

다목적 유전자알고리즘을 이용한 스마트 TMD의 퍼지제어

Fuzzy Control of Smart TMD using Multi-Objective Genetic Algorithm

강 주 원* 김 현 수†
Kang, Joo-Won Kim, Hyun-Su

요 지

본 연구에서는 스마트 TMD를 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어알고리즘을 개발하기 위하여 다목적 유전자알고리즘을 이용한 최적화기법을 제안하였다. 예제구조물로는 풍하중을 받는 76층 벤치마크건물을 선택하였다. 스마트 TMD를 구성하기 위하여 100kN 용량의 MR 감쇠기를 사용하였고, 스마트 TMD의 진동주기는 예제구조물의 1차모드 고유진동주기에 맞추어 조절되었다. MR 감쇠기의 감쇠력은 예제구조물의 풍응답을 최소화할 수 있도록 퍼지제어기를 통해서 조절된다. 퍼지제어기의 입력변수는 75층의 가속도 응답과 스마트 TMD의 변위응답으로 하였고, 출력변수는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압으로 하였다. 퍼지제어기의 최적화를 위하여 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II 기법이 사용되었고, 이때 75층의 가속도 응답과 스마트 TMD의 변위응답을 목적함수로 사용하였다. 최적화 결과, 구조물의 풍응답과 STMD의 변위응답을 동시에 적절히 제어할 수 있는 다수의 퍼지제어기를 얻을 수 있었다. 수치해석을 통해서 스마트 TMD의 성능이 수동 TMD에 비하여 월등히 뛰어난 것을 알 수 있었고 경우에 따라서는 샘플 능동 TMD보다 더 우수한 제어성능을 발휘하였다.

핵심용어 : 풍응답제어, 초고층건물, 스마트 TMD, 퍼지논리제어, 다목적 유전자알고리즘

Abstract

In this study, an optimization method using multi-objective genetic algorithm(MOGA) has been proposed to develop a fuzzy control algorithm that can effectively control a smart tuned mass damper(TMD). A 76-story benchmark building subjected to wind load was selected as an example structure. The smart TMD consists of 100kN MR damper and the natural period of the smart TMD was tuned to the first mode natural period of the example structure. Damping force of MR damper is controlled to reduce the wind-induced responses of the example structure by a fuzzy logic controller. Two input variables of the fuzzy logic controller are the acceleration of 75th floor and the displacement of the smart TMD and the output variable is the command voltage sent to MR damper. Multi-objective genetic algorithm(NSGA-II) was used for optimization of the fuzzy logic controller and the acceleration of 75th story and the displacement of the smart TMD were used as objective function. After optimization, a series of fuzzy logic controllers which could appropriately reduce both wind responses of the building and smart TMD were obtained. Based on numerical results, it has been shown that the control performance of the smart TMD is much better than that of the passive TMD and it is even better than that of the sample active TMD in some cases.

Keywords : wind response control, supertall building, smart TMD, fuzzy logic control, multi-objective genetic algorithm

1. 서 론

건물이 고층화될수록 지진하중보다 풍하중의 영향이 상대적으로 커지므로 초고층건물은 주로 풍하중에 의해서 구조설계가 이루어지게 된다. 풍하중에 대한 구조물의 내풍성능 향

상에 대한 연구는 현재까지 전 세계적으로 광범위하게 이루어져 왔다. 근래에는 구조물 자체의 강성이나 연성을 증대시키는 소극적인 방법에서 탈피하여 구조물에 다양한 제진기술을 적용함으로써 외력의 영향을 제진장치의 에너지 소산으로 변화시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고층건물의

† 책임저자, 정회원 · 선문대학교 건축학부 조교수
Tel: 041-530-2315 ; Fax: 041-530-2839
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr
* 정회원 · 영남대학교 건축학부 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

풍응답을 제어하기 위한 여러 가지 제어장치 중에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)는 기능의 단순성, 경제성, 제어성능의 우수성 등으로 인하여 많은 건물에 다양한 형태로 적용되어 왔다(Kareem 등, 1999; Nishitani 등, 2001; Dyke, 2005). 제진장치에 대한 연구는 수동형 제진기술에 관한 연구에서 시작하여 능동형 제진기술 및 준능동형 제진기술에 대한 연구로 발전하고 있다. 최근에는 각각의 제진기술의 장점을 혼합한 하이브리드 제진기술에 대한 연구도 많이 이루어지고 있다. 제진기술의 한 분야로 80년대 중반 이후 구조물의 진동제어에 관한 연구는 스마트 구조물(smart structures)이라는 분야로 발전되어 왔다. 이 연구 분야는 구조물이 생명체와 같이 환경 변화를 감지하고 적절한 반응을 할 수 있는 능력을 확보하여 구조물의 안정성(stability) 및 신뢰성(reliability)을 유지할 수 있도록 한다는 기본 개념을 가지며 이러한 스마트 구조의 적용 분야는 우주 구조물, 잠수함, 로봇 등 기계분야에서 교량, 빌딩 등의 건축·토목분야로 점차 확대되고 있다. 현재까지 건축 및 토목 분야에서 가장 널리 이용되고 있는 스마트 제어장치는 MR(magnetorheological) 감쇠기로서 이 제어장치를 이용한 스마트 면진장치 및 스마트 TMD(Smart Tuned Mass Damper; STMD)에 대한 연구가 해석 및 실험적으로 수행된 바 있다(Koo, 2003; Narasimhan 등, 2006; Koo 등, 2006; Nagarajaiah, 2009). 이러한 연구들을 통해서 STMD가 수동 TMD에 비하여 매우 우수한 제어성능을 나타내고 경우에 따라서는 능동 TMD와 비교될 만큼 우수한 제어성능을 발휘한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 준능동 스마트시스템을 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 제어알고리즘이 필요하다. 가장 널리 사용되고 있는 제어알고리즘은 전통적인 준능동 제어알고리즘인 그라운드훅(groundhook) 및 스카이훅(skyhook) 제어알고리즘으로서 계산과정이 간단하고 제어효과도 비교적 우수하기 때문에 다양한 형태로 개발되어 적용되고 있다(Koo 등, 2004). 이 외에도 능동제어이론을 기반으로 하여 개발된 clipped-optimal 제어알고리즘, Lyapunov 안정이론에 근거한 제어알고리즘, 분산화된 뱅뱅(bang-bang)제어알고리즘, 최대 에너지소산 제어알고리즘 등이 사용된 바 있다(Jansen & Dyke, 2000). 비록 최근에 준능동 및 스마트 제어기법에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔지만 퍼지제어알고리즘과 같은 지능형 제어기의 활용에 대한 연구는 광범위하게 수행되지 못하고 있는 실정이다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 STMD를 효과적으로 제어할 수 있는 제어알고리즘을 개발하기 위하여 다목적 유전자알고리즘(multi-objective genetic algorithm; MOGA)을 사용하여 최적화된 퍼지제어알고리즘을 개발하였

