

선호도 기반 최적화 방법을 사용한 복합 구조 제어 시스템 설계

Hybrid Structural Control System Design Using Preference-Based Optimization

박원석* 박관순** 고현무***
Park, Wonsuk Park, Kwan-Soon Koh, Hyun-Moo

ABSTRACT

An optimum design method for hybrid control systems is proposed in this study. By considering both active and passive control systems as a combined or a hybrid system, the optimization of the hybrid system can be achieved simultaneously. In the proposed approach, we consider design parameters of active control devices and the elements of the feedback gain matrix as design variables for the active control system. Required quantity of the added dampers are also treated as design variables for the passive control system. In the proposed method, the cost of both active and passive control devices, the required control efforts and dynamic responses of a target structure are selected as objective functions to be minimized. To effectively address the multi-objective optimization problem, we adopt a preference-based optimization model and apply a genetic algorithm as a numerical searching technique. As an example to verify the validity of the proposed optimization technique, a wind-excited 20-storey building with hybrid control systems is used and the results are presented.

1. 서론

구조 제어 시스템을 에너지 공급 여부에 따라 능동, 수동, 준능동 시스템으로 나눌 때, 복합 구조 제어 시스템(Hybrid Structural Control System)은 두 종류 이상의 서로 다른 구조 제어 시스템이 복합적으로 사용되는 구조 제어 시스템을 지칭한다. 제어의 목적과 효율성 등을 고려하여 여러 가지 구성이 가능하며, 능동 제어 시스템과 수동형 에너지 소산장치를 함께 적용하여 구성하는 것

* 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원, 공학박사
** 정회원, 동국대학교 건축공학부 조교수, 공학박사
*** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수, 공학박사

이 가장 일반적인 형태라 할 수 있다.

복합 구조 제어 시스템은 서로 다른 제어 시스템들이 하나의 구조물에 통합되어 동시에 영향을 끼치므로, 각 제어 시스템에 대한 서로 독립된 설계로는 최적의 성능과 효율을 발휘하기 어렵다. 이 연구에서는 상이한 제어 시스템의 동시 최적화를 고려한 복합형 구조 제어 시스템의 최적 설계 방법을 제시한다. 서로 다른 제어 시스템의 설계 변수를 동시에 최적화할 수 있도록 다중 목적 최적화 문제를 구성하고, 선호도 함수(preference function)을 도입하여 제어 목적 및 구속 조건들의 상대적인 가중치 문제를 해결하였다. 최적화 방법으로 유전자 알고리즘^(1,2)을 적용하여 구성된 문제의 복잡성과 불연속성에 대해서도 안정된 해를 찾을 수 있도록 하는 방법을 제시한다. 풍하중을 받는 20층 건물에 대한 복합형 질량 감쇠기 (Hybrid Mass Damper, HMD)와 점성 감쇠 장치의 동시 최적 설계 예제를 통해 제시한 방법의 적용성을 보인다.

2. 복합 구조 제어 시스템 모형

이 연구에서는 능동 및 수동 제어 시스템이 함께 장착된 복합 구조 제어 시스템 모형으로서, HMD와 점성 감쇠 장치가 장착된 빌딩 구조물을 생각한다. 상태 공간 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x} = A_c x + B_w w \quad (1)$$

여기서 A_c 는 능동 및 수동 제어 시스템이 장착된 구조계의 페루프 시스템 행렬, B_w 는 외부 하중 위치 행렬이다. 페루프 시스템 행렬은 다음과 같이 구성된다.

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}(K + B_u G_y C_y) & -M^{-1}(C + C_d + B_u G_y C_y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 M, C, K 는 HMD의 질량, 감쇠, 강성이 포함된 전체 구조계의 질량, 감쇠, 강성 행렬이고, B_u 는 HMD 장착 위치에 따른 제어력 위치 행렬, G_y, C_y 는 제어 이득 행렬 $G = [G_y \ C_y]$ 의 요소 행렬, C_d 는 점성 감쇠기에 의한 감쇠 행렬이고, $C_y = [C_y \ C_y]$ 인 출력행렬이다. 이 연구에서 HMD를 위한 제어기는 가속도 응답에 가중치를 둔 출력 LQR방법을 사용하였다.

