

인접건물의 준능동 퍼지제어를 위한 유전자알고리즘 기반 다목적 최적설계

김현수*

¹선문대학교 건축사회환경학부

Multi-objective Optimal Design using Genetic Algorithm for Semi-active Fuzzy Control of Adjacent Buildings

Hyun-Su Kim^{1*}

¹Division of Architecture, Architectural and Civil Engineering, Sunmoon University

요약 본 연구에서는 지진하중을 받는 인접한 건물의 진동제어를 위한 준능동 제어장치의 제어성능을 검토하였다. 준능동 제어장치로는 MR 감쇠기를 사용하였다. MR 감쇠기로 연결된 인접한 건물을 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지제어알고리즘을 사용하였다. MR 감쇠기로 연결된 인접한 건물의 제어시 한쪽 건물의 응답을 저감시키는 것은 다른 한 쪽 건물의 응답을 증가시키는 효과를 가져온다. 따라서 연결된 건물의 제어는 서로 상충되는 특성이 있기 때문에 다목적 최적화문제로 귀결된다. 따라서 본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 MR 감쇠기를 제어하는 퍼지제어알고리즘을 최적화하였다. 수치해석을 통하여 준능동 MR 감쇠기를 이용한 인접건물의 연결제어효과를 검토하였고 매우 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

Abstract The vibration control performance of a semi-active damper connected to adjacent buildings subjected to seismic loads was investigated. The MR damper was used as a semi-active control device. A fuzzy logic control algorithm was used for effective control of the adjacent buildings connected to the MR damper. In the buildings control coupled with a MR damper, the response reduction of one building results in an increase in the response in another building. Because of these conflict characteristics, multi-objective optimization is required. Therefore, a fuzzy logic control algorithm for the control of a MR damper was optimized using a multi-objective genetic algorithm. Based on numerical analyses, the semi-active fuzzy control of MR damper for adjacent coupled buildings can provide good control performance.

Keywords : Coupled Building Control, Fuzzy Logic Controller, MR Damper, Multi-objective Optimization, Semi-active Control, Seismic Response Control.

1. 서론

급격한 도시화 및 땅값의 상승으로 인하여 대도시의 건물들 사이의 간격이 점점 더 줄어들고 있다. 이러한 인접한 고층건물들에 지진하중이 가해졌을 때 과도한 지진 응답이 발생한다면 충돌에 의한 구조물의 파괴 가능성이 높아지게 된다. 이러한 현상을 지진충돌 (seismic pounding)

이라고 하며 이를 감소시키기 위한 연구도 다수 수행되어 왔다[1,2]. 또한 지진하중을 받는 인접한 고층건물에 대한 연구는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 인접한 건물들을 감쇠기 등으로 서로 연결하여 지진응답을 저감시키기 위한 내용으로도 많이 수행되어 왔다[3,4]. 인접건물의 연결을 통한 구조물의 동적응답 제어는 실험 및 해석적 연구뿐만 아니라 Fig. 1에 나타난 바와 같이 실제 구조

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2013R1A1A2058312).

*Corresponding Author : Hyun-Su Kim(Sunmoon University)

Tel: +82-41-530-2315 email: hskim72@sunmoon.ac.kr

Received October 6, 2015

Revised December 2, 2015

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

물에서도 매우 효과적인 제어기법으로 평가받고 있다. 근래에는 MR 감쇠기와 같은 준능동 제어장치를 이용하여 인접한 건물의 동적응답을 제어하는 기법에 대한 연구도 제안되고 있다[5,6]. 준능동 제어장치를 이용하여 연결된 구조물을 제어할 때 일반적으로 한 구조물에 대해서 최적의 제어효과를 내도록 제어를 하면 연결된 다른 구조물에 대해서는 최적의 제어상태가 되지 못한다. 즉, 연결된 구조물의 동적응답 제어에 있어서 각각의 구조물 응답제어라는 목표는 서로 상충하는 결과를 나타낸다. 따라서 지진하중에 의해 실시간으로 변하는 구조물의 응답을 기반으로 하여 준능동 제어장치의 감쇠력을 적절하게 조절해야 하며 이를 위한 제어알고리즘의 개발이 제어성능에 중요한 영향을 미친다.



