

풍응답과 지진응답의 다중제어를 위한 스마트 아웃리거 댐퍼의 최적설계

Optimal Design of Smart Outrigger Damper for Multiple Control of Wind and Seismic Responses

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

An outrigger damper system has been proposed to reduce dynamic responses of tall buildings. In previous studies, an outrigger damper system was optimally designed to decrease a wind-induced or earthquake-induced dynamic response. When an outrigger damper system is optimally designed for wind excitation, its control performance for seismic excitation deteriorates. Therefore, a smart outrigger damper system is proposed in this study to make a control system that can simultaneously reduce both wind and seismic responses. A smart outrigger system is made up of MR (Magneto-rheological) dampers. A fuzzy logic control algorithm (FLC) was used to generate command voltages sent for smart outrigger damper system and the FLC was optimized by genetic algorithm. This study shows that the smart outrigger system can provide good control performance for reduction of both wind and earthquake responses compared to the general outrigger system.

Keywords : Tall building, Dynamic response reduction, Smart outrigger system, Fuzzy control algorithm, Genetic algorithm

1. 서론

근래에 와서 초고층 건물은 높은 지가와 상징적인 의미 때문에 전 세계에서 경쟁적으로 건설되고 있다. 초고층 건물의 건설에 있어서 가장 중요한 요소 중의 하나는 구조시스템의 결정이다. 지진하중이나 풍하중과 같은 동적이 가해지는 고층건물의 동적응답을 줄이기 위해서는 적절한 구조시스템을 선택하여 구조물의 횡방향 강성을 증가시키는 것이 필요하다. 고층건물의 횡방향 강성을 증가시키기 위해서 지금까지 여러가지 구조시스템이 제안되어 왔다¹⁾. 그 중 아웃리거 시스템은 매우 효과적인 횡력 저항 시스템으로 알려져 있고 여러 고층건물에 다양한 형태로 적용되고 있다²⁾. 일반적인 아웃리거 구조시스템은 고층건물의 외곽기둥과 중앙부에 위치

한 코어를 아웃리거라고 하는 강성이 매우 높은 구조체로 연결함으로써 풍하중과 지진하중과 같은 횡력이 가해질 때 이를 외곽 기둥부재에 인장력과 압축력으로 전달하여 효과적으로 저항을 하게 된다³⁾. 국내외적으로 최근에 건설되고 있는 초고층 건축물의 대부분이 아웃리거 시스템을 적용하여 설계되고 있으며 이와 관련된 연구가 활발히 수행되고 있다.

지진하중이나 풍하중과 같은 횡하중을 받는 고층 건물의 동적응답 저감기술에 대한 연구가 많은 관심을 받아왔다. 이러한 동적응답을 제어하기 위한 진동제어장치는 다양한 형태로 개발되어 왔으면 설치되는 위치 또한 층간에 설치하는 가새-댐퍼 시스템, 최상층에 설치하는 질량형 감쇠기 등으로 적용되어 왔다⁴⁾⁵⁾. 최근에는 아웃리거 구조시스템의 적용이 활발해지면서 <Fig. 1>에 나타난 바와 같이 아웃리거의 단부와 기둥의 연결부에 댐퍼를 설치하는 아웃리거 댐퍼시스템이 제안되었다. 송도의 동북아 무역센터(NEATT)에 설치된 아웃리거 댐퍼는 외곽 기둥과 코어와의 부등축소에 의하여 발생하는 부가적인 응력을 해소하기 위한 목적으로 사용되었다⁷⁾.

* 정희원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil
Engineering, Sunmoon University

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



<Fig. 1> Outrigger damper in NEATT⁶⁾

필리핀에 건설된 “The St Francis Shangri-La Place”에도 아웃리거 댐퍼가 설치되었으며 풍하중에 의한 응답을 저감시키는데 매우 효과적이고, 구조물량의 감소로 인한 경제적인 효과도 높다고 평가받고 있다⁸⁾. 이와 같이 고층건물의 부등축소에 의한 추가적인 응력문제뿐만 아니라 횡방향 동적응답을 효과적으로 제어할 수 있는 능력 때문에 아웃리거 댐퍼에 대한 관심이 점차 확대되고 있다⁸⁻¹⁰⁾.

지진하중이나 풍하중을 받는 구조물의 동적응답을 저감하기 위해서 현재까지 다양한 진동제어장치 및 구조제어기술이 개발되어 왔다. 지진하중이나 풍하중 등의 목표하중이 결정되면 대상하중에 의하여 발생하는 구조물의 동적응답을 저감시킬 수 있는 제어시스템의 최적설계기술에 대한 연구가 다수 수행되었다. 아웃리거 댐퍼시스템도 마찬가지로 지진하중 또는 풍하중에 대해서 최적의 거동을 하도록 설계가 가능하다. 그러나 지진하중과 풍하중의 동적 특성(주파수 성분)은 크게 차이가 난다. 즉, 지진하중의 주요 주파수 성분은 풍하중에 비해서 상대적으로 고주파 성분으로 구성되어 있다. 따라서 지진하중에 대하여 최적의 거동을 할 수 있도록 설계된 아웃리거 댐퍼시스템에 풍하중이 가해질 때 시스템의 제어성능이 저하될 수밖에 없다. 그 반대의 경우도 마찬가지로 서로 상이한 동적특성을 가진 지진하중과 풍하중에 대하여 모두 최적의 제어성능을 발휘하는 것은 구조적 특성이 고정되어 있는 수동 감쇠기를 사용한 아웃리거 댐퍼시스템에서는 불가능하다.