다. 제안된 제어알고리즘 및 STMD의 제어성능을 검토하기 위하여 풍하중을 받는 76층 벤치마크건물을 예제구조물로 선택하였다. 퍼지제어기는 구조물의 응답을 기반으로 하여 실시간으로 STMD의 제어력을 조절하게 되는데, 본 연구에서는 예제구조물의 풍가속도응답과 STMD의 동적변위응답을 퍼지제어기의 입력변수로 선택하였고 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 출력변수로 선택하였다. 이때 퍼지제어기로부터 생성되는 명령전압은 선택된 입력변수의 응답 크기에 따라서 퍼지추론과정을 거쳐서 실시간으로 변화하게 된다.

풍하중에 대한 고층건물의 진동제어 문제에 있어서 구조물의 응답을 저감시키는 것이 첫 번째 목표이지만 진동제어장치의 과도한 응답은 실제 구조물에 적용성과 제어장치의 안정성을 떨어뜨린다. 따라서 구조물 응답의 저감과 함께 STMD와 같은 진동제어장치의 응답을 적절하게 감소시키는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 구조물의 응답뿐만 아니라 STMD의 응답을 줄이는 것을 목적으로 하는 다목적 최적화 과정을 통해서 퍼지제어기를 개발한다. 이러한 퍼지제어기는 전문가의 지식에 기반하여 개발할 수도 있지만 최적의 성능을 발휘하는 제어기를 개발하는 일은 적절한 퍼지 소속함수(membership function)를 선택하고 퍼지제어규칙을 찾아내기 위하여 수많은 반복과 시행착오 과정을 거쳐야 하므로 시간이 많이 소요되는 쉽지 않은 작업이다. 따라서 본 연구에서는 전술한 바와 같이 MOGA를 사용하여 퍼지제어기를 최적화한다. 유전자알고리즘은 다수의 개체를 이용하여 최적화 문제를 해결하는 특징이 있기 때문에 본 연구에서와 같이 STMD의 응답 및 건물의 응답을 동시에 줄이고자 하는 다목적 최적화문제에 적합한 방법이다. 최근까지 여러 연구자들에 의하여 다목적 최적화문제를 해결할 수 있는 유전자알고리즘이 제시되었다. 그 중에서 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)(Deb 등, 2000)를 이용하여 최적해 집합을 찾는다. 본 연구에서는 이러한 연구방법 및 내용을 통하여 벤치마크문제에서 제시한 설계제한조건 및 제어장치의 최대제어력과 허용변위를 만족하는 효과적인 제어시스템을 제안하였다.

2. 예제구조물 및 스마트 TMD

2.1 76층 예제구조물 및 성능평가기준

본 연구에서 선택한 예제 고층건물은 그림 1에 나타난 76층의 풍응답제어 벤치마크건물이다(Yang 등, 2004). 구조형식은 횡하중에 저항하는 철근콘크리트 코어와 수직하중에 저항하는 철근콘크리트 골조로 구성되어 있다. 건물의 총 질량은

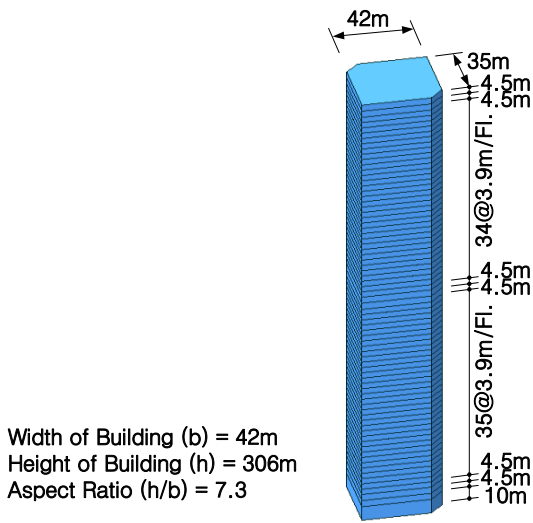


그림 1 예제구조물

153,000ton이고 건물의 높이와 폭의 비율은 $306.1/42=7.3$ 으로 세장하여 풍하중에 큰 영향을 받는다. 벤치마크문제에서 예제구조물은 수직 캔틸레버 보요소로 모형화된다. 세장한 벤치마크건물은 1차 모드 거동이 지배적이기 때문에 건물의 최상층에 STMD를 적용하여 건물의 응답을 제어하는 것이 효율적일 것이다.

벤치마크문제에서는 호주의 시드니대학교 토목공학과 내의 풍동실험 연구소에서 실시한 실험에 의하여 얻은 풍하중을 사용하고 있다(Samali 등, 2004). 건물의 높이에 따라서 측정된 압력계수를 풍하중으로 변환하였고 제어시스템의 성능평가를 위해서 풍 직각방향 풍하중 데이터를 사용하였다. 벤치마크문제의 제어목표는 최대 증가속도는 15cm/sec^2 이하 그리고 RMS 증가속도는 5cm/sec^2 이하로 하는 것이고 76층은 기계실로서 사람이 거주하지 않으므로 75층까지의 응답만을 검토 대상으로 한다. 제어장치의 최대 제어력 및 RMS 제어력을 각각 300kN과 100kN이하로 제한하고 제어장치의 최대 허용변위 및 RMS 허용변위를 95cm 및 30cm이하로 제한하여 보다 실제적으로 제어장치의 성능을 검토할 수 있도록 하였다.

