

스마트 면진시스템을 이용한 대공간 구조물의 다목적 퍼지제어

Multi-objective Fuzzy Control of a Spacial Structure using Smart Base Isolation System

강 주 원* 김 현 수** 임 준 호***
Kang, Joo-Won Kim, Hyun-Su Lim, Jun-Ho

요 약

본 연구에서는 지진하중을 받는 대공간구조물의 동적응답을 저감시키기 위하여 스마트 면진시스템을 제안하였다. MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링을 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하였으며 최적설계된 LRB 면진시스템과 비교하여 진동 제어성능을 검토하였다. 스마트 면진시스템은 제어알고리즘에 따라서 제어성능이 크게 좌우된다. 본 연구에서는 스마트 면진시스템이 설치된 대공간 구조물을 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지제어를 사용하였다. 면진시스템이 적용된 대공간 구조물의 동적응답과 면진층 변위는 서로 상충관계가 있으므로 퍼지제어를 최적화하기 위하여 두 응답을 목적함수로 하는 다목적 유전자알고리즘을 사용하여하였다. 수치해석결과 본 연구에서 제안한 스마트 면진시스템을 적용하면 최적설계된 LRB 시스템에 비하여 면진층 변위 및 대공간 구조물의 동적응답을 대폭 줄일 수 있는 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, a smart base isolation system has been proposed to reduce dynamic responses of a spacial structure subjected to seismic excitation. MR dampers and low damping elastomeric bearings were used to compose a smart base isolation system and its vibration control performance has been investigated compared to that of the optimally designed lead-rubber bearing (LRB) isolation system. Control performance of smart base isolation system depends on control algorithm. Fuzzy controller was used in this study to effectively control the spacial structure having a smart base isolation system. Dynamic responses of the spacial structure with isolation system is conflict with base drifts and thus these two responses are selected as objective functions to apply multi-objective genetic algorithm to optimization of fuzzy controller. Based on numerical simulation results, it has been shown that the smart base isolation system proposed in this study can drastically reduce base drifts and seismic responses of the example spacial structure in comparison with the optimally designed LRB isolation system.

키워드 : 스마트 면진시스템, 대공간 구조물, 진동제어, 퍼지제어, 다목적 유전자알고리즘

Keywords : Smart base isolation system, Spacial structure, Vibration control, Fuzzy control, Multi-objective genetic algorithm

1. 서 론

대공간 구조물은 일반적으로 많은 사람들이 이용하는 운동경기장이나 관람 및 집회시설로 사용되기 때문에 지진하중에 의하여 구조물에 피해가 발생한

다면 매우 심각한 인명 피해가 예상된다. 따라서 대공간 구조물의 지진응답을 최소화하기 위한 제진 및 면진기술에 대한 연구가 필요하다. 일반적인 빌딩 구조물에 비하여 대공간 구조물은 자중이 작은 장경간 구조물로서 매우 상이한 동적특성을 가지고 있다. 대공간 구조물의 동적 특성에 대한 기존의 연구를 살펴보면 대공간 구조물은 그 형태적 특성으로 인하여 수평방향 지진하중에 의하여 수평방향 진동보다 수직방향의 진동이 더 크게 발생하는 것을 알

* 영남대학교 건축학부 부교수

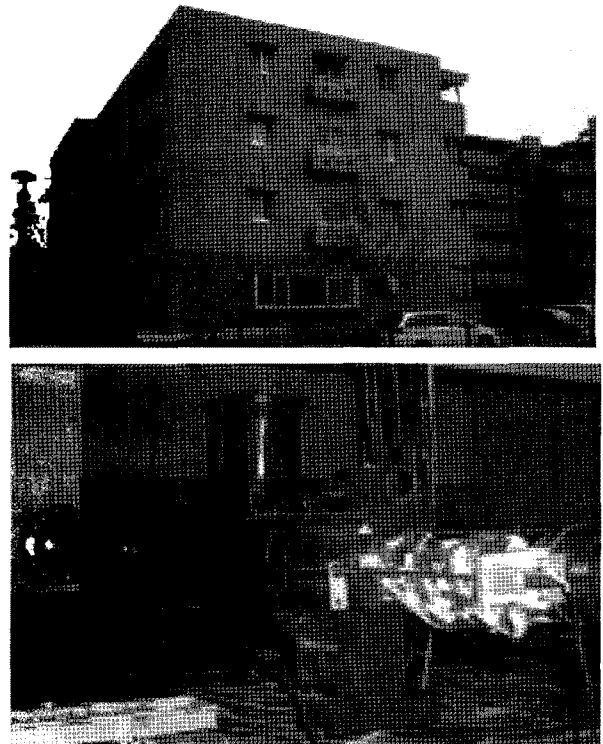
** 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수
Tel: 031-530-2315 Fax: 031-530-2839
E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr

*** 영남대학교 건축학과 석사과정

수 있다.^{1,2)} 따라서 지진하중을 받는 대공간구조물의 제어에 대한 연구를 수행할 경우에 수평방향 지진응답 뿐만 아니라 수직방향 지진응답에 대해서도 관심을 기울여야 한다.

