

퍼지관리제어기법을 이용한 스마트 면진 벤치마크 건물의 제어

Control of Smart Base-isolated Benchmark Building using Fuzzy Supervisory Control

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

P. N. Roschke**

국문요약

본 논문에서는 스마트 면진장치를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지관리제어기를 개발하였고 그 효율성을 검토하였다. 이를 위하여 1세대 스마트 면진 벤치마크 건물을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 대상 벤치마크 구조물은 부정형의 평면을 가지고 있는 8층 건물이고 탄성베어링과 MR 감쇠기로 이루어진 스마트 면진장치가 설치되어 있다. 본 논문에서는 다목적 유전자 알고리즘을 이용하여 원거리 지진과 근거리 지진에 대하여 각각 면진구조물을 효과적으로 제어할 수 있는 하위 퍼지제어기를 개발한다. 최적화과정에서는 구조물의 최대 및 RMS 가속도와 면진층 변위의 저감이 목적으로 사용된다. 벤치마크 건물에 지진하중이 가해지면 두 개의 하위 퍼지제어기에서는 각각 다른 명령전압이 제공되는데 이 명령전압들은 퍼지관리제어기의 추론과정에 기반하여 실시간으로 참여율이 조절되어 하나의 명령전압으로 조합된다. 수치해석을 통하여 제안된 퍼지관리제어기법을 사용함으로써 상부구조물의 응답과 면진층의 변위를 효과적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

주요어 : 스마트 면진장치, 벤치마크 제어문제, 퍼지관리제어, 다목적 유전자 알고리즘, MR 감쇠기

ABSTRACT

The effectiveness of fuzzy supervisory control technique for the control of seismic responses of smart base isolation system is investigated in this study. To this end, first generation base isolated building benchmark problem is employed for the numerical simulation. The benchmark structure under consideration is an eight-story base isolated building having irregular plan and is equipped with low-damping elastomeric bearings and magnetorheological (MR) dampers for seismic protection. Lower level fuzzy logic controllers (FLC) for far-fault or near-fault earthquakes are developed in order to effectively control base isolated building using multi-objective genetic algorithm. Four objectives, i.e. reduction of peak structural acceleration, peak base drift, RMS structural acceleration and RMS base drift, are used in multi-objective optimization process. When earthquakes are applied to benchmark building, each of low level FLCs provides different command voltage and supervisory fuzzy controller combines two command voltages to one based on fuzzy inference system in real time. Results from the numerical simulations demonstrate that base drift as well as superstructure responses can be effectively reduced using the proposed supervisory fuzzy control technique.

Key words : smart base isolation system, bench mark control problem, fuzzy supervisory control, multi-objective genetic algorithm, MR damper

1. 서 론

면진시스템은 지진하중에 대하여 건축 및 토목구조물을 보호하는 데 있어서 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나로서 상부구조물의 층간변위와 가속도를 동시에 줄임으로써 구조물뿐만 아니라 고가 장비의 피해를 효과적으로 줄일 수 있는 시스템으로 알려져 있다. 따라서 탄성 베어링, 마찰 베어링, 납-고무 베어링 등을 사용한 일반적인 면진시스템은 수많은 구조물에 효과적으로 적용되고 있다. 그러나 이러한 면진시스템이 설치된 구조물에 근거리 지진과 같이 강한 지반운동이 가해지면 면진층에서 상당히 큰 변위가 발생할 수 있다. 큰 면진층 변위에 의한 면진구조물의 구조적 실패가 Northridge(1994) 지진 이후에 다수 발생하고 있고, 많은 연구자들에 의해서 근거리 지진에 대해서 면진된 구조물이 가지고 있는 약점이 지적되고 있다.^{(1),(2)} 따라서 최근에 와서는 보조감쇠장치를 추가하여 면진된 구조물의 밀면변위를 보다 효과적으로

줄이는 것에 대한 다양한 연구가 진행 중이다. 그러나 면진된 구조물의 밀면변위를 줄이기 위하여 면진장치에 추가적인 수동감쇠장치를 도입하는 것은 지반과 구조물을 격리 시킴으로써 얻을 수 있는 여러 가지 이점들을 감소시킬 수 있으며 상부구조물의 절대가속도나 층간변위를 증가시키는 결과를 초래할 수 있다.^{(3),(4)} 따라서 이러한 문제점에 대한 해결책으로 수동 보조감쇠장치를 추가하는 것이 아니라 능동이나 준능동 제어장치를 도입하는 것에 대한 연구가 수행중이다.⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾ 능동제어장치를 일반적인 면진장치와 함께 사용함으로써 상부구조물 지진응답의 증가 없이 면진된 구조물의 밀면변위를 줄일 수 있는 방법에 관한 몇몇 연구가 수행되었다. 그러나 능동제어장치는 실제 구조물 제어에 수월하게 이용되지 못하고 있는데 그 주된 이유는 능동제어장치의 안정성(stability)과 견실성(robustness) 등에 관한 우려와 더불어 실제 지진하중이 왔을 때 공급되지 못 할 수도 있는 큰 전력의 필요성 때문이다. 그래서 몇몇 연구자들은 구조물의 지진응답을 감소시키기 위하여 MR 감쇠기와 같은 준능동 스마트감쇠기를 사용한 하이브리드 면진장치에 대한 연구를 수행하였고 좋은 성능을 보여주고 있다.

스마트 면진장치가 설치된 건물을 위한 제어시스템의 효율성

* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과 연구원, 공학박사
(대표저자: digiarchi@skku.edu)

** Professor, Department of civil engineering, Texas A&M University, U.S.A
본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 6. 1 / 심사종료일 : 2005. 7. 21)

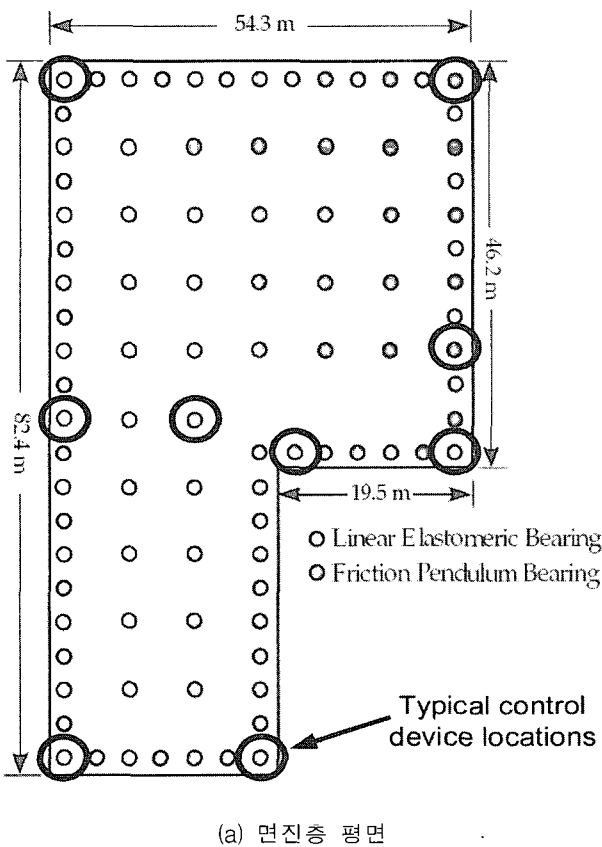
을 보다 체계적으로 비교 및 검증하기 위하여 Narasimhan 등이 1세대 면진 벤치마크 건물⁽⁷⁾을 제안하였다. 본 논문에서는 이 벤치마크 건물의 효과적인 제어를 위하여 퍼지관리제어기를 개발하였고 그 제어 성능을 검토하여 보았다. 퍼지관리제어는 여러 개의 하위 퍼지제어기들을 독립적으로 구성한 뒤 퍼지이론을 이용하여 제어기들의 참여율을 조정하게 된다. 이때, 각 제어기의 참여율은 선택된 제어변수의 상태에 따라 퍼지추론과정을 거쳐서 실시간으로 변화하게 된다. 이러한 퍼지관리제어기법은 여러 연구자들에 의하여 다양한 분야에 적용되고 있다.⁽¹⁰⁾⁻⁽¹³⁾ 본 논문에서의 관리제어기는 근거리 지진 및 원거리 지진에 대하여 최적화된 하위 퍼지제어기(fuzzy logic controller)의 참여율을 결정하는 의사 결정자 (decision maker)로서의 역할을 한다. 하위 퍼지제어기는 다목적 유전자 알고리즘(multi-objective genetic algorithm)을 사용하여 생성하였다. 유전자 알고리즘은 다수의 개체를 이용하여 최적화 문제를 해결하는 특징이 있기 때문에 다목적 최적화문제에 적합한 방법이다. 최근까지 여러 연구자들에 의하여 다목적 최적화문제를 해결할 수 있는 유전자 알고리즘이 제시되었다. 그 중에서 본 논문에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)⁽¹⁴⁾를 이용하여 최적해 집합을 찾는다. 최적화과정에서 사용된 목적은 면진된 구조물의 가속도와 면진층의 변위를 감소시키는 것으로 하였다. 스마트 면진장치를 구성하는 베어링과 제어장치로는 샘플 벤치마크 문제에서 사용된 선

형 탄성베어링과 MR 감쇠기를 그대로 사용함으로써 제어 알고리즘 자체의 성능을 비교할 수 있도록 하였다. 다양한 샘플 지진하중을 사용하여 수치해석을 수행한 결과 퍼지관리제어기의 제어성능이 샘플 제어기인 clipped optimal 제어기보다 우수한 것을 확인할 수 있었다.

