

준능동 스마트 감쇠기를 사용한 빌딩구조물의 지진응답제어

Seismic Response Control of Building Structures using Semiactive Smart Dampers

김 현 수* · Roschke, Paul N.** · 이 동 근***
 Kim, Hyun-Su · Roschke, Paul N. · Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

The goal of many researchers in the field of structural engineering is to reduce both damage to building structures and discomfort of their inhabitants during strong motion seismic events. The present paper reports on analytical work conducted with this aim in mind as a prior research of experimental study. A four-story, 6.4 m tall, laboratory model of a building is employed as a example structure. The laboratory structure has graphite epoxy columns and each floor is equipped with a chevron brace that serves to resist inter-story drift with the installation of a magnetorheological (MR) damper. An artificial excitation has been generated with a robust range of seismic characteristics. A series of numerical simulations demonstrates that an optimized fuzzy controller is capable of robust performance for a variety of seismic base motions. Optimization of the fuzzy controller is achieved using multi-objective genetic algorithm(MOGA), i.e. NSGA-II. Multiple objective functions are used in order to reduce both peak and root-means-squared displacement and accelerations at the floor levels of the building.

Keywords: fuzzy logic, genetic algorithm, MR damper, multi-objective control.

1. 서론

현재까지 건축구조물에 발생하는 지진응답의 크기를 줄여서 구조물의 안전성이 및 사용성을 높이기 위하여 다양한 종류의 제어장치와 제어알고리즘이 개발 및 적용되어 왔다(Kareem 등, 1999; Symans 등, 1999). 다양한 종류의 제어장치 중에서 근래에 들어와서는 능동제어장치의 적응성과 수동제어장치의 안정성의 장점을 동시에 갖춘 준능동 제어장치에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 이러한 준능동 제어장치는 작은 전력을 가지고 우수한 제어성과 안정성을 확보할 수 있으므로 지진하중을 받는 건축 및 토목구조물의 진동제어에 다양하게 적용되고 있다. 이러한 준능동

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 박사 후 연구원 E-mail: digiarchi@skku.edu

** Texas A&M Univ. 교수 E-mail: p-roschke@tamu.edu

*** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 교수 E-mail: dglee@skku.ac.kr

감쇠기의 하나인 MR 감쇠기는 비교적 최근에 개발된 감쇠장치로서 자기장의 세기에 따라 변하는 항복응력을 갖는 점소성 거동을 하기 때문에 이 장치를 이용한 준능동 제어는 자기장을 변화시킬 수 있는 전류 또는 전압을 조절함으로써 이루어진다. MR 감쇠기의 특성은 컴퓨터시뮬레이션과 실험을 통해서 여러 연구자들에 의하여 연구되어 왔고 구조물에 실제 적용을 통해서 MR 감쇠기가 구조물의 동적응답을 저감시키는데 효과적으로 사용될 수 있다는 사실을 확인하였다(조상원 등, 2004; 이호근 등, 2004). 준능동 제어시스템은 일반적으로 높은 비선형성을 보인다. 따라서 효과적인 제어시스템을 개발하기 위해서는 사용되는 제어장치의 특징을 적절하게 다룰 수 있고 활용할 수 있는 제어 알고리즘이 필요하다. 또한 실제 구조물에 적용하기 위해서는 제어명령을 실시간으로 계산할 수 있어야 하고 구조물의 가속도와 같이 쉽게 계측할 수 있는 구조물의 응답에 근거해서 의사결정을 해야한다. 본 연구에서는 준능동 감쇠장치인 MR 감쇠기와 퍼지제어기를 각각 제어장치 및 제어알고리즘으로 사용하여 건축구조물의 지진응답 저감능력을 검토해보았다. 퍼지제어기를 설계하는 과정은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째, 사용할 퍼지추론타입을 선택하고 입력과 출력의 개수를 결정한다. 둘째, 각각의 입력과 출력에 대하여 소속함수(membership function)를 결정한다. 마지막으로 if-then 규칙을 설정한다. 이러한 과정은 일반적으로 전문가의 지식에 근거하게 된다. 그러나 건축구조물이 점차 복잡화하고 대규모화되면서 인간의 경험 및 직관적인 판단력에 근거해서 최적의 퍼지논리 제어알고리즘을 구성한다는 것은 무척 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 다목적 유전자 알고리즘(Multi-Objective Genetic Algorithms; MOGA)을 사용하여 퍼지제어기를 최적화하였다.