벤치마크문제에서는 12개의 성능평가지수(J_1-J_{12})를 제시하여 각 제어장치 및 제어알고리즘의 성능을 객관적으로 비교할 수 있도록 하였다. 각 평가기준은 제어된 구조물의 응답을 제어하지 않은 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현되므로 평가지수가 작을수록 제어장치의 제어능력이 우수한 것을 의미한다. 처음 6개(J_1-J_6)의 평가지수는 벤치마크건물의 RMS(root mean square) 응답에 대한 제어 성능을 나타내고 J_7-J_{12} 까지는 최대치 응답에 대한 평가지수를 나타낸다(Yang 등, 2004).

$$J_1 = \max(\sigma_{x_{11}}, \sigma_{x_{30}}, \sigma_{x_{50}}, \sigma_{x_{55}}, \sigma_{x_{60}}, \sigma_{x_{65}}, \sigma_{x_{70}}, \sigma_{x_{75}}) / \sigma_{x_{75o}}$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \sum_i (\sigma_{x_i} / \sigma_{x_{io}}) \quad (i=50,55,60,65,70,75)$$

$$J_3 = \sigma_{x_{76}} / \sigma_{x_{76o}}$$

$$J_4 = \frac{1}{7} \sum_i (\sigma_{x_i} / \sigma_{x_{io}}) \quad (i=50,55,60,65,70,75,76)$$

$$J_5 = \sigma_{x_m} / \sigma_{x_{76o}}$$

$$J_6 = \sigma_p = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [\dot{x}_m(t)u(t)]^2 dt \right\}^{1/2}$$

$$J_7 = \max(\ddot{x}_{p1}, \ddot{x}_{p30}, \ddot{x}_{p50}, \ddot{x}_{p55}, \ddot{x}_{p60}, \ddot{x}_{p65}, \ddot{x}_{p70}, \ddot{x}_{p75}) / \ddot{x}_{p75o}$$

$$J_8 = \frac{1}{6} \sum_i (\ddot{x}_{pi} / \ddot{x}_{pio}) \quad (i=50,55,60,65,70,75)$$

$$J_9 = x_{p76} / x_{p76o}$$

$$J_{10} = \frac{1}{7} \sum_i (x_{pi} / x_{pio}) \quad (i=50,55,60,65,70,75,76)$$

$$J_{11} = x_{pm} / x_{p76o}$$

$$J_{12} = P_{\max} = \max[\dot{x}_m(t)u(t)]$$

여기서, σ_{x_i} 는 i 층의 RMS 가속도, $\sigma_{x_{75o}}$ 는 제어하지 않은 건물의 75층 RMS 가속도, $\sigma_{x_{io}}$ 는 제어하지 않은 건물의 i 층 RMS 가속도, σ_{x_i} 는 i 층의 RMS 변위, $\sigma_{x_{io}}$ 는 제어하지 않은 건물의 i 층 RMS 변위, σ_{x_m} 은 제어장치의 RMS 변위, $\dot{x}_m(t)$ 는 제어장치의 속도, T 는 전체 적분시간, σ_p 는 RMS 제어력, x_{pi} 는 i 층의 최대변위, x_{pio} 는 제어하지 않은 건물의 i 층 최대변위, \ddot{x}_{pi} 는 i 층의 최대가속도, \ddot{x}_{pio} 는 제어하지 않은 건물의 i 층 최대가속도, x_{pm} 은 제어장치의 최대변위, P_{\max} 는 최대제어력을 나타낸다.

2.2 스마트 TMD의 구성

본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 수동 TMD의 구성요소인 점성감쇠기를 대신하여 MR 감쇠기를 사용하여 STMD를 구성한다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델을 사용하였고, 이 모델을 사용하여 표현되는 MR 감쇠기의 힘-속도 관계를 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 볼 수 있듯이 MR 감쇠기의 최대 감쇠력은 약 100kN이고, 이 값은 예제구조물의 효과적인 제어를 위해 반복해석을 통하여 결정하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0V의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5V의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다. 벤치마크문제에서 제

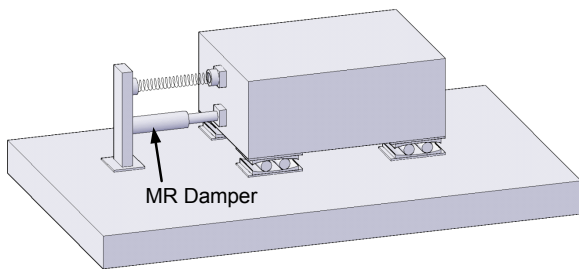


그림 2 MR 감쇠기를 사용한 STMD의 구성

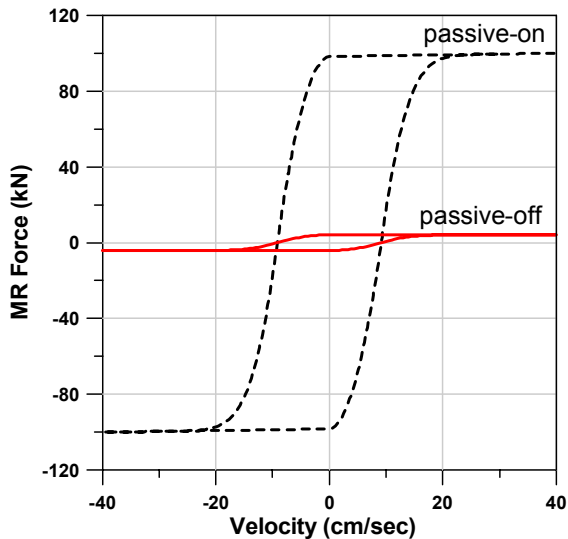


그림 3 100kN MR 감쇠기의 힘-속도 관계

시한 샘플 TMD 및 능동 TMD(ATMD)와 본 연구에서 제시한 STMD의 제어성능을 공정하게 비교하기 위해서 STMD의 질량을 샘플 TMD 및 ATMD의 질량과 동일하게 500ton으로 놓고 수치해석을 수행하였다. STMD의 진동수는 예제구조물의 1차모드 진동수와 동일한 0.16Hz로 두었고 STMD는 예제구조물의 지붕층에 설치되는 것으로 가정하였다.