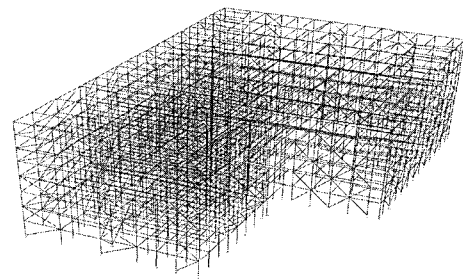
2. 스마트 면진 벤치마크 건물

2.1 건물 개요

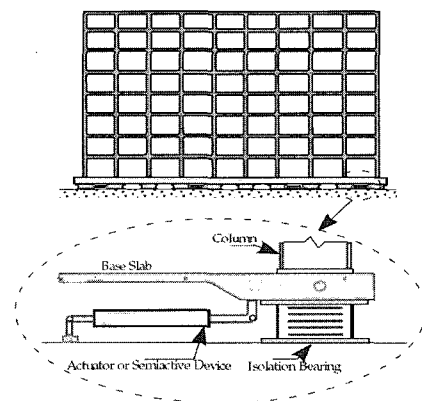
본 논문에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 Narasimhan 등⁽⁷⁾이 제안한 8층의 면진구조물을 예제구조물로 사용하였다. 이 건물은 현재 로스앤젤레스에 존재하는 건물과 매우 유사한 건물로서 길이는 82.4m, 폭은 54.3m이고 'U'자 형의 평면을 가지고 있다. 면진시스템은 연구자의 판단에 의하여 선형탄성 베어링과 마찰진자 베어링 그리고 능동 및 준능동 제어장치 등의 조합으로 이루어질 수 있다. 상부구조물은 선형탄성으로 거동을 한다고 생각한다. 선형탄성 면진시스템은 92개의 저감쇠 탄성베어링으로 이루어져 있고 3초의 기본주기를 가지고 있다. 비선형 면진시스템은 그림 1(a)와 같이 61개의 마찰진자 베어링과 31개의 선형탄성베어링으로 구성된다. 본 논문에서는 선형탄성 면진시스템의 경우만을 대상으로 한다. 모든 경우에 총 16개의 능동 혹은 준능동 제어장치가 X 및 Y방향으로 각각 8개씩 면진층에 설치된다. 보다 자세한 사항은 Narasimhan 등^{(7),(8)}의 논문에 제시되었다.



(a) 면진층 평면



(b) 상부 구조물의 유한요소 모델



(c) 입면

그림 1 스마트 면진 벤치마크 건물

2.2 스마트 면진시스템

앞에서 기술한 바와 같이 본 논문에서 사용된 MR 감쇠기의 용량, 총 개수, 설치 위치 및 구성은 모두 샘플 스마트 면진시스템의 그것과 같다. 즉, MR 감쇠기 하나의 최대 용량은 2,200kN이고 사용된 MR 감쇠기를 모형화하기 위해서 그림 2에 나타난 바와 같이 스프링과 대시포트, 이력요소(Bouc-Wen model)가 병렬로 연결된 모델을 사용하였다. MR 감쇠기에 의해서 생성되는 힘은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f_{MR} = (\alpha z) f(v) + C \dot{U}_b + k U_b \quad (1)$$

여기서, $\alpha = \alpha_a + \alpha_b$, $C = C_a + C_b$, $f(v)$ 는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압의 함수이다. 이력 변수인 z 는 아래의 미분방정식으로 얻을 수 있다.

$$Y_i \dot{z}_i + \gamma |\dot{U}_{bi}| z_i |z_i| + \beta \dot{U}_{bi} z_i^2 - \dot{U}_{bi} = 0 \quad (2)$$

여기서, U_b 는 MR 감쇠기의 변위이고, Y_i 는 이력 요소의 항복변위이다. 파라미터 $U_b, \gamma, \beta, \alpha_a, \alpha_b, C_a, C_b$ 들은 모두 상수이고 보다 상세한 내용은 참고문헌⁽⁸⁾을 통해서 확인할 수 있다. 그림 3에는 조화하중을 받는 MR 감쇠기의 힘-변위관계를 passive-on과 passive-off의 경우에 대하여 나타내었다. 그림에서 MR 감쇠기의 최대 용량이

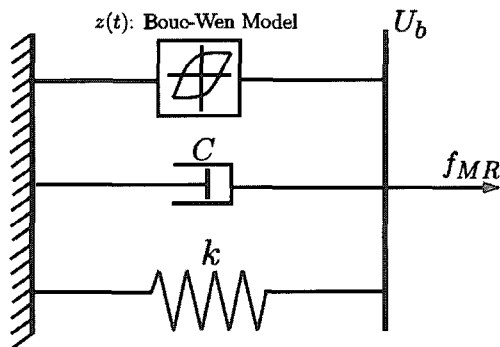


그림 2 MR 감쇠기의 해석모델

2,200kN인 것을 확인할 수 있다. 벤치마크 건물에 설치된 탄성 베어링과 힘-변위 관계를 그림 4에 나타내었다. 베어링의 특성, 위치 및 개수 또한 샘플 스마트 면진시스템과 동일하다.

3. 다목적 유전자 알고리즘

스마트 면진장치의 구성요소인 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 본 논문에서는 고유의 견실성(robustness)과 비선형성(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 퍼지제어기를 사용한다. 비록 퍼지제어기가 수 많은 구조시스템을 제어하는데 이용되어 왔지만 적합한 소속함수(membership function)를 선택하고 제어규칙을 찾아내는 일은 시간이 많이 소요되는 쉽지 않은 작업이다. 본 논문에서는 퍼지제어기의 효과적인 설계를 위하여 다목적 유전자 알고리즘을 이용한다.

3.1 다목적 최적화

스마트 면진시스템을 제어할 제어기의 설계 목적은 면진된 상부구조물의 응답을 줄이는 것과 면진층의 변위를 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. 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 서로 상충한다는 것이다. 이