지진하중이 가해지는 구조물의 동적응답을 저감시키기 위하여 많이 사용되고 있는 장치 중의 하나가 면진시스템이다. 면진시스템은 구조물과 지반 사이에 베어링을 삽입하여 지진하중이 구조물로 전달되는 것을 최소화하는 것을 목적으로 하고 있다.³⁾ 이러한 면진시스템으로는 마찰진자베어링(FPS)이나 납-고무베어링(LRB) 등이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 근래에 와서는 면진시스템에 보조감쇠기를 추가하여 면진된 구조물의 밀면변위를 보다 효과적으로 줄여서 지진에 대한 안전성을 높이고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 면진된 구조물의 밀면변위를 줄이기 위하여 면진장치에 추가적인 수동 감쇠기를 도입하면 지반과 구조물을 격리시키는 면진시스템의 기본 개념에서 벗어나게 되어 면진시스템을 도입함으로써 얻을 수 있는 여러 가지 이점들을 감소시킬 수 있으며 상부구조물의 절대가속도를 증가시키는 결과를 초래할 수 있다.^{4,5)} 이러한 문제점을 해결하고 수동 면진시스템보다 우수한 면진 성능을 발휘할 수 있도록 하기 위하여 기존의 면진장치에 스마트 감쇠기를 조합한 스마트 면진시스템이 제안되었다.^{6,7)} 이러한 스마트 면진시스템은 주로 중저층 건축구조물을 대상으로 적용성 검토가 이루어졌으며 일본에서는 <그림 1>에서 보는 바와 같이 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템이 4층 주거용 건물에 실제로 적용된 사례도 있다. 지금까지 제안된 스마트 면진시스템은 주로 일반적인 건축구조물을 대상⁶⁻⁸⁾으로 그 효율성을 검증하였으며 스마트 면진장치가 설치된 건물을 위한 제어시스템의 효율성을 보다 체계적으로 비교 및 검증하기 위하여 Narasimhan 등⁹⁾이 1세대 면진 벤치마크 건물을 제안한 바 있다. 그러나 대공간 구조물을 위한 면진시스템에 대한 연구는 일반적인 수동 면진시스템의 적용성

에 대한 연구¹⁰⁾만 몇몇 연구자들에 의하여 수행되었을 뿐 스마트 면진시스템의 효율성 및 지진응답제어성능을 검토한 연구는 국내외적으로 찾아보기 어렵다.



<그림 1> 스마트 면진시스템이 설치된 일본의 주택

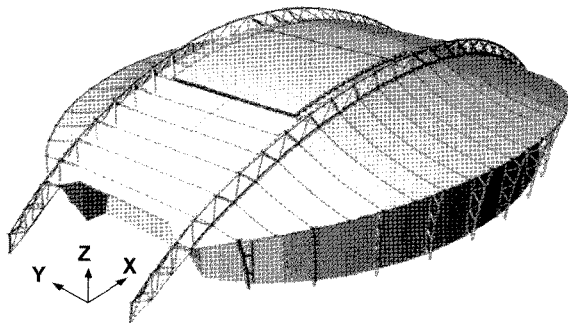
따라서 본 연구에서는 스마트 면진시스템이 적용된 대공간 구조물의 지진응답 제어성능을 검토해보고자 한다. 이를 위하여 한국기술교육대학교에 건설되고 있는 30m 경간의 대공간 파일럿 프로젝트 구조물을 예제구조물로 선택하여 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 스마트 면진시스템은 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링으로 구성하였고 제안된 스마트 면진시스템의 성능을 최적설계된 LRB 면진시스템과 비교, 검토하였다. KBC 2009 설계기준에 근거하여 설계응답스펙트럼을 작성하였고 이를 바탕으로 생성된 인공지진하중을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 스마트 면진시스템은 사용한 제어알고리즘에 따라서 그 제어성능이 크게 좌우되는데 본 연구에서는 퍼지제어알고리즘을 사용하여 지진하중에 의하여 실시간으로 변하는 구조물의 응답을 바탕으로 MR 감쇠기로 전달되는 제어명령을 결정하였

다. 사용된 퍼지제어알고리즘을 최적화하기 위하여 유전자알고리즘을 사용하였다. 면진시스템이 적용된 구조물의 주요한 제어목표인 면진층 변위와 구조물의 가속도는 서로 상충되는 특징을 가지고 있으므로 두 목표를 동시에 만족시킬 수 있는 최적의 퍼지제어를 만들기 불가능하므로 다목적 유전자 알고리즘을 이용하여 두 목표에 대한 퍼지제어의 파레토 최적해집합을 구하였다. 이러한 과정을 통하여 면진층 변위와 예제 대공간 구조물의 지진응답을 동시에 효과적으로 줄일 수 있는 스마트 면진제어시스템을 제안하였다.

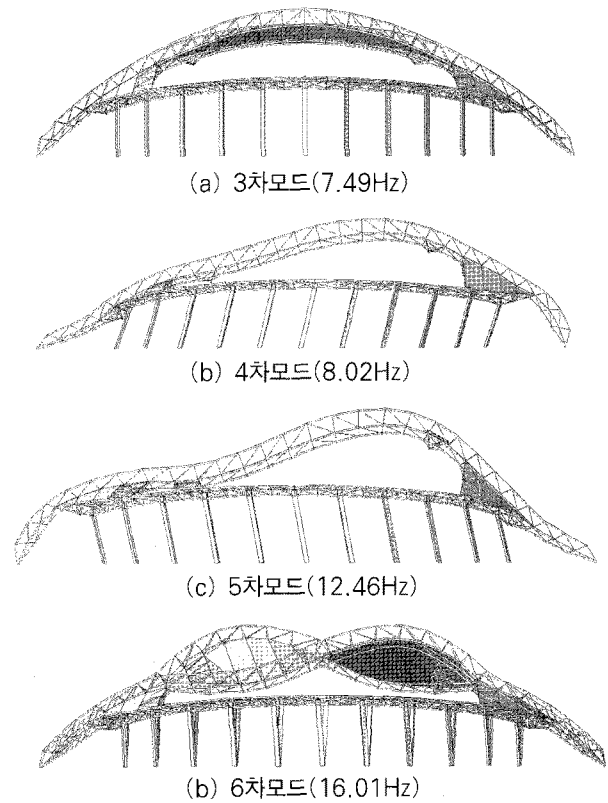
2. 예제 대공간 구조물 및 지진하중

2.1 예제 대공간 구조물

본 연구에서 사용한 예제 대공간 구조물은 한국기술교육대학교의 홍보관으로 대공간 건축물 건설기술개발 연구단의 파일럿 프로젝트로 사용되고 있는 30m 경간의 대공간 구조물로서 <그림 2>에 나타내었다. 예제 구조물의 지붕구조는 철골 킬아치(keel arch)와 막구조 및 격자형 케이블구조(cable net)으로 구성되어 있으며 하부구조는 철골조로 이루어져 있다. 예제 대공간 구조물의 지중구조 중 킬아치가 가장 핵심적인 역할을 하고 킬아치에 의해서 구조물의 동적특성이 크게 좌우된다. 따라서, 예제구조물을 고유치해석한 후 킬아치의 동적거동이 큰 주요 저차모드의 모드형상 및 고유진동수를 <그림 3>에 나타내었다.



