{R} = r_b \times 10^{r_b}$	[-8.0 , -6.0]

2.4 최적 복합제어 시스템 설계문제

이제 최적 복합제어 시스템 설계문제는 다음과 같은 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F_p(\mathbf{d}) &= \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} f_p^i(J^i(\mathbf{d})) \quad (6) \\ \text{subject to } \mathbf{d}_{\min} &\leq \mathbf{d} \leq \mathbf{d}_{\max} \end{aligned}$$

최적화 과정에서는 식 (3), (6)에서 주어진 설계 변수 벡터 \mathbf{d} 에 대하여 각 물리적 목적함수 값 $J^i(\mathbf{d})$ 이 계산되고 각 물리적 값에 대한 선호도 함수 값 $f_p^i(\cdot)$ 이 계산되어야 한다. 이 때, 설계 변수는 수동 및 복합 진동제어 시스템을 모두 포함하고 있고, 구조물 응답 및 능동제어 시스템 응답으로 결정하는 목적 함수 값은 제시한 풍하중 및 지진하중에 대한 시간이력 해석으로부터 결정된다. 즉, 제시하는 방법은 능동 및 수동제어 시스템을 동시에 설계 하여 지진 및 풍하중에 의한 응답을 모두 최소화 하는 최적 설계방법이다. 이는 기존의 단일 목적, 단일 제어 시스템 설계와 차별되는 것이다.

식 (6)의 최적화 문제는 설계 변수의 수가 많은 비선형 목적 함수를 가지므로, 국부 해를 찾는 데 효율적인 전통적인 비선형 최적화 방법보다는 대규모 전역 최적화 문제의 풀이에 적합한 방법을 적용하는 것이 효과적이다.

다음 장에는 이러한 대규모 전역 최적화에 적합한 자가적응 화음탐색 알고리즘을 기술한다.

3. 자가적응 화음탐색 알고리즘

화음탐색 알고리즘은 여러 개의 해로 구성된 해 집합 Harmony Memory(HM)를 반복적으로 개선해 나간다. 확률적 선택 과정을 거쳐 새로운 해를 만들어내고, 새로운 해의 성능과 HM내 기존 해의 성능을 비교하여 더 우수한 해를 HM에 유지시키는 방법으로 해를 개선해 나간다. 새로운 해를 만드는 과정은 다음과 같다. 우선 새로운 해의 현재 성분을 완전히 새로운 값으로 할 것인지 HM 내부 해의 성분을 사용할 것인지를 확률적으로 결정한다. 이 때 HM 내부의 임의의 성분 값을 사용할 확률을 HMCR(harmony memory considering rate)이라 한다. 만일 HM내부의 값을 사용한다면, 이 성분을 약간 조정할 것인지를 새로운 확률 Pitching Adjustment Rate(PAR)에 따라 결정한다. 이 때 이 성분의 조정량은 bandwidth(BW)에 따라 결정된다. 이러한 화음탐색 알고리즘을 Fig. 3에 나타 내었다.

화음탐색 알고리즘의 주요 설정 파라미터는 해집합의 크기를 결정하는 HMS, 전역 탐색 확률을 결정하는 역할을 하는 HMCR, 지역 탐색의 해 조정 확률 및 크기를 결정하는 PAR과

Step 1. Initialize random HM

$$\mathbf{HM} = [\mathbf{x}^1 \mathbf{x}^2 \dots \mathbf{x}^{\text{HMS}}]$$

where $\mathbf{x}^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_n^i]^T$

Step 2. Create $\mathbf{x}^{\text{new}} = [x_1^{\text{new}}, x_2^{\text{new}}, \dots, x_n^{\text{new}}]$

for $j=1$ to n

if $\text{rand}(0,1) < \text{HMCR}$

$x_j^{\text{new}} = x_j^r$, r is a random integer ($1 \leq r \leq \text{HMS}$)

if $\text{rand}(0,1) < \text{PAR}$

$x_j^{\text{new}} = x_j^{\text{new}} \pm \text{BW} \times \text{rand}(0,1)$

end

else

$x_j^{\text{new}} = \text{rand}(x_{\min}, x_{\max})$

end

end

Step 3. Update HM

if $f(\mathbf{x}^{\text{new}}) < f(\mathbf{x}^{\text{worst}} \in \mathbf{HM})$ (Minimization)