3. 선호도 기반 최적 설계

3.1 선호도 기반 최적화 모형

복합 구조 제어 시스템 설계에서는 서로 다른 제어 시스템들이 동시에 사용되므로, 서로 다른 특성을 갖는 목적 함수들이 동시에 고려되어야 한다. 이 연구에서 고려하는 HMD와 점성 감쇠장치의 복합 시스템의 예만 하더라도, HMD의 질량, 제어력, 운동거리, 점성 감쇠 장치의 용량, 구조물의 응답 등 여러 개의 목적 함수를 생각할 수 있다. 따라서, 복합 구조 제어 시스템 설계 문제

는 다목적 최적화(multi-objective optimization) 문제로 구성할 수 있으며, 다목적 최적화 문제의 특성에 따라 하나의 최적해가 존재한다기 보다는 파레토(Pareto) 최적 집합이 존재하는 것이 일반적이다. 그러므로, 설계자의 입장에서는 서로 상충하는 목적함수들의 중요도를 상대적으로 평가하여 해를 찾는 의사 결정 과정이 필요하게 된다.

이 연구에서는 Messac이 제안한 선호도 함수⁽³⁾의 개념을 도입하여 여러 목적 함수들의 상대적 중요도를 고려할 수 있도록 하였다⁽⁴⁾. 선호도 함수는 그림 1과 같이 '바람직한 정도'의 개념을 사용하여 설계자의 선호도를 정량적으로 표현하는 방법이다. 그림 1에서는 바람직한 경우 선호도 함수의 값이 그렇지 않은 경우의 함수 값보다 작은 값을 가지도록 함으로써 최소화 문제로 구성한 예를 나타내고 있다.

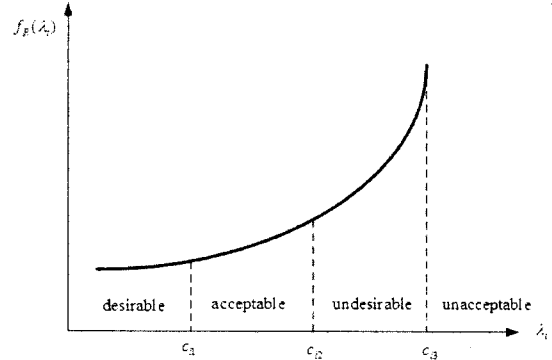


그림 1. 선호도 함수

또한 선호도의 각 단계별 경계에서의 함수값을 모든 선호도 함수에서 동일한 값을 사용하도록 함으로써 서로 다른 목적 함수들에 대한 정규화 효과를 가지도록 구성한다. 이 연구에 사용된 선호도 함수 f_{P_i} 는 다음과 같다.

$$f_{P_i}(\lambda_i) = \left(\frac{\lambda_i}{c_{i_1} \sqrt[n_p]{\alpha^2}} \right)^{n_p} \text{ for } \lambda_i \leq c_{i_1} \quad (3)$$

$$f_{P_i}(\lambda_i) = \left[\frac{(\sqrt[n_p]{\alpha^{k-3}} - \sqrt[n_p]{\alpha^{k-4}})}{c_{i_k} - c_{i_{k-1}}} (\lambda_i - c_{i_{k-1}}) + \sqrt[n_p]{\alpha^{k-3}} \right]^{n_p} \text{ for } c_{i_{k-1}} \leq \lambda_i \leq c_{i_k}, k = 2, 3$$

여기서 λ_i 는 설계 목적 함수 값, c_{i_k} 는 각 선호 단계에 상응하는 값이며, $\alpha \gg 1$ 및 n_p 는 선호도 함수의 형상을 결정하는 계수이다.

식 (3)에서 정의된 선호도 함수를 사용하면, 다목적 최적화 문제는 총 N 개의 각 목적 함수별 선호도 함수 f_{P_i} 의 총합 F_p 의 최소화 문제로 정의되는 다음과 같은 선호도 기반 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\text{Minimize } F_p(\lambda) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{P_i}[\lambda_i(\mathbf{d})] \quad (4)$$

$$\text{subject to } \lambda_i(\mathbf{d}) < c_{i_1}, \mathbf{d}_{\min} \leq \mathbf{d} \leq \mathbf{d}_{\max}$$

여기서 \mathbf{d} 는 설계 변수 벡터, \mathbf{d}_{\min} , \mathbf{d}_{\max} 는 각각 설계 변수의 최소값 및 최대값 벡터이다.

