

준능동 아웃리거 댐퍼시스템의 진동제어 성능평가

Vibration Control Performance Evaluation of Semi-active Outrigger Damper System

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

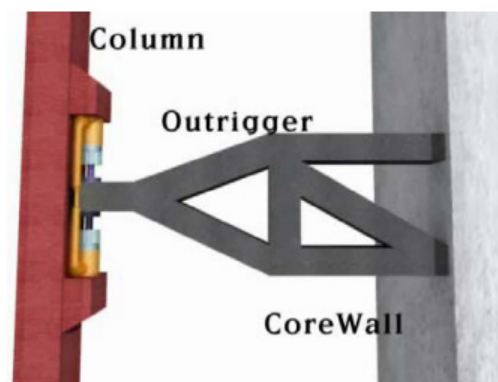
Damped outrigger systems have been proposed as a novel energy dissipation system to protect tall buildings from severe earthquakes and strong wind loads. In this study, semi-active damping devices such as magnetorheological (MR) dampers instead of passive dampers are installed vertically between the outrigger and perimeter columns to achieve large and adaptable energy dissipation. Control performance of semi-active outrigger damper system mainly depends on the control algorithm. Fuzzy logic control algorithm was used to generate command voltage sent to MR damper. Genetic algorithm was used to optimize the fuzzy logic controller. An artificial earthquake load was generated for numerical simulation. A simplified numerical model of damped outrigger system was developed. Based on numerical analyses, it has been shown that the semi-active damped outrigger system can effectively reduce both displacement and acceleration responses of the tall building in comparison with a passive outrigger damper system.

Keywords : Damped outrigger, Seismic response control, Fuzzy logic control, Genetic algorithms, Structural design

1. 서론

도심지의 높은 지가와 상징성 때문에 초고층건물이 국내외적으로 건설 또는 계획되고 있다. 초고층 건물의 설계 및 시공에 있어서 가장 중요한 요소로 결정되는 것이 횡력에 효과적으로 저항할 수 있는 구조시스템을 선정하는 것이다. 아웃리거 구조시스템은 고층건물의 횡방향 강성을 증가시키기 위한 가장 경제적인 구조시스템으로 알려져 있으며 근래에 들어서 다수의 고층건물이 아웃리거 시스템을 적용하고 있는 것으로 알려져 있다¹⁾. 아웃리거 구조시스템은 중앙부 코어와 외부 기둥을 아웃리거라는 매우 높은 강성의 구조체로 연결하는 것으로 지진 및 풍하중과 같은 횡력이 작용할 때 이를 외부 수직 부재에 인장과 압축력으로 전달하며 횡

력에 복합적으로 저항하게 된다²⁾. 최근에는 전통적인 아웃리거 시스템에서 <Fig. 1>과 같이 아웃리거 단부에 댐퍼를 설치하여 외곽기둥과 연결하는 아웃리거 댐퍼시스템이 제안되었다³⁾.



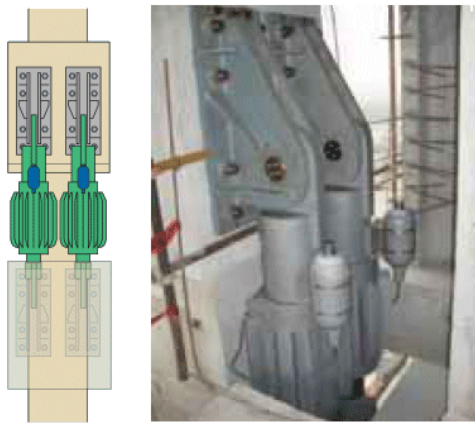
<Fig. 1> Concept of outrigger damper⁴⁾

* 정회원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architectural & Civil Engrg., Sunmoon Univ.

** 종신회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 031-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

전통적인 아웃리거 시스템에서는 <Fig. 1>에서 외곽기둥과 아웃리거가 강접합으로 연결되므로 고층구조물의 횡방향 강성이 증가하게 되어 풍하중이나 지진하중과 같은 횡방향 하중에 효과적으로 저

항하게 된다. 그러나 아웃리거 시스템이 적용된 초고층 건물의 경우에는 코어 전단벽과 외곽기둥의 부등축소로 인해 아웃리거와 외곽기둥 접합부의 응력이 증가할 가능성이 크다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 국내에는 송도에 건설된 동북아무역센터(NEATT)에 아웃리거 댐퍼를 설치하였고 부등축소로 인하여 발생하는 응력의 흡수를 도모한 바가 있다⁴⁾. 그러나 일반적으로 아웃리거 댐퍼시스템은 고층건물의 부등축소 저감 이외에 횡방향 하중에 의한 동적응답의 저감을 주목적으로 사용하는 것이 일반적이다. 국외에서는 필리핀에 건설된 “The St Francis Shangri-La Place” 건물에 아웃리거 댐퍼가 설치된 사례가 있으며, 설계단계에서부터 그 특성이 고려되어 풍진동을 제어하는데 매우 효과적이고, 구조물량의 감소로 경제적인 효과가 높다고 평가받고 있다. 이 건물에서는 <Fig. 2>에서 보는 바와 같이 아웃리거 댐퍼시스템의 감쇠값을 증가시키기 위하여 아웃리거 단부에 2개의 점성감쇠기를 사용하였다.