<그림 2> 예제 대공간 구조물



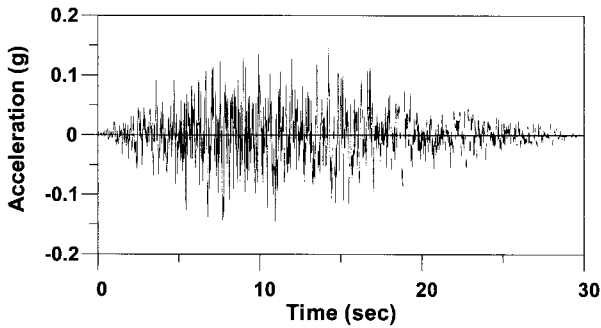
<그림 3> 예제 구조물의 주요 모드형상 및 고유진동수

모드별 고유진동수를 보면 구조물의 지진응답에 많은 영향을 미치는 저차모드의 진동수가 일반적인 지진하중의 지반가속도 스펙트럼이 매우 커지는 1Hz 이상(주기 1초 이내)에 존재하는 것을 알 수 있다. 따라서 지진하중에 대하여 예제 구조물의 동적응답이 작지 않게 발생하리라는 것을 예측할 수 있다. 예제 구조물의 주요 저차모드 형상을 보면 구조물의 수평방향 움직임 못지않게 수직방향 움직임이 크게 발생할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 이러한 특성 때문에 대공간 구조물은 라멘구조와 달리 수평지진하중에 의하여 수평방향 응답뿐만 아니라 수직방향 응답도 크게 발생하는 것으로 알려져 있다.

2.2 지진하중

본 연구에서는 스마트 면진시스템이 설치된 대공간 예제 구조물의 지진응답제어성능을 검토하기 위하여 지진하중을 사용해 시간이력해석을 수행하였다. 이를 위하여 국내 건축구조설계기준(KBC2009)

을 바탕으로 설계응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하여 수치 해석에 사용하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성 시 지역계수는 0.22, 지반종류는 SB의 보통암 지반으로 선택하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도 시간이력을 <그림 4>에 나타내었다. 생성된 인공지진하중 가속도시간이력 데이터 중의 가장 큰 값 (Peak Ground Acceleration; PGA)은 0.144g로서 우리나라에서 주로 발생하는 지진하중의 특성이 고려된 중약진지역의 지진하중으로 생각할 수 있다. 생성된 지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다. 지진하중은 길아치와 나란한 X 방향으로 가하여 수치해석을 수행하였다.

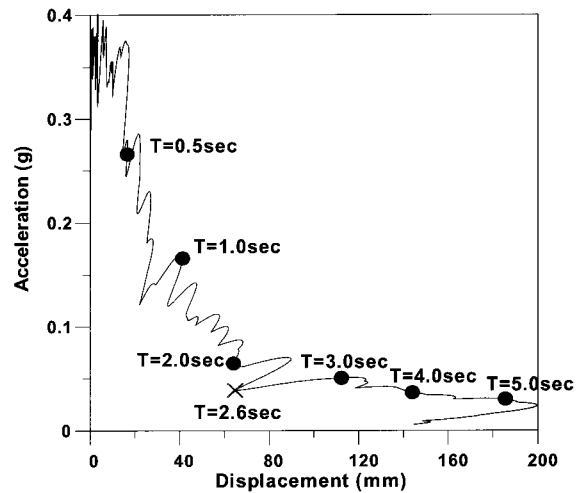


<그림 4> 지진하중의 가속도 시간이력

3. LRB 면진시스템의 최적설계

본 연구에서는 대공간 예제구조물에 스마트 면진시스템의 적용성을 검토하기 위하여 앞서서 일반적으로 널리 사용되고 있는 LRB 면진시스템을 적용한 결과를 검토하였다. 최적 설계된 LRB 면진시스템을 적용한 대공간 구조물의 지진응답 제어성능을 기준으로 본 연구에서 제안된 스마트 면진시스템의 제어성능을 비교하고자 한다. LRB 면진시스템을 최적설계하기 위해서는 우선 1차모드의 고유진동주기를 선택하는 것이 필요하다. 이를 위하여 인공지진하중의 변위-가속도 스펙트럼을 작성하여 <그림 5>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 변위응답스펙트럼과 가속도응답스펙트럼은 일반적으로 반비례 관계를

나타낸다. 즉, 구조물의 주기가 길어지면 가속도응답은 감소하는 반면에 변위응답은 증가하는 경향이 있고 구조물의 주기가 짧아지면 그 반대의 경향을 나타낸다. 이를 면진시스템이 사용된 구조물에 적용하여 설명하자면 다음과 같다. 면진시스템의 강성이나 감쇠를 작게 하면 지반과 구조물의 격리효과가 커져서 지반운동이 상부구조물로 전달되는 것을 막아주게 된다. 따라서 면진된 상부구조물의 절대가속도는 작아지지만 면진층의 변위가 증가하게 되어 지반과 상부구조물 사이의 상대변위가 커지게 된다. 반대로 면진시스템의 강성이나 감쇠가 커지면 면진층의 변위가 감소하게 되지만 상부구조물로 지반운동이 전달되어 면진된 구조물의 절대가속도가 증가하게 된다. 따라서 두 응답사이에 서로 상충관계 (trade-off)가 발생하므로 면진시스템을 설계할 때에는 두 가지 응답을 적절하게 저감시킬 수 있는 주기를 면진된 구조물의 1차 모드 진동주기로 선택하는 것이 필요하다.