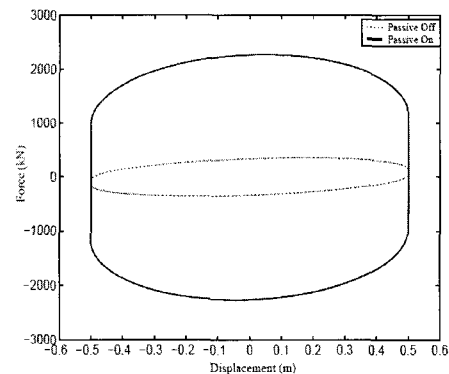


그림 3 MR 감쇠기의 힘-변위 관계

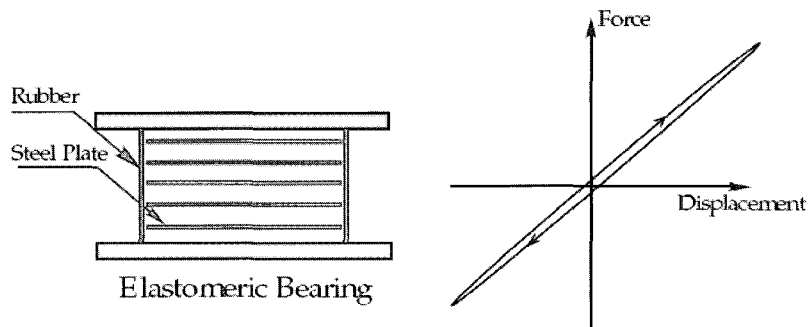


그림 4 탄성베어링의 힘-변위 관계

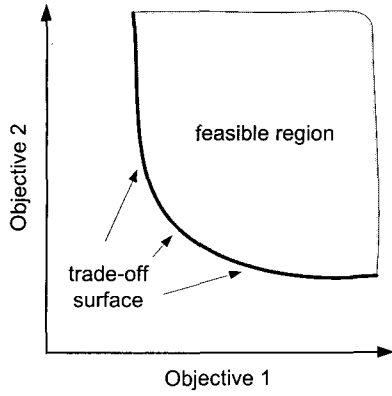


그림 5 상충하는 목적사이의 trade-off

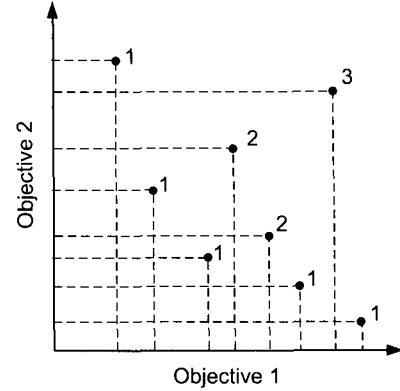


그림 6 다목적 순위

러한 경우에는 각각의 목적들 사이에 trade-off가 존재하게 되는데 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 스마트 면진시스템이 설치된 건물의 면진층 변위를 감소시키기 위해서는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 크게 하여 감쇠력을 크게하는 것이 필요하다. 그러나 이러한 경우에는 지반과 구조물의 격리효과가 저하되므로 지반의 운동 에너지가 상부구조물로 전달되어 상부구조물의 응답을 더욱 크게 만들게 된다. 이와 같이 스마트 면진장치를 제어하는 문제에 있어서는 trade-off가 면진층의 변위와 상부구조물의 응답(절대가속도) 사이에서 존재하게 된다. 다목적 최적화 문제에서 하나의 최적해를 찾는 것은 거의 불가능하고 일련의 서로 우열을 가릴 수 없는 해의 집합(파레토 최적해)이 존재하게 된다. 이것을 그림 5에 나타내었다. 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. Schaffer가 다목적 최적화 문제에 유전자 알고리즘을 적용한 이후로 많은 수의 다목적 유전자 알고리즘이 제안되었다(multi-objective genetic algorithm).⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾ 이러한 여러 가지 다목적 유전자 알고리즘 중에서 다른 방법보다 우월한 몇 가지 특성⁽¹⁴⁾ 때문에 본 논문에서는 NSGA-II를 이용하였다.

3.2 비지배 정렬 유전자 알고리즘(NSGA-II)

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 부여

된 순위에 근거하여 적합도를 결정함으로써 이루어진다. 각각의 개체는 파레토 지배(Pareto dominance)의 개념을 사용하여 비교된다. 이러한 개념은 Goldberg에 의하여 유전자 알고리즘 분야에 처음으로 도입되었다⁽¹⁸⁾. 매 세대마다 개체군안에서 비지배 개체를 다음과 같은 방법으로 찾을 수 있다. 두 개의 목적에 대한 최적화 문제를 생각했을 때 만약 개체 'a'가 개체 'b'보다 두 목적에 대하여 모두 우수한 성능을 보인다면 개체 'a'는 개체 'b'를 '지배한다(dominate)'라고 한다. 즉, 개체 'b'는 개체 'a'에 의하여 지배당한다고 할 수 있다. 만약 하나의 개체가 다른 개체에 의해서 지배당한다면 그 개체는 제외되고 그렇지 않으면 개체군에 남긴다. 개체군에 있는 모든 개체에 대해서 이러한 방법으로 비교를 하면 모든 남아있는 개체는 비지배 해가 되고 파레토 최적해 집합을 이룬다. 이렇게 남은 비지배 해(파레토 최적해)에 순위 1을 부여하고 원래의 개체군에서 임시로 지운다. 그리고 남아있는 개체들만을 이용하여 전술한 방법과 같이 비지배 개체들을 계산한다면 이렇게 결정된 비지배 개체들에는 순위 2가 부여될 수 있다. 모든 개체에 순위가 부여될 때까지 이러한 작업을 반복 수행한다면 그림 6과 같이 모든 개체에 순위가 부여된다. 이러한 작업은 결과적으로 일련의 비지배 front를 형성한다. Deb 등은 이러한 접근법을 그들의 NSGA-II에서 적용하였다. 이렇게 부여된 다목적에 고려한 순위는 이후 개체에 적합도를 부여하는데 사용되며 다목적 유전자 알고리즘과 일반 유전자 알고리즘과의 가장 큰 차이점이 된다. NSGA-II에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌⁽¹⁴⁾을 통해서 확인할 수 있다.

4. NSGA-II를 이용한 퍼지제어기의 최적화

4.1 인코딩(encoding) 방법

본 논문에서 사용된 유전자 알고리즘에서 각각의 개체들은 퍼지제어기를 나타내고 인코딩(encoding)은 이러한 퍼지제어기의 유전적 표현이라고 말할 수 있다. 퍼지제어기를 구성하는데 필요한 모든 정보는 염색체(chromosome)라고 불리는 하나의 구조에 인코딩된다. 본 논문에서는

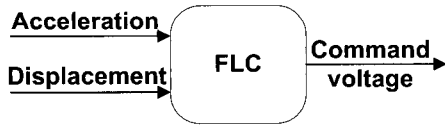


그림 7 퍼지제어기의 입출력 관계

스마트 면진장치가 사용된 구조물의 제어를 위하여 두 개의 입력(면진된 구조물의 최상층 절대가속도와 면진층 변위)과 한 개의 출력(제어전압)으로 이루어진 퍼지제어기를 이용하였으며 이 관계를 그림 7에 나타내었다.

모든 입력과 출력을 표현하기 위하여 가우스 소속함수를 사용하였다. 가우스 소속함수의 형태는 식 (3)에서 2개의 파라미터(c and σ)를 정의함으로써 결정된다. 여기서 c 는 중앙부의 위치, σ 는 표준편차를 각각 나타낸다. 이 두 가지 파라미터를 적절히 조절함으로써 여러 가지 종류의 지식이 표현될 수 있다. 이 두 가지의 파라미터는 그림 8에서 보는 바와 같이 실수 표현방법으로 유전자에 인코딩된다.

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

그림 8에 나타낸 인코딩 방법은 모든 염색체에 적용된다. 여기서 하나의 퍼지 규칙은 두 개의 입력(x_1, x_2)과 하나의 출력(x_3)으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 두 개의 입력은 중앙부를 나타내는 c_1, c_2 와 표준편차를 나타내는 σ_1, σ_2 로 각각 구성되고 출력을 표현하기 위해서는 c_3 와 σ_3 가 이용된다. 파라미터 t 는 두 입력 사이의 관계 조건을 나타내는데 연결조건이 논리곱(AND)이라면 $t=1$ 로 그리고 연결조건이 논리합(OR)이라면 $t=2$ 로 표현한다. 그리고 각각의 제어규칙에 가중치(w)를 두어서 유전자 알고리즘이 각각의 제어규칙이 전체 의사결정과정에서 미치는 영향을 조절할 수 있도록 하였다.

4.2 목적함수

유전자 알고리즘에서 적합도 함수는 각각의 염색체의

성능을 평가하기 위하여 사용되는 주요한 지표이다. 적합도 함수는 유전자 알고리즘과 모호화되는 스마트 면진시스템과의 중요한 연결고리를 제공한다. 좋은 적합도 함수는 스마트 면진장치의 사용시 요구되는 조건을 구체적으로 표현할 수 있어야하고 염색체로 표현되는 각각의 개체를 적절히 평가할 수 있어야 한다. 전술한 바와 같이 좋은 면진장치는 면진층의 변위와 구조물의 가속도를 동시에 저감시킬 수 있어야하므로 스마트 면진장치를 제어하기 위한 퍼지제어기를 설계할 때 사용되는 목적은 면진층 변위와 상부구조물 응답을 동시에 최소화시키는 것이어야 한다. 본 논문에서 대상으로 하고 있는 벤치마크 문제에서는 표 1에 나타낸 9개의 제어성능 평가기준을 제시하고 있다. 각 평가기준은 제어된 구조물의 응답을 제어하지 않은 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현되며 보다 자세한 내용은 참고문헌에 상세히 기술되어 있다⁽⁷⁾.