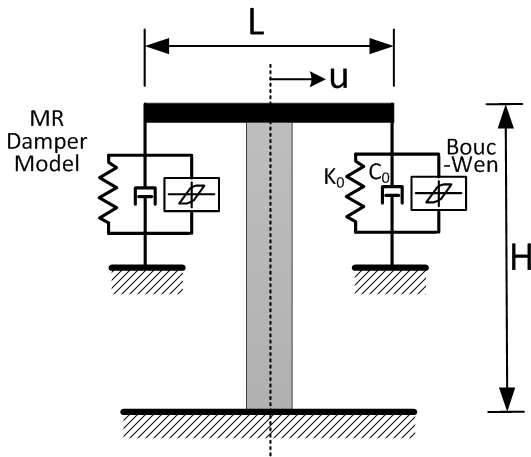
외부 동적하중의 변화에 따라서 아웃리거 댐퍼시스템의 특성을 실시간으로 변화시켜서 제어성능을 향상시키고자하는 연구가 최근에 수행되고 있다

^{11),12)}. 이러한 연구에서는 MR 감쇠기와 같은 스마트 댐퍼를 아웃리거와 외곽기둥 사이에 설치하여 준능동 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 제안하고 있다^{13),14)}. 이러한 스마트 아웃리거 댐퍼시스템에 대한 연구는 전 세계적으로 아직 몇 건이 보고되지 않을 정도로 초기 단계이다. 특히 대부분의 선행연구는 지진하중을 대상으로만 연구되고 있어서 풍하중과 지진하중에 대하여 동시에 제어성능을 검토한 사례는 찾아보기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 지진하중과 풍하중에 대하여 모두 효과적인 제어성능을 발휘할 수 있는 스마트 아웃리거 댐퍼제어시스템 최적설계기술을 개발하고자 한다. 이를 위해 우선 스마트 아웃리거 댐퍼시스템에 사용되는 MR 감쇠기 용량을 조절하는 파라미터 연구를 수행하여 지진하중 및 풍하중에 대해서 효과적으로 제어성능을 발휘하는 용량을 선택하였다. 지진하중에 대해서 최적설계된 스마트 아웃리거 댐퍼 설계안에 풍하중을 그리고 풍하중에 대해서 최적설계된 설계안에 지진하중을 각각 가하여 제어성능 저하정도를 분석하였다. 풍하중과 지진하중에 대하여 동시에 각각 제어성능을 효과적으로 발휘할 수 있는 제어알고리즘을 개발하기 위하여 퍼지제어알고리즘과 유전자알고리즘을 사용하였다. 수치해석을 위하여 인공풍하중 및 인공지진하중을 사용하였고 MATLAB 버전 R2011a와 SIMULINK를 사용하여 운동방정식을 모형화하였다.

2. 수치해석모델 및 동적하중

본 논문에서는 풍하중 및 지진하중이 가해지는 고층건물에 대하여 스마트 아웃리거 댐퍼시스템의 제어성능을 검토하기 위하여 <Fig. 2>에 나타난 수치해석모델을 개발하였다. MR 감쇠기의 강성은 외곽기둥에 비하여 상대적으로 매우 약하기 때문에 아웃리거 단부가 MR 감쇠기에 의하여 지반과 직접 연결되는 것으로 가정하였다. 이러한 단순 모델은 고층건물의 동적응답에 아웃리거 댐퍼시스템이 미치는 영향을 비교적 정확히 파악할 수 있는 장점을 가지고 있어서 다수의 선행연구에서 빈번하게 사용되고 있다¹¹⁻¹⁵⁾.