본 연구는 4층 벤치마크 건물의 진동제어 실험에 대한 선행 연구로서 본 연구자들은 실험 및 해석적인 연구를 통하여 MR 감쇠기와 퍼지제어기를 사용한 건축구조물의 제어성능에 대하여 검토해 보고자하는 일련의 연구를 수행하고 있다. 그 중에서 본 논문은 해석적인 연구에 대한 내용을 다루고 있으며 본 논문에서 개발된 제어알고리즘은 후속연구인 실험적 연구에서 사용할 계획이다. 본 연구에서는 MR 감쇠기의 동적거동을 모사할 수치해석 모델을 개발하기 위하여 비선형 시스템의 표현에 뛰어난 성능을 보이는 뉴로-퍼지 모델을 사용하였다(Schurter 등, 2001). MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델은 ANFIS(adaptive neuro-fuzzy inference system)(Jang, 1993)를 이용하여 생성하였다. 본 연구에서 개발된 퍼지제어기의 건축구조물의 지진응답제어기에 대한 효율성을 검증하기 위하여 다양한 지진하중을 이용한 수치해석을 수행하였다.

2. 예제구조물

MR 감쇠기를 이용한 건축구조물의 지진응답 제어성능을 검토해보기 위하여 본 연구에서는 그림 1에 나타난 4층 벤치마크 건물을 이용하였다. 그림에 나타난 6.5m 높이의 4층 벤치마크 건물은 미국의 Texas A&M 대학의 토목공학과 실험실에 설치되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 역V형 가새를 매층에 설치하였고 1층에 MR 감쇠기를 설치하였다. 구조물의 수치모델을 얻기 위하여 충격해머(impact hammer)를 사용한 시스템 식별(system identification) 작업을 선행연구를 통하여 수행하였고 그 결과 벤치마크 건물은 1.05 Hz, 3.84 Hz, 8.11 Hz, 및 13.66 Hz의 고유진동주기를 가지고 있는 것을 확인하였다(Zhang 등, 1999). 건물의 질량은 각층에 75kg씩 집중질량으로 분포시켰다. 4층의 벤치마크 건물이 약 1초의 고유진동 주기, 즉 대략 10층 건물의 고유진동주기와 비슷한 동적 특성을 가지도록 함으로써 MR 감쇠기를 사용한 고층건물의 지진응답 제어에 적용 가

능성을 검토해보고자 하였다. 벤치마크 건물은 진동대 위에 설치되었으며 이를 통하여 다양한 지진하중을 가진할 수 있다.