본 논문에서는 면진층 최대변위와 구조물의 최대 절대 가속도에 대한 제어성능을 나타내는 J3과 J5를 퍼지제어기를 최적화하기 위한 목적함수로 이용하였다. 그리고 추가적으로 구조물의 RMS (root mean square) 응답도 목적함수에 포함함으로써 퍼지제어기가 구조물의 최대응답 뿐만 아니라 RMS응답도 적절하게 제어할 수 있도록 하였다. 즉, 본 논문에서는 J3, J5, J7, J8을 목적함수로 사용하는 다목적 최적화를 통하여 퍼지제어기를 최적화 하였다. 다목적 최적화 문제에서 여러 가지의 목적을 하나의 적합도 함수로 만들 수 있는 몇 가지 전통적인 방법이 존재한다. 이러한 방법들 중에서 목적에 가중치를 주어서 합하는 가중합방법(weighted sum approach)이 가장 널리 이용되고 있다. 이 방법을 이용하여 다목적 최적화 문제를 단일목적 최적화 문제로 변환시킨 후 최적화를 수행하면 단지 하나의 최적해만을 얻을 수 있다. 그러나 이러한 방법으로 결정되는 최적해는 가중치의 값에 따라서 매우 민감하게 변하기 때문에 사용자가 원하는 성능을 만족시키는 최적해를 한 번의 최적화 작업으로 찾기는 매우 어렵다. 따라서 가중합방법을 이용하여 파레토 최적해를 구하기 위해서는 여러 번의 최적화 작업을 수행하여야 하므로 많은 시간과 노력이 필요하게 된다. 그러나 NSGA-II

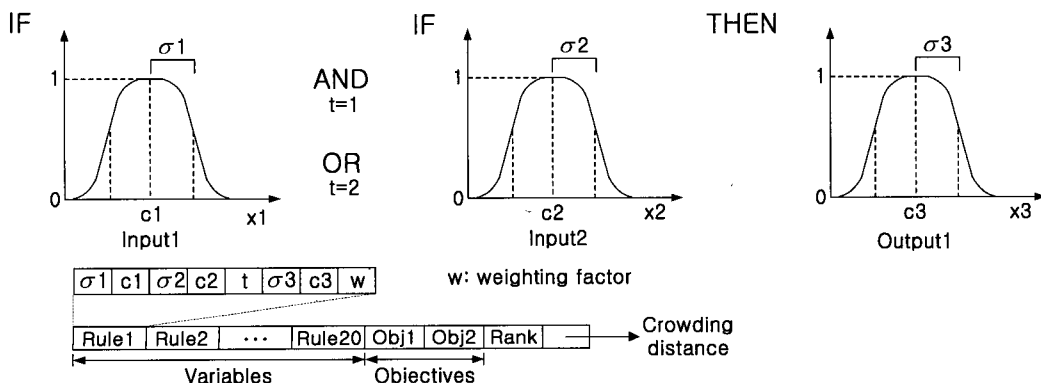


그림 8 NSGA-II에서 사용되는 염색체의 구조

표 1 벤치마크 문제의 제어성능 평가지수

내용	성능 평가지수
Peak base shear	$J_1(q) = \frac{\max_t \ V_0(t, q)\ }{\max_t \ \hat{V}_0(t, q)\ }$
Peak structure shear	$J_2(q) = \frac{\max_t \ V_1(t, q)\ }{\max_t \ \hat{V}_1(t, q)\ }$
Peak base displacement	$J_3(q) = \frac{\max_{t,i} \ d_i(t, q)\ }{\max_{t,i} \ \hat{d}_i(t, q)\ }$
Peak inter-story drift	$J_4(q) = \frac{\max_{t,f} \ d_f(t, q)\ }{\max_{t,f} \ \hat{d}_f(t, q)\ }$
Peak absolute floor acceleration	$J_5(q) = \frac{\max_{t,f} \ a_f(t, q)\ }{\max_{t,f} \ \hat{a}_f(t, q)\ }$
Peak control force	$J_6(q) = \frac{\max_t \left\ \sum_k F_k(t, q) \right\ }{\max_t \ V_0(t, q)\ }$
RMS base displacement	$J_7(q) = \frac{\max_t \ \sigma_d(t, q)\ }{\max_t \ \hat{\sigma}_d(t, q)\ }$
RMS absolute floor acceleration	$J_8(q) = \frac{\max_f \ \sigma_a(t, q)\ }{\max_f \ \hat{\sigma}_a(t, q)\ }$
Total absorbed energy	$J_9(q) = \frac{\sum_k \left[\int_0^{T_0} F_k(t, q) v_k(t, q) dt \right]}{\int_0^{T_0} \left(V_0(t, q) \otimes \hat{g}_s(t, q) \right) dt}$

와 같은 다목적 유전자알고리즘을 사용하면 한 번의 최적화작업 수행으로 파레토 최적해 집합을 구할 수 있는 장점이 있다.

5. 하위 퍼지제어기의 설계

5.1 샘플 지진하중을 이용한 하위 퍼지제어기의 개발

Jangid 등은 그의 연구⁽¹⁹⁾에서 근거리지진의 지반속도는 대략 50cm/sec 정도의 크기를 가진다고 하였다. 따라서 지반속도가 약 30cm/sec 이하의 지진이라면 근거리 지진은 아니라고 생각할 수 있다. 이 연구에 근거하여 벤치마크 문제에서 제시한 7개의 샘플 지진하중의 지반속도를 비교하여 본 결과 지반속도가 대략 30cm/sec 이하인 El Centro 지진은 원거리 지진으로, 그 이외의 지진은 근거리 지진으로 나눌 수 있으며 그림 9에 El Centro 지진과 근거리 지진을 대표해서 Kobe 지진의 지반속도를 나

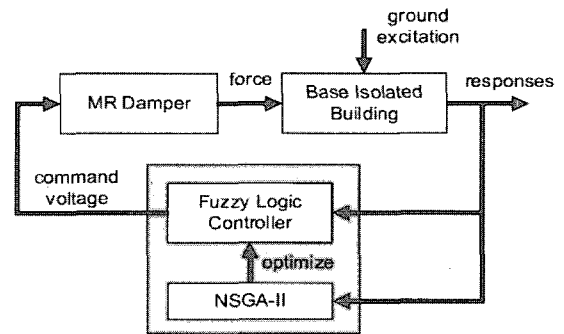
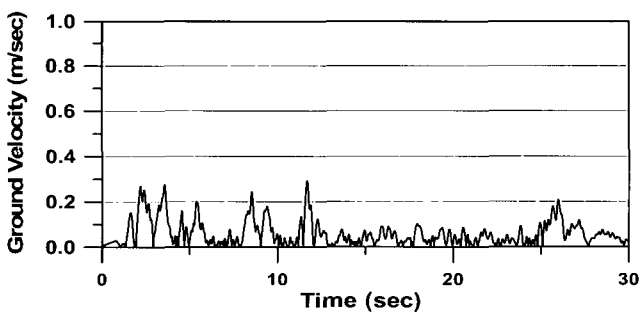
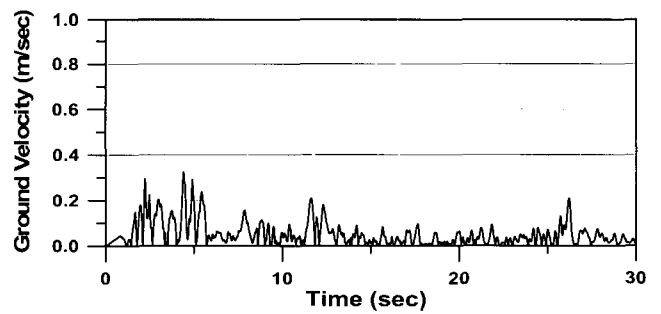


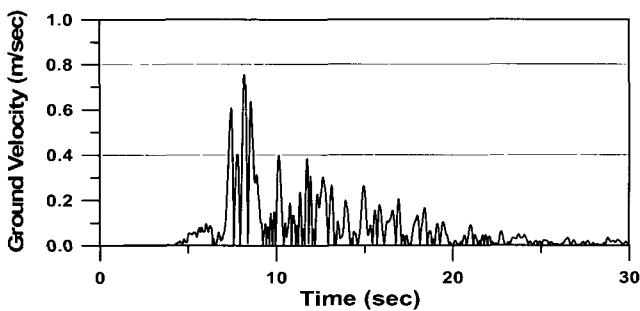
그림 10 NSGA-II를 이용한 퍼지제어기 최적화의 개념도



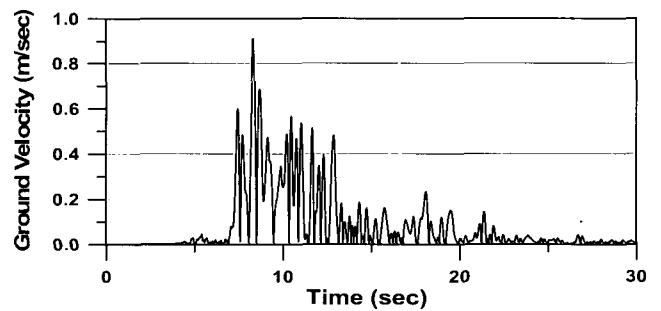
(a) El Centro - FP



(b) El Centro - FN



(c) Kobe - EW



(d) Kobe - NS

그림 9 지진하중의 지반속도 절대값 시간이력 (FP-Fault Parallel, FN-Fault Normal, EW-East West, NS-North South)

