

적응형 스마트 공유 TMD의 MIMO 제어알고리즘개발

Development of Multi-Input Multi-Output Control Algorithm for Adaptive Smart Shared TMD

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

A shared tuned mass damper (STMD) was proposed in previous research for reduction of dynamic responses of the adjacent buildings subjected to earthquake loads. A single STMD can provide similar control performance in comparison with two traditional TMDs. In previous research, a passive damper was used to connect the STMD with adjacent buildings. In this study, a smart magnetorheological (MR) damper was used instead of a passive damper to compose an adaptive smart STMD (ASTMD). Control performance of the ASTMD was investigated by numerical analyses. For this purpose, two 8-story buildings were used as example structures. Multi-input multi-output (MIMO) fuzzy logic controller (FLC) was used to control the command voltages sent to two MR dampers. The MIMO FLC was optimized by a multi-objective genetic algorithm. Numerical analyses showed that the ASTMD can effectively control dynamic responses of adjacent buildings subjected to earthquake excitations in comparison with a passive STMD.

Keywords : MR damper, Seismic response control, Fuzzy logic controller, Shared tuned mass damper, Multi-objective genetic algorithms, Coupled building control

1. 서 론

대도시 등지에서 건설되는 고층건물의 동적응답을 제어하기 위한 인접건물의 연결제어(coupled building control)에 대한 연구가 Klein 등⁽¹⁾과 Kunieda⁽²⁾의 연구 이래로 다수 수행되어 왔다. 이와 관련된 연구는 주로 다양한 형태의 수동형 감쇠기로 인접한 건물들을 연결하여 구조물의 동적응답을 저감시키거나^(3,4) 지진하중시 발생하는 인접건물의 충돌에 의한 효과(pounding effect)를 저감시키는 방향^(5,6)으로 수행되고 있다. 근래에 와서는 인접한 건물을 연결할 때 수동형 감쇠기 대신에 MR(magnetorheological) 감쇠기와 같은 능동 동역학 또는 액추에이터와 같은 능동 감쇠기를 사용하여 외부

하중의 특성에 따라 구조물을 효과적으로 제어할 수 있는 기술에 대한 연구도 제안되었다^(7,8).

인접하여 건설된 두 개 이상의 건물을 다양한 형태의 감쇠기를 사용하여 직접 연결함으로써 연결된 건물의 동적응답을 저감시킬 수 있는 방법 이외에 구조물의 동적응답을 저감시키기 위하여 가장 널리 사용되고 있는 제어장치 중의 하나인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)를 인접한 건물에서 서로 공유해서 사용해 보자는 새로운 접근 방법이 2000년대 초에 제안되었다⁽⁹⁾. 하나의 TMD를 인접하여 건설된 각각의 빌딩 구조물에서 서로 공유하여 사용하면서 충분한 제어성능을 발휘할 수 있다면 각각의 TMD를 설치하기 위해서 필요한 질량 및 감쇠장치의 설계, 시공을 위한 직접적인 경제적 비용뿐만 아니라 TMD 설치공간의 저감으로 인한 임대공간의 증대 등으로 간접적인 비용을 절감할 수 있을 것이다. 선행 연구⁽⁹⁾에서는 이러한 공유형 TMD(Shared TMD; STMD)를 제안하였고 각각의 건물에 TMD를 설치한 일반적인 시스템과 비교하

* 정희원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수
Div. of Architectural & Civil Engrg, Sunmoon University