3. 제어알고리즘

3.1 퍼지제어알고리즘

STMD를 구성하기 위하여 사용된 MR 감쇠기를 제어하기 위해서는 적절한 제어가 필요하다. 비록 MR 감쇠기가 능동 제어장치와 같이 제어신호에 의하여 감쇠력을 조절할 수 있지만 전통적인 능동제어 알고리즘을 스마트 준능동 제어장치인 MR 감쇠기에 직접 적용할 수 없다. 현재 제시된 준능동 제어장치를 제어하는 제어기법으로는 능동제어이론에 기반하여 매 순간 감쇠력의 소산성을 판단하고 이에 따라 전류의 세기를 on-off의 2단계만으로 조절하는 clipped-optimal 제어기법

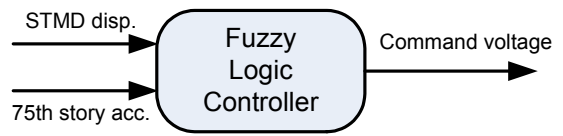


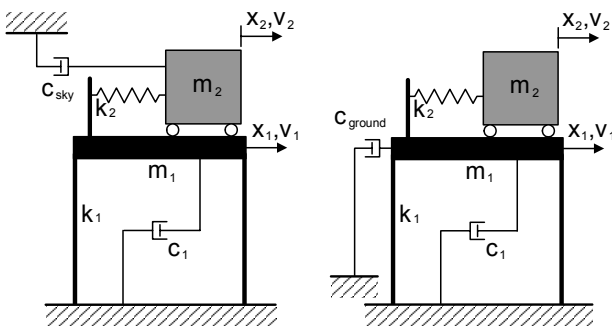
그림 4 퍼지제어기의 입출력관계

이나 절대변위와 상대속도의 부호를 이용하여 조절하는 그라운드혹 및 스카이혹 제어기 등이 있다. 그런데 이러한 방법들은 적용하기가 간단하면서도 어느 정도 효과적이라는 장점을 가지지만 감쇠기의 비선형성을 고려하지 못하여 감쇠기에 입력되는 전압을 최대값 또는 최소값으로만 결정한다. 이는 MR 감쇠기의 이력거동을 모사하는 비선형 미분방정식으로부터 매 순간 원하는 감쇠력을 발휘하는 전류의 양을 정량화할 수 없기 때문이다. 이에 반하여 퍼지제어기법은 구조물에 발생하는 변위 및 가속도 등의 정보를 이용하여 퍼지추론과정을 거쳐서 구조물의 상태를 파악함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘하도록 MR 감쇠기에 입력되어 감쇠력을 결정하는 명령전압을 실시간으로 조절할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 4에 나타난 바와 같이 퍼지제어기를 사용하여 MR 감쇠기에 전달되는 명령전압을 조절하였다.

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 퍼지제어 규칙을 설정한다. 본 연구에서는 퍼지추론타입으로 Mamdani 퍼지모델을 사용하였고 그림 4에 나타난 바와 같이 STMD의 변위와 75층의 절대가속도를 입력변수로 사용하고 MR 감쇠기를 제어할 전압신호를 출력변수로 사용하였다. 입력과 출력변수의 소속함수는 가우스함수를 사용하였고 소속함수의 형태와 퍼지제어규칙은 다음에 설명할 MOGA를 사용해서 최적화하였다.

3.2 스카이혹과 그라운드혹 조합 제어알고리즘

본 연구에서 제안한 MOGA로 최적화된 퍼지제어알고리즘의 제어성능을 비교검토하기 위하여 대표적인 준능동 제어알고리즘인 스카이혹 및 그라운드혹 제어알고리즘을 사용하여 비교대상 제어기를 구성하였다. 스카이혹 및 그라운드혹 제어알고리즘의 개념도를 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 스카이혹 제어알고리즘은 STMD와 연결된 감쇠기를 하늘에 고정시킨 것과 같은 효과를 내도록 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절함으로써 구조물의 응답보다는 STMD 자체의 움직임을 최소화하는데 효과적이다. 일반적으로 이 제어알고리즘은 지반과 격리되어 움직이는 구조체의 응답을 최소화



(a) 스카이하크 (b) 그라운드훅
그림 5 스카이하크 및 그라운드훅의 개념도

시키는데 효과적이므로 자동차의 현가시스템이나 스마트 먼진장치를 제어하는데 효과적으로 이용되고 있다. 이에 비하여 그라운드훅 제어알고리즘은 그림 5(b)에 나타난 바와 같이 구조물에 연결된 감쇠기를 지반에 고정시킨 것과 같은 효과를 내도록 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절한다. 따라서 그라운드훅 제어알고리즘은 구조물의 응답을 저감시키는데 효과적이다. 두 제어알고리즘은 평형위치에 대한 STMD의 변위(x_2) 및 주구조물의 변위(x_1)와 두 구조체의 상대속도($v_1 - v_2$)의 관계를 이용하여 식 (1)~(4)에 나타난 바와 같이 간단한 수식으로 정의된다. 식 (1)과 (2)는 스카이하크 제어알고리즘에서 감쇠력을 결정하기 위한 조건식이며, 식 (3)과 (4)는 그라운드훅 제어알고리즘의 조건식이다. 본 연구에서는 MR감쇠기를 사용하여 STMD를 구성하므로 제어알고리즘에 의해서 결정된 제어명령을 바탕으로 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 조절한다. 따라서 아래의 식에서 V_{max} 는 5volt를 V_{min} 은 0volt를 의미한다. 두 제어기 모두 구조물과 STMD의 변위 및 속도의 단순한 계산으로 제어명령을 결정하므로 계산량이 매우 작아서 실시간 제어에 상당히 유리하다. 벤치마크 문제의 제어목표는 구조물의 응답을 줄이는 것이지만 제어장치의 응답에도 제한이 있기 때문에 두 제어기에 의하여 결정된 MR 감쇠기의 감쇠력을 적절하게 조합해서 사용한다.

$$V = V_{max} \quad x_2(v_1 - v_2) \leq 0 \quad (1)$$

$$V = V_{min} \quad x_2(v_1 - v_2) > 0 \quad (2)$$

$$V = V_{max} \quad x_1(v_1 - v_2) \geq 0 \quad (3)$$

$$V = V_{min} \quad x_1(v_1 - v_2) < 0 \quad (4)$$

STMD의 변위를 줄이는데 적합한 스카이하크와 예제구조물의 응답을 줄이는데 적합한 그라운드훅 제어기에서 결정된 제어명령을 하나의 제어명령으로 조합하기 위하여 본 연구에서는 두 개의 제어명령을 조합하는데 가장 보편적으로 사용되는 가중합(weighted sum)방법을 사용하였다. 각 제어명

령에 가중치를 두어 합하는 가중합방법은 식 (5)에 나타난 바와 같이 0에서 1사이의 가중치(w)를 이용하여 손쉽게 두 제어명령을 조합할 수 있다.

$$V = w V_{sky} + (1 - w) V_{ground} \quad (5)$$

여기서, V_{sky} 는 스카이하크 제어기에 의해서 결정된 명령전압이고 V_{ground} 는 그라운드훅 제어기에 의해서 결정된 명령전압이다. 이러한 가중합 방법의 장점은 매우 간단히 두 제어명령을 조합할 수 있고 가중치를 변경함으로써 손쉽게 두 제어기의 참여도를 결정할 수 있다는 것이다. 가중치가 커지면 스카이하크 제어기의 참여도가 증가하고 그라운드훅 제어기의 참여도가 약해지므로 STMD의 동적변위는 감소하고 구조물의 응답이 증가하게 된다. 반대로 가중치가 작아지면 그라운드훅 제어기의 참여도가 커지므로 예제구조물의 응답이 감소하게 된다. 식 (5)에서 보는 바와 같이 가중치가 '0'인 경우에는 순수한 그라운드훅 제어기를 나타내고 가중치가 '1'인 경우에는 순수한 스카이하크 제어기를 나타낸다.