3.2 유전자 알고리즘을 사용한 최적해 도출

식 (4) 로 주어진 최적화 문제는 다음과 같이 적합도 함수 F_f 를 도입함으로써 유전자 알고리즘을 사용한 최적해를 도출할 수 있다.

$$F_{f_i} = [\max_j(F_{P_j}) + \min_j(F_{P_j})] - F_{P_i}, j = 1, \dots, N_g \quad (5)$$

유전자 알고리즘에서 각 세대별 생성되는 개체를 위한 설계 string에는 복합 구조 제어 시스템의 동시 최적 설계를 위해 능동 및 수동 제어 시스템의 설계 변수를 연속하여 포함시켰다. 임의로 생성된 string에 의해 정해지는 각 설계 변수들은, 유전자 알고리즘의 세 가지 기본 연산인 선택(selection), 교차(crossover), 돌연변이(mutation) 과정을 통해서 최적화 과정을 거치게 된다.

4. 수치 예제

4.1 예제 구조물

그림 2 와 같이 풍하중을 받는 20층 빌딩 구조물에 대하여, HMD와 점성 감쇠기를 설계하였다. 구조물의 주요 물성값을 표 1에 나타내었다.

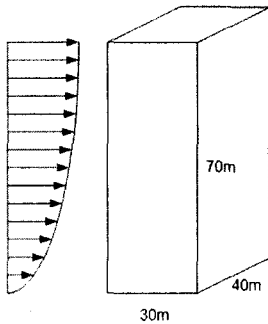


표 1. 구조물의 주요 물성

층	무게(kN)	강성(10^8 N/m)
1	6723	27.0
2-13	5684	27.0
14-20	5559	27.0

그림 2. 풍하중을 받는 20층 구조물

이 빌딩 구조물에 작용하는 풍하중은 다음과 같이 풍방향 하중을 가정하여 산정하였다⁽⁵⁾.

$$F(z_i, t) = A(z_i)v(t) \quad (6)$$

여기서 $v(t)$ 는 풍속이며, $A(z_i)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$A(z_i) = \rho \mu_s \mu_z D(z_i) \bar{V}_{10} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 $1/800$ kN/m³인 공기 밀도, μ_s 는 풍압계수, $D(z_i)$ 는 각 층 고도 z_i 에서의 수평면적이며 \bar{V}_{10} 는 10m 높이에서의 평균 풍속이다.

풍속 고도에 따른 계수 μ_z 는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$\mu_z = (0.1z_i)^{2\alpha} \quad (8)$$

변동 풍속 $v(t)$ 는 다음과 같은 Davenport 스펙트럼으로부터 구하였다.

$$S_v(\omega) = 4K\bar{V}_{10}^2 \frac{x^2}{\omega(1+x^2)}, \quad x = \frac{600\omega}{\pi\bar{V}_{10}} \quad (9)$$

그림 3 에 생성된 풍하중의 시간이력 예를 나타내었다.

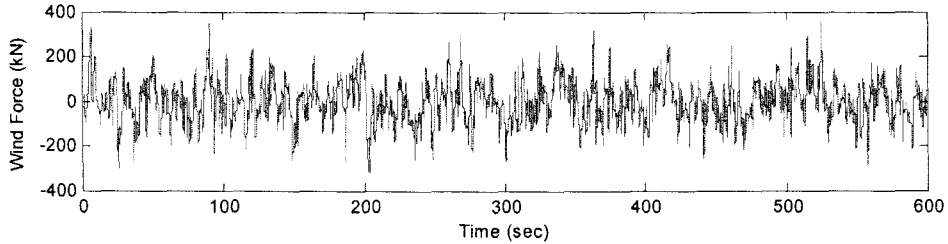


그림 3. 풍하중 시간 이력 예 (20층)

식(6)~(9)와 같이 생성된 풍하중에 대하여 제어 시스템이 장착되기 전의 비 제어 시 응답을 계산한 결과 최상층 응답 가속도가 19.64cm/sec^2 로 평가되었다. 제어 목적 함수는 이 값을 바탕으로 하여 정한다.