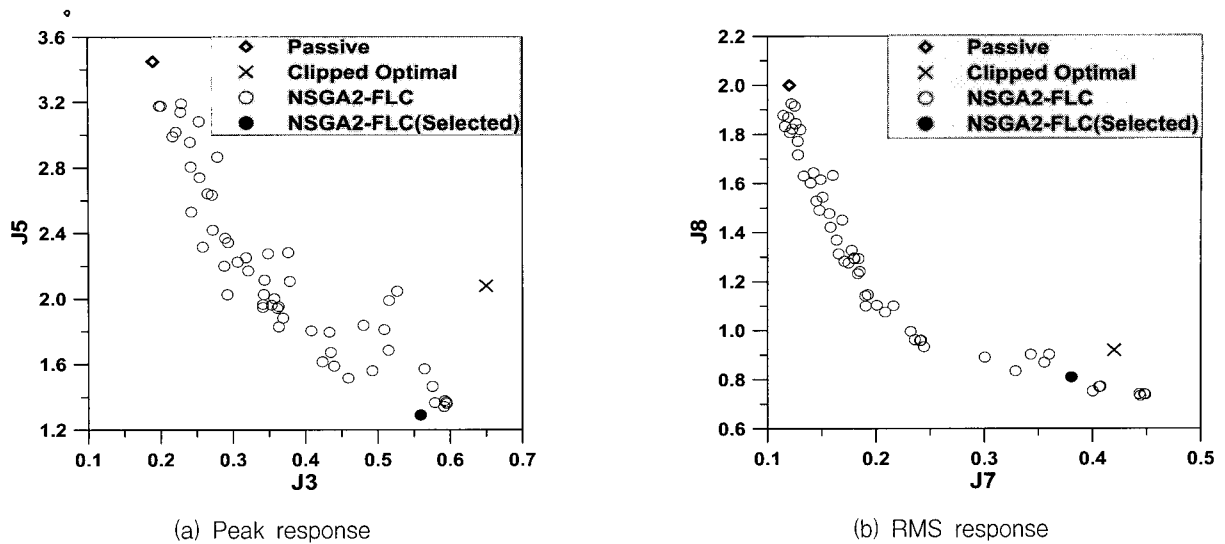


그림 11 El Centro 지진하중에 대한 제어성능

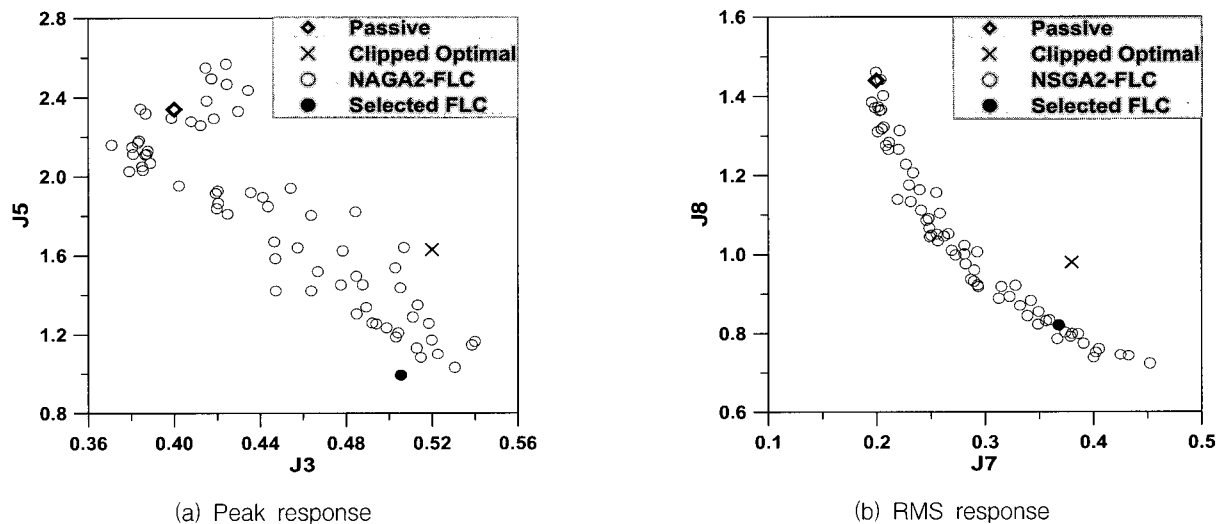


그림 12 Kobe 지진하중에 대한 제어성능

타내었다. 본 논문에서는 그림 9에 나타낸 두 개의 지진 하중을 이용하여 각각 원거리 지진 및 근거리 지진을 효과적으로 제어할 수 있는 제어기를 개발하였다.

그림 9에 나타낸 두 개의 지진을 각각 효과적으로 제어할 수 있는 하위 퍼지제어기를 개발하기 위하여 4장에서 소개한 NSGA-II를 적용하였다. NSGA-II를 사용하여 퍼지제어기를 최적화하는 과정을 그림 10에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 NSGA-II는 구조물의 응답을 기준으로 퍼지제어기의 성능을 평가한 뒤 퍼지제어기의 제어성능을 향상시키는 방향으로 제어기를 최적화 시킨다. 본 논문에서는 각각의 하위 퍼지제어기를 최적화하기 위해서 개체군의 크기를 100으로 하였고 최적화는 200 세대까지 수행하였다.

El Centro 지진하중 및 Kobe 지진하중에 대하여 최적화를 수행한 후 얻은 비지배 개체군을 샘플 제어기(clipped optimal controller) 및 passive-on의 경우와 함께 각각 그림 11과 12에 나타내었다. 그림 11과 12는 면진층 변위(J3, J7)와 구조물 절대가속도(J5, J8)의 최대 응답 및 RMS 응답에 대한 제어기들의 제어 성능을 비교한 그림

이다. 지진하중의 FP(또는 EW) 및 FN(또는 NS) 성분을 벤치마크 건물의 X축과 Y축에 동시에 가하고 다시 Y축과 X축에 동시에 가한 후에 얻어지는 제어성능 지수 중 큰 값을 각각의 개체의 제어성능 값으로 고려하였다. Passive-on의 경우에는 MR 감쇠기의 제어력을 항상 최대로 유지하는 경우이므로 면진층 변위를 가장 효과적으로 제어할 수 있는 반면에 상부 구조물의 가속도 응답에 대한 제어성능은 가장 좋지 않은 것을 알 수 있다. 샘플 제어기인 clipped optimal 제어기를 보면 면진층 변위에 대한 제어 성능을 어느 정도 포기하면서 상부구조물의 가속도 응답에 대한 제어성능을 향상시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 다목적 유전자 알고리즘(NSGA-II)에 의하여 최적화를 수행하면 한 번의 실행으로 다양한 비지배 개체군을 얻을 수 있고 이를 그림 11과 12에 나타내었다. 그림을 보면 면진층 변위와 상부구조물의 가속도 응답 사이에는 서로 상충관계가 있어서 어느 한쪽의 제어성능을 저감시켜야지만 다른 응답의 제어성능을 향상시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 비지배 개체군 중에서 clipped optimal 제어기에 비하여 면진층 변위

표 2 선택된 퍼지제어기의 제어성능지수

성능 지수	El Centro		Kobe	
	FP-X FN-Y	FN-X FP-Y	EW-X NS-Y	NS-X EW-Y
J1	0.93 (-26%)	0.97 (-22%)	0.83 (-20%)	0.98 (-15%)
J2	0.89 (-28%)	0.97 (-22%)	0.82 (-20%)	0.98 (-18%)
J3	0.36 (-33%)	0.56 (-14%)	0.48 (-8%)	0.51 (-2%)
J4	0.79 (-37%)	1.13 (-18%)	0.76 (-24%)	0.99 (-26%)
J5	1.25 (-22%)	1.29 (-38%)	0.99 (-39%)	0.96 (-35%)
J6	0.33 (-13%)	0.33 (-11%)	0.25 (-11%)	0.26 (-13%)
J7	0.28 (-33%)	0.38 (-10%)	0.34 (+31%)	0.37 (-3%)
J8	0.65 (-14%)	0.81 (-12%)	0.63 (-14%)	0.83 (-15%)
J9	0.80 (+23%)	0.80 (+16%)	0.75 (+3%)	0.75 (+4%)

와 상부구조물 가속도를 동시에 더 효과적으로 제어할 수 있는 제어기가 다수 존재하는 것을 알 수 있다. Kobe 지진하중에 대해서는 passive-on 제어기보다 면진층변위를 더 효과적으로 줄일 수 있는 제어기도 존재하는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 흰색 원으로 나타낸 여러개의 비지배 개체군 중에서 검정색 원으로 나타낸 두 개의 개체를 선택하여 원거리 지진과 근거리 지진을 각각 제어할 하위 제어기로 이용하였다. 선택된 두 개의 하위 제어기의 제어성능을 표 2에 나타내었다. 표에서 FN-X FN-Y는 FN 성분의 지진하중을 벤치마크 건물의 X축에 그리고 FN 성분을 Y축에 동시에 가하였을 경우를 나타낸다. 표에서 괄호 안에 표시한 값은 clipped optimal 제어기의 제어성능지수와 비교하여 각 지수의 증감치를 퍼센트로 나타낸 것이다. 표에서 나타낸 바와 같이 거의 모든 성능지수에서 본 논문에서 개발된 퍼지제어기가 clipped optimal 제어기보다 더 우수한 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림 11과 12에 나타낸 여러개의 비지배 개체군 중에서 엔지니어의 판단에 근거하여 다른 퍼지제어기를 선택한다면 보다 다른 제어성능을 발휘하는 제어기를 얻을 수 있을 것이다.