<Fig. 2> Outrigger dampers in The St Francis Shangri-La Place⁵⁾

아웃리거 댐퍼시스템은 아웃리거와 외곽기둥이 강접합으로 연결되지 않고 점성 또는 점탄성 감쇠기를 통하여 연결이 되기 때문에 강성에 의해서 횡력에 저항하는 전통적인 아웃리거 시스템의 거동특성을 기대할 수 없게 된다. 그러나 일반적으로 설계시 고려되는 횡방향 하중은 지진하중 및 풍하중과 같은 동적하중이므로 이와 같은 횡방향 동적하중이 작용할 때 아웃리거와 외곽기둥 사이에 있는 감쇠기의 감쇠력이 발생하여 두 부재 사이를 구속하게

된다. 일반적으로 점성 및 점탄성 감쇠기의 감쇠력은 속도에 비례하여 증가하기 때문에 횡방향 동적하중에 의해서 발생하는 동적응답이 클수록 감쇠력이 커져서 아웃리거와 외곽기둥을 구속하게 된다. 그러나 강접합 연결과는 달리 아웃리거 댐퍼에서 에너지 소산이 일어나므로 동적응답 저감에 효과가 크고 특히 가속도 응답을 줄이는데 매우 효과적이라고 알려져 있어서 초고층 건물 상층부의 사용성을 높이는데 효과적이다.

이와같이 수직 정적하중에 의한 고층건물의 부등축소 문제 뿐만 아니라 횡방향 동적하중을 효과적으로 제어할 수 있는 능력 때문에 아웃리거 댐퍼에 대한 관심이 점차 확대되고 있다^{6,9)}. 기존의 아웃리거 시스템은 동적응답이 구조물의 강성분포에만 의존하고 고층건물의 동적응답을 저감시키기 위하여 추가적인 감쇠를 사용한 기존의 댐퍼에 대한 연구는 감쇠만을 고려하면 되므로 비교적 명료하게 연구가 수행될 수 있었다. 그러나 아웃리거 댐퍼시스템은 강성과 감쇠가 복합적으로 거동하고 특히 아웃리거 댐퍼의 강성증가는 변위응답을 저감시킬 수 있지만 가속도응답은 오히려 증가시키는 등 쉽게 최적설계가 이루어지기 어렵다.

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 아웃리거 댐퍼에 사용되는 수동 감쇠기를 대신하여 준능동 감쇠기를 사용함으로써 구조물의 변위응답과 가속도응답을 동시에 효과적으로 줄일 수 있는 방법에 대하여 검토하였다. 아웃리거 댐퍼시스템에서 준능동감쇠기를 사용한 연구는 전 세계적으로 아직 몇 건이 보고되지 않을 정도로 이에 대한 연구는 초기 단계이다¹⁰⁻¹²⁾. 그러나 MR 감쇠기와 같은 준능동 스마트 제어장치가 전통적인 동적응답 제어시스템인 면진장치, 동조질량감쇠기 등과 함께 사용되어 매우 효과적인 성능을 발휘하고 또, 실제 건물에 적용되는 사례를 보았을 때 준능동 아웃리거 댐퍼시스템도 그 제어성을 분석하고 실용화 가능성을 판단해 보는 것이 필요한 시점이다.

본 연구에서는 아웃리거 댐퍼에 사용되는 수동감쇠기 대신에 대표적인 준능동 감쇠장치인 MR 감쇠기를 사용하여 아웃리거와 외곽기둥을 연결함으로써 준능동 아웃리거 댐퍼시스템을 구성하였다. 동적

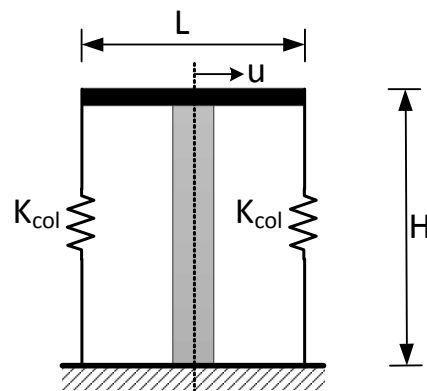
하중을 받는 구조물의 아웃리거와 외곽기둥의 상대 응답에 따라서 실시간으로 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절하기 위해서 퍼지논리제어기를 사용하였다. 퍼지논리제어기의 최적설계를 위하여 다목적유전자알고리즘¹³⁾을 사용하였고 수치해석의 효율성을 위하여 고층건물의 특성을 나타내는 단순해석모델을 사용하였다. 횡방향 동적하중으로는 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 바탕으로 설계응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하였다. 수치해석을 통하여 제안된 준능동 아웃리거 댐퍼시스템의 동적응답 저감성능을 전통적인 아웃리거 시스템과 비교하여 검토하였다.