4. MOGA를 이용한 퍼지제어기의 최적화

4.1 다목적 최적화 및 목적함수

STMD가 설치된 고층건물의 응답을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기의 설계목적은 구조물의 응답을 줄이는 것과 STMD의 동적변위를 허용치 이하로 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. 이러한 경우에는 각각의 목적들 사이에 상치관계(trade-off)가 존재하게 되는데 여기서 어떠한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. STMD의 동적변위를 감소시키기 위해서는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 크게 하여 감쇠력을 크게 하는 것이 필요하다. 그러나 이러한 경우에는 STMD의 움직임이 줄어들어 주구조물의 응답을 제어하는 효과가 저감된다. 이와 같이 STMD를 제어하는 문제에 있어서는 상치관계가 STMD의 동적변위와 주구조물의 동적응답(주로 가속도) 사이에서 존재하게 된다. 본 연구에서는 다목적 최적화의 목적함수로서 예제구조물의 75층 가속도와 STMD의 변위를 선택하였다. 예제구조물의 최상층(76층) 응답대신에 75층 응답을 선택한 이유는 벤치마크문제에서 밝힌 바와 같이 최

상층에는 사람이 주거하지 않기 때문에 평가대상에서 제외되기 때문이다. 다목적 최적화 문제에서 하나의 최적해를 찾는 것은 거의 불가능하고 일련의 서로 우열을 가릴 수 없는 해의 집합(파레토 최적해)이 존재하게 된다. 구조공학과 관련된 다목적 최적화문제를 해결하는데 있어서는 구조엔지니어가 한 개의 최적해보다는 구조설계의 대안으로서 파레토 최적해 집합에 더 큰 관심을 가질 것이다. 유전자알고리즘은 많은 수의 개체(해)들을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 때문에 여러 개의 최적해를 동시에 찾는데 유전자알고리즘을 이용하는 것이 매우 자연스러운 일이다. Schaffer가 다목적 최적화 문제에 유전자알고리즘을 적용한 이후로 많은 수의 다목적 유전자알고리즘이 제안되었다. 그 중에서 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다. Deb 등(2000)이 제안한 이 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 계산시간을 대폭 줄였고 추가적인 파라미터 없이도 개체의 다양성을 유지하기 위하여 혼잡도 비교연산자를 도입하였다.

4.2 퍼지제어기의 구성 및 암호화(Encoding)

본 연구에서는 전술한 바와 같이 퍼지제어기를 사용하여 STMD를 제어하고 이 제어기는 NSGA-II를 이용하여 최적화된다. NSGA-II를 이용하여 퍼지제어기를 최적화하는 과정의 개념도를 그림 6에 나타내었다.

유전자알고리즘에서 각각의 개체들은 퍼지제어기를 나타내고 암호화(encoding)는 이러한 퍼지제어기의 유전적 표현방법이라고 말할 수 있다. 퍼지제어기를 구성하는데 필요한 모든 정보는 염색체라고 불리는 하나의 구조에 암호화된다. 본 연구에서는 모든 입력과 출력을 표현하기 위하여 가우스 소속함수를 사용하였다. 가우스 소속함수의 형태는 식 (6)에

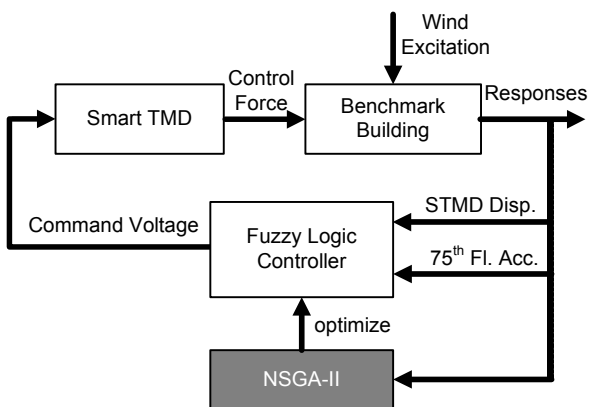


그림 6 NSGA-II를 이용한 퍼지제어기의 최적화 개념도

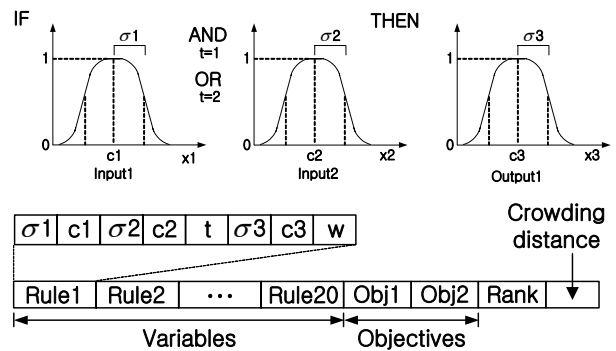


그림 7 염색체의 구성

나타낸 바와 같이 2개의 파라미터(c 와 σ)를 정의함으로써 결정된다. 여기서 c 는 중앙부의 위치, σ 는 표준편차를 각각 나타낸다. 이 두 가지 파라미터를 적절히 조절함으로써 다양한 형태의 가우스 소속함수를 표현할 수 있고, 이를 통하여 여러 가지 종류의 지식이 표현될 수 있다. 이 두 가지의 파라미터는 그림 7에서 보는 바와 같이 실수 표현방법으로 유전자에 암호화된다.