<그림 5> 지진하중의 변위-가속도 스펙트럼

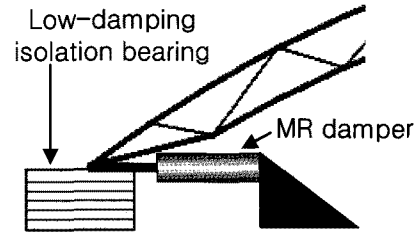
<그림 5>에 나타난 인공지진하중의 변위-가속도 스펙트럼을 보면 구조물의 주기가 증가함에 따라서 가속도응답이 급격히 감소하다가 2.6초 이후에는 가속도응답의 저감은 거의 없고 변위응답이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 2.6초

를 면진된 구조물의 1차 모드 진동주기로 선택하였다. 본 연구에서 사용하는 예제 대공간 구조물은 30m 경간의 비교적 작은 파일럿 프로젝트로서 8.26ton의 질량을 가지고 있다. 면진시스템을 적용한 아치구조물의 1차모드 고유진동주기를 2.6초로하기 위하여 LRB의 납이 항복한 후 탄성베어링만의 강성(K_{yield})을 492.1kN/m로 두었다. LRB 면진시스템의 감쇠는 2%로 하여 저감쇠 시스템으로 구성하였다. LRB를 설계할 때 결정해야할 중요한 변수는 항복전과 항복후의 강성비($K_{initial}/K_{yield}$)와 LRB의 항복하중(Q_y)이다. 따라서 본 연구에서는 예제 대공간 구조물에 적용할 최적의 LRB를 설계하기 위해서 $K_{initial}/K_{yield}$ 와 Q_y 를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 이때 $K_{initial}/K_{yield}$ 는 1에서 20까지 0.25간격으로 변화시켰고 Q_y 는 구조물 무게의 1%에서 20%까지 0.25% 간격으로 변화시켰다. 그 결과 본 연구에서는 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 적절하게 제어할 수 있는 값으로 $K_{initial}/K_{yield}$ 를 5로 Q_y 를 5%로 선택하였다.

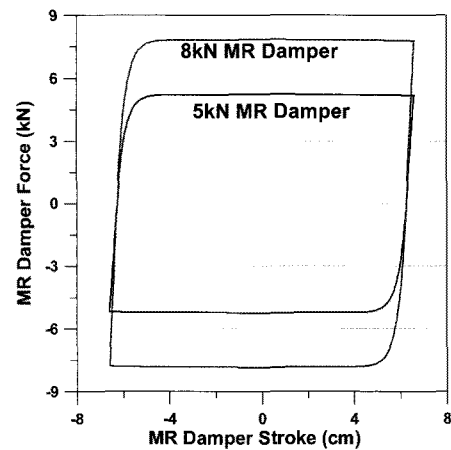
4. 스마트 면진시스템

본 연구에서는 스마트 면진시스템을 구성하기 위하여 <그림 6>에 나타난 바와 같이 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링을 사용하였다. 탄성베어링의 강성은 앞 절에서 설명한 LRB의 항복 후 강성과 동일하게 두어 면진된 아치구조물의 1차 모드 고유진동주기가 2.6초가 되도록 하였다. 스마트 면진시스템이 MR 감쇠기로 인한 제어효과를 크게 하기 위하여 탄성베어링의 감쇠를 비교적 작은 값인 2%로 하였다. 사용한 MR 감쇠기는 5kN과 8kN 용량의 두 가지로 하였다. MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 이 모델은 전단형태의 MR 감쇠기의 거동을 잘 모사하며 실제규모의 MR 감쇠기 모델링에도 효과적으로

적용될 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서는 Yoshida와 Dyke의 연구¹¹⁾에서 사용한 1000kN MR 감쇠기의 수치해석모델 파라미터를 조정하여 <그림 7> 나타낸 바와 같이 5kN 및 8kN MR 감쇠기를 구성하였다. MR 감쇠기로 전달되는 최소 및 최대 전압은 0V와 5V이다.



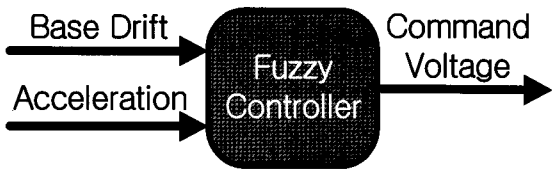
<그림 6> 스마트 면진시스템의 구성



<그림 7> MR 감쇠기의 힘-변위 이력곡선

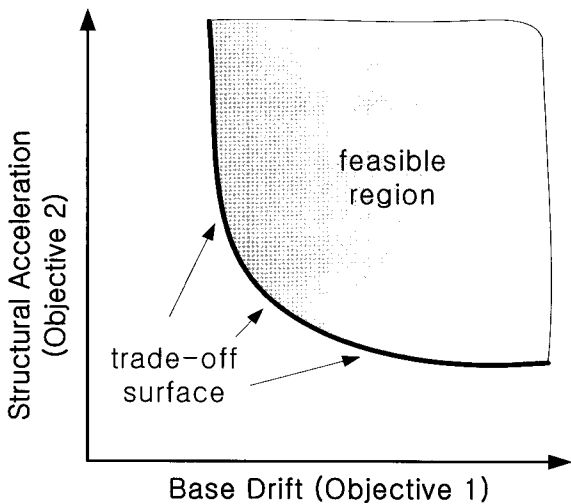
5. 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 최적화

본 연구에서는 스마트 면진시스템을 구성하고 있는 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지제어기를 사용하였다. 퍼지제어기의 입력변수는 <그림 8>에 나타난 바와 같이 스마트 면진시스템의 면진층 변위와 예제구조물의 가속도로 하였고 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 출력변수로 하였다. 퍼지제어기의 입력 및 출력 소속함수는 가우스함수를 사용하였고 소속함수의 형태와 퍼지규칙은 다목적 유전자알고리즘을 사용해서 최적화하였다.