2. 준능동 아웃리거 댐퍼의 모형화

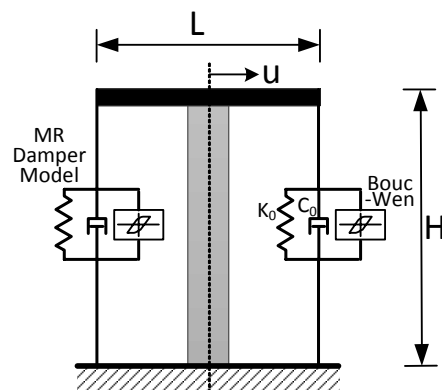
지진하중을 받는 고층건물에 대한 준능동 아웃리거 댐퍼시스템의 진동제어성능을 검토하기 위해서 본 연구에서는 <Fig. 3, 4>에 나타난 2가지 단순모델을 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 수치해석의 효율성을 높이기 위하여 아웃리거 시스템의 거동특성을 잘 표현할 수 있는 단순화된 축소모델을 사용하였다. 이 단순모델은 김병진 등⁶⁾의 연구에서 사용한 모델을 수정한 모델로 고층건물의 동적응답에 아웃리거 댐퍼시스템이 미치는 영향을 비교적 정확히 파악할 수 있는 장점을 가지고 있어서 매개변수 연구에 매우 효과적으로 활용될 수 있다.

이 모델에서는 수평하중에 대한 전단력은 전단벽에 의해서만 부담되고 전단벽 코어의 강성은 탄성계수(E), 단면2차모멘트(I) 및 전단벽의 높이(H)에 의해서 결정된다. 슬래브나 보에 비해서 아웃리거의 상대적인 강성이 매우 크므로 축소모델에서는 전단벽 코어와 외곽기둥을 연결하는 부재로 아웃리거 하나만으로 가정하였으며 길이는 L이고 강체로 모형화하였다. 예제구조물의 재료는 철근콘크리트로 가정하였고 탄성계수는 $2.8 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 으로 하였다. 구조물은 4m의 층고를 가지는 50층 구조물이고 전체 구조물의 폭은 40m, 코어 전단벽의 폭은 12m로 가정하였다. 한 층의 질량을 400,000kg으로 하여 구조물의 전체질량을 20,000,000kg으로 두었다. 예제 구조물은 3차원 구조물을 2차원으로 단순화하여 고

려하기 때문에 전단벽의 두께는 3차원 상에 존재하는 두께를 합하여 3m로 가정하였다. 이렇게 가정된 아웃리거가 없는 예제구조물의 1차모드 고유진동주기는 4.17초이다. <Fig. 3>에 나타난 모델은 일반적인 아웃리거 시스템을 단순화한 모델로서 외곽기둥과 아웃리거가 강접합 되어있고 외곽기둥의 강성(K_{col})이 해석모델의 횡방향 강성에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 외곽기둥의 강성을 계산하기 위하여 1m×1m 단면을 가지는 철근콘크리트 기둥이 외곽에 10개가 있는 것으로 가정을 하였다. 이렇게 외곽기둥의 강성을 크게 함으로써 전통적인 아웃리거 시스템에 의한 횡방향 강성의 증가가 증대되도록 모형화하였다. 아웃리거가 있는 예제구조물의 1차모드 고유진동주기는 2.18초이다.



<Fig. 3> Traditional outrigger model

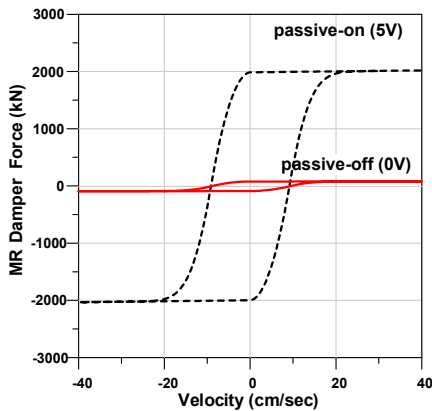


<Fig. 4> Semi-active outrigger damper model

본 연구에서 제안한 준능동 아웃리거 댐퍼시스템을 위한 단순화된 모델을 <Fig. 4>에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 외곽기둥과 아웃리거 사

이는 MR 감쇠기로 연결되어 있다. 외곽기둥부재의 수직방향 강성(K_{col})에 비하여 MR 감쇠기의 강성이 상대적으로 매우 약하기 때문에 아웃리저 단부와 외곽기둥 연결은 MR 감쇠기의 감쇠력에 의해서 결정된다. 아웃리저 단부와 외곽기둥의 접합부에서 수직방향 변형이 가능한데 아웃리저 단부의 수직변형은 아웃리저의 회전각도(θ)에 의해 계산될 수 있다.

MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델¹⁴⁾을 사용하였다. 본 연구에서는 <Fig. 5>에서 볼 수 있듯이 약 2,000 kN의 최대 감쇠력을 가지는 MR 감쇠기를 <Fig. 2>에 나타난 것처럼 좌측과 우측 아웃리저에 각각 2개씩 사용하였다. 이 MR 감쇠기의 용량은 예제구조물의 최적제어를 위한 값을 찾기 위해 반복해석을 통하여 결정하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0 volt의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5 volt의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다.



<Fig. 5> Force-velocity relationship of MR damper

수치해석을 위해서 선행 연구^{6,7)}에 사용된 축소모델의 운동방정식을 본 연구에서 활용하였고 이 식은 다음과 같이 하중을 받는 아웃리저 댐퍼시스템의 수평변위(u)와 아웃리저가 회전하는 각도(θ)로 표현된다. 여기서, E 는 전단벽 코어의 탄성계수, I 는 단면2차 모멘트, H 는 건물의 높이, f 는 수평하중, T 는 회전 모멘트이다. 식 (1)의 두 번째 행을 전개하면 회전모멘트 T 는 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \frac{12EI}{H^3} & \frac{6EI}{H^2} \\ \frac{6EI}{H^2} & \frac{4EI}{H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ T \end{bmatrix} \quad (1)$$

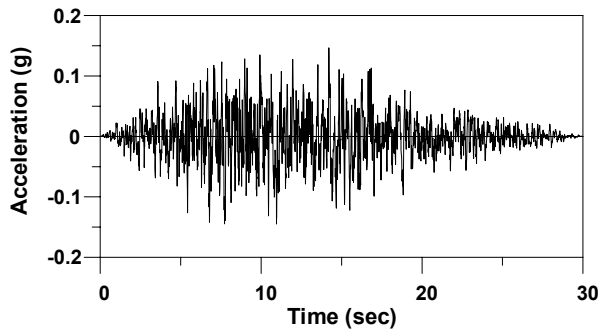
$$T = \frac{6EI}{H^2}u + \frac{4EI}{H}\theta \quad (2)$$

이 회전모멘트는 아웃리저 단부에 설치된 댐퍼에 의한 모멘트 T_d 와 같게 되며 식 (3)에 나타난 바와 같이 아웃리저 팔길이(L)와 회전변형(θ)으로 나타낼 수 있다.

$$T_d = -K_d \frac{L^2}{2} \theta - FL \quad (3)$$

여기서, K_d 는 외곽기둥의 강성이며, F 는 아웃리저 댐퍼에 발생하는 감쇠력을 나타낸다. <Fig. 3>에 나타난 전통적 아웃리저 모델에서는 아웃리저 댐퍼가 없으므로 ' $F=0$ '가 되며 외곽기둥의 강성으로 K_{col} 이 사용된다. 준능동 아웃리저 댐퍼시스템의 경우에는 ' $F=F_{MR}$ '이 되며 F_{MR} 은 MR 감쇠기의 감쇠력이 된다.

본 논문에서는 상기 운동방정식을 MATLAB 버전 R2011a와 SIMULINK를 사용하여 모형화하였다. 수치해석을 위하여 인공 지반운동성분을 생성하였다. 이를 위해 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 바탕으로 설계응답 가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 잘 표현할 수 있는 인공지진을 생성하여 수치해석에 사용하였다. 설계응답 가속도스펙트럼 작성시 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_B 의 보통암 지반으로 선택하였다. 이렇게 생성한 인공지진하중의 가속도 시간이력을 <Fig. 6>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.