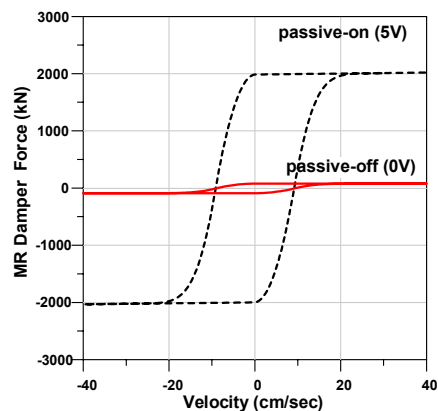


<Fig. 2> Analytical model of smart outrigger damper system

본 연구에서 사용하는 단순모델에서는 지진하중 및 풍하중에 대한 저항은 코어를 이루고 있는 전단벽에 의해서만 이루어진다. 코어를 이루는 전단벽의 강성은 탄성계수(E), 단면2차모멘트(I) 및 전단벽의 높이(H)에 의해서 계산된다. 아웃리거는 같은 층에 사용되는 수평부재인 슬래브나 보에 비해서 강성이 매우 크기 때문에 단순모델에서는 강체로 가정하여 모형화 하였고 그림에 나타난 바와 같이 길이는 L로 하였다. 단순모델을 사용하여 모형화할 고층 예제구조물은 철근콘크리트조 건물로 가정하였고 탄성계수는 $2.8 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ 로 하였다. 예제구조물의 층고는 4m로 하였고 전체 층수를 50층으로 가정하여 건물 최상층의 높이는 200m로 하였다. 예제구조물의 폭은 40m로 두었고 전단벽의 폭은 12m로 가정하였다. 예제구조물 한 층의 질량은 400,000kg으로 하였고 따라서 전체 구조물의 질량은 20,000,000kg으로 계산된다. 아웃리거 댐퍼가 없는 일반 아웃리거가 설치된 구조물은 외곽기둥과 아웃리거가 직접 연결되기 때문에 <Fig. 2>에 나타난 MR 댐퍼 모델을 사용하지 않고 외곽기둥의 강성(K_{col})을 이용하여 아웃리거 단부와 지반까지 연결된다. 본 연구에서는 외곽기둥의 강성을 계산하기 위하여 1m×1m 단면을 가지는 철근콘크리트 기둥이 외곽에 10개가 있는 것으로 가정을 하였다. 본 연구에서 사용한 예제구조물에서 아웃리거가 없다고 가정하여 고유치 해석을 수행하면 1차모드 고유진동주기가 4.17초로 계산되었다. 또한 아웃리거 댐퍼가 아닌 일반적인 아

웃리거 시스템이 설치된 예제구조물의 1차모드 고유진동주기는 2.18초이다. 아웃리거 시스템에 의해서 예제구조물의 횡방향 강성이 대폭 증가하는 것을 알 수 있다. 동적하중에 대한 수치해석을 수행하기 위해서는 운동방정식을 구성하는 것이 필요한데 본 연구에서는 선행 연구^{9),15)}에 사용된 축소모델의 운동방정식을 활용하였다.

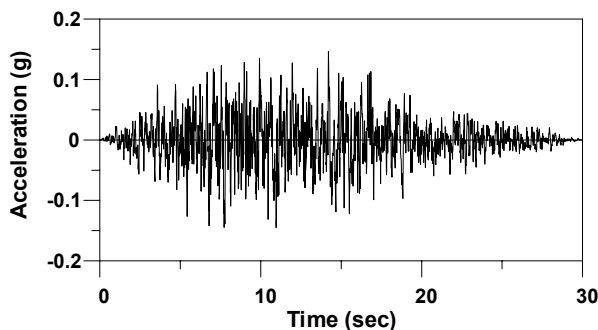
스마트 아웃리거 댐퍼시스템의 가장 핵심적인 요소인 MR 댐퍼를 모형화하기 위해서 <Fig. 2>에 나타난 바와 같이 Bouc-Wen 모델¹⁶⁾을 사용하였다. 이 모델을 사용하여 시뮬레이션한 MR 댐퍼의 힘-속도 관계그래프를 <Fig. 3>에 나타내었다. 그림에 나타난 MR 댐퍼는 약 2,000 kN의 최대 감쇠력을 나타내고 있는데 MR 감쇠기의 최적 감쇠용량을 찾기 위한 파라미터 연구는 다음 절에서 소개한다. Bouc-Wen 모델로 계산되는 MR 댐퍼의 감쇠력은 댐퍼로 전달되는 명령전압에 의해서 결정된다. 본 연구에서는 MR 댐퍼로 0 volt의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5 volt의 전압이 전달될 때 최대 감쇠력을 나타낸다.



<Fig. 3> Force-velocity relationship of MR damper

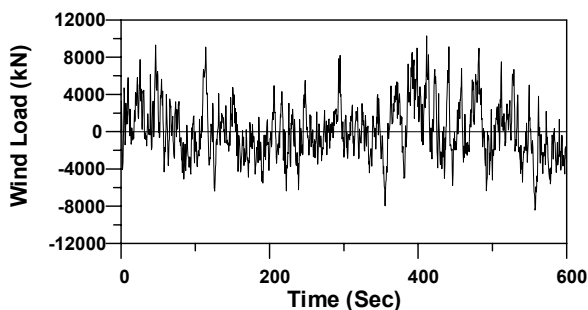
본 연구에서는 지진하중과 풍하중에 대해서 모두 우수한 제어성능을 발휘하는 스마트 아웃리거 댐퍼 시스템을 설계하고자 한다. 이를 위한 지진하중으로 인공 지반운동성분을 생성하였다. 인공지진하중을 생성하기 위해서 국내 건축구조설계기준(KBC2009)을 사용하여 설계가속도스펙트럼을 작성하였고 이를 기반으로 인공 지반가속도를 생성하였다. 설계가속도스펙트럼을 작성하기 위해서 지역계수는 0.22,

지반종류는 보통암 지반(S_B)으로 선택하였다. 이러한 방법으로 생성한 인공지진하중의 가속도 시간이력을 <Fig. 4>에 나타내었다. 생성된 지진하중의 길이는 30초로 하였고 시간간격은 0.01초로 하였다. 생성된 인공지진하중의 PGA(Peak Ground Acceleration)는 0.144g이고 이는 우리나라에서 주로 발생하는 지진하중의 특성이 고려된 중앙진지역의 지진하중으로 생각할 수 있다.