〈그림 8〉 퍼지제어기의 입출력관계

다목적 최적화문제에서는 본질적으로 서로 우열을 판별할 수 없는 다수의 최적해가 존재하게 되는데 이를 파레토 최적해집합이라고 한다. 이는 다수의 목적함수가 서로 상충하는 특성 때문에 〈그림 9〉에 나타난 바와 같이 trade-off가 발생한다. 스마트 면진장치기 설치된 구조물에서 명령전압을 크게 하면 면진층의 변위가 감소하지만 구조물의 가속도는 증가하게 된다. 반대로 명령전압을 작게 하면 지반과의 격리효과가 커져서 구조물의 가속도는 감소하지만 면진층 변위가 증가하게 된다. 이처럼 두 응답이 서로 상충되기 때문에 다목적 유전자알고리즘의 목적함수로 사용하였다. 사용된 두 목적함수는 〈표 1〉에 나타난 바와 같이 스마트 면진시스템이 설치된 구조물의 응답을 LRB가 설치된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. LRB가 설치된 경우의 최대 면진층 변위 및 대공간 구조물 중앙부의 X방향 최대 가속도는 5.21cm 및 61.96cm/s²이다.

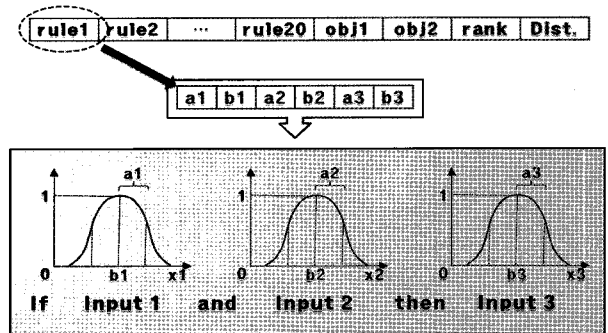


〈그림 9〉 상충하는 목적사이의 trade-off

〈표 1〉 다목적 최적화의 목적함수

목적함수	내용
f_1	$\frac{\text{스마트 면진시스템이 적용된 경우의 최대 면진층 변위}}{\text{LRB 면진시스템이 적용된 경우의 최대 면진층 변위}}$
f_2	$\frac{\text{스마트 면진시스템이 적용된 경우의 최대 구조물 가속도}}{\text{LRB 면진시스템이 적용된 경우의 최대 구조물 가속도}}$

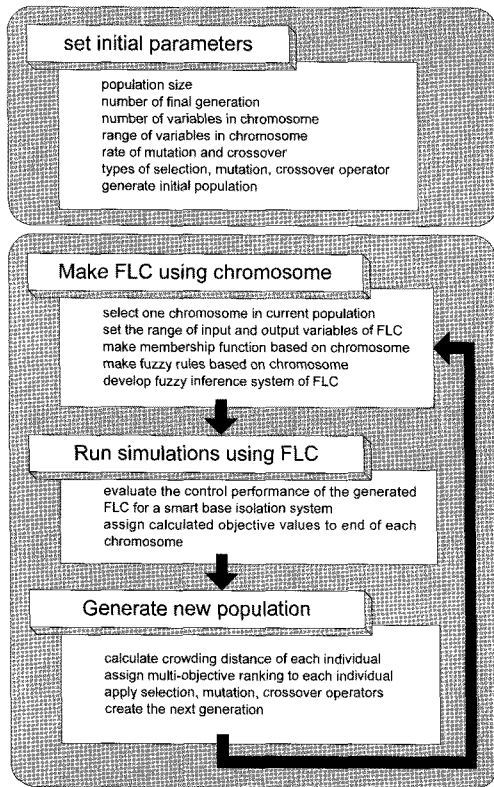
본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘 중의 하나인 NSGA-II(2)(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 사용하여 퍼지제어기(FLC)를 최적화하였다. 유전자알고리즘을 통해서 최적화하기 위해서는 암호화(encoding)과정을 거쳐서 퍼지제어기를 구성하는데 필요한 모든 정보를 염색체라 불리는 하나의 구조로 표현되어야 한다. 본 연구에서 사용한 퍼지제어기의 입출력 변수는 가우스함수를 통해서 표현이 되고 사용된 염색체의 구조를 〈그림 10〉에 나타내었다.



〈그림 10〉 퍼지제어기의 염색체 구조

그림에 나타난 바와 같이 하나의 염색체에는 20개의 퍼지제어규칙과 다목적 최적화에 필요한 목적함수별 적합도 값 (obj1, obj2) 및 우선순위(rank)와 혼잡도거리(dist)가 저장된다. 각각의 퍼지제어규칙은 6개의 파라미터를 통해서 표현이 되는데 a는 가우스 소속함수의 중앙부 위치, σ 는 표준편차를 각각 나타낸다. 여기서 a1, b1 및 a2, b2는 입력변수를 위한 가우스 소속함수를 나타내고 a3, b3는 출력변수를 위한 가우스 소속함수를 나타낸다. 이러한 가우

스 소속함수들은 NSGA-II를 이용한 다목적 최적화 과정을 통하여 최적화되며 이 과정의 flowchart를 <그림 11>에 나타내었다.