4.2 제어기 설계 목적 함수

변동 풍속에 의한 구조물 응답의 감소가 제어의 목적이므로, 각 층의 최대 가속도 응답 및 rms 가속도 응답을 제어 목적 함수로 하였다. 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\lambda_i = \max[\ddot{x}_i(t)], \quad i = 1, \dots, 20 \quad (10)$$

$$\lambda_{i+20} = \max[\text{rms}(\ddot{x}_i(t))], \quad i = 1, \dots, 20 \quad (11)$$

수동형 제어 시스템인 점성 감쇠 장치는 감쇠 계수가 감쇠기의 용량에 비례하므로 다음과 같은 제어 목적함수를 사용하였다.

$$\lambda_{41} = \sum_{i=1}^{20} c_i \quad (12)$$

여기서 c_i 는 i 번째 층에 장착된 점성 감쇠기의 감쇠 계수 이다.

능동형 제어 시스템인 HMD는 질량체의 질량, 최대 순간 제어력, 순간 파워 및 제어 에너지를 제어 목적 함수로 하였으며, 다음 식과 같이 나타내었다.

$$\lambda_{42} = r_m \quad (13)$$

$$\lambda_{43} = \max [|u(t)|] \quad (14)$$

$$\lambda_{44} = \max [p_u(t)] \quad (15)$$

$$\lambda_{45} = \int_0^{t_f} p_u(t) dt \quad (16)$$

여기서 r_m 는 HMD 질량체와 빌딩 일차 모우드 질량과의 비, $u(t)$ 는 HMD를 구동하는 제어력 시간 이력, $p_u(t)$ 는 제어력에 의한 파워이다.

제어 목적 함수 값 λ_i 는 선호도 함수 생성에 사용되며, 최종적으로 선호도 함수 값을 사용한 복합 제어 시스템 설계 문제는 다음과 같은 최적화 문제로 표현 할 수 있다

$$\begin{aligned} & \text{Find } \mathbf{c}, r_m, \mathbf{Q}, \mathbf{R} \text{ which minimize } F_P(\lambda) \\ & = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} f_{P_i}[\lambda_i(\mathbf{c}, r_m, \mathbf{Q}, \mathbf{R})] \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $N_f = 44$, \mathbf{c} 는 20×1 의 점성 감쇠기 벡터, \mathbf{Q}, \mathbf{R} 은 제어기 설계 가중 행렬 값이다.

해석 예제에 사용된 선호도 함수 생성에 사용된 계수 값들은 다음 표 3에 나타내었다.

표 3. 예제에 사용된 선호도 함수의 계수 값

	선호도 함수의 계수 값				
	c_{i1}	c_{i2}	c_{i3}	α	n^p
$\lambda_{1 \sim 20}$ 최대 가속도 응답 (cm/sec ²)	5.00	8.00	15.00	5	2
$\lambda_{21 \sim 40}$ rms 가속도 응답 (cm/sec ²)	1.50	2.50	5.00	5	2
λ_{41} 감쇠기 감쇠계수 합(10 ⁵ Nsec/m)	6.00	14.00	20.00	5	2
λ_{42} HMD 질량비 (%)	1.00	3.00	10.00	5	2
λ_{43} 최대 제어력 (10 ² kN)	0.30	0.75	1.50	5	2
λ_{44} 최대 제어파워 (10 ² kW)	0.30	0.75	1.50	5	2
λ_{45} 총 에너지 (10 ⁶ J)	1.60	4.00	8.00	5	2

4.3 설계 및 해석 결과

유전자 알고리즘을 사용한 최적화에서는 한 세대 당 40개의 유전자를 사용하였으며, 룰렛 선택 방식을 사용하였다. 교차 확률은 0.85로 하여 2점 교차 방식을 사용하고 돌연 변이 확률은 0.02로 하였다. 최적화 세대 이력을 그림 4에 나타내었다.