replace $\mathbf{x}^{\text{worst}}$ with \mathbf{x}^{new}

else

disregard \mathbf{x}^{new}

end

Step 4. Repeat Step 2-3 until convergence

Fig. 3 Pseudocode of a standard harmony search algorithm

BW이다. 이 중에서 해집합의 크기 HMS는 계산에 필요한 메모리와 시간 등에 의해 주로 제한을 받는 값이고, 나머지 파라미터들이 문제에 따른 알고리즘의 성능 효율에 직접적으로 영향을 끼치는 값이라 할 수 있다. 그러나 이 파라미터들은 어느 최적화 알고리즘과 마찬가지로 고려하는 최적화 문제의 특성에 따라 다른 최적 값을 가지며, 일반적으로 시행착오에 의한 결정에 의존한다. 이러한 시행착오적 결정 방법을 개선하는 방법으로 자동화된 파라미터 설정 방법의 하나인 자가적응 화음탐색 방법이 개발되고 있다(Wang *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2018).

이 연구에서는 Zhao 등(2015)에 의해 개발된 동적 PAR 및 BW조절 알고리즘을 적용하여 자가적응 화음탐색 최적화를 수행한다. 이 방법에서는 Fig. 3에 제시한 표준 화음탐색 알고리즘 Step 2의 PAR를 대칭 sigmoid 함수를 이용하여 반복 계산 횟수 k 가 최대 반복횟수 NI 까지 증가함에 따라 동적으로 다음과 같이 변화하도록 한다.

$$PAR(k) = PAR_{min} + \frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{1 + \exp\left(\frac{20k}{NI} - 10\right)} \quad (7)$$

또한, 성분 조정량 BW는 HM의 해 벡터들 각 성분 값의 median 값으로 한다. 이 방법은 반복 횟수가 늘어날수록 PAR값은 최대값에서 최소값으로 가까워지도록 하여 빠른 수렴 속도와 해의 다양성 사이에 균형을 맞추면서 탐색할 수 있도록 고안되었다.

4. 최적 설계 결과

식 (6)으로 나타낸 최적제어 시스템 설계문제를 3장에서 제시한 자가적응 화음탐색 알고리즘을 사용하여 최적화하였다. 해집합 크기 HMS는 50, 메모리 내 탐색률 HMCR은 0.9로 하였고, PAR 및 BW 값은 자가적응 식에 따라 자동으로 조정될 수 있도록 하였다. 최대 1000회까지 탐색하여 수렴한 결과를 최적 값으로 선정하였다. 또한 확률 기반 탐색 알고리즘의 특성을 고려하여 총10회의 최적화를 수행하여 최적해를 정하였다.

최적화된 제어 시스템의 제어 효과를 Fig. 4~7에 나타내었다. 풍하중에 대하여 층별 최대 가속도와 rms 가속도의 경우 비 제어 시에 비하여 각각 최대 72.0% 82.9% 감소하였고 (Fig. 4, 5), 지진응답은 최대 층간 변위, 바닥 모멘트 및 전단력 응답이 각각 최대 81.4%, 81.5%, 82.2% 감소하였다 (Fig. 6, 7).

제안하는 최적화 방법의 우수성은 동시 최적화하지 않은, 일반적으로 설계한 제어 시스템과 비교할 때 더욱 두드러진다.

비교를 위해 같은 설계 조건을 이용하여 풍하중에 대한 최적 HMD 시스템과 지진 하중에 대한 균등 분포 점성 감쇠기 시스템을 갖춘 복합 시스템을 고려하여 응답을 비교하였다. 이 “일반적” 제어 시스템은 제안하는 방법과 달리 지진하중과 풍하중에