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

그림 7에 나타난 암호화 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 관계조건을 나타내는데 연결조건이 논리곱(AND)이라면 $t=1$ 로 그리고 연결조건이 논리합(OR)이라면 $t=2$ 로 표현한다. 그리고 각각의 제어규칙에 가중치(w)를 두어서 유전자알고리즘이 각각의 제어규칙이 전체 의사결정과정에 미치는 영향을 조절할 수 있도록 하였다. 염색체에는 전체 20개의 제어규칙이 사용되고 두 개의 목적함수에 대한 적합도 값 및 우선순위 등이 염색체의 뒷부분에 저장된다.

5. 수치해석결과

본 연구에서 사용한 유전자알고리즘인 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 500세대까지 수행하였다. 벤치마크문제에서 제시된 900초의 풍하중을 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 수치해석 시간간격은 0.001초를 사용하여 개발된 제어기의 진동제어 성능을 평가하였다. NSGA-II를 이용하여 최적화 작업을 수

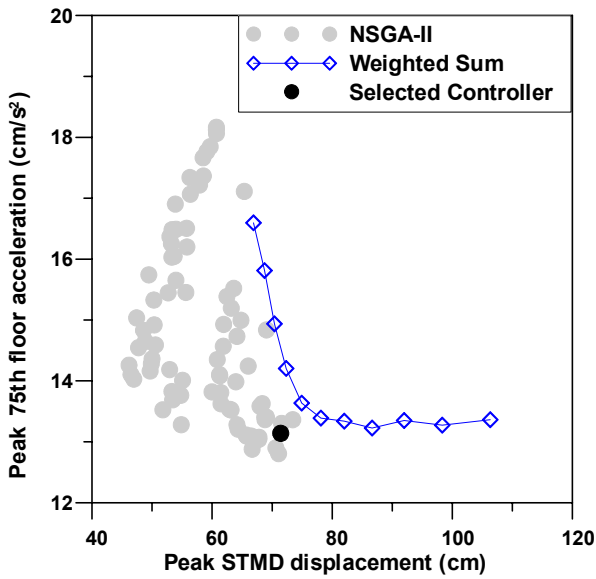


그림 8 제어알고리즘별 최대응답 비교

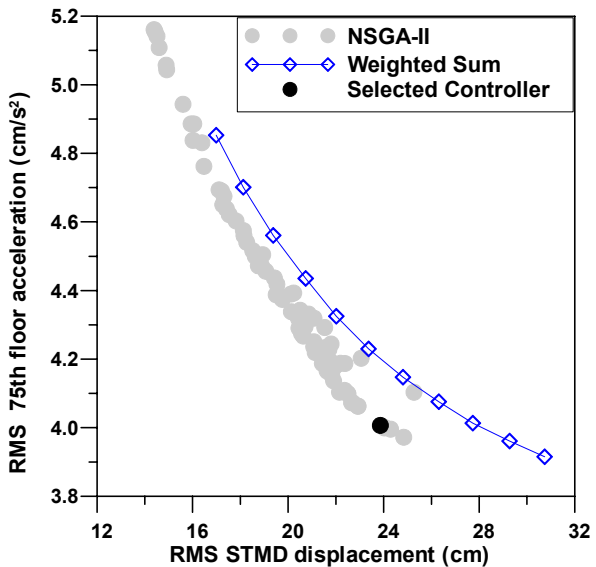


그림 9 제어알고리즘별 RMS응답 비교

행한 결과인 파레토 최적해집합을 비교대상 제어기와 제어성능을 비교하여 그림 8 및 9에 함께 나타내었다.

그림에서 NSGA-II에 의해서 최적화된 제어알고리즘의 파레토 최적해집합을 회색으로 나타내었다. 3.2절에서 설명한 그라운드훅 및 스카이훅 제어기를 가중합방법으로 조합한 제어알고리즘을 그래프에서 'Weighted Sum'으로 표현하였다. 이때 가중치를 0에서 1까지 0.1 간격으로 증가시켜서 수치해석을 수행하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대응답과 RMS응답 모두 NSGA-II에 의해서 최적화된 제어알고리즘이 'Weighted Sum' 제어알고리즘에 비해서 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 볼 수 있다. 특히 최대응답의 경우에는 STMD의 변위응답을 대폭 줄이면서도 가중합방법의 제어알고리즘에 비해서 더

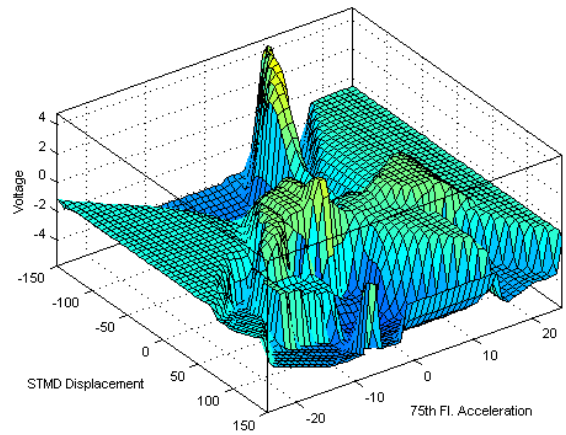


그림 10 제어규칙평면(rule surface)

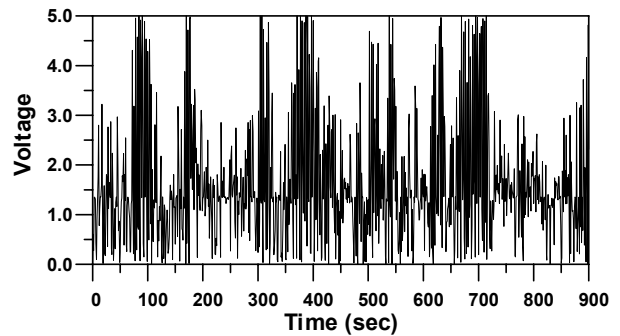


그림 11 명령전압 시간이력

우수한 제어성능을 나타내었다. 본 연구에서 제안한 NSGA-II를 이용한 최적화 기법을 이용하면 한 번의 최적화 과정으로 일련의 파레토 최적해 집합을 얻을 수 있고 파레토 최적해 집합에 속해있는 각각의 개체들은 암호화된 퍼지제어기를 나타낸다. 퍼지제어알고리즘의 파레토 최적해집합 중에서 최대응답과 RMS응답을 동시에 적절히 저감시킬 수 있는 제어알고리즘을 선택하여 그림에서 검정색으로 나타내었고 선택된 퍼지 제어알고리즘의 제어규칙평면(rule surface)을 그림 10에 나타내었다. 최대응답만을 고려한 경우에는 선택한 제어알고리즘보다 더욱 우수한 제어성능을 나타내는 알고리즘이 많지만 RMS응답을 동시에 고려하여 검정색으로 나타낸 퍼지제어알고리즘을 선택하였다.