** 교신저자, 정희원, 영남대학교 건축학부 교수
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

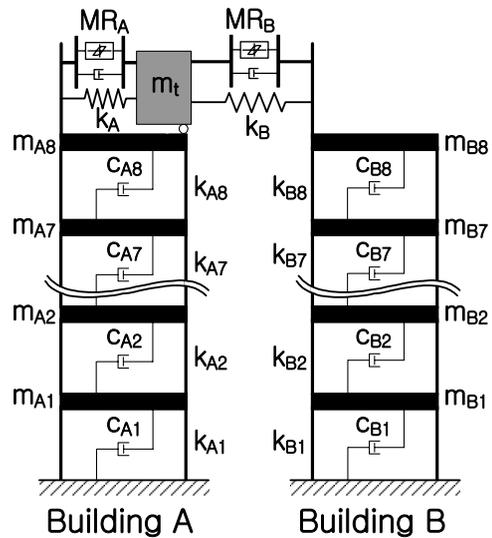
여 비슷하거나 조금 뒤쳐지는 제어성능을 발휘하는 것을 보여줌으로써 인접건물 연결제어에 대한 새로운 가능성을 제시하였다. 이러한 STMD의 효과적인 설계를 위하여 다목적 유전자알고리즘을 이용한 최적설계기법에 대한 연구도 수행된 바 있다⁽¹⁰⁾. 그러나 이러한 STMD에 대한 연구들은 TMD를 인접건물과 연결하기 위해서 모두 수동 감쇠기만을 사용하였고 최근 진동제어 분야에서 각광을 받고 있는 준능동 MR 감쇠기를 사용한 연구는 아직 발표된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 인접한 건물의 효율적인 동적응답 제어를 위하여 STMD를 MR 감쇠기를 사용하여 건물과 연결하는 적응형 스마트 공유 TMD (Adaptive Smart STMD; ASTMD)를 제안하였고 제어성능 및 적용 가능성을 검토하여 보았다. ASTMD가 효과적인 제어성능을 나타내기 위해서는 적절한 제어알고리즘을 개발하는 것이 매우 중요하다. 특히 본 연구에서는 ASTMD를 구성하기 위해서 2개의 MR 감쇠기가 사용되므로 MIMO 형태의 제어알고리즘이 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 비선형 거동이 큰 감쇠장치의 제어에 우수한 성능을 나타내는 것으로 알려진 MIMO 퍼지제어기 (Fuzzy Logic Controller; FLC)를 개발하였다. 사용된 MIMO FLC를 최적화하기 위하여 유전자알고리즘을 사용하였다. ASTMD가 연결된 개개의 구조물 응답을 저감시키는 것은 서로 상충되는 특징을 가지고 있으므로 두 목표를 동시에 만족시킬 수 있는 최적의 퍼지제어기를 만들기 불가능하다. 따라서 다목적 유전자 알고리즘⁽¹¹⁾을 이용하여 두 목표에 대한 퍼지제어기의 파레토 최적해집합을 구하였다. 이러한 과정을 통하여 ASTMD의 최적설계 및 지진 응답 제어성능을 검토하였다.

2. 예제구조물과 인공지진하중

본 연구에서는 <Fig. 1>에 나타난 바와 같이 두 개의 8층 예제구조물을 사용하여 해석모델을 구성하였다. 예제구조물은 각 층별 집중질량(m_i)과 기둥 강성(k_i) 및 점성감쇠(c_i)로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였다. 본 연구에서 사용한 예

제구조물의 특성치는 선행연구와 동일하게 두었다⁽⁹⁾. 즉, 건물 A와 B의 층 질량인 m_{Ai} 와 m_{Bi} 를 각각 $3.5 \times 10^5 kg$ 와 $4 \times 10^5 kg$ 로 두었고 층 강성인 k_{Ai} 와 k_{Bi} 를 $3.404 \times 10^8 N/m$ 와 $6.127 \times 10^8 N/m$ 로 각각 두었다. 또한 건물 A와 B의 층 감쇠인 c_{Ai} 와 c_{Bi} 를 동일하게 $1.0 \times 10^5 N/m/s$ 로 두었다. 본 연구에서 사용한 8층의 일반구조물을 이용하여 고유치 해석한 결과 건물 A 및 건물 B의 5개 저차모드 고유진동주기는 1.09, 0.37, 0.23, 0.17, 0.14초와 0.87, 0.29, 0.18, 0.13, 0.11초로 나타났다.