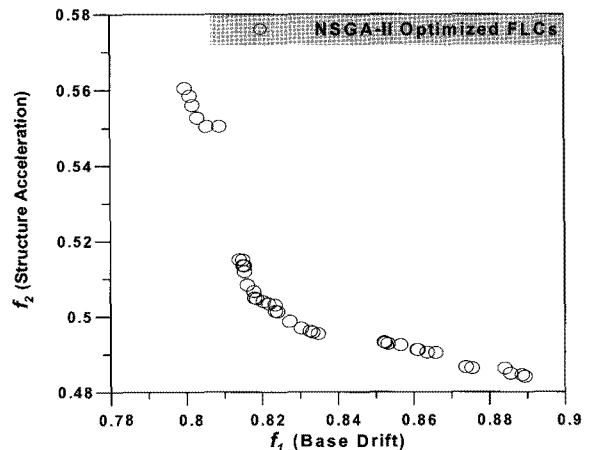


<그림 11> NSGA-II를 이용한 피지제어기 다목적최적화의 flowchart

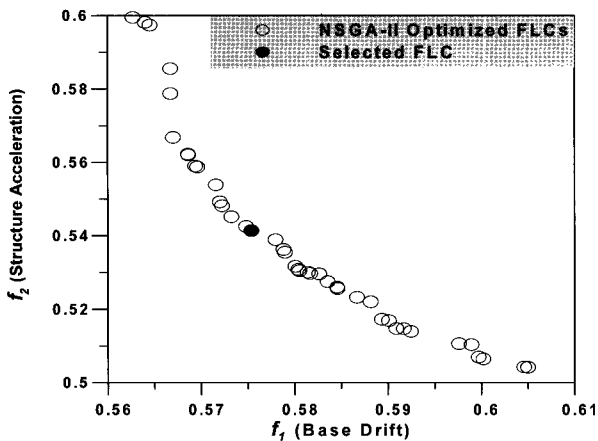
본 연구에서 사용한 피지제어기는 엔지니어의 경험이나 직관에 의해서도 개발될 수 있지만 반복적인 해석과 제어성능 검토에 많은 노력이 필요할 뿐만 아니라 검토범위에도 한계가 있다. 다목적 최적화 문제일 지라도 다수의 목적을 가중합 등의 방법으로 하나로 만든 후 단일목적 유전자알고리즘을 적용하는 것이 일반적이다. 하지만 이때에는 다수의 목적을 합하는 가중치에 따라서 최적화 결과가 달라지고 적절한 가중치를 결정하는 것이 풀어야할 또 다른 최적화문제로 대두된다. 따라서 본 연구에서는 한 번의 최적화과정을 통해서 다수의 피지제어기 파레토 최적해집합을 얻을 수 있는 다목적 유전자알고리즘을 적용하여 피지제어기를 개발하는 방법을 제안하였다.

6. 수치해석을 통한 제어성능 평가

스마트 면진시스템을 효과적으로 제어할 수 있는 피지제어기를 개발하기 위하여 사용한 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화 작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2009b를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다. 5kN과 8kN MR 감쇠기를 사용한 면진시스템의 최적화 수행결과를 <그림 12>과 <그림 13>에 각각 나타내었다. <그림 12>을 보면 모든 개체의 f_1 과 f_2 의 값이 1보다 작으므로 LRB 면진시스템보다 스마트 면진시스템이 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 두 목적함수 중 면진층 변위보다는 구조물의 가속도를 더 효과적으로 제어하는 것을 볼 수 있다. 8kN 용량의 MR 감쇠기를 사용한 <그림 13>의 결과를 보면 5kN MR 감쇠기를 사용한 경우와 비교하여 면진층 변위를 매우 효과적으로 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 일반적으로 면진층에 수동감쇠기를 설치하거나 감쇠기 용량을 늘리게 되면 면진층 변위는 줄어들지만 면진된 구조물의 가속도응답은 증가하게 된다. 그러나 스마트 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 용량을 늘릴 경우에는 가속도응답의 증가 없이 면진층 변위를 매우 효과적으로 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