구조물에 풍하중이 가해질 경우에 발생하는 동적응답 중에서 75층 가속도와 STMD의 변위를 그림 10에 나타낸 퍼지 제어알고리즘에 입력하면 MR 감쇠기로 전달될 명령전압이 출력된다. 벤치마크문제에서 제시한 900초의 풍하중을 예제 구조물에 가했을 경우에 퍼지제어기에 의해서 출력되는 명령전압 시간이력을 그림 11에 나타내었다.

그림 11을 보면 선택된 퍼지제어알고리즘이 0volt에서 5volt까지 적절하게 분포된 명령전압을 생성할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 STMD의 변위가 과도하면 명령전압을

표 1 스카이훅, 그라운드훅 및 퍼지제어기에 따른 응답의 비교(단위: cm, cm/s²)

층	그라운드훅(w=0)				스카이훅(w=1)				퍼지제어기			
	최대값		RMS값		최대값		RMS값		최대값		RMS값	
	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도	변위	가속도
1	0.04	0.22	0.01	0.06	0.04	0.21	0.01	0.06	0.04	0.21	0.01	0.06
30	4.93	3.74	1.24	0.95	5.47	4.15	1.40	1.14	4.89	3.75	1.26	0.97
50	11.69	7.18	2.99	2.02	13.04	8.26	3.37	2.54	11.60	6.93	3.03	2.08
55	13.60	8.23	3.49	2.34	15.18	9.21	3.94	2.95	13.49	8.23	3.54	2.41
60	15.56	9.37	4.01	2.66	17.38	10.76	4.53	3.36	15.44	9.04	4.06	2.73
65	17.56	10.26	4.54	3.05	19.63	12.33	5.13	3.84	17.42	10.03	4.60	3.13
70	19.58	11.67	5.08	3.42	21.90	13.99	5.75	4.33	19.42	11.31	5.15	3.52
75	21.67	13.36	5.64	3.91	24.25	16.60	6.38	4.85	21.49	13.14	5.71	4.01
76	22.14	14.53	5.77	3.98	24.77	17.34	6.52	4.98	21.95	14.38	5.84	4.08
STMD	106.32	109.06	30.74	30.55	66.89	72.40	16.99	18.03	71.46	78.42	23.87	23.96

크게 하여 STMD의 동적거동을 줄이게 되고 75층 가속도 응답이 크게 되면 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 줄여서 STMD의 동적거동을 크게 하여 구조물의 응답을 효과적으로 제어하도록 한다. 900초 동안 퍼지제어기에 의하여 생성된 명령전압의 평균값은 1.61volt로서 최대값인 5volt에 비하여 작은 값이다. 이것은 퍼지제어기가 STMD의 동적응답보다는 주로 예제구조물의 가속도응답을 효과적으로 줄일 수 있도록 명령전압을 생성하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 9에서 볼 수 있듯이 파레토 해집합에 속한 다수의 퍼지제어기 중에서 STMD 변위보다는 75층 가속도를 효과적으로 줄일 수 있는 제어기를 선택했기 때문이다. 따라서 엔지니어가 STMD를 효과적으로 줄일 수 있는 제어기를 원한다면 파레토 해집합 중에서 그러한 특성을 가진 제어기를 선택하면 되므로 한 번의 최적화 과정을 통해서 간단히 원하는 특성을 가진 제어기의 대안을 선택할 수 있다.

선택한 퍼지제어기를 적용하여 STMD를 제어하였을 경우의 응답을 그라운드훅 및 스카이훅 제어기를 사용하여 제어한 경우와 비교하여 표 1에 나타내었다. 표 1을 보면 그라운드훅 제어기를 사용한 경우는 STMD의 응답보다는 예제구조물의 응답을 매우 효과적으로 제어하므로 제어기의 설계의도에 잘 부합하는 것을 알 수 있다. 그러나 STMD의 최대변위 및 RMS 변위가 제한조건인 95cm와 30cm를 각각 초과하므로 벤치마크문제의 제어목표를 만족시키지 못한다. 스카이훅 제어기의 경우에는 STMD의 변위응답을 매우 효과적으로 저감시키지만 75층 최대 가속도 응답이 제어목표인 15cm/s²을 초과한다. 이에 반하여 본 연구에서 개발한 퍼지제어알고리즘은 그라운드훅 제어기와 비슷한 제어성능을 보이면서도 STMD의 동적 변위를 제한조건 이하로 대폭 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 2.1절에서 설명한 성능평가지수를 사용하

표 2 제어장치별 성능평가지수의 비교

Index	STMD	TMD	ATMD
J_1	0.438	0.589	0.369
J_2	0.431	0.583	0.417
J_3	0.576	0.681	0.578
J_4	0.578	0.682	0.580
J_5	2.355	1.258	2.271
J_6	2.533	1.358	11.988
J_7	0.433	0.652	0.381
J_8	0.450	0.637	0.432
J_9	0.680	0.786	0.717
J_{10}	0.688	0.794	0.725
J_{11}	2.212	1.319	2.299
J_{12}	2.342	1.384	71.869

여 퍼지제어알고리즘으로 제어한 STMD의 제어성능을 검토하여 보았다. 벤치마크문제에서 제시한 샘플 TMD 및 ATMD의 성능평가지수와 함께 STMD의 성능평가지수를 표 2에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 STMD의 제어성능은 TMD에 비해서는 매우 우수한 것을 알 수 있다. STMD의 제어성능을 ATMD와 비교해 보면 가속도응답(J_1, J_2, J_7, J_8)에 대해서는 ATMD가 더 우수한 제어성능을 나타내지만 변위응답(J_3, J_4, J_9, J_{10})에 대해서는 STMD가 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 76층 벤치마크건물의 제어시 사용된 RMS 제어력(J_6) 및 최대제어력(J_{12})은 ATMD에 비해 STMD가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

STMD가 설치된 76층 벤치마크건물의 풍응답 중에서 본 연구에서 가장 중요하게 고려하고 있는 75층 가속도 응답 및 STMD 변위응답의 시간이력을 그림 12와 13에 나타내었다. 풍응답의 변화를 보다 명확하게 확인하기 위하여 전체 900