Fig. 1. Triton Square complex in Tokyo, Japan

본 연구에서는 MR 감쇠기와 같은 비선형성이 강한 감쇠장치의 제어에 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려진 퍼지논리제어기를 사용하였다. 퍼지논리제어기의 입출력변수에 대한 소속함수를 결정하고 퍼지제어규칙을 생성하는 최적설계 과정에서 유전자알고리즘을 사용하였다. MR 감쇠기로 연결된 구조물의 응답제어는 서로 상충하기 때문에 단일목적 최적화기법을 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 다목적 유전자알고리즘을 사용하였다. 국내 기준의 설계응답스펙트럼에 기반하여 인공지진 하중을 생성하였고 이를 이용하여 MR 감쇠기로 연결된 인접한 고층건물의 퍼지제어성능을 검토하였다.

2. 수치해석모델

본 논문에서는 MR 감쇠기를 이용한 인접한 고층건물의 연결제어성능을 검토하기 위하여 Fig.2에 나타낸 예

제구조물을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 예제구조물은 각 층별 집중질량(m_i)과 기둥강성(k_i) 및 점성감쇠로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였고 그림에서 보는 바와 같이 각각 20층과 12층을 가지는 인접한 구조물을 선택하였다. 본 연구에서 사용한 예제구조물의 특성치는 선행연구와 동일하게 두었다[7]. 건물 A와 B의 층 질량인 m_{Ai} 와 m_{Bi} 를 동일하게 $8.0 \times 10^5 kg$ 으로 두었고 층 강성 k_{Ai} 와 k_{Bi} 를 $1.35 \times 10^9 N/m$ 와 $2.02 \times 10^9 N/m$ 로 각각 두었다. 또한 건물 A와 B의 1차모드와 2차모드 감쇠비를 2%로 가정하여 Rayleigh 감쇠로 감쇠행렬을 구성하였다. 본 연구에서 사용한 독립된 예제구조물을 이용하여 고유치해석 한 결과 20층 및 12층 건물의 5개 저차모드 고유진동주기는 2.00, 0.67, 0.40, 0.29, 0.23초와 1.00, 0.33, 0.20, 0.15, 0.12초로 나타났다.

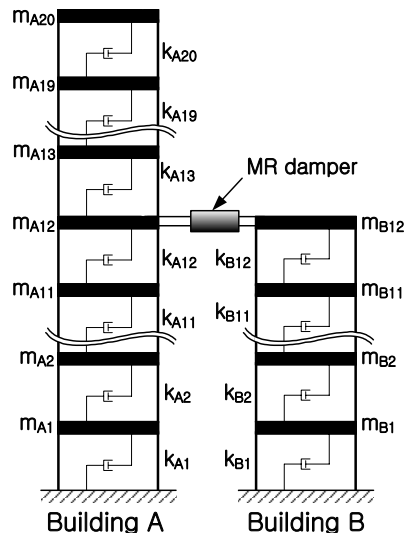


Fig. 2. Example building coupled by MR damper

인접한 건물에 연결하여 설치할 감쇠장치의 최적 위치는 연결되는 두 건물 사이의 동적거동의 차이가 가장 큰 위치이어야 한다. 예제구조물이 전형적인 캔틸레버형상이므로 구조물의 거동은 주로 저차모드에 큰 영향을 받게 된다. 1차모드의 형상만을 생각한다면 두 건물이 연결될 수 있는 가장 높은 층인 12층에서 모드형상의 차이가 가장 클 것이다. 이러한 예상은 층수가 다른 인접한 두 건물을 연결할 때 감쇠기 설치의 최적 위치는 낮은 건물의 최상층이라는 선행연구[7]의 결과와 부합한다.

따라서 본 연구에서는 12층에 MR 감쇠기를 설치하여 두 건물을 연결하였다.

MR 감쇠기를 모형화하기 위해서 일반적으로 널리 사용되고 있는 Fig. 3에 나타낸 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 이 모델에서 MR 감쇠기의 감쇠력은 식 (1)과 같이 표현된다[8].

