

스마트 스카이브릿지를 이용한 인접건물의 진동제어

Vibration Control of Adjacent Buildings using a Smart Sky-bridge

강주원* 채승훈** 김현수***
Kang, Joo-Won Chae, Seoung-Hun Kim, Hyun-Su

요약

본 연구에서는 MR 감쇠기와 FPS를 사용하여 구성된 스마트 스카이브릿지를 제안하였으며 스마트 스카이브릿지로 연결된 인접 건물의 지진응답 제어성능을 분석하였다. 이를 위하여 스마트 스카이브릿지로 연결된 10층과 20층 구조물을 예제 구조물로 선택하였고 근거리(near fault) 및 원거리(far fault) 지진의 특성을 가지는 El Centro 지진과 Kobe지진을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 스마트 스카이브릿지를 효과적으로 제어하기 위해서 퍼지논리제어기를 개발하였으며 퍼지논리제어기를 최적화하기 위하여 다목적 유전자알고리즘을 사용하였다. 최적화결과 10층 건물의 지진응답과 20층 건물의 지진응답 사이에는 상충관계(trade-off)가 있는 것을 알 수 있었고 다목적 유전자알고리즘을 통해서 두 건물의 지진응답 제어에 대한 퍼지논리제어기의 파레토 해집합을 구할 수 있었다. 수치해석결과 본 연구에서 제안한 스마트 스카이브릿지를 사용하면 연결된 건물의 지진응답을 효율적으로 저감시킬 수 있는 것을 알 수 있었다.

Abstract

In this study, a smart sky-bridge composed of MR damper and FPS has been proposed and vibration control performance of a smart sky-bridge for the connected buildings was investigated. To this end, 10-story and 20-story building structures connected by a smart sky-bridge were selected as example structures and El Centro and Kobe earthquakes, which have near and far fault ground motion characteristics respectively, were used for time history analyses. In order to effectively control the smart sky-bridge, fuzzy logic controller was developed and multi-objective genetic algorithm was used to optimize fuzzy logic controllers. Based on optimization results, it has been seen that there is a trade-off between seismic responses of 10-story and 20-story buildings and a suite of Pareto optimal solutions of fuzzy logic controllers for seismic response control can be obtained by multi-objective genetic algorithm. It is shown from numerical study that seismic responses of adjacent buildings can be efficiently controlled by using a smart sky-bridge.

키워드 : 스마트 스카이브릿지, 진동제어, 퍼지논리제어, 다목적 유전자알고리즘

Keywords : Smart Sky-bridge, Vibration control, Fuzzy logic control, Multi-objective genetic algorithm

1. 서론

사회가 발전하고 도시화가 급속히 진행되면서 제한된 토지로 인하여 건물들이 점점 고층화되며 건물들 사이의 간격이 점점 줄어들고 있는 추세에 있다. 이러한 인접한 건물의 경우 지진과 같은 횡방향

하중이 작용할 때 충돌(pounding)로 인한 파괴가 발생할 가능성이 높아지게 된다. 실제로 과거에 지진으로 인한 인접건물의 충돌에 의하여 구조체의 손상 및 파괴가 발생한 사례가 여러 차례 보고되었다¹⁻³⁾. 따라서, 이러한 문제를 피하기 위하여 건물간 최소간격이 제안되었으며 여러 나라의 내진설계 기준에서 지진하중에 의한 충돌을 방지하기 위하여 건물간의 최소간격을 여러 가지 방법으로 규정하고 있다. 이러한 지진하중에 의한 건물간의 충돌 문제를 보다 적극적으로 해결하기 위하여 인접한 건물 사이에 에너지를 소산시킬 수 있는 감쇠기를 사용

* 영남대학교 건축학부 부교수

** 영남대학교 대학원 건축학과 박사과정

*** 선문대학교 건축학부 조교수(교신저자)

Tel: 031-530-2315 Fax: 031-530-2839

E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr

하는 방법이 Kelvin 등⁴⁾에 의하여 제안된 바 있다. 그 이후 수동형 감쇠장치⁵⁻⁷⁾뿐만 아니라 준능동 및 능동형 제어장치⁸⁻¹¹⁾를 사용하여 인접건물의 진동제어에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 인접건물 사이에 진동제어장치를 설치하여 연결된 건물의 진동을 저감시키고자 하는 연구는 초기에 지진하중에 의한 건물간 충돌을 막는 것을 목표로 하여 진행되었고 이후 건물이 고층화되면서 점점 더 유연해지고 낮아지는 감쇠비로 인하여 야기되는 과도한 지진응답 및 풍응답을 저감시키기 위한 방향으로 확대되어 왔다. 이러한 선행연구들을 살펴보면 다양한 형태의 진동제어장치를 사용하여 인접한 건물들을 서로 연결함으로써 각각의 독립된 구조물에 비하여 내진 및 내풍성능을 크게 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 인접건물에 진동제어장치를 직접 연결하기 위해서는 건물 사이의 거리가 충분히 가까워야 하며 그렇지 않을 경우에는 추가적인 구조체를 구성하여 두 건물사이를 연결시켜 주어야 하는 문제점이 발생할 수 있다.