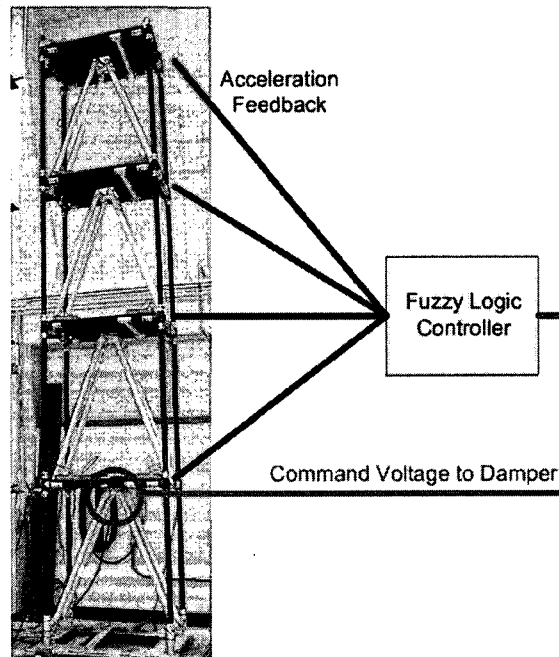


그림 1. 4층 벤치마크 건물과 제어시스템 개념도

3. 제어장치 및 제어알고리즘

3.1. MR 감쇠기

건물의 지진응답을 제어하기 위하여 본 연구에서는 그림 2에 나타낸 MR 감쇠기를 제어장치로 사용한다. 그림 1에 나타낸 4층 벤치마크 건물은 역V형 가새가 설치된 평면 내에서만 움직이도록 구성을 하였다. 따라서 지진하중 역시 동일한 평면 내에서만 가해지므로 MR 감쇠기는 가해지는 지진하중에 효과적으로 저항할 수 있도록 그림 1에서 나타낸 동그라미 안에 설치된다. 유전자 알고리즘을 이용하여 퍼지제어기를 개발하기 위해서는 MR 감쇠기의 동적거동을 정확하게 모사할 수 있는 수치해석 모델이 필요하다. 이를 위하여 ANFIS를 이용하여 뉴로-퍼지 모델을 개발하였다. 본 연구에서 ANFIS는 MR 감쇠기의 성능실험을 통하여 얻은 입력 및 출력데이터를 이용하여 MR 감쇠기의 동적거동을 정확히 모사할 수 있도록 퍼지추론시스템(Fuzzy Inference System; FIS)의 퍼지규칙과 소속함수를 적절하게 조절한다. MR 감쇠기의 특성은 변위, 속도, 제어전압 및 감쇠력의 관계에 의하여 결정된다. ANFIS 학습을 통하여 생성한 MR 감쇠기 뉴로-퍼지모델의 rule surface를 그림 3에 나타내었다.

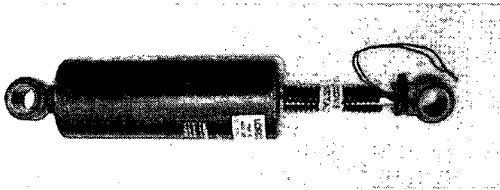


그림 2. MR 감쇠기

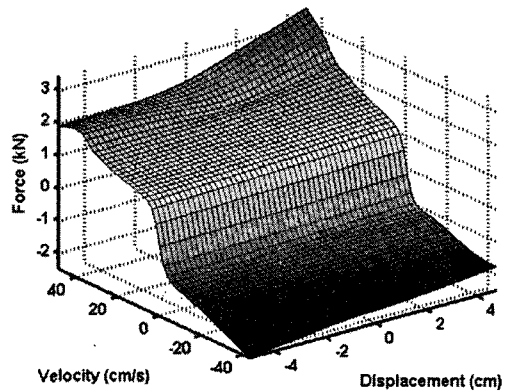


그림 3. MR 감쇠기 뉴로-퍼지 모델의 rule surface

3.2. 퍼지제어기

본 연구에서는 4층 예제건물에 사용된 준능동 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지 제어기를 사용한다. 퍼지제어기법은 구조물의 동적응답정보로부터 퍼지연산을 수행함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘하도록 MR 감쇠기에 입력되는 명령전압을 조절한다. 퍼지제어기는 엔지니어나 제어전문가의 지식을 바탕으로 구조물 제어에 필요한 제어규칙을 기술하게 되며 제어대상 시스템에 대한 불확실성과 비선형성을 보다 용이하게 취급할 수 있는 장점이 있다. 기존에는 입력력량과 시스템파라미터를 분명히 알 수 있다는 가정 하에서 정확한 수치를 이용하는 하나의 수식 또는 제어알고리즘에 의해서 제어가 이루어졌다. 그러나 실제 시스템에서는 어떤 모델도 실제 모델에 대한 근사치에 지나지 않고 확률론적 모델로부터 얻어진 기대치에 불과한 모델이므로 시스템을 모델링할 때 근사치를 고려해야하며 불확실하게 모델링된 시스템을 제어할 때에는 불확실한 모델에 대한 불확실한 제어기법이 필요하게 되었다. 이러한 관점에서 다루어지는 지능제어기법 중에 하나가 퍼지제어기이다. 본 연구에서는 예제건물 각층의 가속도를 입력으로 하고 출력을 MR 감쇠기를 제어할 명령전압으로 하는 즉, MISO (Multi-Input Single-Output) 퍼지제어기를 개발하고자 한다. 소속함수의 파라미터 및 퍼지제어규칙 등은 다음절에서 설명할 유전자 알고리즘 최적화를 통해서 결정된다.