<Fig. 6> Acceleration time history of artificial earthquake

3. 준능동 제어알고리즘의 개발

MR 감쇠기가 사용된 준능동 아웃리거 댐퍼시스템을 외부 동적하중의 변화에 따라서 효과적으로 제어하기 위해서는 MR 감쇠기의 감쇠력을 적절하게 제어해야 한다. 비록 MR 감쇠기가 능동제어장치와 같이 제어신호에 의하여 감쇠력을 조절할 수 있지만 직접적인 제어력을 구조물에 가할 수는 없기 때문에 전통적인 능동제어 알고리즘을 스마트 준능동 제어장치인 MR 감쇠기에 그대로 적용할 수는 없다. 현재 제시된 준능동 제어기법 중 능동제어이론에 기반 하여 매 순간 감쇠력의 소산성을 판단하고 이에 따라 전류의 세기를 on-off의 2단계만으로 조절하는 clipped-optimal 제어기법이 가장 널리 사용되고 있다. 그 이외에도 Lyapunov 안정이론에 근거한 제어알고리즘, decentralized bang-bang 제어 알고리즘, modulated homogeneous 마찰 제어 알고리즘 등이 제안되었다¹⁵⁾. 그런데 이러한 방법들은 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 준능동 아웃리거 댐퍼시스템의 구성요소인 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 본 논문에서는 고유의 견실성(robustness)과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 퍼지제어기를 사용하였다. 퍼지제어기를 설계하는 과정은 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫째, 사용할 퍼지추론타입을 선택하고 입력과 출력의 개수를 결정하고 둘째, 각각의 입력과 출력에 대하여 소속함수(membership function)를 결정한 후 마지막으로 퍼지제어규칙을 설정한다. 본 연구에서는 퍼지추론타입으로 Mamdani 퍼지모델을 사용하였고 <Fig. 7>에 나타난 바와 같이 MR 감쇠기 양단의 상대변위 및 속도를 입력변수로 사용하고 MR 감쇠기를 제어할 전압신호를 출력변수로 사용하였다.



<Fig. 7> Inputs and outputs of fuzzy controller

전술한 바와 같이 본 연구에서는 <Fig. 4>에 나타난 것처럼 좌측과 우측 아웃리거 단부에 각각 2개의 MR 감쇠기를 사용하였다. 아웃리거를 강체로 가정하였기 때문에 아웃리거의 회전에 의해서 발생하는 MR 감쇠기의 길이방향 변위 및 속도는 좌우측이 부호만 반대이고 크기는 같게 된다. 따라서 좌우측의 MR 감쇠기로 전달되는 제어명령전압을 같게 하였고 식 (3)을 이용하여 아웃리거 단부에 설치된 MR 댐퍼에 의한 모멘트 T_d 를 계산하였다.

지금까지 퍼지제어기가 수많은 구조시스템을 제어하는데 이용되어 왔고 이때 적합한 소속함수를 선택하고 제어규칙을 찾아내기 위하여 엔지니어의 경험이나 직관에 의해서 주로 개발되어 왔다. 이렇게 전문가의 경험적 지식에 의해서 퍼지제어기를 개발할 경우에 반증적인 해석과 제어성능 검토에 많은 노력과 시간이 필요할 뿐만 아니라 검토범위에도 한계가 있는 등 쉽지 않은 작업을 수행해야 한

다. 이에 본 연구에서는 퍼지제어기의 효과적인 설계를 위하여 다목적 유전자 알고리즘을 이용하였다.

다목적 최적화문제는 다수의 목적함수가 서로 상충하는 특성 때문에 발생한다. 준능동 아웃리거 댐퍼시스템이 설치된 고층건물에서 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 크게 하면 아웃리거와 외곽기둥의 연결시켜 구속하려는 힘이 강해지므로 전체적으로 구조물의 횡방향 강성이 증가하게 되므로 횡변위 제어에 효과적이다. 그러나 이러한 횡방향 강성의 증가에 따른 변위응답의 감소와 반대로 가속도응답은 증가하게 된다. 반대로 명령전압을 작게 하면 동적하중에 의한 구조물의 가속도는 감소하지만 횡변위가 증가하게 된다. 이처럼 두 응답이 서로 상충되기 때문에 다목적 유전자알고리즘의 목적함수로 사용하였다. 사용된 두 목적함수는 <Table 1>에 나타낸 바와 같이 준능동 아웃리거 댐퍼시스템이 설치된 구조물의 응답을 전통적인 일반 아웃리거 시스템이 설치된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. 목적함수 J1은 최대 변위응답에 대한 값이고 J2는 RMS 가속도응답에 대한 값이다. 일반적인 아웃리거 시스템이 설치될 경우 예제구조물의 최대 변위응답은 아웃리거 시스템이 없는 경우에 비하여 17.3 cm에서 8.7 cm로 대폭 줄일 수 있었다. 이에 반하여 RMS 가속도 응답은 15.1 cm/s²에서 37.0 cm/s²로 크게 증가하였다. 따라서 목적함수의 기준이 되는 최대 변위응답 및 RMS 가속도응답은 각각 8.7 cm와 37.0 cm/s²이다.