<Fig. 4> Acceleration time history of artificial earthquake

본 연구에서는 수치해석을 위하여 인공풍하중을 생성하였으며 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 진동 제어성능 검토를 위하여 풍방향 성분만을 고려하여 작성하였다. 인공풍하중을 작성하기 위한 풍속스펙트럼은 널리 알려진 Kaimal 스펙트럼을 이용하였으며 인공풍하중의 생성 시 기본 풍속은 30m/s, 노풍도는 C로 하였고 600초 동안의 풍하중을 0.1초 간격으로 작성하였다. 풍하중을 생성하기 위해서는 하중을 받는 예제구조물의 형상 및 크기를 결정하는 것이 필요하다. 예제구조물의 폭은 전술한 바와 같이 40m이고 층고 4m, 전체 층수 50층으로 가정하여 풍하중을 생성하였다. 본 연구에서 사용한 풍하중 시간이력 그래프를 <Fig. 5>에 나타내었다.



<Fig. 5> Time history of artificial wind load

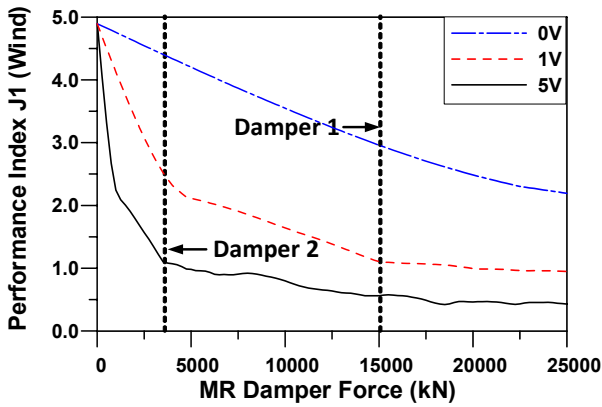
3. MR 댐퍼 용량에 따른 아웃리저 댐퍼시스템의 제어성능 검토

본 절에서는 전술한 스마트 아웃리저 댐퍼시스템에서 MR 댐퍼의 용량에 따른 예제구조물의 제어성능을 검토해보기 위하여 파라미터 연구를 수행하였다. 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 제어성능을 평가하기 위하여 <Table 1>에 나타낸 성능평가 기준을 사용하였다. 성능평가 기준은 외곽기둥과 아웃리저가 강접으로 직접 연결된 전통적인 아웃리저 시스템을 기준으로 하여 스마트 아웃리저 댐퍼시스템의 응답을 비교하였다. 구조물의 안전성과 관련된 최대 변위응답에 대한 평가기준을 J1로 하였고 사용성과 관련된 RMS 가속도응답에 대한 평가기준을 J2로 하였다. 표에서 보는 바와 같이 평가기준이 1보다 작은 값일 때 스마트 아웃리저 댐퍼시스템이 일반 아웃리저보다 제어성능이 우수함을 나타낸다.

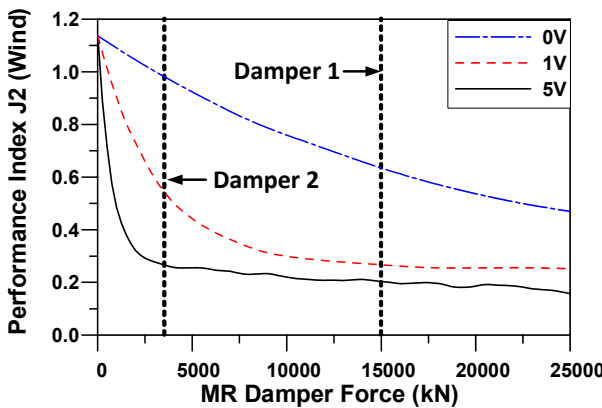
<Table 1> Performance index

Index	Description
J1	$\frac{\text{Peak displacement with smart outrigger damper system}}{\text{Peak displacement with traditional outrigger system}}$
J2	$\frac{\text{RMS acceleration with smart outrigger damper system}}{\text{RMS acceleration with traditional outrigger system}}$

우선 풍하중이 예제구조물에 가해지는 경우에 대하여 스마트 아웃리저 댐퍼시스템을 구성하는 MR 댐퍼의 용량을 변화시켜 보았다. MR 댐퍼의 용량변화에 따른 성능평가지수 J1과 J2의 변화를 <Fig. 6>과 <Fig. 7>에 나타내었다. 그림에 나타낸 MR 댐퍼의 용량은 <Fig. 2>에 나타낸 모델에서 한 쪽 편에 사용된 용량으로서 수치해석 과정에서 현재의 기술로 제작 가능한 MR 댐퍼의 최대 용량을 넘어설 수 있다. 이러한 경우에는 제작 가능한 최대 용량의 MR 댐퍼를 여러개 설치하는 것으로 가정하였다.