4. NSGA-II를 이용한 퍼지제어기의 최적화

건축구조물의 지진응답을 제어하는 제어알고리즘 설계의 목적은 구조물의 안전을 위하여 층간 변위를 줄이는 것과 거주자의 사용성 측면에서 층가속도를 줄이는 것으로 크게 나눌 수 있다. 따라서 이 문제는 하나의 목적을 만족시키는 것이 아니라 여러 개의 성능지표에 대하여 동시에 좋은 성능을 발휘할 수 있는 최적해를 찾는 다목적 최적화로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 표 1에 나타낸 바와 같이 층간변위 및 층가속도의 최대값 뿐만 아니라 RMS(root mean square) 응답도 목적함수에 포함함으로써 퍼지제어기가 구조물의 최대응답 뿐만 아니라 RMS 응답도 효과적으로 제어할 수 있도록 하였다. 목적함수는 표에서 볼 수 있듯이 제어된 구조물의 응답을 제어하지 않았을 때의 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. X 는 층간변위, \dot{X} 는 층가속

도, σ 는 층간변위의 RMS값, $\ddot{\sigma}$ 는 층가속도의 RMS값을 의미한다. 식에서 max는 전체시간에 걸쳐서 모든 층에서 발생하는 응답중의 최대값을 의미한다.

표 1. 다목적 최적화의 목적함수

| 내용 | 목적함수 |
|------------------------------|---|
| Normalized peak drift | $J_1 = \frac{X_{\max}^{\text{controlled}}}{X_{\max}^{\text{uncontrolled}}}$ |
| Normalized peak acceleration | $J_2 = \frac{\dot{X}_{\max}^{\text{controlled}}}{\dot{X}_{\max}^{\text{uncontrolled}}}$ |
| Normalized RMS drift | $J_3 = \frac{\sigma^{\text{controlled}}}{\sigma^{\text{uncontrolled}}}$ |
| Normalized RMS acceleration | $J_4 = \frac{\ddot{\sigma}^{\text{controlled}}}{\ddot{\sigma}^{\text{uncontrolled}}}$ |