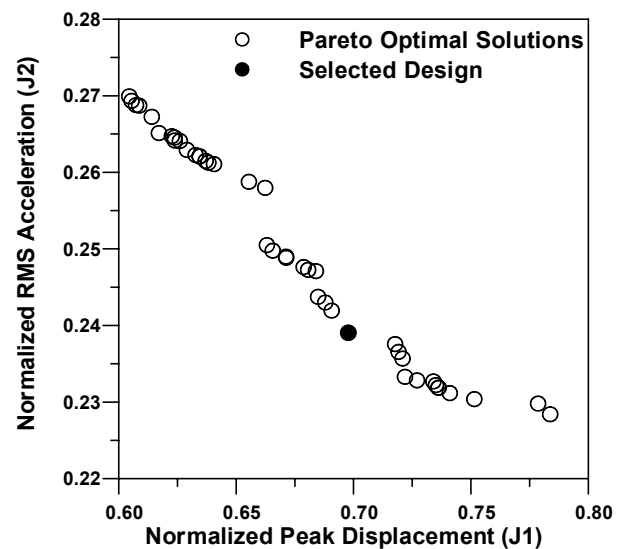
<Table 1> Multi-objective functions

Objective function	Description
J1	Peak displacement with semi-active outrigger damper system Peak displacement with traditional outrigger system
J2	RMS acceleration with semi-active outrigger damper system RMS acceleration with traditional outrigger system

본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘 중의 하나인 NSGA-II¹³⁾(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)를 사용하여 퍼지제어기를 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 사용해서 표현하였다. 하나의 염색체에는 20개의 퍼지제어규칙과 다목적 최적화에 필요한 목적함수별 적합도 값(obj1, obj2) 및 우선순위(rank)와 혼잡도 거리(dist)가 저장된다. 가우스 소속함수의 중앙부위치 및 표준편차를 통해서 입력 및 출력변수를 표현할 수 있으므로 2개의 입력변수와 1개의 출력변수를 포함하는 각각의 퍼지제어규칙은 6개의 파라미터를 통해서 표현이 된다.

4. 수치해석결과

준능동 아웃리거 댐퍼시스템의 제어알고리즘을 최적화하기 위하여 NSGA-II를 이용한 퍼지제어기의 최적화작업에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개로 구성하였으며 최적화는 1,000세대까지 수행하였다. 최적화작업을 통해서 얻은 파레토 최적해집합을 두 개의 목적함수에 대하여 <Fig. 8>에 나타내었다.



<Fig. 8> Pareto optimal solutions

그림에서 확인할 수 있듯이 준능동 아웃리거 댐퍼시스템은 일반적인 아웃리거 시스템에 비해서 최대 변위응답 및 RMS 가속도응답을 대폭 저감시킬 수 있는 것을 알 수 있다. 목적함수 J1에 대해서 대부분의 개체가 0.6-0.8 사이에 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 준능동 아웃리거 댐퍼를 사용하면 기존의 아웃리거 시스템에 비해서 최대 변위응답을 40%-20%를 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 목적함수 J2에 대해서는 대부분의 개체가 0.23-0.27 사이에 있는데 이것은 RMS 가속도응답에 대해서는 77%-73%까지 응답을 대폭 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 가속도 응답에 대해서 이렇게 매우 우수한 제어성능을 나타내는 것은 아웃리거 시스템이 없는 구조물에 비해서 아웃리거 시스템이 있는 구조물의 가속도응답이 증가하였기 때문이다. 일반적으로 아웃리거와 외곽기둥의 결합력이 커지게 되면 고층건물의 횡방향 강성이 증가하게 되므로 동적 변위응답은 줄어들게 되고 가속도응답은 증가하게 되므로 두 응답이 서로 상충하게 된다. 그러나 준능동 아웃리거 댐퍼시스템을 사용하면 변위응답과 가속도응답을 동시에 매우 효과적으로 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다.

다목적 최적화작업이 끝난 후에 엔지니어는 이 중에서 가장 적절하다고 판단되는 개체를 선택하게 되는데 본 논문에서는 <Fig. 8>에서 검정색 원으로 나타낸 개체를 선택하였고 이것은 하나의 퍼지제어 알고리즘에 대한 설계안이 된다. 선택된 개체의 J1 과 J2에 대한 목적함수 값은 각각 0.70 및 0.24로서 이것은 준능동 아웃리거 댐퍼시스템이 일반 아웃리거 시스템을 적용한 경우에 비하여 최대 변위응답 과 RMS 가속도응답을 각각 30%와 76% 저감시킬 수 있음을 의미한다. 선택된 개체를 사용하여 퍼지 제어알고리즘을 작성한 후 수치해석을 수행하였다. 개발된 제어알고리즘의 준능동 아웃리거 댐퍼시스템에 대한 진동제어성능을 정량적으로 파악하기 위하여 아웃리거 시스템을 적용하지 않은 경우 및 일반적인 아웃리거 시스템을 적용한 경우와 함께 예제구조물의 동적응답을 비교하여 <Table 2>에 나타내었다.