근래에 들어서는 인접한 고층건물들 사이에 이동의 편의를 위하여 스카이브릿지(sky-bridge)을 설치하여 화재와 같은 비상시에 대피 및 피난통로 사용될 수 있도록 하는 경우가 많다. 이렇게 건축적 목적으로 설치된 스카이브릿지를 이용하여 연결된 구조물의 동적응답을 저감시키고자 하는 연구가 몇몇 연구자에 의하여 시도되고 있다. 스카이브릿지를 사용하여 연결된 건물의 진동제어가 가능하다면 진동제어장치로 인접한 건물을 직접 연결하는 것에 비하여 감쇠기의 설치가 용이하고 연결을 위하여 추가적인 구조체가 필요 없으므로 경제적인 장점도 있다. 그러나 진동제어장치를 인접건물에 직접 연결하는 방법은 구조적 성능개선을 우선적 목표로 하고 있기 때문에 임의의 위치에 임의의 용량을 가진 제어장치를 비교적 자유롭게 사용할 수 있다. 이에 비하여 스카이브릿지를 사용하여 제어를 하는 경우에는 연결통로로서의 역할이 스카이브릿지의 1차적 목표가 되고 스카이브릿지를 이용한 동적특성개선이 2차적인 목표가 되므로 아무래도 연결된 건물의 동적응답 저감효과는 감쇠기를 사용하여 직접 연결하는 방법에 비하여 제한적일 수밖에 없을 것이다.

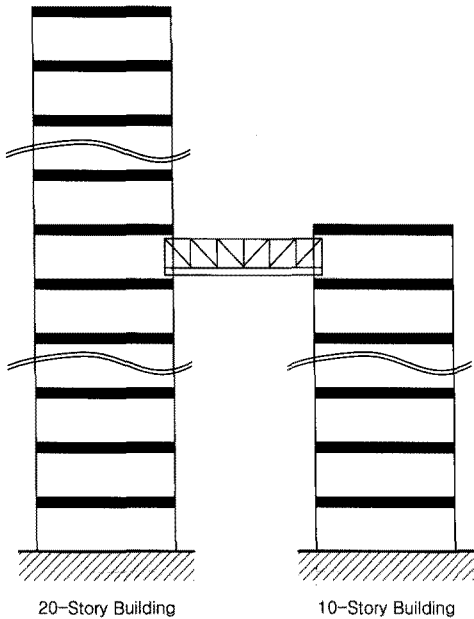
그러나, 건축적 목적으로 기왕에 설치될 스카이브릿지를 사용하여 연결된 건물의 지진 및 풍응답을 상당부분 저감시킬 수 있다면 매우 효율적인 진동제어기술로서 사용될 수 있을 것이다. 이러한 배경을 바탕으로 스카이브릿지를 이용한 인접건물의 진동제어에 대한 연구가 수행되어왔다¹²⁻¹⁶⁾. 기존 연구에서는 스카이브릿지 연결시스템의 특성에 따른 진동제어성능의 검토가 주로 이루어졌다¹²⁻¹⁴⁾. 이렇게 스카이브릿지의 연결방식을 다양하게 적용하고 그 영향을 분석하기 위해서는 반복적인 구조해석이 수반된다. 그러나 고층구조물 전체를 일반적인 방법으로 모형화한 유한요소 원형 모델을 사용하게 된다면 실제 구조물의 동적특성을 정확하게 반영하는 점은 유리하지만 반복적인 구조해석때문에 효율적이지 못하다. 따라서 스카이브릿지가 연결된 고층건물에 대한 효율적인 동적해석방법들이 등장하였다. 최근의 연구에서는 일반적인 상용 프로그램에서도 쉽게 사용할 수 있는 등가모델이 제안되었다^{15,16)}.