<Fig. 6> J1 vs MR damper capacity (Wind)

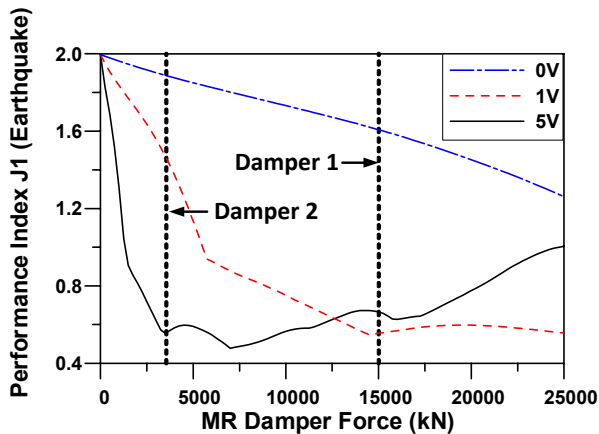


<Fig. 7> J2 vs MR damper capacity (Wind)

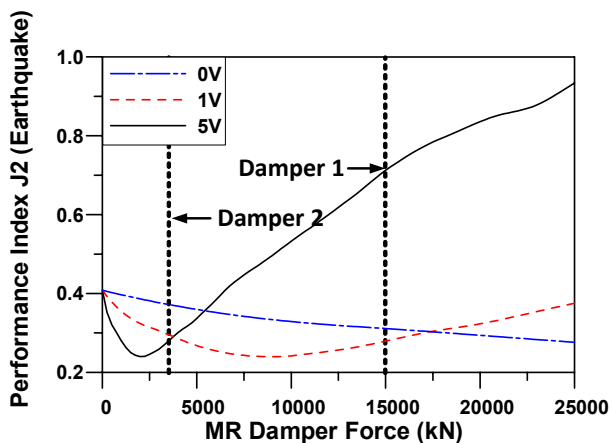
그림에서 보는 바와 같이 풍하중에 대해서는 MR 댐퍼의 용량이 커질수록 성능평가지수 J1과 J2 모두 줄어드는 것을 알 수 있다. 이때 MR 댐퍼로 전달되는 명령전압은 제어하지 않고 일정한 상태로 두어서 수동 아웃리거 댐퍼시스템과 같은 거동을 나타내도록 하였다. 일반적으로 명령전압이 크면 클수록 더 우수한 제어성능을 나타내었다. 성능평가지수 J1에 대해서는 명령전압이 0 volt 혹은 1 volt일 때에는 전 구간에 걸쳐서 1보다 크게 나타났다. 따라서 일반적인 아웃리거 시스템보다 우수한 제어성능을 발휘하기 위해서는 5 volt의 명령전압을 사용하는 것이 필요하다. 성능평가지수 J2에 대해서는 명령전압이 낮은 상태의 경우에도 나쁘지 않은 제어성능이 발휘되었고 5 volt의 명령전압을 사용한 경우에는 대부분의 구간에서 1 이하의 J2 값을 나타내었다. 성능평가지수 J1과 J2 모두 MR 감쇠기의 용량을 늘리는 초기에 급격히 감소하다가 약 5,000 kN

이후에는 감소율이 줄어드는 것을 알 수 있다. 풍하중에 대해서는 그림에서 보는 바와 같이 가속도응답(J2)보다 변위응답(J1)을 줄이는 것이 더 어렵고 중요하다고 판단되므로 15,000 kN의 댐퍼용량을 최적의 값으로 선택하였다. 이때의 댐퍼를 Damper 1로 표현하였고 J1은 0.5626, J2는 0.2038을 나타내었다. 이것을 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 이용하면 일반적인 아웃리거 시스템보다 최대 변위응답은 약 44%, RMS 가속도응답은 약 80% 더 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

지진하중이 가해지는 예제구조물에 대하여 MR 댐퍼의 용량을 변화시킨 파라미터 연구 결과를 <Fig. 8>과 <Fig. 9>에 나타내었다. 성능평가지수 J1을 보면 명령전압이 0 volt인 경우에는 댐퍼의 용량이 커질수록 감소하지만 1보다 작은 값을 나타내는 것이 어려웠다. 명령전압이 1 volt인 경우에는 약 5,000 kN까지는 급격하게 감소하다가 약 15,000 kN까지는 감소율이 완만해지고 그 이후에는 지수개선 효과가 거의 나타나지 않았다. 전압이 5 volt인 경우에는 대략 7,000 kN까지는 J1 값이 감소하다가 그 이후에는 MR 댐퍼의 용량이 커짐에 따라서 오히려 J1 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 지진하중에 대한 성능평가지수 J2 값은 MR 댐퍼용량이 '0'이더라도 이미 약 0.4를 나타낼 정도로 가속도응답의 제어효과는 아웃리거 댐퍼시스템이 기존의 아웃리거 시스템 보다 우수한 것을 알 수 있다. <Fig. 9>에 나타난 바와 같이 명령전압이 0 volt일 때에는 MR 댐퍼의 용량이 증가함에 따라서 성능평가지수 J2의 값이 감소한다. 그러나 명령전압이 1 volt 이상일 때에는 댐퍼용량의 증가에 따라서 J2 값이 감소하다가 댐퍼용량이 너무 증가하게 되면 J2 값이 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다. 명령전압이 5 volt일 경우에는 댐퍼용량이 약 2,400 kN까지는 J2 값이 급격히 감소하다가 댐퍼용량이 그보다 커지면 J2 값이 매우 가파르게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해서 지진하중에 의한 가속도응답을 제어할 때에는 너무 큰 용량의 MR 댐퍼를 사용하게 되면 제어성능이 급격히 저하됨을 알 수 있다.