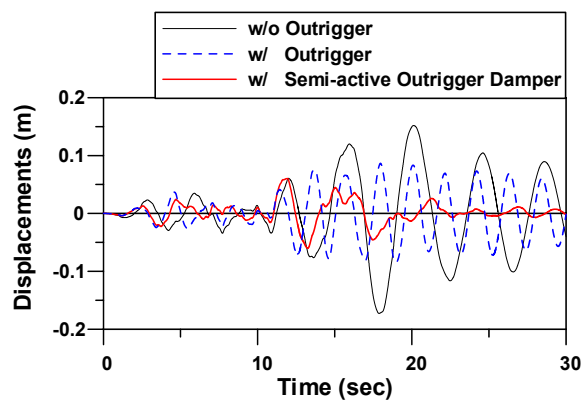
<Table 2> Comparison of dynamic responses

System Response	w/o outrigger system	w/ outrigger system	w/ semi- active outrigger damper
Peak Displacement	17.3 cm (100%)	8.7 cm (50.3%)	6.0 cm (34.7%)
RMS Displacement	6.7 cm (100%)	4.1 cm (61.2%)	1.9 cm (28.4%)
Peak Acceleration	39.2 cm/s ² (100%)	78.3 cm/s ² (199.7%)	25.0 cm/s ² (63.8%)
RMS Acceleration	15.1 cm/s ² (100%)	37.0 cm/s ² (245.0%)	10.7 cm/s ² (70.9%)

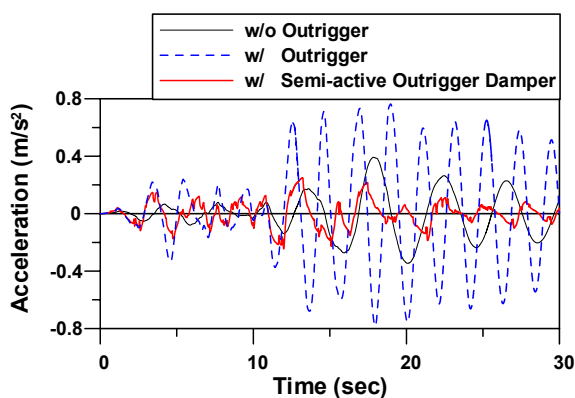
표에서 보는 바와 같이 아웃리거 시스템이 설치되지 않은 경우를 기준(100%)으로 하여 일반적인 아웃리거 시스템과 준능동 아웃리거 댐퍼시스템이 사용된 경우의 응답증감 정도를 퍼센트(%)로 나타내었다. 일반적인 아웃리거 시스템을 사용한 경우 변위응답에 대해서는 최대치와 RMS값을 각각 약 50%와 39% 저감시킬 수 있었다. 그러나 가속도응답을 보면 아웃리거 시스템을 사용하지 않은 경우에 비하여 최대치와 RMS값이 약 2배 이상 증가하는 것을 볼 수 있다. 준능동 아웃리거 댐퍼시스템을 적용한 경우에는 변위응답을 약 60-70% 저감시키면서도 가속도응답을 약 30-40% 저감시킬 수 있었다.

지진하중을 받는 고층건물에 아웃리거 시스템 및 아웃리거 댐퍼시스템을 적용한 경우에 구조물의 응답이 변화하는 경향을 검토하기 위하여 변위응답 및 가속도응답 시간이력을 <Fig. 9, 10>에 나타내었다. 모델별 각 응답의 크기는 <Table 2>에 나타낸 결과와 마찬가지로 일반적인 아웃리거 시스템의 추가적인 강성은 변위응답을 줄이는 데는 효과적이지만 가속도응답을 줄이는 데는 그렇지 않다는 것을 확인할 수 있다. 또한 준능동 아웃리거 댐퍼시스템의 경우에는 변위응답과 가속도응답 모두 효과적으로 제어할 수 있다. 본 연구에서 사용한 예제구조물이 비교적 장주기를 가지는 고층건물이므로 그래프의 주기를 보면 각 모델별 고유진동주기를 대략적으로 파악할 수 있다. 변위시간이력 그래프를 통해서 예제구조물에 아웃리거 시스템이 적용되면 횡방향 강성이 증가하므로 그래프의 진동주기, 즉 구조

물의 고유진동주기가 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 이때 아웃리저를 적용하지 않은 일반 구조물과 아웃리저를 적용한 구조물의 그래프를 보면 전체 시간에 걸쳐서 그래프의 주기가 거의 일정한 것을 알 수 있다. 이것은 지진하중이 가해지는 동안에 구조물의 고유진동주기가 변하지 않는다는 것을 의미한다. 그러나 준능동 아웃리저 댐퍼시스템이 적용된 모델의 그래프를 보면 저차모드의 탁월한 진동수 이외에도 다양한 진동수 성분이 섞여있는 것을 볼 수 있다. 이것은 실시간으로 변하는 MR 감쇠기의 감쇠력이 아웃리저와 외곽기둥의 구속 정도를 조절함으로써 구조물의 횡방향 강성을 순간적으로 변화시키는 효과를 가져오기 때문인 것으로 판단된다.