다목적 최적화 문제에서 여러 가지의 목적을 하나의 적합도 함수로 만들 수 있는 몇 가지 전통적인 방법이 존재한다. 본 연구에서는 다목적 최적화 기법중에 하나인 비지배 정렬 유전자 알고리즘(NSGA-II)(Deb 등, 2000)을 사용하여 한 번의 최적화작업 수행으로 파레토 최적해 집합을 구할 수 있도록 하였다. 구조공학과 관련된 다목적 최적화문제를 해결하는데 있어서는 구조엔지니어가 한 개의 최적해보다는 구조설계의 대안으로서 파레토 최적해 집합에 더 큰 관심을 가질 것이다. 유전자 알고리즘은 많은 수의 개체(해)들을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 때문에 여러 개의 최적해를 동시에 찾는데 유전자 알고리즘을 이용하는 것이 매우 자연스러운 일이다. NSGA-II를 이용한 다목적 최적화작업의 개념도를 그림 4에 나타내었다. 다목적 유전자 알고리즘과 단일 목적을 가진 일반적인 유전자 알고리즘과의 가장 근본적인 차이점은 개체에 적합도를 부여하는 방법이다. 다목적 유전자 알고리즘에서 모든 개체는 각각의 목적에 대한 성능지수를 계산하여 벡터의 형태로 저장하게 된다. 이러한 벡터는 유전자알고리즘의 선택 연산자를 적용하기 위해서 스칼라 형태인 하나의 적합도 값으로 변환되어야 한다. 이러한 과정은 개체군에 포함된 모든 개체에 상대적인 순위를 부여하고 부여된 순위에 근거하여 적합도를 결정함으로써 이루어진다. 각각의 개체는 파레토 지배의 개념을 사용하여 비교된다. 이 내용을 그림 5에 나타내었다. 그림에서 사각형으로 표현된 개체는 비지배개체(non-dominated individuals)를 나타낸다. 이는 현재 개체군에서는 모든 목적에 대해서 더 우월한 성능을 나타내는 개체가 없기 때문에 다른 개체들에 의하여 지배되지 않는 개체들이라는 즉, 가장 우월한 개체들이라는 의미를 표현하고 있다. 이렇게 비지배 개체들에 의해서 구성되는 일련의 개체군을 프론트라고 하고 이 프론트에 속하는 개체에게는 우선순위 '1'이 부여된다. 이렇게 우선순위 '1'이 부여된 개체들을 원래의 개체군에서 임의로 지우고 남아있는 개체들만을 이용하여 전술한 방법과 같이 비지배 개체들을 계산한다면 이렇게 결정된 비지배 개체들에는 순위 '2'가 부여될 수 있다. 모든 개체에 순위가 부여될 때까지 이러한 작업을 반복 수행한다면 그림 5와 같이 모든 개체에 순위가 부여될 수 있다. 이러한 작업은 결과적으로 일련의 비지배 프론트들을 형성한다.