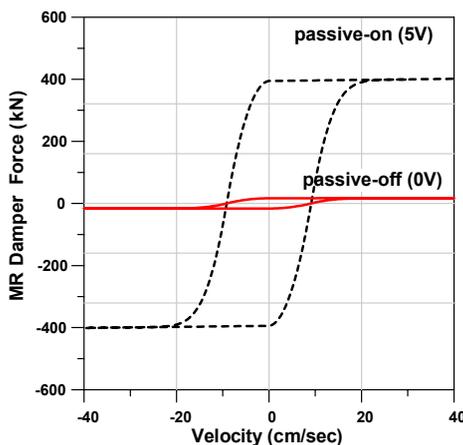


<Fig. 1> Example structure models

본 연구에서 제안된 ASTMD의 진동제어성능을 비교·검토하기 위하여 제어장치가 사용되지 않은 일반건물과 함께 각각의 건물에 전통적인 수동 TMD를 사용하여 제어한 경우를 고려하였다. 또한 선행 연구에서 수행한 수동 공유형 TMD의 제어성능도 비교하였다. 수동 TMD를 구성하기 위해서 가장 중요한 것은 TMD의 질량을 결정하는 것이다. 본 연구에서는 설치되는 TMD의 질량을 건물 A 및 B의 최상층 질량의 15%로 두었다. 즉, 건물 A에 설치되는 TMD의 질량은 $5.25 \times 10^4 kg$ 이고 건물 B에 설치되는 TMD의 질량은 $6.0 \times 10^4 kg$ 이다. 독립된 건물에 설치된 TMD가 최적의 성능을 발휘하기 위해서는 TMD의 강성 및 감쇠비의 최적값을 찾는 것이 필요하다. 본 연구에서는 Warburton⁽¹³⁾의 연구에서

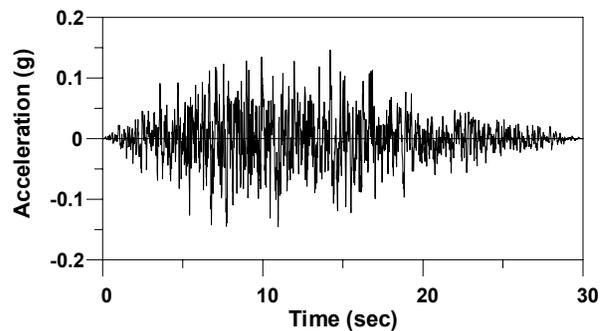
제시한 랜덤지반가속도가 구조물에 가해질 경우에 대한 TMD의 최적 감쇠비 및 고유진동수비를 사용하였다. 이 식에 의해서 계산된 최적감쇠비는 6.8%이고 고유진동수비는 0.977이다. ASTMD의 경우에는 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 하나의 질량만을 사용하므로 두 개의 일반적인 수동 TMD 질량의 평균값인 $5.625 \times 10^4 kg$ 로 하였다. ASTMD 및 TMD로 연결된 인접한 두 건물 A와 B가 지진하중을 받는 경우의 운동방정식의 유도방법은 선행연구⁽¹⁰⁾에서 상세히 기술하였다.

ASTMD는 <Fig. 1>에서 보는 바와 같이 하나의 TMD를 두 건물에서 공유하여 사용하고 있고 각각의 건물과 TMD가 MR 댐퍼로 연결되어 있다. 이때 ASTMD를 두 건물에 연결하는 MR 댐퍼의 특성을 어떻게 설정하느냐에 따라서 진동제어 성능이 달라진다. 이러한 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델⁽¹²⁾을 사용하였다. 이 모델은 전단형태의 MR 감쇠기의 거동을 잘 모사하며 실제규모의 MR 감쇠기 모델링에도 효과적으로 적용될 수 있다고 알려져 있다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 최대용량이 400 N을 가지도록 설계된 모델로서 입력전압이 0V일 때 passive-off 상태를, 5V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기의 입력전압에 따른 이력거동 변화 그래프를 <Fig. 2>에 나타내었다.



<Fig. 2> Force-Velocity relationship of MR damper

우리나라가 속한 중약진지역의 특성을 나타내는 지반운동성분을 생성하기 위하여 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 바탕으로 설계응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성시 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_B 의 보통암 지반으로 선택하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도 시간이력을 <Fig. 3>에 나타내었다. 생성된 지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다.