〈Fig. 9〉 Displacement time histories



〈Fig. 10〉 Acceleration time histories

5. 결론

본 연구에서는 아웃리저와 외곽기둥 사이에 MR 감쇠기를 설치한 준능동 아웃리저 댐퍼시스템을 제

안하였고 이 시스템의 지진응답 제어성능을 기존의 아웃리저 시스템과 비교하여 검토하였다. 준능동 아웃리저 댐퍼시스템을 효율적으로 제어하기 위하여 유전자 알고리즘으로 최적화한 퍼지제어기를 사용하였다. 인공지진하중을 사용한 수치해석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 일반적인 아웃리저 시스템은 지진하중을 받는 고층건물의 변위응답을 효과적으로 저감시킬 수 있었지만 가속도응답은 오히려 증가시킬 수도 있다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 준능동 아웃리저 댐퍼시스템은 지진하중에 의한 변위응답 뿐만 아니라 가속도응답도 기존의 아웃리저 시스템에 비해서 매우 효과적으로 제어할 수 있었다.
- (3) 준능동 아웃리저 댐퍼시스템에서 아웃리저와 외곽기둥을 연결하는 MR 감쇠기의 감쇠력을 실시간으로 조절함으로써 아웃리저에 의한 횡방향 강성의 크기를 순간적으로 변화시키는 효과를 가져온다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 다목적 유전자알고리즘과 퍼지제어기라는 소프트웨어 기법을 이용하여 준능동 아웃리저 댐퍼시스템을 매우 효과적으로 제어할 수 있는 알고리즘을 개발할 수 있었다. 이 방법을 이용하면 한 번의 최적화과정을 통해서 얻은 다수의 설계안 중 적절한 설계안을 엔지니어가 선택할 수 있는 기회를 제공함으로써 매개변수 연구 및 단일목적 최적화에 비하여 설계과정의 효율성을 증대시킬 수 있다.
- (5) 본 논문에서는 중약진 지역을 대표하는 인공지진을 사용하여 준능동 아웃리저 댐퍼의 진동제어성능을 검토하였다. 보다 일반적인 평가를 위하여 더 다양한 지반가속도 및 풍하중에 대한 성능평가가 추후 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2014R1A2A2A01005418).

References

1. Ali, M.M. and Moon, K.S., "Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects", *Architectural Science Review*, Vol. 50, No. 3, 2007, pp. 205-223.
 2. Kim, D.H. and Chung, K.R., "Evolution of Tall Building Structural System", *Review of Architecture and Building Science*, 2009, pp. 18-23.
 3. Smith, R and Willford, M., "Damped outriggers for tall buildings", *The Arup Journal* 3/2008, pp. 15-21.
 4. Kim, D.Y., "Application of outrigger dampers to songdo NEATT", *Spring Conference of The Korea Institute of Building Construction*, Vol. 10, No. 1, 2010, pp. 69-74.
 5. Smith, R and Willford, M., "Damped outriggers for tall buildings", *The Arup Journal*, Vol. 3, 2008, pp. 15-21.
 6. Kim, B.J., Lee, S.H. and Chung, L., "Design of outrigger damper system for wind-induced vibration control of building structures", *Journal of the Wind Engineering Institute of Korea*, Vol. 15, No. 4, 2011, pp. 163-171.
 7. Kim, H.S., Yoon, S.W. and, Kang, J.W., "Optimal design of outrigger damper using multi-objective genetic algorithm", *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 14, No. 4, 2014, pp. 97-104.
 8. Smith, R and Willford, M., "The damped outrigger concept for tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16, 2007, pp. 501-517.
 9. Chen, Y., McFarland, D.M., Wang, Z. Spencer Jr., B.F. and Bergman, L.A., "Analysis of tall buildings with damped outriggers", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 136, No. 11, 2010, pp. 1435-1443.
 10. Asai, T., Chang, C.M., Phillips, B.M. and Spencer, B.F. Jr., "Real-time hybrid simulation of a smart outrigger damping system for high-rise buildings", *Engineering Structures*, Vol. 57, 2013, pp. 177-188.
 11. Chang, C.M., Asai, T., Wang, Z., Spencer, B.F. Jr. and Chen Z., "Smart outriggers for seismic protection of high-rise buildings", *Proceedings of the 15th WCEE*, 2012.
 12. Chang, C.M., Wang, Z., Spencer, B.F. Jr. and Chen Z., "Semi-active damped outriggers for seismic protection of high-rise buildings", *Smart Structures and Systems*, Vol. 11, No. 5, 2013, pp. 435-451.
 13. Deb, K., Pratap, A., Agrwal, S. and Meyerivan, T., "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, 2002, pp. 181-197.
 14. Sues, R.H., Mau, S.T. and Wen, Y.K., "System identification of degrading hysteretic restoring forces", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 114, No. 5, 1988, pp.833-846.
 15. Jansenm L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 8, 2000, pp.795-803.
- Received : September 14, 2015
 - Revised : October 01, 2015
 - Accepted : October 01, 2015