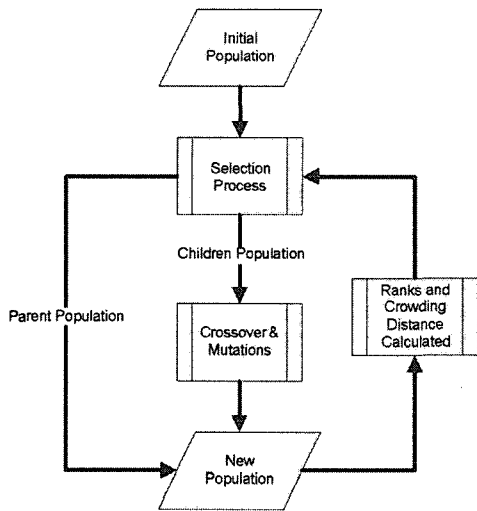


그림 4. NSGA-II의 최적화 개념도

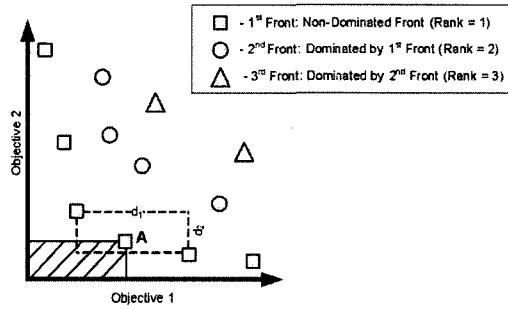


그림 5. 다목적 최적화의 우선순위 부여방법

5. 개발된 퍼지제어기를 사용한 건축구조물의 제어성능평가

본 연구에서 개발된 퍼지제어기의 제어성능을 검토해보기 위하여 El Centro FN(1940), Kobe NS(1995) 및 Northridge FN(1994)과 인공지진하중의 네 가지 지진하중을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구를 통해서 개발한 퍼지제어기(FLC)뿐만 아니라 passive-on(P-On; MR 감쇠기로 최대 전압이 전달되는 경우) 및 passive-off(P-Off; MR 감쇠기로 전압이 전달되지 않는 경우) 제어기를 사용했을 때의 각 지진별 제어성능을 표 2에 정리하였다. 이 세 가지 제어기 중에서 우선 P-On을 사용했을 경우의 제어성능을 살펴본다면 이 때는 감쇠기의 감쇠력이 가장 크게 발휘되기 때문에 최대치와 RMS 층간변위(J1, J3)의 제어에 매우 효과적인 것을 확인할 수 있다. 그러나 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압이 커지게 되면 감쇠기에 의해서 구조물에 추가되는 강성이 커지는 효과가 나타나므로 층가속도(J2, J4)의 제어에는 상당히 좋지 않은 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 표 2를 보면 모든 지진하중에 대해서 1보다 큰 제어성능치를 나타내고 있으며 특히, Kobe 및 Northridge 지진과 같은 근거리 지진에 대해서는 제어를 하지 않았을 때보다 수십 배가 더 큰 층가속도응답을 유발시키는 것을 알 수 있다. 따라서 P-On 제어기는 거주자의 사용성 및 심리적 안전성에 매우 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 이에 반하여 P-off 제어기는 MR 감쇠기의 감쇠력을 최소화하기 때문에 층간변위의 제어성능은 P-on의 경우에 비하여 좋지 않지만 구조물의 층가속도를 효과적으로 제어할 수 있는 것을 알 수 있다. 이에 반해서 본 연구를 통해서 개발한 FLC 제어기는 4가지의 목적함수에 대해서 균형 있는 제어성능을 나타낸다. 즉, 표 2를 보면 FLC는 층간변위의 제어에 있어서 P-on의 경우와 비슷하거나 더 나은 제어성능을 보여주는 한편 층가속도 제어에서는 P-on의 경우에 비하여 무척 월등한 제어성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 지진하중에 대한 구조물의 안전성을 증대시키기 위하여 MR 감쇠기의 감쇠능력을 가장 크게 발휘하는 P-on 제어를 사용한다면 구조물의 층간변위는 효과적으로 제어할 수 있지만 층가속도가 제어하지 않았을 때에 비하여 수십 배가 증가할 수 있다. 그러나 본 연구에서 개발한 퍼지제어기

를 사용한다면 가속도응답의 큰 증가 없이 구조물의 층간변위를 P-on 수준으로 줄일 수 있으므로 건축구조물의 지진응답제어에 매우 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