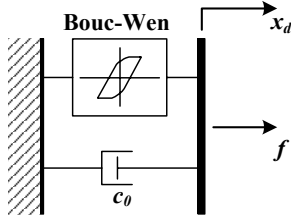


Fig. 3. Bouc-Wen model of MR damper

$$f = c_0 \dot{x}_d + \alpha z \quad (1)$$

여기서, x_d 는 감쇠기 양단의 상대변위(stroke)를 나타내고 변수 c_0 와, α , z 는 아래의 식 (2), (3), (4)를 통해서 각각 얻을 수 있다.

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (2)$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}_d| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x}_d |z|^n + A_m \dot{x}_d \quad (4)$$

식 (2)는 감쇠상수를 식 (3)은 MR 감쇠기의 변화하는 거동 특성을 모사하기 위한 변수로서 입력전압(u)의 함수로서 표현되며 입력전압의 값에 따라서 감쇠력이 매 순간 변화할 수 있다. 식 (1)과 (4)의 변수 z 는 MR 감쇠기의 이력거동을 모사하기 위한 가상의 변수로서 매개변수 γ , n , β , A_m 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 사용되는 계수들이다. 본 연구에서는 Ok 등의 연구[7]에서 사용한 최대용량이 1000kN을 가지도록 설계된 모델의 변수값을 사용하였고 이 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Properties of MR damper model

| | | | |
|------------|----------------|----------|---------------------|
| c_{0a} | 0.44 N·s/cm | γ | 3 cm^{-1} |
| c_{0b} | 4.4 N·s/cm | n | 1 |
| α_a | 10872 N/cm | β | 3 cm^{-1} |
| α_b | 49616 N/(cm·V) | A_m | 1.2 |

수치해석을 위하여 KBC2009를 바탕으로 설계응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 작성된 스펙트럼을 전체 진동주기에 걸쳐서 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성을 할 때 필요한 계수들은 일반적인 경우로 가정하여 결정하였으며 지역 계수는 0.22, 지반종류는 SB의 보통암 지반으로 선택하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도 시간이력을 Fig. 4에 나타내었다. 생성된 인공지진하중의 PGA(Peak Ground Acceleration)는 0.144g로서 우리나라에서 주로 발생하는 지진하중의 특성이 고려된 중약진지역의 지진하중으로 생각할 수 있다. 지진하중의 길이는 30초이고 시간간격은 0.01초이다.

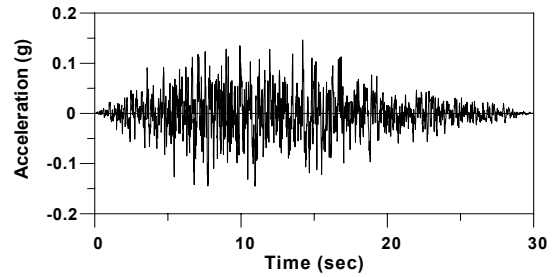


Fig. 4. Acceleration time history of artificial earthquake

3. 퍼지제어의 최적설계

인접한 두 건물의 12층에 연결된 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 퍼지제어알고리즘을 사용하였다. 퍼지제어를 설계하기 위해서는 가장 먼저 입력 및 출력변수를 결정해야 하는데 본 연구에서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 MR 감쇠기의 양단부가 연결된 두 건물 12층의 상대변위 및 상대속도를 입력변수로, MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 출력변수로 하였다.

퍼지논리제어기는 우선 2개의 입력정보를 입력 소속함수(membership function)를 사용하여 퍼지변수로 변환하게 되고 이 입력 퍼지변수는 퍼지규칙(fuzzy rule)을 통하여 퍼지추론(fuzzy inference)을 수행한다. 마지막으로 비퍼지화(Defuzzification) 작업을 통하여 물리적 의미를 가지는 명령전압으로 출력된다. 이때 입력 및 출력 소속함수의 형태, 범위의 설정과 함께 퍼지제어규칙을 결정하는 것은 퍼지논리제어기의 제어성능에 큰 영향을 미치고 이것은 주로 전문적인 지식에 의해서(knowledge base) 작성되어 왔다. 그러나 이렇게 전문가의 지식에 의

존하여 퍼지논리제어기를 작성하면 어느 정도 효과적인 제어기를 비교적 쉽게 작성할 수 있는 장점은 있으나 최적의 제어성능을 나타내는 제어기를 개발하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 소속함수의 범위와 퍼지제어규칙은 다목적 유전자알고리즘을 사용해서 최적화하였다. 지금까지 제안된 많은 다목적 유전자알고리즘 중에서 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다[9].