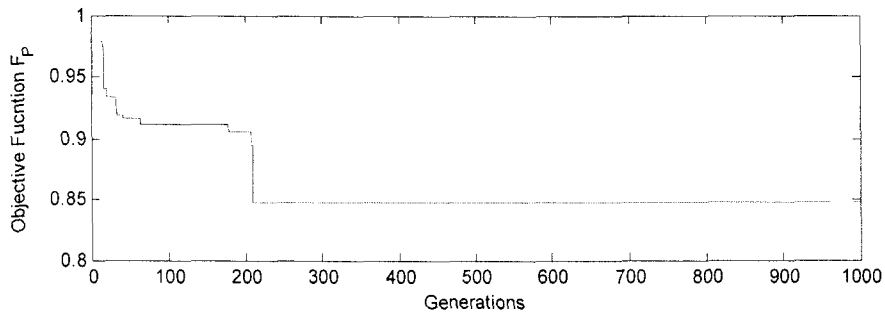


그림 4. 선호도 함수의 세대 이력

그림 5와 표 4에 최종 결과를 나타내었다. 구해진 최적 제어기를 사용한 응답은 그림 5에 보이는 바와 같이 최 상층부의 최대 가속도 응답이 7.69 cm/sec^2 로서 비 제어시 응답 19.64 cm/sec^2 의 40% 수준으로 응답을 줄였으며, 이는 표 3에 나타난 선호 구간 중 acceptable 구간에 해당함을 알 수 있다. 다른 설계 변수에 대한 최종 최적화 값을 표 4에 나타내었다. 표 4의 결과에서 HMD 질량비와 최대 제어력을 제외한 다른 값들이 모두 acceptable 구간의 값으로 정해졌음을 알 수 있는데, 이는 최종적으로 설계된 제어 시스템이 수동 제어 시스템인 점성 감쇠 보다는 HMD의 제어 노력이 많이 필요한 쪽으로 설계되었음을 보여준다고 할 수 있다.

표 4. 최종 최적화 값 및 해당 선호 구간

	최종 최적화 값	선호 구간			
		I	II	III	IV
λ_{41} 감쇠기 감쇠계수 합(10^5 N sec/m)	6.74		●		
λ_{42} HMD 질량비 (%)	3.97			●	
λ_{43} 최대 제어력 (10^2 kN)	1.24				●
λ_{44} 최대 제어파워 (10^2 kW)	0.33		●		
λ_{45} 총 에너지 (10^6 J)	1.95		●		

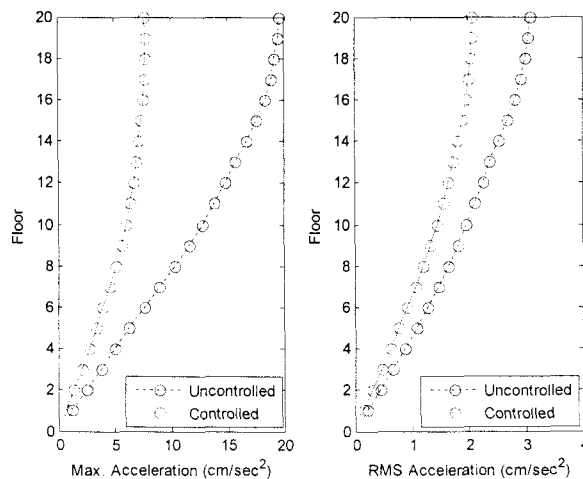


그림 5 각 층의 최대 및 rms 가속도 응답

5. 결론

상이한 제어 시스템의 동시 최적화를 고려한 복합형 구조 제어 시스템의 최적 설계 방법을 제시하였다. 각각의 제어 시스템은 별도의 설계 과정을 거치지 않고 동시에 최적화 되어 최적의 제어 성능을 발휘 할 수 있도록 설계된다. 또한 선호도 함수를 도입함으로써, 설계자의 의도를 반영하여 서로 다른 설계 목적과 상충하는 제한 조건들을 처리할 수 있도록 하였다. 풍하중을 받는 20층 빌딩 구조물에 대하여 HMD와 점성 감쇠기를 사용하는 복합 제어 시스템 설계 예제를 통하여 제시한 방법의 적용성을 보였다. 수치 해석 결과 제시한 방법을 통해 설계자의 목적에 부합하는 최적 복합 구조 제어 시스템을 찾을 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 지원금에 의하여 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, 1975
2. Goldberg, D. E., *Genetic algorithm in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, 1989
3. Messac, A., Wilson B. H., "Physical programming for computational control", *AIAA Journal*, Vol. 36, No. 2, 1998, pp. 219-226
4. Park, K.-S., Koh, H.-M., "Preference-based optimum design of an integrated structural control system using genetic algorithms," *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, 2004, pp. 85-94
5. Li, Q. S., Liu, D. K., Fang, J. Q., Tam, C. M., "Multi-level optimal design of building with active control under winds using genetic algorithms," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 86, 2000, pp. 65-86