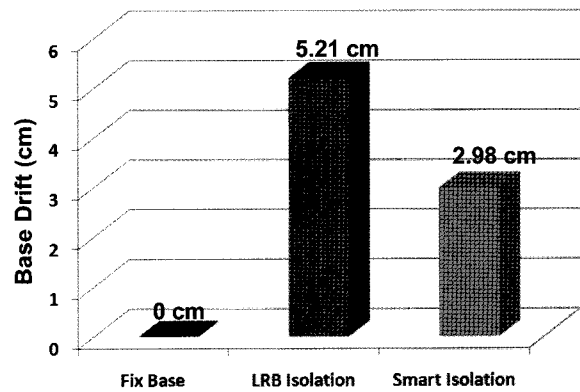


<그림 12> 5kN MR 감쇠기를 이용한 스마트 면진시스템의 다목적 최적화 결과

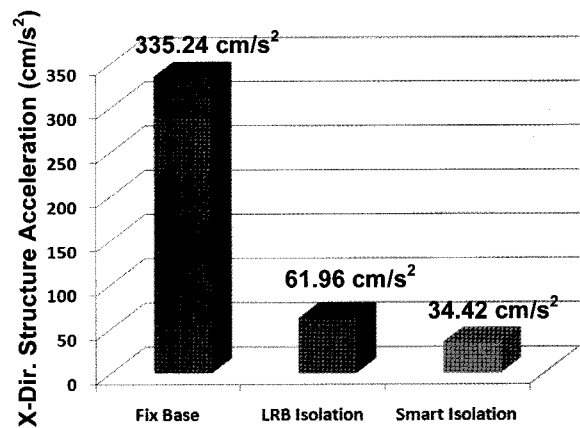


〈그림 13〉 8kN MR 감쇠기를 이용한 스마트 면진시스템의 다목적 최적화 결과

8kN MR 감쇠기를 이용한 스마트 면진시스템의 다목적 최적화 결과를 보면 대부분의 개체가 0.6이하의 f_1 과 f_2 의 값을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 스마트 면진시스템을 적용한 예제 대공간 구조물의 면진층 변위와 구조물 가속도가 최적 LRB를 적용한 경우에 비하여 60% 이하가 된다는 것을 의미한다. 즉, 본 연구에서 개발된 퍼지제어기를 사용하여 스마트 면진시스템을 제어하면 LRB 면진시스템에 비하여 면진층 변위와 구조물 가속도를 약 40% 이상 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 〈그림 13〉에 나타난 파레토 최적해 집합 중에서 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 적절하게 줄일 수 있는 퍼지제어기를 선택하였고 이를 검정색 원으로 나타내었다. 〈그림 13〉에서 검정색 원으로 나타난 퍼지제어기의 f_1 과 f_2 의 값은 각각 0.57과 0.54로서 LRB를 사용했을 경우에 비하여 면진층 변위는 43%, 구조물 가속도는 46% 더 줄일 수 있음을 의미한다. 이를 정량적으로 파악하기 위하여 최적 설계된 LRB 면진시스템과 스마트 면진시스템 그리고 고정기초를 가진 예제구조물의 최대치 지진응답을 비교하여 〈그림 14〉와 〈그림 15〉에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 LRB 면진시스템을 사용하면 면진층에서 5.21cm의 변위가 발생하지만 스마트 면진시스템을 사용하면 2.98cm의 변위가 발생한다. 예제 대공간 구조물에 면진시스템을



〈그림 14〉 최대치 면진층 변위의 비교

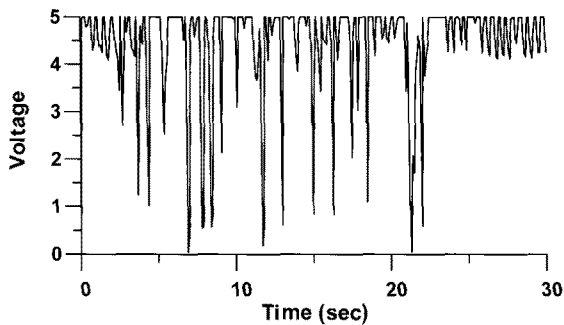


〈그림 15〉 최대치 구조물 가속도 비교

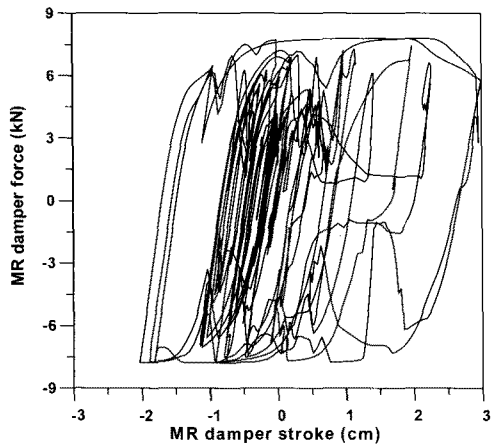
적용하지 않았을 경우에는 지붕구조물 중앙부의 X방향 가속도응답이 335.24cm/s²이 발생하였고 LRB 면진시스템을 적용하였을 경우에는 이를 61.96cm/s²로 줄일 수 있었다. 특히 스마트 면진시스템은 예제구조물의 가속도응답을 고정지인 경우에 비하여 약 10%로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

스마트 면진시스템이 설치된 예제구조물에 인공 지진하중이 가해질 경우에 선택된 퍼지제어기에 의해서 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압의 시간이력을 〈그림 16〉에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 퍼지제어기는 구조물의 응답에 따라서 0V와 5V사이에서 적절한 값을 실시간으로 결정하여 출력하는 것을 알 수 있다. 〈그림 17〉에는 지진하중이 스마트 면진시스템에 가해졌을 경우에 퍼지제어기에 의해서 제어되는 MR 감쇠기의 힘-변위 관계 그래프를 나타내

었다. 이때 이력곡선 내부면적의 합만큼 지진에너지가 소산되게 되는데 그림에서 보는 바와 같이 MR 감쇠기가 최대 용량 8kN이내에서 적절하게 거동하여 입력되는 지진에너지를 소산시키는 것을 알 수 있다. KBC2009를 바탕으로 생성된 인공지진하중은 중약진 지진하중으로 생각할 수 있으며 따라서 MR 감쇠기의 양단 상대변위(stroke)는 그림에서 볼 수 있듯이 3cm 이하로 비교적 작은 값이다.