<Fig. 8> J1 vs MR damper capacity (EQ)



<Fig. 9> J2 vs MR damper capacity (EQ)

지진하중에 대한 성능평가지수 J1과 J2에 대해서 모두 적절하게 제어할 수 있는 MR 댐퍼의 용량을 3,500 kN으로 선택하였고 이를 <Fig. 9>와 <Fig. 10>에서 Damper 2로 나타내었다. Damper 2의 성능평가지수 J1 값은 0.5547이고 J2 값은 0.2789로서 일반적인 아웃리거 시스템에 비해 아웃리거 댐퍼시스템의 제어성능이 매우 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

지진하중 및 풍하중에 대한 스마트 아웃리거 댐퍼시스템의 제어성능을 분석해보면 일반적인 아웃리거 시스템에 비해서 변위응답보다는 가속도응답을 더 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 변위응답의 제어성능 개선이 어려운 이유는 스마트 아웃리거 댐퍼시스템에서는 아웃리거와 외곽기둥의 연결이 댐퍼를 통해서 이루어지기 때문에 기존 아

웃리거 시스템에 비하여 횡방향 강성이 저하되기 때문인 것으로 판단된다. 본 절에서는 강성 및 감쇠의 실시간 변화가 가능한 MR 댐퍼를 이용해서 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 구성하였지만 일정한 명령전압을 사용해서 MR 댐퍼의 용량을 조절하였기 때문에 사실상 수동 아웃리거 댐퍼시스템으로 볼 수 있다. 수치해석을 통하여 풍하중에 의한 응답을 효과적으로 제어할 수 있도록 선택한 적절한 용량의 MR 댐퍼를 Damper 1이라고 하였고 지진하중에 대해서는 Damper 2로 두었다. 풍하중에 의한 응답을 효과적으로 제어하기 위해 선택한 Damper 1을 사용하여 구성된 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 지진하중에 적용하는 경우와 반대로 지진하중에 의한 응답의 제어를 위해 선택한 Damper 2를 풍하중에 적용하는 경우에 대해서 제어성능 변화를 검토하여 보았다. 이를 위한 Damper 1과 Damper 2가 사용된 스마트 아웃리거 댐퍼시스템의 풍하중과 지진하중에 대한 성능평가지수를 <Table 2>와 <Table 3>에 나타내었다.

<Table 2> Performance index of damper1

	J1	J2
Wind	0.5626	0.2038
Earthquake	0.6660	0.7125
Average	0.6143	0.4582

<Table 3> Performance index of damper2

	J1	J2
Wind	1.1071	0.2670
Earthquake	0.5547	0.2789
Average	0.8309	0.2730

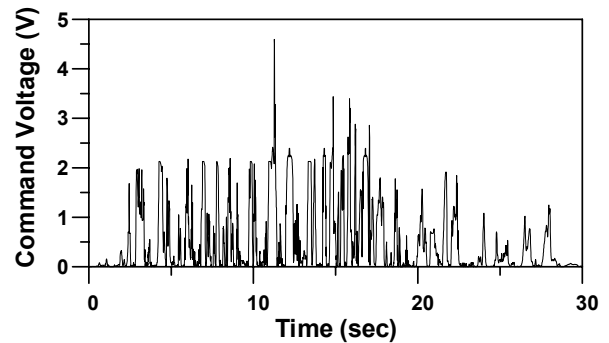
표에서 보는 바와 같이 Damper 1은 풍하중에 대해서 우수한 제어성능을 나타내지만 지진하중에 대해서는 제어성능이 저하되는 것을 볼 수 있다. 이것은 지진하중에 대해서 설계된 Damper 2의 결과와 비교해보면 더 확실하게 알 수 있다. 즉, 지진하중

에 대해서 Damper 2의 경우에 J1과 J2가 각각 0.5547과 0.2789의 값을 나타내었는데 Damper 1을 사용하면 각각의 값이 0.6660과 0.7125로 증가하는 것을 알 수 있다. 지진하중에 대해서 설계된 Damper 2를 풍하중에 대해서 적용하면 가속도 응답과 관련된 J2는 큰 차이가 없는 반면에 변위응답에 관련된 J1은 1.1071로서 일반적인 아웃리거 시스템보다 응답이 더 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용하는 예제구조물은 높이가 200m인 초고층 건물로서 하중의 절대적인 크기를 비교해 보자면 풍하중이 지진하중보다 크다. 따라서 큰 하중인 풍하중에 의해서 선택된 Damper 1을 지진하중에 적용할 때보다 작은 하중인 지진하중에 의해 선택된 Damper 2를 풍하중에 적용할 때 제어성능 저감이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 풍하중의 절대값이 지진하중보다 크지만 그 반대의 경우일지라도 두 하중 중 큰 하중을 적절하게 제어할 수 있는 MR 댐퍼를 선택하는 것이 필요하다고 판단된다.