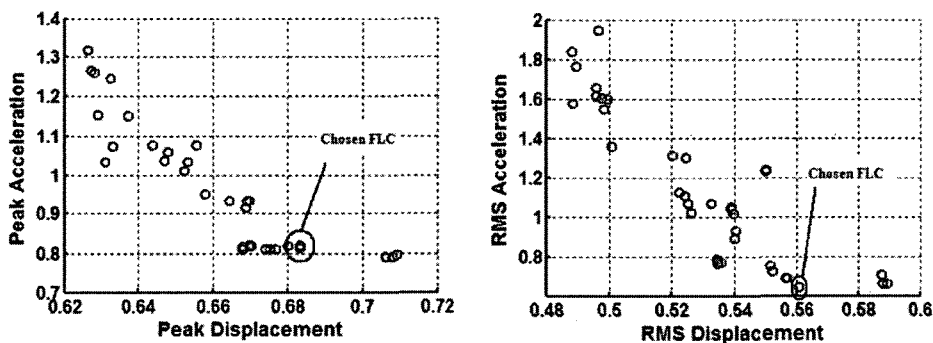


그림 6. 인공지진을 이용한 다목적 최적화결과

표 2. 제어성능의 비교

| 지진하중 | 제어기 | J1 | J2 | J3 | J4 |
|---------------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Artificial EQ | P-Off | 0.801 | 0.846 | 0.752 | 0.787 |
| | P-On | 0.615 | 1.509 | 0.472 | 3.251 |
| | FLC | 0.687 | 0.818 | 0.567 | 0.653 |
| El Centro | P-Off | 0.854 | 0.859 | 0.798 | 0.714 |
| | P-On | 0.804 | 3.081 | 0.725 | 11.022 |
| | FLC | 0.811 | 1.567 | 0.693 | 2.537 |
| Kobe | P-Off | 0.588 | 0.746 | 0.688 | 0.693 |
| | P-On | 0.531 | 11.851 | 0.815 | 36.703 |
| | FLC | 0.554 | 6.48 | 0.614 | 5.003 |
| Northridge | P-Off | 0.806 | 0.812 | 0.803 | 0.722 |
| | P-On | 0.731 | 3.149 | 0.756 | 20.786 |
| | FLC | 0.649 | 1.753 | 0.705 | 2.667 |

6. 결론

본 연구에서는 MR 감쇠기를 이용하여 4층 예제건물의 지진응답을 효과적으로 제어할 수 있는 제어알고리즘을 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여 다목적, 유전자 알고리즘을 이용하였고 이를 통하여 개발된 제어알고리즘의 제어성능을 검토하여 보았다. 4층 예제건물의 층가속도와 층간변위를 줄이는 것을 다목적 최적화문제의 목적함수로 사용하였고 NSGA-II를 이용하여 파레토 최적해 집합을 구하였다. 유전자 알고리즘을 이용하여 다목적 최적화문제를 푸는 전통적인

가중합방법을 사용하여 최적해 집합을 구하고자 한다면 한 번의 최적화작업 수행으로 하나의 최적해만을 얻을 수 있기 때문에 가중치를 변경해가면서 여러 번의 최적화 작업을 반복적으로 수행하는 것이 필요하다. 그러나 본 연구에서 도입한 NSGA-II를 사용하여 최적화를 수행을 한다면 한 번의 최적화 작업으로 파레토 최적해 집합을 구할 수 있다. 이렇게 구한 파레토 최적해 집합에서 설계요구조건을 만족시키는 적절한 퍼지제어기를 선택할 수 있으므로 매우 효율적이다. 즉 여러개의 최적화된 제어알고리즘 대안들을 한꺼번에 구할 수 있으므로 매우 효과적인 방법이라고 판단된다. NSGA-II로 최적화된 퍼지제어기의 제어성능을 passive-on 및 passive-off 제어기와 비교하여 검토하였다. passive-on은 건물의 지진응답 중에 층간변위를 저감하는 데는 무척 효과적이지만 층가속도를 급격히 증가시킬 수 있다. 이에 반하여 passive-off의 경우에는 층가속도를 효과적으로 제어할 수 있는 반면에 층간변위 제어에는 효과가 별로 좋지 않은 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 MOGA-퍼지제어기는 건물의 층가속도 응답의 큰 증가 없이 층간변위를 효과적으로 줄일 수 있으므로 건축구조물의 지진응답 제어에 효과적으로 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 이호근, 민경원, 성금길, 김대곤, (2004) 구조물 진동의 반능동 제어를 위한 MR 댐퍼 설계, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.469-476.
- 조상원, 이현재, 김춘호, 이인원, (2004) MR댐퍼 기반의 스마트 수동제어 시스템, 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, pp.453-461.
- Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T. (2000) A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature. VI Conference. Paris, France*, 16-20 September, pp 849-858.
- Jang, R.J.S. (1993) ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*,23(3), pp.665-685.
- Kareem, A., Kijewski, T. and Tamura, Y.(1999) Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, *Wind and Structures*, 2(3), pp.201-251
- Schurter, K. and Roschke, P. N. (2001) Neuro-Fuzzy Control of Structures Using Magnetorheological Dampers, *Proceedings of the 2001 American Control Conference*. Washington, D.C., June, pp.25-27.
- Symans, M.D and Constantinou, M.C. (1999) Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review, *Engineering Structures*, 21, pp.469-487.
- Zhang, J. and Roschke, P. N. (1999) Active Control of a Tall Structure Excited by Wind, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83.