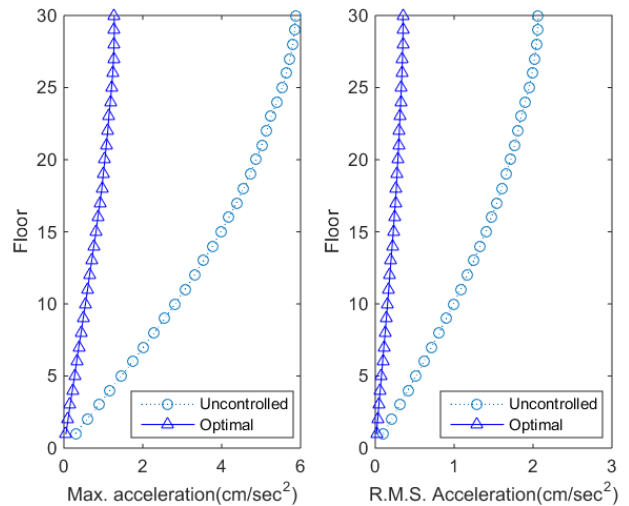


Fig. 4 Maximum(left) and r.m.s. acceleration(right) responses of the controlled and uncontrolled building structure for wind excitation

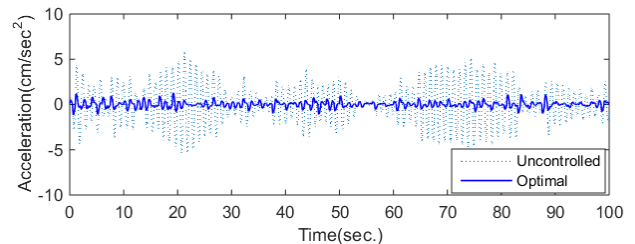


Fig. 5 Top floor acceleration time history for wind excitation

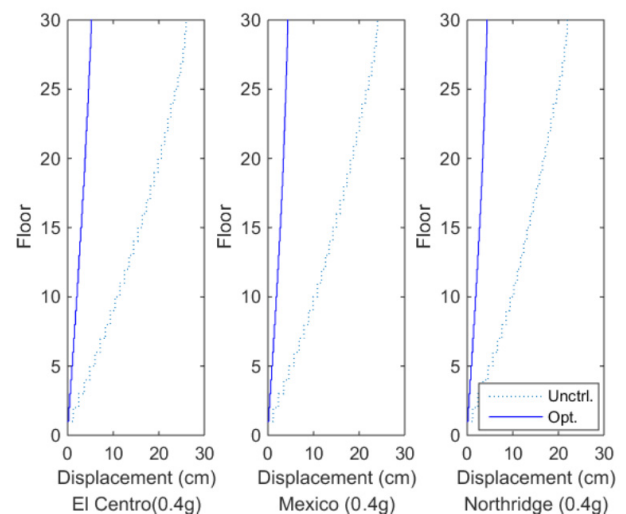


Fig. 6 Maximum story drift responses for El Centro (left), Mexico(center), and Northridge(right) earthquake