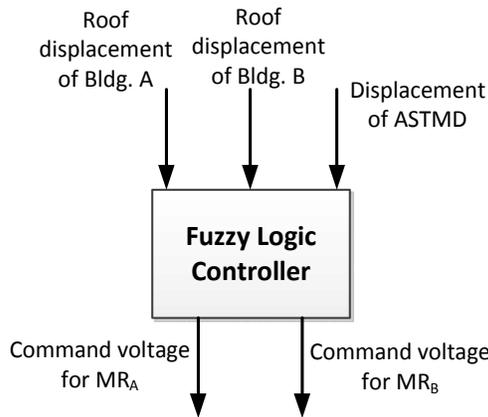
<Fig. 3> Artificial earthquake

3. ASTMD의 제어알고리즘 개발

진술한 바와 같이 ASTMD가 효과적인 제어성을 나타내기 위해서는 사용된 MR 감쇠기를 적절하게 제어할 수 있는 제어알고리즘과 함께 ASTMD가 두 건물과 연결되는 강성을 결정하는 것이 필요하다. 현재까지 공유형 TMD의 최적설계에 대한 연구가 수행된 바가 없다. 따라서 본 연구에서는 기존 일반 TMD의 최적설계방법⁽¹³⁾을 따라서 ASTMD와 두 건물을 연결하는 강성을 결정하였다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 Warburton의 연구에서 제안한 방법으로 계산한 최적의 고유진동수비는 0.977이다. 이 값을 이용하면 ASTMD가 건물 A 및 건물 B와 연결되는 강성 (k_A 및 k_B)은 각각 $1.66 \times 10^6 N/m$ 와 $2.99 \times 10^6 N/m$ 로 계산된다.

본 연구에서는 제어알고리즘으로 MR 감쇠기의 비선형성을 고려하여 복잡하고 불확실하며 애매한 조건아래서 매우 우수한 제어성을 나타내는 퍼지 논리제어기(Fuzzy Logic Controller)를 사용하였다.

퍼지논리제어기는 고유의 견실성(robustness)과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력이 있기 때문에 본 연구에서 사용하는 MR 감쇠기를 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 기대된다. ASTMD를 제어하기 위한 퍼지제어 알고리즘을 개발하기 위해서는 우선 입력변수 및 출력변수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 <Fig. 4>에 나타낸 바와 같이 건물 A 및 건물 B의 최상층 변위와 ASTMD의 변위를 입력변수로 선택하였고 건물 A 및 B와 연결되는 각각의 MR 감쇠기에 전달되는 명령전압을 출력변수로 선택하였다. 이것은 일반적인 제어알고리즘의 형태인 다중입력 단일출력(Multi-Input Single-Output; MISO)의 형태가 아니라 다중입력 다중출력(Multi-Input Multi-Output; MIMO)의 형태를 띠고 있다. 따라서 두 개의 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압이 서로 독립적으로 계산되지 않고 상호작용을 고려하여 최적화 되므로 MISO보다 효과적인 제어성능을 발휘할 수 있다.



<Fig. 4> Inputs and outputs of FLC

사용한 퍼지제어알고리즘을 최적설계하기 위해 입출력 변수에 대한 소속함수를 결정해야 하고 이들 간의 관계를 퍼지제어규칙으로 연결시켜주어야 한다. 본 연구에서는 이를 위하여 여러 개의 목적을 동시에 최적화할 수 있는 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 ASTMD를 위한 퍼지제어알고리즘을 최적화 하였다.

본 연구에서 제안한 ASTMD는 동적특성이 다른 건물 A와 건물 B에 동시에 연결되어 있기 때문에

어느 한 건물의 지진응답제어를 위해서 최적의 제어성능을 발휘한다면 다른 건물에 대해서는 그렇지 않을 것이다. 즉, 연결된 두 건물에 대해서 동시에 최적성능을 나타내는 것은 불가능하다. 따라서 이 문제는 하나의 목적을 만족시키는 것이 아니라 여러 개의 목적에 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 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 즉, 건물 A와 건물 B의 지진응답을 동시에 최적으로 저감시킬 수 없으므로 두 구조물의 동적응답 사이에서 상치관계가 존재하게 된다.

본 연구에서는 상치되는 건물 A 및 건물 B의 최상층 최대치 변위응답의 제어를 최적화의 목적으로 선택하였다. 이 값들을 선행연구⁽¹⁰⁾에서 수행한 최적 설계된 수동 공유형 TMD의 응답으로 나누어 정규화된 비율을 <Table 1>에 나타낸 바와 같이 본 연구의 목적함수로 선정하였다. 따라서 목적함수의 값이 1보다 작을수록 ASTMD의 제어성능이 수동 공유형 TMD보다 우수하다는 것을 나타낸다.