5.2 인공지진을 이용한 하위 퍼지제어기의 개발

앞 절에서는 샘플 근거리 지진하중을 대표해서 Kobe 지진하중을 이용하여 하위 퍼지제어기를 개발하였다. 본 절에서는 보다 일반적인 근거리 지진하중을 사용하여 퍼지제어기를 개발하기 위하여 인공지진을 사용하고자 한다. 본 논문에서는 인공지진을 생성하기 위하여 일련의 샘플 근거리 지진하중의 특징을 매우 잘 표현할 수 있는 식(4)로 표현이 되는 셰이핑 필터(shaping filter)⁽⁸⁾를 이용하였다.

$$F(s) = \frac{4\zeta_g \omega_g s}{s^2 + \zeta_g \omega_g s + \omega_g^2} \quad (4)$$

여기서, $\omega_g = 2\pi \text{ rad/sec}$, $\zeta_g = 0.3$ 이고 이 필터를 그림

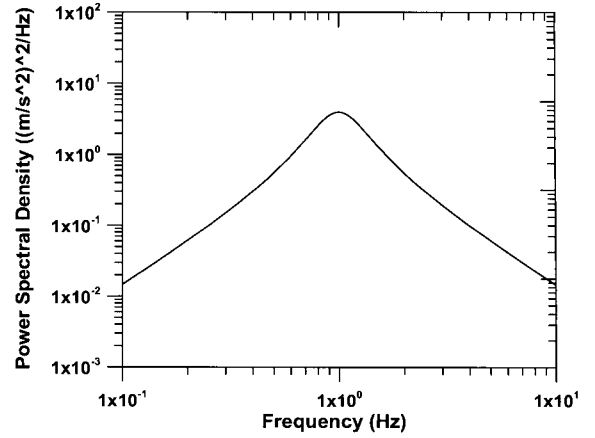


그림 13 인공지진을 위한 셰이핑 필터

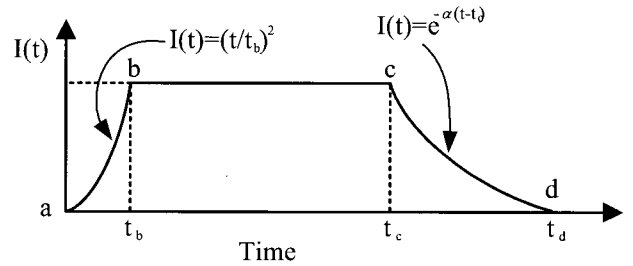
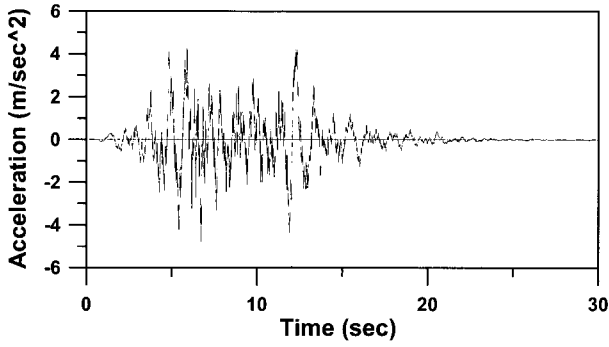


그림 14 포락함수

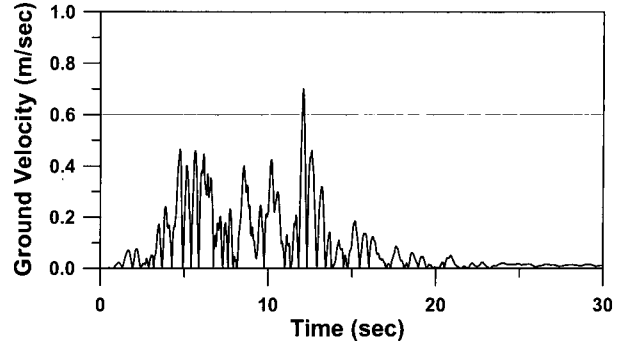
13에 나타내었다. 인공지진하중을 생성하기 위하여 시간간격을 0.005초, PGA를 0.7g로 하는 백색파(white noise)를 생성한 후에 그림 13의 셰이핑 필터를 통과시켜서 근거리 지진하중의 특징을 갖도록 하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중을 그림 14의 포락함수를 사용하여 보다 실제 지진과 비슷하게 만들었다. 여기서 $t_b = 7$ 초, $t_c = 12$ 초, $t_d = 30$ 초이고 α 의 값으로 0.3을 이용하였다. 최종적으로 얻은 인공지진하중을 그림 15에 나타내었다. 이렇게 생성한 인공 근거리 지진하중을 이용하여 앞 절에서 설명한 것과 마찬가지로 NSGA-II를 사용하여 하위 퍼지제어기를 최적화 하였다. 그림 13에서 나타낸 셰이핑 필터는 6개의 샘플 근거리 지진하중에서 4개 지진(Newhall, Sylmar, Kobe, Rinaldi)의 특성을 근사적으로 모형화할 수 있기 때문에⁽⁷⁾ 이 인공지진하중으로 최적화된 퍼지제어기가 샘플 지진하중에 대해서도 좋은 제어성능을 발휘하리라고 예상할 수 있다.

6. 퍼지관리제어기의 설계

일반적으로 지진하중들은 서로 다른 다양한 동특성을 가지고 있고 특히 근거리 지진과 원거리 지진은 그 특성이 매우 상이하다. 그러므로 본 논문에서는 하나의 제어규칙에 의해서 얻어진 제어기를 사용하여 근거리 및 원거리 지진을 제어하는 것보다는 근거리 및 원거리 지진하중에 대하여 각각 최적화된 제어기들을 적절하게 조율함으로써 보다 효율적인 제어성능을 갖도록 하는 퍼지관리제어기법을 사용한다. 앞에서 개발한 하위 퍼지제어기들의



(a) 가속도 시간이력



(b) 속도 시간이력

그림 15 인공지진하중

참여율을 실시간으로 조절하기 위하여 식 (5)에 나타난 가중평균⁽²⁰⁾을 이용하였다.

$$V = \frac{w_n V_n + w_f V_f}{w_n + w_f} \quad (5)$$

여기서, V 는 MR 감쇠기로 보내어지는 제어전압, w_n 과 w_f 는 각각 근거리 지진과 원거리 지진에 대한 가중치, V_n 과 V_f 는 근거리 지진과 원거리 지진에 대해서 각각 최적화된 하위 퍼지제어기로부터 계산된 제어전압을 의미한다. 퍼지관리제어기의 개발하기 위해서는 구조물에 가해지는 지진하중에 대한 사전 정보 없이 원거리 지진인지 근거리 지진인지를 실시간으로 판단할 수 있어야하고 이러한 판단에 근거하여 식 (5)에서 사용된 근거리 및 원거리 지진에 대한 가중치를 결정해야 한다. 본 논문에서는 4.1절에서 기술한 바와 같이 Jangid 등의 연구⁽¹⁹⁾에 근거하여 지반속도가 대략 50cm/sec 이상의 크기를 가지면 근거리 지진으로 그리고 지반속도가 약 30cm/sec 이하의 지진이라면 원거리 지진으로 판단하였고 지반속도에 따라서 가중치가 결정되는 방법을 그림 16에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 근거리 지진과 원거리 지진의 가중치를 위해서 S형상 소속함수와 Z 형상 소속함수를 각각 사용하였다. 지반가속도가 30cm/sec 이하인 경우에는 그림 16에서 보는 바와 같이 w_f 는 1이되고 w_n 은 0이 되므로 원거리 지진에 대하여 최적화된 하위 퍼지제어기가 주제어기(main controller)가 되어 V 가 V_f 와 같게된다. 지반가속도가 50cm/sec 보다 큰 경우에는 반대로 w_f 는 0이되고 w_n 은 1이 되므로 근거리 지진에 대하여 최적화된 하위 퍼지제어기가 주제어기의 역할을 한 ($V = V_n$)다. 그러나 지반가속도가 30cm/sec와 50cm/sec의 사이에 있는 경우에는 그림 16의 관계를 사용하여 실시간으로 얻은 w_f , w_n 을 식 (5)에 대입하여 제어전압을 계산한다. 이와 같은 과정을 통하여 하위 퍼지제어기들의 참여율이 실시간으로 결정되고 계산된 제어전압은 MR 감쇠기로 보내어진다.