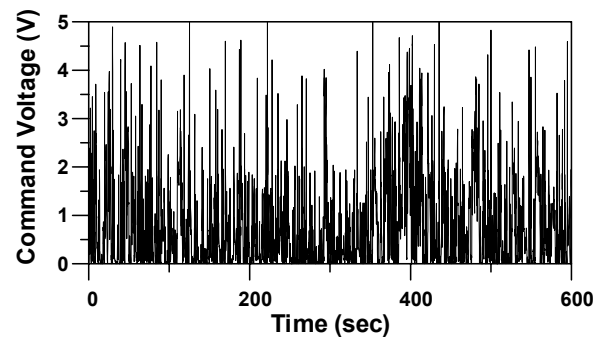
4. 스마트 아웃리거 댐퍼시스템의 최적제어

앞 절에서 MR 댐퍼의 용량을 조절하여 풍하중과 지진하중에 대해 각각 효과적인 제어성능을 나타내는 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 구성하였다. 그러나 MR 댐퍼의 감쇠력을 조절하지 않았기 때문에 지진하중과 풍하중 모두 효과적인 제어성능을 발휘하기가 어려웠다. 본 절에서는 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 구성하는 MR 댐퍼의 감쇠력을 실시간으로 최적제어하기 위해서 제어알고리즘을 개발하였다. 제어알고리즘으로는 퍼지제어알고리즘을 사용하였고 이를 최적화하기 위하여 유전자알고리즘을 사용하였다. 퍼지제어알고리즘의 입력변수로는 아웃리거와 외곽기둥 사이의 상대변위 및 상대속도를 사용하였고 출력변수는 명령전압으로 하였다. 스마트 아웃리거시스템을 구성하는 좌측과 우측의 MR 댐퍼에 동일한 명령전압을 전달하였다. 유전자 알고리즘은 풍하중 및 지진하중에 대한 성능평가지

수(J1, J2)를 각각 구한 뒤 이 값의 평균값을 저감시키는 것을 목적으로 하여 퍼지제어알고리즘을 최적화시킨다. 이렇게 개발한 퍼지제어알고리즘을 사용할 때 지진하중과 풍하중에 의해서 생성되는 명령전압을 <Fig. 10>과 <Fig. 11>에 나타내었다. 본 수치해석에서는 MR 댐퍼 Damper 1 모델을 사용하여 구성한 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 하중의 절대적 크기가 작은 지진하중에 대해서는 비교적 작은 크기의 명령전압이 생성되고 크기가 큰 풍하중에 대해서는 생성되는 명령전압의 크기가 커서 MR 댐퍼의 감쇠력이 커지는 것을 알 수 있다.



<Fig. 10> Command voltage for earthquake



<Fig. 11> Command voltage for wind

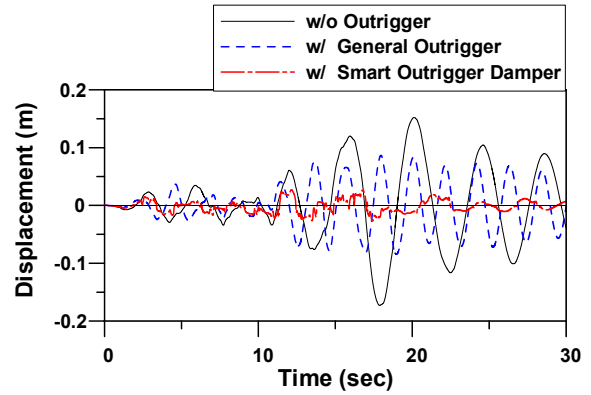
이렇게 개발된 퍼지제어알고리즘으로 제어된 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 사용하였을 때 얻은 성능평가지수를 <Table 4>에 나타내었다. 지진하중과 풍하중에 대한 J1 및 J2의 평균값은 0.3097 및 0.2190으로서 파라미터 연구를 통해 얻은 Damper 1이나 Damper 2에 의한 값보다 월등히 우수한 값을 나타내었다. 즉 적절히 제어된 스마트 아웃리거

댐퍼시스템은 지진 및 풍하중에 대하여 변위응답은 약 70%, 가속도응답은 약 78%정도 일반적인 아웃리거 시스템에 비하여 더 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 아래 표에서 볼 수 있듯이 외부 동적하중에 대해서 실시간으로 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 제어한다면 파라미터 연구를 통해서 결정한 수동 스마트 아웃리거 댐퍼시스템보다 탁월한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

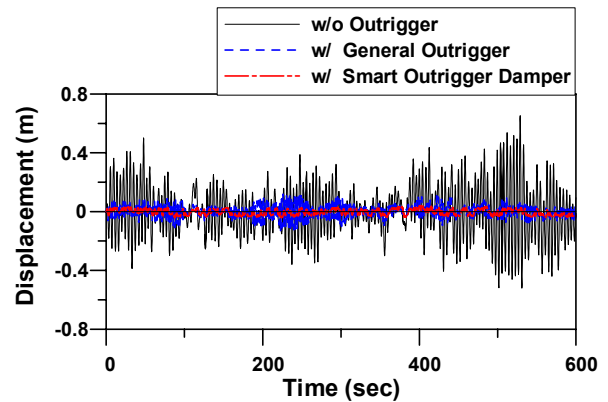
<Table 4> Performance index of smart damper