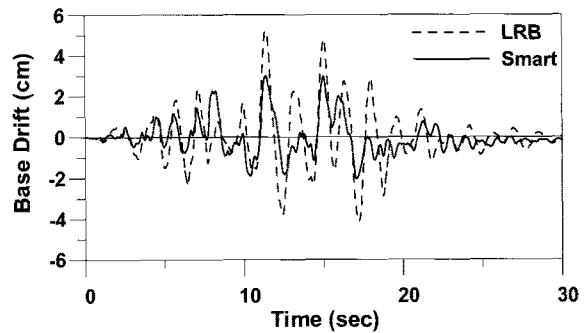
〈그림 16〉 퍼지제어기에서 출력되는 명령전압 시간이력



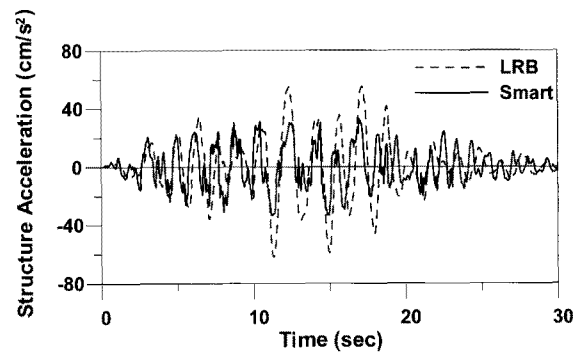
〈그림 17〉 8kN MR 감쇠기의 힘-변위곡선

지진하중을 받는 대공간 예제구조물의 면진층 변위와 지붕구조물 가속도응답의 시간이력을 LRB 면진시스템과 스마트 면진시스템을 적용한 경우에 대하여 〈그림 18〉과 〈그림 19〉에 나타내었다. 그림을 보면 스마트 면진시스템이 LRB 면진시스템에 비하여 면진층 변위를 대폭 줄이면서도 구조물의 최대 가속도응답도 동시에 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 스마트 면진시스템을 제어할 퍼지제어기를 설계할 때 면진층 변위와 구조물 가속도를 동시에 적절하게 줄일 수 있는 퍼지제어기를 선택하였기 때문에 〈그림 18〉과 〈그림 19〉에서 볼 수 있듯이 두 가지 응답이 비슷한 수준으로 제어된다. 그러나 수치해석 결과 최대 면진층 변위가 2.98cm로 매우 작으므로 두 가지의 최적화목적 중 구조물 가속도 응답을 최소화할 수 있는 퍼지제어기를 선택한다면 구조물의 지진응답을 더 효과적으로 제어할 수 있을 것이다.



〈그림 18〉 면진층 변위의 시간이력응답 비교



〈그림 19〉 구조물 가속도의 시간이력응답 비교

7. 결론

본 연구에서는 대공간 구조물의 지진응답 제어를 위하여 MR 감쇠기와 저감쇠 탄성베어링으로 구성된 스마트 면진시스템을 제안하였고 이를 효율적으로 제어할 수 있는 퍼지제어알고리즘을 개발하였다. 퍼지제어기를 최적화하기 위해서 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 사용하였고 면진층 변위와 대공간

구조물 지붕의 가속도를 목적함수로 사용하였다. 제안된 스마트 면진시스템의 지진응답 제어성능을 최적설계된 LRB 면진시스템과 비교하여 검토하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 면진시스템이 적용된 대공간 구조물의 지진응답 중 면진층 변위와 구조물 가속도는 서로 상충관계에 있으므로 두 응답을 동시에 적절하게 제어할 수 있는 시스템을 설계하기 위해서는 다목적 최적화 기법이 필요하다.

(2) 본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘(NSGA-II)을 이용해서 최적화과정을 수행하여 면진층 변위와 구조물의 가속도응답을 동시에 적절하게 줄일 수 있는 퍼지제어기의 파레토 최적해집합을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 다수의 최적 퍼지제어기 중에서 엔지니어가 원하는 성능을 가진 제어기를 쉽게 선택할 수 있었으며 시뮬레이션결과 기대한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지제어기의 최적화방법을 스마트 면진시스템 제어기의 개발에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

(3) 예제 대공간 구조물에 최적설계된 LRB 면진시스템을 적용하면 지붕구조물의 X방향 가속도를 335.24cm/s²에서 61.96cm/s²로 대폭 줄일 수 있었다. 스마트 면진시스템을 적용하면 LRB 면진시스템을 적용한 경우에 비하여 면진층 변위와 구조물 가속도 모두 40%이상 더 줄일 수 있었다.

(4) 5kN과 8kN 용량의 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성한 결과 5kN MR 감쇠기를 사용한 경우에 비하여 8kN MR 감쇠기를 사용한 시스템이 구조물의 가속도를 증가시키지 않으면서 면진층 변위를 효과적으로 줄일 수 있었다. 따라서 스마트 면진시스템을 개발할 때 제어알고리즘의 최적화작업 뿐만 아니라 MR 감쇠기 용량의 최적화작업도 포함한 통합 최적화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0016647)

- 참고문헌 -

1. 강주원, 정찬우 (2008), “대공간 건축물의 형태별 지진거동 특성”, 한국공간구조학회지 학술기사, 제8권, 1호, pp. 5-12.
2. 김기철, 김광일, 강주원 (2008), “면진 트러스-아치 구조물의 지진거동분석”, 한국공간구조학회 논문집, 제8권, 2호, pp. 73-84.
3. F. Naeim and J.M. Kelly (1999), Design of Seismic Isolated Structures: from Theory to Practice, Wuley: New York.
4. T.H. Heaton, J.F. Hall, D.J. Wald and M.W. Halling (1995), Response of high-rise and base-isolated buildings in a hypothetical Mw 7.0 blind thrust earthquake, Science, 267, pp. 206-211.
5. J.M. Kelly (1999), The role of damping in seismic isolation, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 28, pp. 30-20.
6. E.A. Johnson, J.C. Ramallo, B.F. Spencer Jr. and M.K. Sain (1999), Intelligent base isolation systems, Proc. 2nd World Conf. on Structural Control, Kyoto, Japan, pp. 367-376.
7. B.F. Spencer Jr., E.A. Johnson and J.C. Ramallo (2000), Smart isolation for seismic control, JSME Int. J. Ser. C., 43(4), pp. 704-711.
8. H.S. Kim, and P.N. Roschke (2006), Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm, Engineering Structures, 28(1), pp. 84-96.
9. S. Narasimhan, S. Nagarajaiah, E.A. Hohnson, and H.P. Gavin (2006), Smart base isolated benchmark building part I: problem definition, J. of Struct. Control and Health Monitoring,

- 13, pp. 573–588.
10. I. Tatemich and M. Kawaguchim (2000), A New Approach to Seismic Isolation: Possible Application in Space Structures, International Journal of Space Structure, 15(2), pp. 145–154.
11. O. Yoshida and S.J. Dyke (2004), Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 130(4), pp. 386–392.
12. K. Deb, A. Pratap, S. Agrawal, and T. Meyarivan (2000), "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.

(접 수 일 자 : 2010년 10월 27일)

(심사 완료일자 : 2011년 3월 15일)

(게재 확정일자 : 2011년 5월 27일)