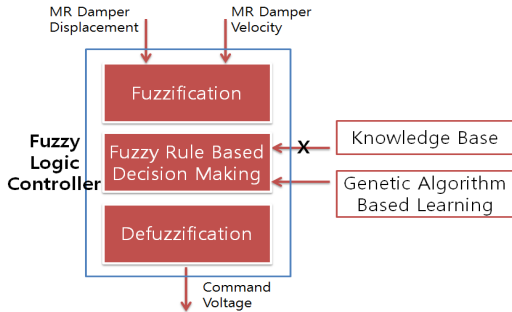


Fig. 5. GA based fuzzy logic control

인접한 건물에 대하여 MR 감쇠기를 사용한 연결제어를 수행할 때 어느 한 건물에 최적제어성능을 나타내는 제어알고리즘은 다른 건물에 대해서는 최적의 성능을 나타내지 못하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 2에 나타낸 건물 A와 건물 B의 동적응답 저감이라는 2개의 목표를 다목적 최적화의 목적함수를 선택하였다. Table 2에 나타낸 바와 같이 각각의 목적함수는 MR 감쇠기로 연결제어를 수행한 구조물의 최대변위를 제어하지 않은 구조물의 최대변위로 나누어 정규화하였다. 따라서 목적함수의 값이 1보다 작을수록 제어성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

Table 2. Multi-objective functions

| Objective Function | Description |
|--------------------|--|
| J1 | Peak displacement of coupled Building A |
| | Peak displacement of uncoupled Building A |
| J2 | Peak displacement of coupled Building B |
| | Peak displacement of uncoupled Building B |

4. 지진응답 제어성능 검토

NSGA-II를 이용한 퍼지제어기의 최적화작업에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개로 구성하였으며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화작업을 통해서 얻은 파레토 최적해집합을 두 개의 목적함수에 대하여 <Fig. 6>에 나타내었다.

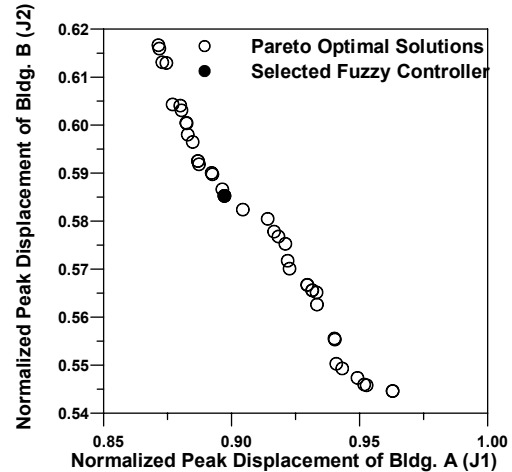


Fig. 6. Genetic algorithm based optimization results

그림에 나타낸 파레토 최적해 집합의 각각의 개체들은 퍼지제어알고리즘의 설계안을 의미한다. 본 논문에서는 그림에서 검정색 원으로 표시한 설계안을 선택하였다. 선택된 설계안의 목적함수 값은 J1과 J2에 대해서 각각 0.89와 0.58이다. 이것은 건물 A와 B의 최대치변위를 연결하지 않은 건물에 비해서 약 10%와 40% 이상 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다. 건물 A와 B의 지진응답을 MR 감쇠기로 연결된 경우와 그렇지 않은 경우에 대하여 Table 3과 4에 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 최적화의 목적함수로 사용한 최대치 및 RMS 변위 응답 뿐만 아니라 가속도응답도 MR 감쇠기를 이용한 연결제어를 통해서 매우 효과적으로 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 특히 건물 A보다는 건물 B의 응답을 더 효과적으로 줄일 수 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 그림 6에 나타낸 다양한 설계안 중에서 건물 B에 효과적인 제어알고리즘을 선택했기 때문이다.