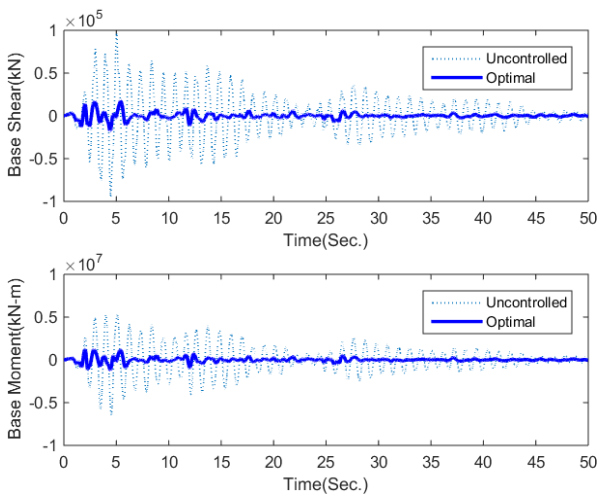


Fig. 7 Base shear and moment response time histories for El Centro earthquake

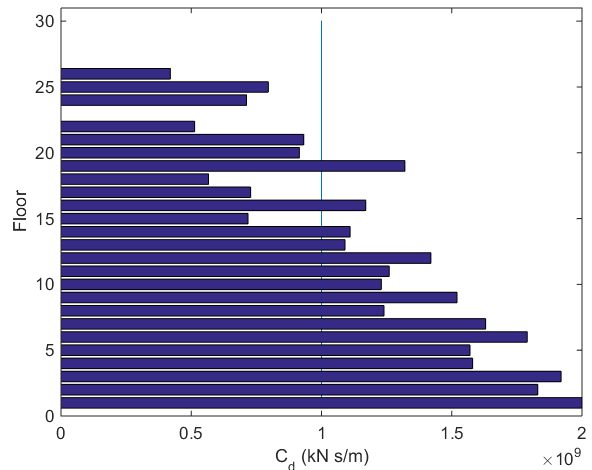


Fig. 8 Distribution of the optimal viscous damper design parameters

Table 4 Performance comparison of the control system designs

No.	Performance index	Conventional design	Optimal design(GA)	Optimal design(HS)
1	Wind : Max. acc.(cm/s ²)	1.415	1.313	1.280
2	Wind : Max. r.m.s. acc.(cm/s ²)	0.402	0.354	0.352
3	Eq : Max. drift(cm)	0.481	0.359	0.345
4	Eq : Max. base shear (kN)	37899	28142	26714
5	Eq : Max. base moment (kN-m)	2.09×10 ⁶	1.833×10 ⁶	1.827×10 ⁶
6	HMD mass (%)	0.25	0.0875	0.05
7	HMD stroke (cm)	222.8	45.09	37.16
8	HMD control force(kN)	223.6	20.00	13.63
9	HMD control power(kW)	531.7	11.38	64.97
10	VD : sum. of coeff. (kN-s/m)	30×10 ⁶	30×10 ⁶	30×10 ⁶

대하여, 능동과 수동제어 시스템을 각각 최적 설계한 것을 단순히 함께 사용하는 시스템이다.

일반 시스템과 제안하는 최적 시스템의 성능 비교 결과를 Table 4에 나타내었다. 성능비교 결과 제안하는 최적제어 시스템은 비교 대상인 일반 제어 시스템에 비하여 제어의 효율성 면에서 뛰어난 결과를 나타냈다. 제안하는 최적제어 시스템은 점성 감쇠기의 경우 감쇠정수의 합으로 표현된 용량 지표에서

일반적 제어 시스템과 동일한 수준의 용량을 사용하고, HMD의 경우 단지 1/5 수준의 질량을 가지고 최대 제어력은 6/100 수준만 사용하면서도 제어 효과는 모든 면에서 더 좋은 결과를 보였다.

결정된 최적해를 살펴보면, HMD 시스템 파라미터의 경우 HMD 질량비는 최소값 0.05%(4.43ton), 진동수 비 및 감쇠비는 각각 130%, 20%였으며, LQR 제어기의 $R=1.10 \times 10^{-6}$ 으로 나타났다. 이 값들은 최소 질량비를 사용하고, 제어력 최소화를 위한 가중치인 R 값을 최대값으로 사용하는 것으로서 능동제어 시스템의 제어력 사용을 최소화하는 방향으로 최적화가 이루어지는 것을 나타낸다. 점성 감쇠기는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 상층부에 상대적으로 작은 감쇠정수가, 하층부에 상대적으로 큰 감쇠정수가 배분되는 최적 해가 도출되었다. 감쇠정수는 최대 감쇠력 자체는 아니지만, 속도에 비례하여 발현하는 제어력의 크기를 나타낸다고 할 수 있어, 일반적으로 점성 감쇠기의 용량을 나타내는 지표라고 할 수 있다.

대표적인 전역최적화 방법인 유전알고리즘(GA)을 적용한 최적화 결과도 비교하였다. 200개의 개체 수로 10회의 최적화를 수행하여 그 중 가장 좋은 결과를 Table 4에 비교를 위해 표시하였다. GA는 대략 120세대 정도에 수렴하였다. 비교 결과 GA의 해와 제안하는 화음탐색 알고리즘과 전반적으로 비슷한 수준의 최적해를 도출한 것으로 확인되었으나 화음탐색 알고리즘이 약간 우수한 구조물 응답을 내는 것으로 나타났다. 특히 화음탐색 알고리즘으로 찾은 최적 능동제어 시스템은 더 작은 질량과 더 작은 이동거리를 쓰면서도 더 좋은 제어 효과를 나타내는 것으로 나타났다. 이러한 결과만으로 이 문제에서 적용한 화음탐색 알고리즘이 일반적인 GA에 비해 우수하다고 일반화할 수는 없다. 그러나 적용한 화음탐색 알고리즘은 GA와 같은 대표적인 전역 최적화 방법과 동등한 수준의 전역해를 도출할