<Table 1> Multi-objective functions

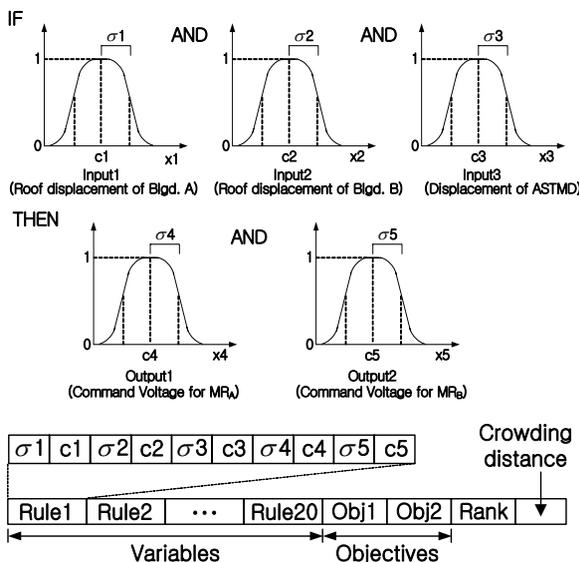
Objective function	Description
J1	Top floor peak displacement of building A with ASTMD
	Top floor peak displacement of building A with STMD
J2	Top floor peak displacement of building B with ASTMD
	Top floor peak displacement of building B with STMD

다목적 유전자알고리즘을 이용하여 ASTMD를 최적설계하기 위해서는 ASTMD를 구성하는데 필요한 모든 정보가 염색체(chromosome)라고 불리는 구조에 암호화(encoding)되어 유전적으로 표현되어야 한다. 본 연구에서는 퍼지제어기의 모든 입력과

출력을 표현하기 위하여 가우스 소속함수를 사용하였다. 가우스 소속함수의 형태는 식 (1)에 나타난 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 <Fig. 5>에서 보는 바와 같이 실수 표현방법으로 유전자에 암호화된다.

$$\mu = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

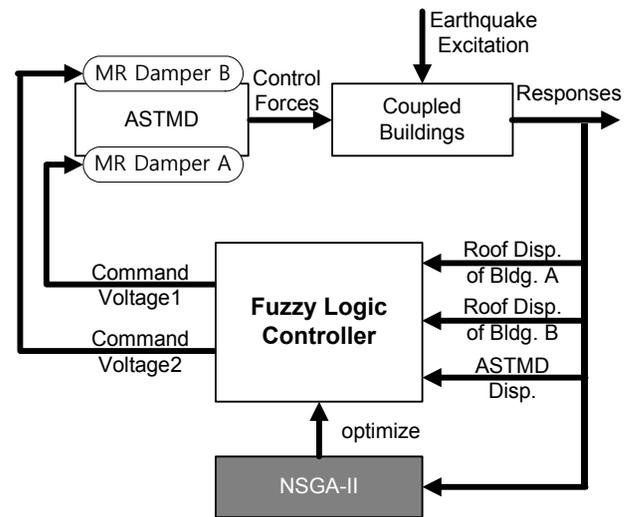
<Fig. 5>에 나타난 암호화 방법은 모든 염색체에 적용된다. 여기서 하나의 퍼지 규칙은 세 개의 입력(x_1, x_2, x_3)과 두 개의 출력(x_4, x_5)으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 세 개의 입력 및 두 개의 출력 사이의 관계조건은 논리곱(AND)으로 설정하였다. 염색체에는 전체 20개의 제어규칙이 사용되고 두 개의 목적함수에 대한 적합도 값 및 우선순위 등이 염색체의 뒷부분에 저장된다.



<Fig. 5> Configuration of chromosome

지금까지 다양한 특성을 가진 유전자 알고리즘이 개발되어 사용되고 있는데 그 중에서 본 연구에서

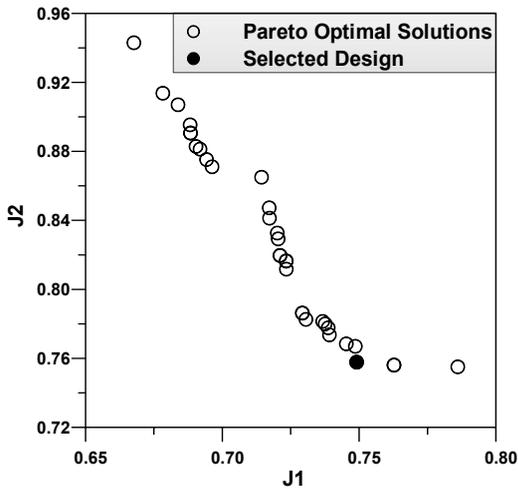
는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)⁽¹¹⁾를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다. <Fig. 6>에 STMD 최적화를 위한 NSGA-II의 작업과정을 나타내었다.