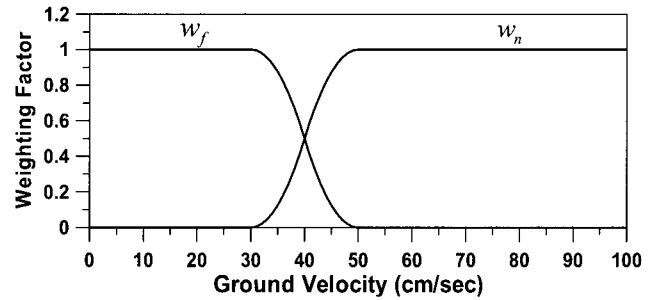


그림 16 근거리 및 원거리 지진을 위한 가중치

7. 수치해석 결과

본 논문에서 제안된 퍼지관리제어기법의 제어성능을 검토해보기 위하여 벤치마크 문제에서 제시한 7개의 샘플 지진하중을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 지진하중은 단층에 직각인 성분(fault normal: FN)과 단층에 평행한 성분(fault parallel)으로 구성되어 있으며 이 하중성분을 대상 구조물의 주축, 즉 동서 및 남북 방향으로 동시에 가하여 해석하였고 다시 각각의 하중성분을 90도 회전시켜서 가함으로써 총 14가지의 하중조건에 대한 해석을 수행하였다. 이 때 수치해석은 MATLAB 및 SIMULINK를 사용하여 수행하였으며 보다 사실적인 시뮬레이션을 위해서 quantization 에러와 A/D convertor 및 D/A convertor의 saturation, 그리고 계측잡음이 SIMULINK 모델에 추가되었다. 비교대상 샘플 제어기로는 벤치마크 문제에서 제시한 H2/LQG 제어기법에 근거한 clipped optimal 제어기⁽⁸⁾를 이용하였고 각 제어기의 제어성능을 표 3과 4에서 비교하였다. Passive 제어기의 경우는 선형 탄성 베어링만을 사용했을 때에 비하여 면진층 변위(J3, J7)를 매우 효과적으로 줄일 수 있지만 면진층에 추가되는 감쇠에 의하여 구조물과 지반의 격리효과가 크게 떨어지므로 대부분의 지진하중에 대하여 상부구조물의 응답(특히 구조물의 절대가속도와 층간변위)이 증가하는 결과는 나타내는 것을 알 수 있다. 이것이 바로 스마트 면진 시스템이 필요한 이유이다. 표에서 SV-FLC1은 El Centro 지진과 Kobe 지진을 사용하여 최적화된 하위 퍼지제어기로 구성된 퍼지관리제어기를 의미하고 SV-FLC2는 El

표 3 제어기별 제어성능지수의 비교 (FP-X 및 FN-Y 방향)

Earthquake	Control Case	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Newhall	Passive	0.91	0.95	0.51	1.30	2.49	0.34	0.25	1.07	0.89
	Clipped Optimal	0.97	1.02	0.56	1.04	1.49	0.30	0.33	0.89	0.79
	SV-FLC1	0.93	0.95	0.67	1.09	1.20	0.19	0.45	0.79	0.71
	SV-FLC2	0.92	0.97	0.64	1.22	1.35	0.30	0.42	0.81	0.74
Sylmar	Passive	0.90	0.93	0.66	0.81	1.48	0.25	0.40	0.82	0.86
	Clipped Optimal	0.90	0.91	0.73	0.87	1.16	0.24	0.45	0.74	0.81
	SV-FLC1	0.88	0.90	0.87	0.85	0.96	0.14	0.63	0.78	0.62
	SV-FLC2	0.89	0.90	0.87	0.87	1.04	0.22	0.61	0.78	0.65
El Centro	Passive	0.73	0.87	0.14	1.22	2.86	0.67	0.09	1.61	0.82
	Clipped Optimal	1.25	1.24	0.54	1.26	1.61	0.38	0.42	0.76	0.65
	SV-FLC1	0.93	0.89	0.36	0.79	1.25	0.33	0.28	0.65	0.80
	SV-FLC2	0.93	0.89	0.36	0.79	1.25	0.33	0.28	0.64	0.81
Rinaldi	Passive	0.95	0.96	0.50	0.97	1.12	0.29	0.27	0.83	0.86
	Clipped Optimal	1.04	1.02	0.60	0.96	1.01	0.27	0.38	0.71	0.77
	SV-FLC1	0.99	0.98	0.80	0.93	0.93	0.17	0.58	0.67	0.65
	SV-FLC2	1.01	0.98	0.77	0.89	0.89	0.23	0.56	0.69	0.68
Kobe	Passive	0.84	0.84	0.36	1.19	2.34	0.39	0.16	1.14	0.87
	Clipped Optimal	1.04	1.03	0.52	1.00	1.63	0.28	0.26	0.73	0.73
	SV-FLC1	0.82	0.82	0.50	0.79	1.10	0.25	0.41	0.61	0.71
	SV-FLC2	1.00	0.88	0.51	0.89	1.50	0.30	0.41	0.68	0.74
Jiji	Passive	0.83	0.82	0.65	0.86	0.92	0.17	0.42	0.82	0.70
	Clipped Optimal	0.84	0.84	0.65	0.86	0.87	0.17	0.46	0.72	0.64
	SV-FLC1	0.90	0.90	0.82	0.89	0.90	0.10	0.66	0.80	0.47
	SV-FLC2	0.85	0.86	0.75	0.85	0.86	0.15	0.56	0.76	0.54
Erzinkan	Passive	0.94	0.95	0.49	0.85	1.21	0.26	0.32	0.60	0.87
	Clipped Optimal	0.93	0.93	0.47	0.86	1.23	0.25	0.34	0.63	0.80
	SV-FLC1	1.00	1.02	0.69	0.90	1.19	0.14	0.67	0.73	0.62
	SV-FLC2	0.98	1.00	0.68	0.91	1.17	0.23	0.66	0.74	0.64

표 4 제어기별 제어성능지수의 비교 (FP-Y 및 FN-X방향)

Earthquake	Control Case	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9
Newhall	Passive	0.83	0.93	0.51	1.31	1.85	0.33	0.34	1.05	0.89
	Clipped Optimal	0.88	0.92	0.55	1.24	1.40	0.30	0.42	0.84	0.80
	SV-FLC1	0.90	0.95	0.69	1.15	1.18	0.17	0.57	0.78	0.71
	SV-FLC2	0.86	0.92	0.66	1.24	1.33	0.27	0.54	0.80	0.73
Sylmar	Passive	0.79	0.78	0.68	0.80	1.25	0.25	0.46	0.67	0.85
	Clipped Optimal	0.80	0.79	0.74	0.79	0.92	0.23	0.51	0.61	0.81
	SV-FLC1	0.88	0.87	0.94	0.89	0.99	0.12	0.69	0.68	0.61
	SV-FLC2	0.88	0.86	0.93	0.89	1.07	0.20	0.68	0.67	0.64
El Centro	Passive	0.73	0.93	0.19	2.18	3.45	0.69	0.12	2.00	0.81
	Clipped Optimal	1.25	1.24	0.65	1.37	2.08	0.37	0.42	0.92	0.69
	SV-FLC1	0.97	0.97	0.56	1.15	1.40	0.32	0.38	0.81	0.80
	SV-FLC2	0.97	0.97	0.56	1.13	1.29	0.33	0.38	0.81	0.80
Rinaldi	Passive	0.88	0.93	0.53	0.93	1.12	0.28	0.24	0.58	0.87
	Clipped Optimal	0.98	1.01	0.62	0.99	1.02	0.26	0.30	0.47	0.78
	SV-FLC1	0.92	0.97	0.66	0.97	0.95	0.16	0.54	0.54	0.65
	SV-FLC2	0.94	0.98	0.66	0.96	0.97	0.23	0.53	0.52	0.67
Kobe	Passive	0.96	1.00	0.40	1.30	2.24	0.41	0.20	1.44	0.87
	Clipped Optimal	1.15	1.20	0.52	1.33	1.47	0.30	0.38	0.98	0.72
	SV-FLC1	0.95	0.95	0.53	0.92	1.08	0.27	0.43	0.74	0.72
	SV-FLC2	1.05	1.05	0.58	1.00	1.35	0.34	0.44	0.82	0.75
Jiji	Passive	0.74	0.74	0.63	0.75	0.77	0.17	0.40	0.74	0.70
	Clipped Optimal	0.74	0.73	0.63	0.73	0.80	0.17	0.46	0.61	0.64
	SV-FLC1	0.89	0.89	0.79	0.90	0.91	0.09	0.67	0.74	0.47
	SV-FLC2	0.83	0.84	0.74	0.85	0.86	0.15	0.59	0.68	0.54
Erzinkan	Passive	0.85	0.85	0.51	0.95	1.13	0.25	0.29	0.48	0.87
	Clipped Optimal	0.84	0.83	0.50	0.89	1.14	0.24	0.32	0.52	0.79
	SV-FLC1	0.92	0.92	0.69	0.94	1.06	0.13	0.62	0.68	0.64
	SV-FLC2	0.91	0.90	0.67	0.90	1.05	0.22	0.61	0.68	0.67