수 있으며, 이 문제와 같이 해공간이 넓은 최적화 문제에 있어서 다양하고 더 좋은 해를 찾기 위해 적용할 수 있는 또 다른 좋은 대안이 될 수 있음을 보였다고 할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 지진과 풍하중에 의한 구조물 진동제어를 위해 능동 및 수동제어 시스템을 동시에 최적 설계하는 방법을 제안하였다. 일반적으로 두 가지 이상의 구조제어 시스템이 적용될 경우 독립적, 순차적 설계는 최적 설계를 도출하기 어렵다. 제안하는 방법은 이러한 특성을 고려하여, 대표적인 능동 및 수동제어 시스템인 복합형 질량 감쇠기(HMD)와 점성 감쇠기(viscous damper) 시스템을 동시에 설계할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 지진과 풍하중에 대하여 두 제어 시스템이 각각의 하중에 대응하도록 설계하지 않고, 같이 협력하여 제어 효율을 높이고자 하였다.

최적화 문제의 해를 구하기 위해 최근 활용도가 증가하고 있는 전역 최적화 방법인 화음탐색(harmony search) 알고리즘을 적용하였다. 특히 자동화된 화음탐색 알고리즘의 메타 파라미터 설정을 위한 자가적응형 파라미터 선정법을 적용하여 효율적으로 해집합을 얻을 수 있었다.

30층 전단 빌딩 모형에 대한 설계예제에 대하여 제안한 방법을 적용한 결과, 제안하는 최적 복합제어 시스템은 효과적으로 풍하중 및 지진하중에 의한 가속도 응답과 변위 응답, 기초 부재력 응답을 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 특히, 동시 최적화의 효과로서 개별 최적화에 비하여 제어 비용과 효과면에서 모두 향상된 최적 해를 얻을 수 있었다. 이 연구 결과에서는 수동형 시스템의 층별 최적 배치를 통해 능동형 시스템의 용량을 최대한으로 줄일 수 있는 최적해가 도출되었다. 향후 추후 연구를 통해 능동 및 수동제어 시스템의 기여 비율을 설계 변수로 조절할 수 있도록 하고, 실 구조물 모델에 대한 설계 사례를 구축한다면 실제 현장에서의 활용도를 더욱 높일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017학년도 목포대학교 교내연구과제 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Choi, Y.H., Lee, H.M., Yoo, D.G., Kim, J.H. (2018) Improvement of Search Efficiency in Optimization Algorithm using Self-adaptive Harmony Search Algorithms, *J. Korea Acad.-Industrial Coop. Soc.*, 19(1), pp.1~11.
- Chulahwat, A., Mahmoud, H. (2017) A Combinatorial Optimization Approach for Multi-hazard Design of Building Systems with Suspended Floor Slabs under Wind and Seismic Hazards, *Eng. Struct.*, 137, pp.268~284.
- Duthinh, D., Simiu, E. (2009) Safety of Structures in Strong Winds and Earthquakes: Multihazard Considerations, *J. Struct. Eng.*, 136(3), pp.330~333.
- Geem, Z.W., Kim, J.H., Loganathan, G.V. (2001) A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, *Simul.*, 76(2), pp.60~68.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., et al. (1997) Structural Control: Past, Present, and Future, *J. Eng. Mech.*, 123(9), pp.897~971.
- Kim, D., Park, J., Ok, S.-Y., Park, W. (2016) Performance Test and Numerical Model Development of Restoring Viscous Damper for X-Type Damper System, *J. Korean Soc. Saf.*, 31(6), pp.52~57.
- Kim, H., Adeli, H. (2005) Hybrid Control of Irregular Steel Highrise Building Structures under Seismic Excitations, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 63(12), pp.1757~1774.
- Kim, H.-S., Kim, H.-S. (2009) Fuzzy Hybrid Control of a Smart TMD for Reduction of Wind Responses in a Tall Building, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(2), pp.135~144.
- Lee, K.S., Geem, Z.W. (2004) A New Structural Optimization Method based on the Harmony Search Algorithm, *Comput. & Struct.*, 82(9-10), pp.781~798.
- Li, Q., Liu, D., Fang, J., Tam, C. (2000) Multi-Level Optimal Design of Buildings with Active Control under Winds using Genetic Algorithms, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 86(1), pp.65~86.
- Messac, A., Wilsont, B. (1998) Physical Programming for Computational Control, *AIAA J.*, 36(2), pp.219~226.
- Park, J.-H., Kim, T.-H., Kim, O.-J., Lee, D.-B. (2008) Performance Evaluation of the Drift Control in Residential Tall Building Using the Dampers, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 21(3), pp.265~273.