<Fig. 6> Optimization process of NSGA-II

4. ASTMD를 위한 MIMO 제어알고리즘 성능평가

본 연구에서 사용한 유전자알고리즘인 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 예제구조물에 지진하중을 가하여 시간이력해석을 수행한 후 적합도함수값을 계산하였다. NSGA-II를 이용하여 최적화 작업을 수행한 결과인 파레토 최적해 집합을 <Fig. 7>에 나타내었다. 최적화 결과인 파레토 최적해 집합을 보면 모든 개체의 J1과 J2의 값이 '1'보다 작으므로 ASTMD가 수동 STMD에 비해서 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 그림에 나타난 파레토 최적해 집합의 각 개체는 MIMO 퍼지제어알고리즘을 나타낸다. 최적해 집합을 보면 J1의 값이 J2의 값보다 더 작은 것을 알 수 있다. 이것은 ASTMD가 건물 B보다 건물 A를 더 효과적으로 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용한 예제구조물 A의 질량이 건물 B의 질량보다 더 작기 때문인 것으로 판단된다.



<Fig. 7> Pareto optimal solutions

<Fig. 7>에 나타난 여러 개의 Pareto 최적해 집합 중에서 검정색 원으로 표시한 설계안을 선택하여 퍼지제어기를 작성하였다. 선택한 설계안의 J1 및 J2 값은 각각 0.75와 0.76이다. 즉, 선택한 퍼지제어기로 ASTMD를 제어하면 수동 STMD에 비하여 건물 A는 25%, 건물 B는 24%의 최상층 최대치 응답을 더 저감시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이렇게 선택한 MIMO 퍼지제어기를 사용하여 ASTMD를 제어하였고 인공지진이 가해지는 예제구조물의 지진 응답 제어성능을 검토하여 보았다. 이를 위해서 건물 A와 B의 최상층 최대응답 및 RMS 응답을 정리하여 <Table 2, 3>에 나타내었다. 제어성능의 비교를 위하여 제어하지 않았을 경우와 일반적인 TMD를 사용한 경우 및 수동 STMD를 사용한 경우를 함께 나타내었다. 각 응답 값 옆에는 제어장치를 사용했을 때의 응답을 제어하지 않았을 때(uncontrolled)의 응답으로 나누어 퍼센트 비율로 표현하였다. 각 표에서 변위의 단위는 'cm'이다.

<Table 2> Peak displacement of roof floor

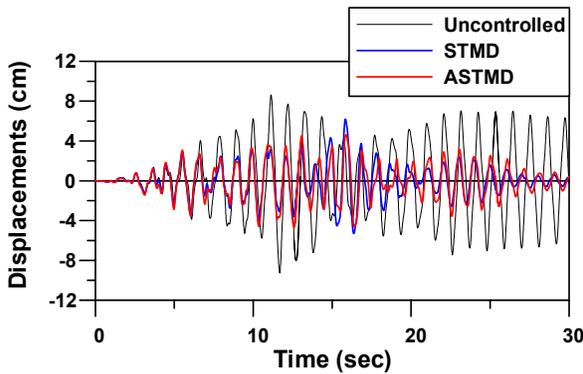
	Building A	Building B
Uncontrolled	9.26	10.15
TMD	6.12 (66.1%)	3.84 (37.8%)
STMD	6.19 (66.8%)	3.92 (38.6%)
ASTMD	4.64 (50.1%)	2.97 (29.3%)

<Table 3> RMS displacement of roof floor

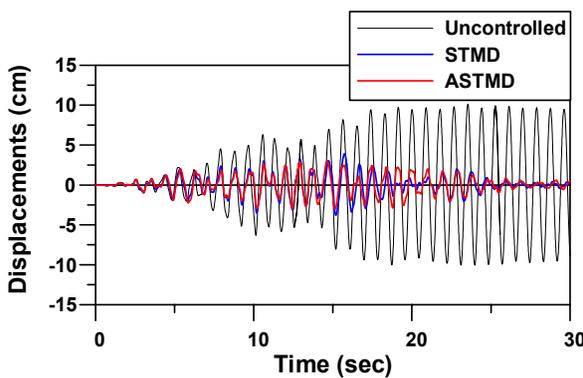
	Building A	Building B
Uncontrolled	3.68	5.14
TMD	1.63 (44.3%)	1.24 (24.1%)
STMD	1.69 (45.9%)	1.24 (24.1%)
ASTMD	1.77 (48.1%)	1.21 (23.5%)