	J1	J2
Earthquake	0.3084	0.2427
Wind	0.3110	0.1952
Average	0.3097	0.2190

예제구조물에 아웃리거 시스템이 없는 경우와 일반적인 아웃리거 시스템, 그리고 스마트 아웃리거 댐퍼시스템이 있는 경우에 대하여 지진하중 및 풍하중에 대한 변위 시간이력을 <Fig. 12>와 <Fig. 13>에 비교하였다. 그림에서 보듯이 지진하중과 풍하중의 재하시간인 30초와 600초 동안의 응답을 비교하였다. 지진하중에 의한 응답을 보면 아웃리거가 없는 구조물에 비해서 아웃리거가 있는 구조물의 응답이 효과적으로 제어되는 것을 볼 수 있다. 특히 예제구조물은 50층의 초고층 건물로서 장주기 구조물이기 때문에 <Fig. 12>에 나타난 그래프를 통해서 대략적인 구조물의 고유진동주기를 파악할 수 있다. 그림을 보면 아웃리거가 없는 구조물에 비하여 아웃리거 시스템이 설치된 구조물의 고유진동주기가 더 짧아지면서 응답이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 아웃리거 시스템에 의해서 예제구조물의 횡방향 강성이 증가했기 때문이다. 퍼지제어알고리즘으로 제어되는 스마트 아웃리거 댐퍼시스템은 일반 아웃리거 시스템에 비해서 지진응답을 대폭 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 풍하중에 의한 응답 역시 아웃리거 시스템에 의해서 큰 폭으로 줄일 수 있는 것을 볼 수 있고 스마트 아웃리거 댐퍼시스템은 일반 아웃리거 시스템에 비해서 최대 변위를 약 69%정도 더 줄일 수 있었다.



<Fig. 12> Displacement time histories due to earthquake load



<Fig. 13> Displacement time histories due to wind load

5. 결론

기존 아웃리거 시스템은 횡방향 강성 증가에 우수한 효과를 나타내므로 변위응답 제어에 뛰어난 성능을 보이는 반면에 가속도 응답의 제어에는 크게 효과적이지 못하다고 알려져 있다. 비교적 최근에 개발된 아웃리거 댐퍼시스템은 기존 아웃리거 시스템에 비해서 가속도응답의 제어에 매우 뛰어난 성능을 보이고 있으나 변위응답의 효과적인 제어를 위해서는 댐퍼의 용량을 키우는 것이 필요하다. 아웃리거 댐퍼시스템을 적절하게 설계하면 풍하중 또는 지진하중에 대하여 매우 우수한 제어효과를 얻을 수 있다. 그러나 풍하중과 지진하중은 동적 특성이 매우 상이하기 때문에 어느 한 하중에 대해서 최적의 제어성능을 발휘하도록 설계된다면 다른 하중에 대해서는 제어성능이 저감될 수밖에 없다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 지진하중과 풍하중에 대하여 모두 효과적인 제어 성능을 나타내는 스마트 아웃리거 댐퍼시스템을 제안하였다. 수치해석 결과 제안한 스마트 아웃리거 댐퍼시스템은 최적의 수동 아웃리거 댐퍼시스템보다 지진하중과 풍하중 모두에 대해서 더 뛰어난 제어 효과를 나타내었다. 또한 동적 특성뿐만 아니라 하중의 절대적인 크기가 매우 다른 지진하중과 풍하중에 대해서 MR 댐퍼의 감쇠력을 실시간으로 조절함으로써 매우 뛰어난 적응력과 제어성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2014R1A2A2A01005418)

References

- Schueller, W., *The Vertical Building Structure*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- 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.
- Ho, W.M.G., "The evolution of outrigger system in tall buildings", *International Journal of High-Rise Buildings*, Vol. 5, No. 1, 2016, pp. 21-30
- Aydin, E., "Optimal damper placement based on base moment in steel building frames", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 79, 2012, pp. 216-225.
- Daniel, Y. and Lavan O., "Gradient based optimal seismic retrofitting of 3D irregular buildings using multiple tuned mass dampers", *Computers & Structures*, Vol. 139, No. 15, 2014, pp. 84-97.
- Park, K., Kim, D., Yang, D., Joung D., Ha, I. and Kim, S., "A comparison study of conventional construction methods and outrigger damper system for the compensation of differential column shortening in high-rise buildings", *International Journal of Steel Structures*, Vol. 10, No. 4, 2010, pp. 317-324.
- 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.
- Smith, R.J. and Willford, M.R., "The damped outrigger concept for tall buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 16, No. 4, 2007, pp. 501-517.
- 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 Spacial Structures*, Vol. 14, No. 4, 2014, pp. 97-104.
- 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.
- 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.
- 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.
- Chang, C.M., Wang, Z., Spencer, B.F. Jr. and Chen Z, "Semi-active damped outriggers for

- seismic protection of high-rise buildings”,
Samrt Structures and Systems, Vol. 11, No. 5,
2013, pp. 435-451.
14. Kim, H.S. and Kang, J.W., "Vibration control
performance evaluation of semi-active
outrigger damper system", Journal of the
Korean Association for Spatial Structures,
Vol. 15, No. 4, 2015, pp. 81-89.
15. 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.
16. 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.

- Received : August 29, 2016
- Revised : September 05, 2016
- Accepted : September 05, 2016