Table 3. Responses of Building A

| | Uncoupled | Coupled |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| Peak Displacement | 9.74cm | 8.74cm |
| RMS Displacement | 3.62cm | 2.11cm |
| Peak Acceleration | 2.86m/s ² | 2.33m/s ² |
| RMS Acceleration | 0.62m/s ² | 0.58m/s ² |

Table 4. Responses of Building B

| | Uncoupled | Coupled |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| Peak Displacement | 6.84cm | 4.00cm |
| RMS Displacement | 2.29cm | 1.06cm |
| Peak Acceleration | 3.77m/s ² | 3.03m/s ² |
| RMS Acceleration | 1.23m/s ² | 0.68m/s ² |

MR 감쇠기로 연결된 인접건물에 대한 피지제어성능을 시간의 변화에 따라 검토해보기 위하여 건물 A와 B의 최상층 변위시간이력을 Fig. 7, 8에 나타내었다. 변위 그래프에서 볼 수 있듯이 건물 A보다는 B에서 더 우수한 연결제어 효과가 나타났다. 특히 15초 이후에는 연결제어에 의해서 두 건물의 응답이 모두 대폭 줄어드는 것을 알 수 있다.

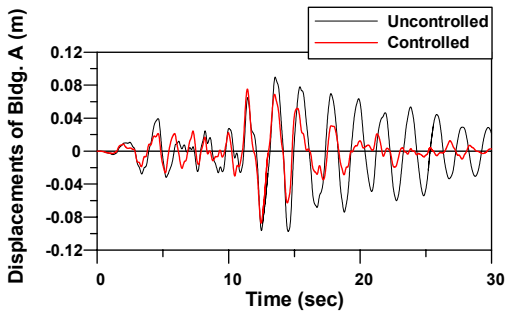


Fig. 7. Displacement time history of building A

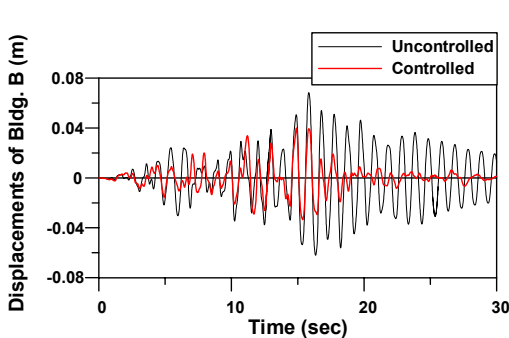


Fig. 8. Displacement time history of building B

다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 이용하여 최적화된 피지제어기는 실시간으로 변하는 MR 감쇠기 양단의 상대변위 및 상대속도를 기반으로 최적의 명령전압을 생성하게 된다. 이렇게 생성된 명령전압이 MR 감쇠기로 전달되게 되면 감쇠력이 실시간으로 조절되는데 이렇게 제어된 MR 감쇠기의 감쇠력 시간이력그래프를 Fig. 9에 나타내었다.

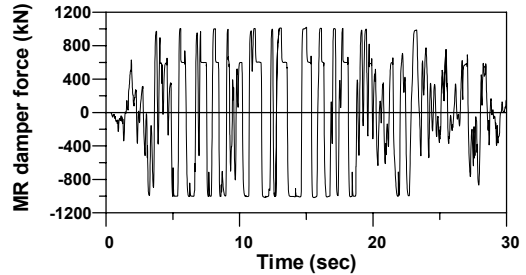


Fig. 9. Time history of MR damper force

그림에서 보는 바와 같이 피지제어기는 실시간으로 MR 감쇠기의 감쇠력을 적절하게 조절하여 엔지니어가 원하는 제어성능을 발휘할 수 있다. 또한 사용한 MR 감쇠기의 용량이 최대 1000kN의 감쇠력을 발휘할 수 있는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안한 인접구조물의 지진응답제어기술의 지진충돌 (seismic pounding)에 대한 성능을 검토해보기 위해서 두 예제구조물의 층간상대변위를 12층에서 비교하여 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 지진하중이 가해지는 전체 구간에서 두 건물의 상대변위를 효과적으로 제어할 수 있는 것을 볼 수 있다. 두 건물사이의 최대상대변위는 제어하지 않은 경우에 11.4 cm 인데 반해서 제어한 경우에는 7.1 cm로 대폭 줄어들었다.