본 연구에서 제어알고리즘 최적화의 목표로 삼았던 예제구조물 최상층 최대치응답을 보면 제어하지 않은 경우에 비하여 전통적인 수동 TMD를 2개 사용한 결과를 보면 건물 A와 B의 응답이 각각 61.6%와 37.8%로 대폭 줄어든 것을 알 수 있다. 특히, 건물 A에 비하여 건물 B의 응답을 더욱 효과적으로 제어할 수 있었다. 한 개의 수동형 STMD를 사용한 경우에는 건물 A 및 B 모두 2개의 TMD를 사용한 경우에 비하여 응답이 조금 씩 증가하였지만 질량 제어장치의 설치비용 등을 고려한 경제적 측면을 고려하였을 때에는 효과적인 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안한 하나의 ASTMD를 사용한 경우에는 2개의 TMD를 사용한 경우와 비교해서도 더 우수한 제어성능을 나타내었고 결과적으로 제어하지 않은 경우에 비하여 건물 A의 응답은 약 절반으로 건물 B의 응답은 30%이하로 대폭 줄일 수 있었다. <Table 3>의 RMS 응답을 보면 건물 B의 경우에는 ASTMD가 STMD보다 더 우수한 제어성능을 보이지만 건물 A의 경우에는 오히려 더 증가한 것을 볼 수 있다. 이것은 MIMO 퍼지 제어알고리즘을 최적화할 때 RMS 응답을 배제하고 최대치 응답만을 목적함수로 선택했기 때문이다. 따라서 RMS 응답에 대한 제어성능을 개선시키기 위해서는 RMS 응답제어를 목적함수로 추가하여 최적화하는 것이 필요하다고 판단된다.

인공지진하중을 받는 두 예제건물의 최상층 변위 시간이력을 제어하지 않은 경우, 수동 STMD를 사용한 경우, 준능동 ASTMD를 사용한 경우에 대하여 비교한 결과를 <Fig. 8, 9>에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제어하지 않은 경우에 비하여 STMD를 사용하여 제어한 경우의 응답이 크게 줄어드는 것을 알 수 있고 ASTMD가 STMD에 비하여 최대치 응답을 저감시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다.

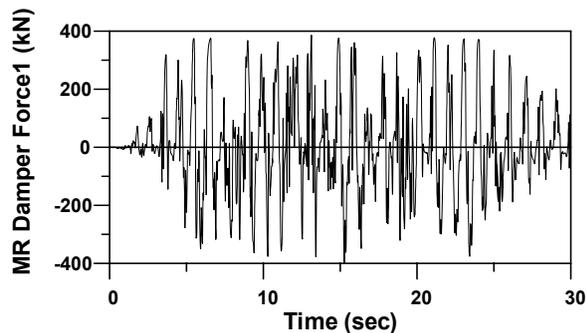


〈Fig. 8〉 Top floor displacement of Bldg. A

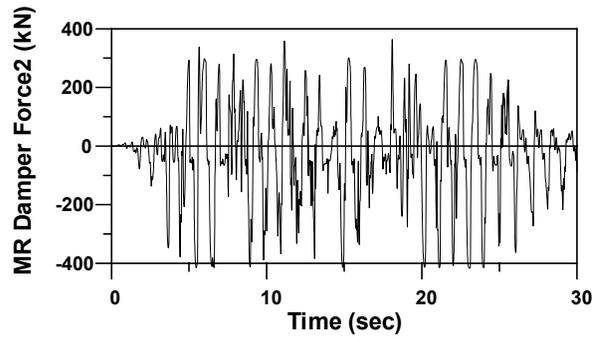


〈Fig. 9〉 Top floor displacement of Bldg. B

본 연구에서는 적응형 스마트 공유 TMD를 효과적으로 제어하기 위하여 MIMO 퍼지제어알고리즘을 사용하였고 다목적 유전자알고리즘으로 최적화하였다. 개발된 MIMO FLC에서는 연결된 두 구조물의 응답과 ASTMD의 응답을 바탕으로 해서 두 건물과 연결된 각각의 MR 감쇠기에 전달될 명령전압을 실시간으로 생성하게 되고 이에 따라 <Figs. 10, 11>에 나타난 바와 MR 감쇠기의 감쇠력이 적절하게 변하게 된다.