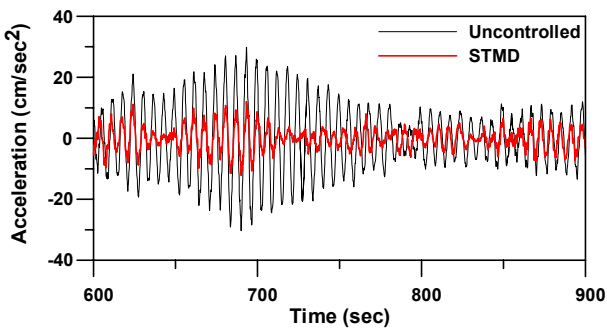


그림 12 75층 가속도 시간이력

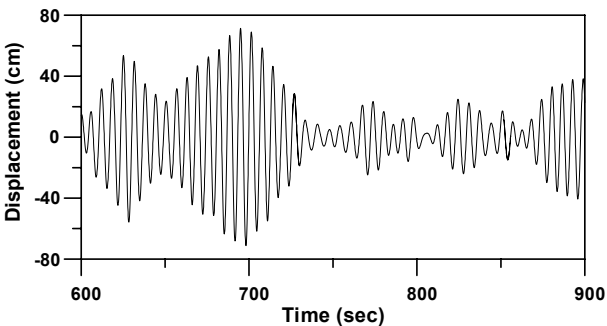


그림 13 STMD 변위 시간이력

초의 시간이력해석 결과 중에서 응답이 가장 큰 600-900 초 구간만을 그래프에서 나타내었다. 그림 12에는 STMD로 제어한 경우와 제어하지 않은 경우의 75층 가속도 응답을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 STMD를 사용하여 76층 벤치마크건물의 가속도 응답을 효과적으로 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 특히 구조물의 응답이 비교적 작은 800초 구간대보다 응답이 과도한 700초 구간대에서 STMD의 효율성이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 13을 보면 구조물의 응답이 클수록 STMD의 동적움직임도 함께 커지는 것을 알 수 있고 전 구간에 걸쳐서 STMD 변위의 제한조건인 95cm를 여유있게 만족시키는 것을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 풍하중을 받는 76층 벤치마크 건물의 동적 응답을 저감하기 위하여 MR 감쇠기로 구성된 STMD를 적용하였고 이를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지제어알고리즘을 개발하였다. 퍼지제어알고리즘의 최적화를 위하여 다목적유전자알고리즘인 NSGA-II를 이용하였고 서로 상치관계에 있는 예제구조물의 75층 가속도응답과 STMD의 동적변위를 목적함수로 사용하였다. 최적화과정을 통하여 75층의 가속도응답과 STMD의 변위를 동시에 적절하게 줄일 수 있는 파레토 최적해집합을 얻을 수 있었다. 널리 사용되고 있는 준능동 제어알고리즘인 스카이훅 제어기와 그라운드훅 제

어를 가중합방법으로 조합한 비교대상 제어알고리즘에 비하여 본 연구에서 제안한 최적화 과정을 통해서 얻은 일련의 퍼지제어알고리즘들이 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 파레토 최적해집합에 속하는 퍼지제어알고리즘들은 서로 우열을 가질 수 없는 최적해로서 엔지니어가 각각의 퍼지제어알고리즘이 제공하는 제어성능을 평가하여 적절한 제어기를 선택할 수 있다. 즉, 다목적 최적화에서는 하나의 최적해를 제공하는 것이 아니라 엔지니어가 선택할 수 있는 다양한 대안을 한 번의 최적화 과정으로 효과적으로 생성해 낼 수 있다. 파레토 최적해집합 중에서 적절한 퍼지 제어알고리즘을 선택하여 STMD의 제어에 적용시켜 수치해석을 한 결과 벤치마크 문제의 제한조건을 만족시키면서 제어목표를 달성할 수 있었다. 또한 모든 평가기준에 있어서 샘플 TMD에 비해서 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 벤치마크 문제에서 제시한 샘플 ATMD의 제어성능과 비교하여 본 결과 STMD의 제어성능은 가속도 제어에 있어서는 ATMD보다 저하된 결과를 보여주었지만 변위응답의 제어에 있어서는 ATMD보다 더 우수한 성능을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S., Meyarivan, T. (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.
- Dyke, S.J. (2005) Current Directions in Structural Control in the US, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, pp.1~22.
- Jansen, L.M., Dyke, S.J. (2000) Semi-Active Control Strategies for MR Dampers: A Comparative Study, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 126, pp.795~803.
- Kareem, A., Kijewski, T. (1999) Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, *Wind and Structures*, 2(3), pp.201~251.
- Koo, J.H. (2003) Using Magneto-Rheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control

- Structural Vibrations, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- Koo, J.H., Ahmadian, M., Setareh, M.** (2006) Experimental Robustness Analysis of Magneto-Rheological Tuned Vibration Absorbers Subject to Mass Off-Tuning, *Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 128(1), pp.126~131.
- Koo, J.H., Setareh, M., Murray, T.M.** (2004) In Search of Suitable Control Methods for Semi-Active Tuned Vibration Absorbers, *Journal of Vibration and Control*, 10, pp.163~174.
- Nagarajaiah, S.** (2009) Adaptive Passive, Semiactive, Smart Tuned Mass Dampers: Identification and Control using Empirical Mode Decomposition, Hilbert Transform and Short-Term Fourier Transform, *Structural Control and Health Monitoring*, 16, pp.800~841.
- Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Johnson, E.A., Gavin, H.P.** (2006) Smart Base-Isolated Benchmark Building. Part I: Problem Definition, *Structural Control and Health Monitoring*, 13, pp.573-588.
- Nishitani, A., Inoue, Y.** (2001) Overview of the Application of Active/Semiactive Control to Building Structures in Japan, *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, 30, pp.1565~1574.
- Samali, B., Kwok, K.C.S., Wood, G.S., Yang, J.N.** (2004) Wind Tunnel Tests for Wind-Excited Benchmark Building, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 130(4), pp.447~450.
- Spencer, B.F.Jr, Johnson, E.A., Ramallo, J.C.** (2000) Smart Isolation for Seismic Control, *JSME Int J Ser C*, 43(3), pp.704~711.
- Yang, J.N., Agrawal, A.K., Samali, B., Wu, J.C.** (2004) Benchmark Problem for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 130(4), pp.437~446.
- 논문접수일 2010년 7월 31일
 - 논문심사일 2010년 8월 5일
 - 게재확정일 2010년 10월 18일