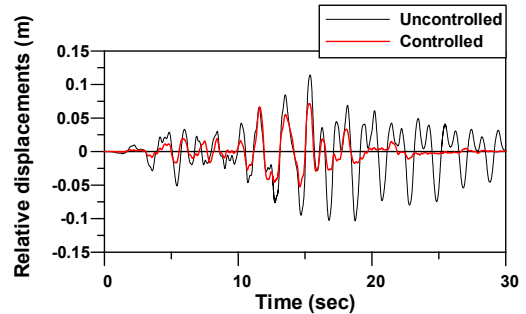


Fig. 10. Relative displacement at 12th floor

5. 결론

본 논문에서는 지진하중을 받는 인접한 두 건물 사이에 MR 감쇠기를 설치하여 준능동 연결제어성을 검토하였다. 예제구조물로는 20층 및 12층 전단발딩모델을 사용하였으며 두 건물의 12층을 MR 감쇠기로 연결하였다. MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지논리 제어를 사용하였으며 퍼지제어의 최적설계를 위하여 다목적 유전자알고리즘을 적용하였다. 수치해석결과 두 건물을 연결 제어할 경우에 각각 건물의 응답제어 목표는 서로 상충관계에 있는 것을 알 수 있었다. 따라서 다목적 최적화가 효과적으로 적용될 수 있었고 결과로서 얻은 파레토 최적해집합 중에서 엔지니어가 적절한 설계안을 용이하게 선택할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 MR 감쇠기를 이용한 준능동 퍼지제어를 사용하면 지진하중을 받는 인접건물의 변위응답뿐만 아니라 가속도응답도 매우 효과적으로 제어할 수 있었다. 본 연구에서는 지진하중을 받는 인접건물의 전체적인 동적응답제어만을 목표로 하고 있으나 실제 적용을 위해서는 두 건물이 MR 감쇠기로 연결되는 층에서 국부적으로 발생하는 전단력 등에 대한 응력검토, 이를 보강하기 위한 기둥보강 및 전단벽 설치 등이 필요할 것이다. 따라서 이에 대한 연구를 추후 수행할 계획이다.

References

- [1] S.E.A. Raheem, "Seismic pounding between adjacent building structures", *Electronic Journal of Structural Engineering*, Vol. 6, pp. 66-74., 2006.
- [2] R. Jankowski, "Pounding force response spectrum under earthquake excitation", *Engineering Structures*, Vol. 28, pp. 1149-1161, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.12.005>
- [3] D.G. Lee, H.S. Kim, H. Ko, "Evaluation of Coupling-Control Effect of a Sky-Bridge for Adjacent Tall Buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 21., pp.311- 328, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/tal.592>
- [4] R.E. Christenson, B.F. Spencer, Jr., E.A. Johnson, K. Seto, "Coupled building control considering the effects of building/connector configuration", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 132, No. 6, pp. 853-863, 2006.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2006\)132:6\(853\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:6(853))
- [5] R.E. Christenson, B.F. Spencer, Jr., E.A. Johnson, "Semiactive connected control method for adjacent multidegree-of-freedom buildings", *Journal of Structural*

Engineering, Vol. 133, No. 3, pp. 290-298, 2007.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(2007\)133:3\(290\)](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(2007)133:3(290))

- [6] M.S. Shahidzadeh, H. Tarzi, M. Dorfeshan, "Takagi-Sugeno fuzzy control of adjacent structures using MR dampers", *Journal of Applied Sciences*, Vol. 11, No. 15, pp. 2816-2822, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3923/jas.2011.2816.2822>
- [7] S.Y. Ok, D.S. Kim, K.S. Park, H.M. Koh, "GA-based optimal design for vibration control of adjacent structures of linear viscous damping system", *Journal of Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 1, pp. 11-19, 2007.
- [8] R.H. Sues, S.T. Mau, Y.K. Wen, "System identification of degrading hysteretic restoring forces", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 114, No. 5, pp. 833-846, 1988.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2007.11.1.011>
- [9] K. Deb, A. Pratap, S. Agrwal, T. Meyarivan, "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 181-197, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/4235.996017>

김 현 수(Hyun-Su Kim)

[정회원]



- 2002년 8월 : 성균관대학교 건축공학과 (공학박사)
- 2004년 12월 : Texas A&M University, Department of Civil Engineering (박사후 연구원)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축사회환경학부 부교수

<관심분야>

구조해석, 진동제어, 최적설계