〈Fig. 10〉 Damper force time history for MR_A



〈Fig. 11〉 Damper force time history for MR_B

MR_A 및 MR_B 감쇠기로 전달되는 명령전압의 평균값은 각각 2.53 V 및 1.88 V로 계산되었다. 이것은 평균적으로 MR_A 댐퍼의 감쇠력이 MR_B 댐퍼의 감쇠력에 비해서 크다는 것을 의미하고 그래프를 통해서도 확인할 수 있다. 본 해석적 연구를 통해서 제안된 MIMO 퍼지제어기가 적응형 스마트 공유 TMD를 적절하게 제어할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 인접한 고층건물의 효율적인 지진 응답 제어를 위하여 적응형 스마트 공유 TMD를 제안하였고 이를 효과적으로 제어할 수 있는 제어알고리즘을 개발하였다. 수치해석결과 MIMO FLC는 두 개의 스마트 제어기가 사용된 ASTMD의 제어에 효과적임을 알 수 있었다. 또한 다목적 유전자알고리즘은 MIMO 퍼지제어기 최적화작업에 효과적이었고 다목적 최적화의 결과로 다수의 파레토 최적해 설계안을 얻을 수 있으므로 설계과정에 엔지니어의 판단이 개입할 수 있다는 장점이 있었다. 수동 STMD를 사용한 지진응답 제어성능은 전반적으로 TMD에 의한 제어성능과 유사한 성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 제안한 ASTMD는 TMD 및 수동 STMD 보다 최대치 응답 제어에 더 우수한 성능을 나타내었다. 일반적인 TMD는 두 개의 질량감쇠기를 각각의 건물에 적용한데 비하여 ASTMD는 하나의 질량감쇠기를 사용하여 얻은 결과이다. 따라서 일반적인 TMD는 설치비용이 많이 들 수 있고 ASTMD는 MR 감쇠기의 설치 및 운용에 경비가 많이 들 수 있으므로 경제적

측면과 제어 효율성 측면에서 추후 보다 상세한 분석이 필요하다고 판단된다. 또한 인접건물의 층수나 기하학적 형상 등이 다를 때 현실적인 적용 방법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

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

References

1. Klein, R.E., Cusano, C. and Stukel, J., "Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures," Presented at 1972 ASME Winter Annual Meeting, New York, Paper No. 72-WA/AUT-H.
2. Kunieda, M., "Earthquake prevent design and earthquake proof design for structures," Journal of JSME, Vol. 79, 1976, pp. 86-91.
3. Xu, Y.L., He, Q. and Ko, J.M., "Dynamic response of damper-connected adjacent buildings under earthquake excitation", Engineering Structures, Vol. 21, 1999, pp. 135-148.
4. Zhang, W.S. and Xu, Y.L. "Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, 1999, pp. 1163-1185.
5. Raheem, S.E.A., "Seismic pounding between adjacent building structures", Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 6, 2006, pp. 66-74.
6. Ni, Y.Q., Ko, J.M. and Ying, Z.G., "Random seismic response analysis of adjacent buildings coupled with non-linear hysteretic dampers," Journal of Sound and Vibration, Vol. 246, 2001, pp. 403-417.
7. Christenson, R.E., Spencer, B.F. Jr., Hori, N. and Seto, K., "Coupled building control using acceleration feedback", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 18, No. 1, 2003, pp. 4-18.
8. Christenson, R.E., Spencer, B.F. Jr. and Johnson, E.A., "Semiactive connected control method for adjacent multidegree-of-freedom buildings", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No. 3, 2007, pp. 290-298.
9. Abdullah, M.M., Hanif, J.H., Richardson, A. and Sobanjo, J., "Use of a shared tuned mass damper (STMD) to reduce vibration and pounding in adjacent structures", Earthquake Engng. Struct. Dyn., Vol. 30, 2001, pp. 1185-1201.
10. Kim, H.S. and Kang, J.W., "Seismic response control of adjacent buildings using shared tuned mass damper," Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.14, No.3, 2014, pp. 75-84.
11. 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.
12. Wen, Y.K., "Method of Random Vibration of Hysteretic Systems", J. Engng. Mech. Division, Proceedings, ASCE, 102, 1976, pp. 249-263.
13. Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", Earthquake Engng. and Struct. Dyn., Vol. 10, 1982, pp.381-401.

■ Received : April 14, 2015

■ Revised : May 12, 2015

■ Accepted : May 12, 2015