- Park, K.-S., Koh, H.-M.** (2004) Preference-based Optimum Design of an Integrated Structural Control System using Genetic Algorithms, *Adv. Eng. Softw.*, 35(2), pp.85~94.
- Park, K.-S., Ok, S.-Y.** (2015) Optimal Design of Hybrid Control System for New and Old Neighboring Buildings, *J. Sound & Vib.*, 336, pp.16~31.
- Park, W., Park, K.-S., Koh, H.-M., Ha, D.-H.** (2006) Wind-induced Response Control and Serviceability Improvement of an Air Traffic Control Tower, *Eng. Struct.*, 28(7), pp.1060~1070.
- Saaed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J.-E., Hedlund, H.** (2015) A State-of-the-Art Review of Structural Control Systems, *J. Vib. & Control*, 21(5), pp.919~937.
- Saka, M.P., Hasançebi, O., Geem, Z.W.** (2016) Metaheuristics in Structural Optimization and Discussions on Harmony Search Algorithm, *Swarm & Evol. Comput.*, 28, pp.88~97.
- Soong, T.T.** (1988) State-of-the-Art Review: Active Structural Control in Civil Engineering, *Eng. Struct.*, 10(2), pp.74~84.
- Soong, T.T., Dargush, G.F.** (1997) *Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering*.
- Spencer Jr, B., Nagarajaiah, S.** (2003) State of the Art of Structural Control, *J. Struct. Eng.*, 129(7), pp.845~856.
- Tewari, A.** (2002). *Modern Control Design*, John Wiley & Sons, NY, pp.283~308.
- Wang, C.-M., Huang, Y.-F.** (2010) Self-Adaptive Harmony Search Algorithm for Optimization, *Expert Syst. with Appl.*, 37(4), pp.2826~2837.
- Zhao, F., Liu, Y., Zhang, C., Wang, J.** (2015) A Self-Adaptive Harmony Pso Search Algorithm and Its Performance Analysis, *Expert Syst. with Appl.*, 42(21), pp.7436~7455.

요 지

이 논문에서는 다중 재난을 고려한 복합 구조제어 시스템의 최적 설계방법을 제시한다. 한 가지 유형의 위험에 대해 하나의 시스템이 설계되는 전형적인 구조제어 시스템과는 달리, 구조물의 지진 및 바람에 의한 진동응답을 저감하기 위해 능동 및 수동제어 시스템에 대한 동시 최적 설계방법을 제안하였다. 수치 예로서, 30층 빌딩 구조물에 설치된 30개의 점성 댐퍼와 복합형 질량 감쇠기에 대한 최적 설계문제를 보였다. 최적화 문제를 풀기 위해 자체적응 화음탐색(harmony search, HS) 알고리즘을 채택하였다. 화음탐색 알고리즘은 사람이 연주하는 악기의 튠링 과정을 모방한 전역 최적화를 위한 메타 휴리스틱 진화 연산방법의 하나이다. 또한 전역 탐색 및 빠른 수렴을 위해 자가적응적이고 동적인 매개변수 조정 알고리즘을 도입하였다. 최적화 설계 결과, 능동 및 수동 시스템이 독립적으로 최적화된 표준적인 복합제어 시스템에 비해 제안한 동시 최적제어 시스템의 성능과 효율성이 우수함을 보였다.

핵심용어 : 구조제어, 최적제어, 복합제어 시스템, 화음탐색 알고리즘