Centro 지진과 인공지진을 사용한 퍼지관리제어기를 의미한다. SV-FLC1의 제어성능을 보면 하위 퍼지제어기를 최적화하는데 사용한 2개의 지진(EI Centro 지진, Kobe 지진)에 대해서는 거의 모든 제어성능이 비교대상 제어기보다 월등하게 우수한 것을 볼 수 있다. 특히 EI Centro 지진하중이 FP-X, FN-Y 방향으로 가해졌을 때의 제어성능을 비교해보면 면진층의 최대변위를 clipped optimal 제어기에 비하여 33% 이상 줄이면서도 상부구조물의 최대 절대가속도와 최대 층간변위를 각각 22%와 37% 더 줄이는 매우 우수한 결과를 나타낸다. Kobe 지진하중에 대한 제어성능 역시 clipped optimal 제어기에 비하여 대부분 우수한 것을 알 수 있다. 그 이외의 샘플 지진에 대해서도 clipped optimal 제어기와 비슷하거나 조금 더 우수한 제어성능을 발휘하지만 지반 속도가 다른 샘플 지진하중에 비하여 비교적 큰 Jiji와 Erzinkan 지진에 대해서는 대부분의 성능지수가 더 좋지 않은 것을 확인할 수 있다.

Kobe 지진 대신에 인공지진을 사용하여 근거리지진을 제어할 하위 퍼지제어기를 최적화한 SV-FLC2 제어기의 제어성능을 보면 Kobe 지진에 대한 성능은 SV-FLC1에 비하여 조금 안 좋아 졌지만 여전히 비교대상 제어기인 clipped optimal 제어기보다는 우수한 성능을 나타낸다. 또한 EI Centro 지진하중에 대한 제어성능은 SV-FLC1과 거의 변화가 없고 다른 지진하중에 대해서는 대부분의 제어성능 지수가 더 좋아진 것을 볼 수 있다. 특히 Jiji 하중에 대한 제어성능이 매우 좋아진 것을 확인할 수 있다. 이것으로 하위 퍼지제어기를 최적화할 때 사용한 인공지진하중이 Jiji 지진하중의 특성을 비교적 잘 반영한다는 것을 확인할 수 있다. Passive 제어기와 clipped optimal 제어기는 근거리 지진하중에 대해서는 비교적 우수한 제어성능을 보이지만 EI Centro 지진하중과 같은 원거리 지진에 대해서는 매우 좋지 않은 제어성능을 보였다. 특히 상부구조물의 최대 절대가속도의 경우에는 탄성베어링만을 사용했을 때에 비하여 Passive 제어기는 최대 3배 이상, clipped optimal 제어도 2배 이상의 응답이 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 퍼지관리제어기의 경우에는 원거리 지진에 대해서 비교대상제어기에 대하여 월등한 제어성능을 보이면서도 근거리 지진에 대한 제어성능도 상당히 우수한 것을 확인할 수 있다.

8. 결 론

본 논문에서는 MR 감쇠기와 탄성베어링으로 이루어진 스마트 면진 벤치마크 건물을 이용하여 스마트 면진장치의 효율성을 검토하여 보았고 퍼지관리제어기법을 이용하여 개발한 제어기의 성능을 비교대상 제어기인 clipped optimal 제어기와 비교하여 보았다. 스마트 면진장치를 용하는 기본 목적은 수동 면진장치를 사용했을 때와 비교하여 상부구조물의 응답을 증가시키지 않으면서 면진층 변위를 줄이는 것이다. 본 논문의 수치해석 결과로부터

MR 감쇠기와 탄성베어링으로 이루어진 스마트 면진장치가 대부분의 경우에 이러한 조건을 만족시키는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 근거리 및 원거리 지진에 대하여 각각 최적화한 하위 퍼지제어기들을 지진하중의 지반 속도에 근거하여 적절히 조합하는 퍼지관리제어기법을 이용하여 제어기를 개발하였다. 이렇게 개발한 퍼지관리제어기들은 샘플 clipped optimal 제어기가 근거리 지진에 대해서만 우수한 제어성능을 발휘하는데 비하여 원거리 지진에 대해서도 우수한 제어성능을 나타낸다. 본 논문에서는 하위 퍼지제어기의 개발을 위하여 다목적 유전자알고리즘을 사용하였기 때문에 최적화작업을 수행하면 다수의 파레토 최적해를 얻을 수 있다. 따라서 설계 요구 사항에 적합한 제어성능을 보이는 적절한 하위 퍼지제어기를 엔지니어가 선택함으로써 본 논문에서 제안한 퍼지관리제어기와는 다른 성능을 나타내는 제어기를 쉽게 만들 수 있으므로 스마트 면진시스템을 제어할 제어기의 다양한 대안들을 효과적으로 생성해낼 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 성균관대학교 Post-Doc. 연수지원에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Hall J.F., Heaton T.H., Halling M.W. and Wald D.J., "Near-source ground motion and its effects on flexible buildings," *Earthquake Spectra*, Vol. 11, No. 4, 1995, pp. 569-605.
2. Heaton T.H., Hall J.F., Wald D.J. and Halling M.W., "Response of high-rise and base-isolated buildings in a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake," *Science*, Vol. 267, 1995, pp. 206-211.
3. Kelly, J.M., "The role of damping in seismic isolation," *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* Vol. 28, 1999, pp. 30-20.
4. Kelly, J.M., "The current state of base isolation in the United States," *Proc. Second World Conference on Structural Control*, Kyoto, Japan, Vol. 1, 1999, pp. 1043-1052.
5. Spencer, B.F. Jr, Johnson, E.A. and Ramallo, J.C., "Smart isolation for seismic control," *JSME Int. J. Ser. C.*, Vol. 43, No. 4, 2000, pp. 704-711.
6. Johnson, E.A., Ramallo, J.C., Spencer, B.F. Jr and Sain M.K., "Intelligent base isolation systems," *Proc. 2nd World Conf. on Structural Control*, Kyoto, Japan, 1999, pp. 367-376.
7. Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Hohnson, E.A. and Gavin H.P., "Smart base isolated bench-

- mark building part I: problem definition," *J. of Struct. Control and Health Monitoring*, 2004, in review.
8. Narasimhan, S. and Nagarajaiah S., "Phase I smart base isolated benchmark building - sample controllers for linear isolation system: part II," *J. of Struct. Control and Health Monitoring*, 2004, in review.
 9. 정형조, 최강민, 장지은, 이인원, "MR감쇠기가 설치된 지진격리 건물의 스마트 진동제어", 한국지진공학회 학술대회 논문집, 한국지진공학회, 2005, pp. 544-551
 10. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "퍼지관리제어기법을 이용한 사장교의 지진응답제어", 한국지진공학회 논문집, 8권, 4호, 2004, pp. 51-62.
 11. 박관순, 고현무, 옥승용, "퍼지관리제어기법을 이용한 지진응답의 능동제어", 한국지진공학회 논문집, 5권, 4호, 2001, pp. 75-81.
 12. Chekkouri, R., Romeral, L., Catala, J. and Aldabas, E., "Supervisory fuzzy control of non-linear motion systems," *7th Int. Workshop on Advanced Motion Control*, Maribor, Slovenia, 2002, pp. 341-346.
 13. Sbarbaro, D. and Segovia, J.P., "Application of a supervisory fuzzy controller for controlling nonlinear processes," *Proc. of the Fifth IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, New Orleans, LA, 1996, pp. 575-579.
 14. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II," *Technical Report No. 200001*, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2000.
 15. Schaffer, J.D., "Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithms," *Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms*, Hillsdale, New Jersey, 1985, pp. 93-100.
 16. Horn, J., Nafpliotis, N. and Goldberg, D.E., "A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization," *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Orlando, FL, 1994, pp. 82-87.
 17. Fonseca, C.M. and Fleming, P.J., "Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization," *Genetic Algorithms: Proceedings of the Fifth International Conference*, Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1993, pp. 416-423.
 18. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reissue, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
 19. Jangid, R.S. and Kelly, J.M., "Base isolation for near-fault motions," *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, Vol. 30, 2001, pp. 691-707.
 20. Jang, J.R., Sun, C.T. and Mizutani, E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall International, Inc., 1997, 343pp.