이렇게 기존의 스카이브릿지를 이용한 진동제어에 관한 연구는 주로 수동 연결시스템을 적용한 경우에 국한되어 있고 아직까지 스마트 감쇠기로 구성된 연결시스템을 사용한 스카이브릿지의 진동제어성능에 대한 검토 및 분석은 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 스마트 감쇠기를 사용하여 연결시스템을 구성한 스마트 스카이브릿지를 제안하고 스마트 스카이브릿지의 지진응답 제어성능을 평가하고자 한다. 스마트 스카이브릿지의 연결시스템은 MR(magneto-rheological) 감쇠기와 마찰진자베어링(Friction Pendulum System; FPS)으로 구성하였다. 예제구조물로는 10층이 스카이브릿지로 연결된 10층과 20층 구조물을 사용하였고 근거리(near fault) 및 원거리(far fault) 지진의 특성을 가지는 El Centro 및 Kobe 지진하중을 각각 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 스마트 스카이브릿지에 사용된 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 퍼지논리제어기(fuzzy logic controller)를 사용하였으며 퍼지논리제어기를 최적화하기 위하여 다목적 유전자알고리즘(multi-objective genetic algorithm)을 사용하였다. 수치해석을 위하여 MATLAB 버전 2009b를 사용하였으며 스마트 스카이브릿지를 사용하지 않은

경우와 사용한 경우의 지진응답을 비교하여 스마트 스카й브릿지의 진동제어성능을 검토하였다.

2. 스카й브릿지로 연결된 예제구조물

본 연구에서는 <그림 1>에 나타낸 바와 같이 10층에 스카й브릿지가 설치된 20층과 10층의 건물을 예제 구조물로 선택하였고 각 층별 집중질량(m_i)과 기동강성(k_i)으로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화 하였다. 따라서 층별 하나의 자유도로 모형화되어 20층 구조물과 10층 구조물은 각각 20개와 10개의 자유도를 가지는 운동방정식으로 표현된다.



<그림 1> 스카й브릿지로 연결된 예제모델

지진하중을 받는 스카й브릿지가 연결되지 않은 20층과 10층 건물의 운동방정식은 각각 아래의 식 (1)과 식 (2)로 표현할 수 있다.

$$M_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 = -M_1 E_1 \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = -M_2 E_2 \ddot{x}_g \quad (2)$$

여기서, E_1 과 E_2 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 각각 $[20 \times 1]$ 과 $[10 \times 1]$ 의 크기를 가진 단위벡터

(원소가 '1'인 벡터)이다. $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ 와 $x_2, \dot{x}_2, \ddot{x}_2$ 는 각각 20층 및 10층 건물의 변위, 속도, 가속도 벡터를 나타내고 \ddot{x}_g 는 입력되는 지반가속도를 나타낸다. M_1 과 M_2 는 각각 20층과 10층 건물의 질량행렬로서 식 (3)과 식 (4)의 대각행렬로 표현되며 K_1 과 K_2 는 두 구조물의 강성행렬로서 식 (5)와 식 (6)과 같이 정의된다.

$$M_1 = \begin{bmatrix} m1_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & m1_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & m1_{19} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & m1_{20} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} m2_1 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & m2_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & m2_9 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & m2_{10} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} k1_1 + k1_2 & -k1_2 & \dots & \dots & 0 \\ -k1_2 & k1_2 + k1_3 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k1_{19} + k1_{20} & -k1_{20} \\ 0 & \dots & \dots & -k1_{20} & k1_{20} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k2_1 + k2_2 & -k2_2 & \dots & \dots & 0 \\ -k2_2 & k2_2 + k2_3 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k2_9 + k2_{10} & -k2_{10} \\ 0 & \dots & \dots & -k2_{10} & k2_{10} \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, $m1_i$ 와 $k1_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 20$)는 20층 건물의 i 번째 층의 질량과 강성을 나타내며, $m2_j$ 와 $k2_j$ ($j = 1, 2, 3, \dots, 10$)는 10층 건물의 j 번째 층의 질량과 강성을 나타낸다. 본 연구에서는 20층 건물과 10층 건물의 층 질량을 동일하게 $8.0 \times 10^5 \text{kg}$ 으로 두었고 20층 건물의 층 강성은 $1.4 \times 10^9 \text{N/m}$ 로 두었고 10층 건물의 층 강성은 $2.0 \times 10^9 \text{N/m}$ 로 두었다. 이 값을 이용하여 고유치해석 한 결과 20층 구조물의 5개 저차모드 고유진동주기는 1.96, 0.65, 0.39, 0.28, 0.22초이고, 10층 구조물의 5개 저차모드 고유진동주기는 0.84, 0.28, 0.17, 0.13, 0.10초이다. 식 (1)과 식 (2)에서 C_1 과 C_2 로 나타낸 20층 및 10층 구조물의 감쇠행렬은 Rayleigh 감쇠를 이용하여 구성하였으며 건물의 거동에 가장 큰 영향을 미치는 1차모드 및 2차모드의 감쇠를 2%로 두었다.

위와 같이 구성된 운동방정식은 스마트 스카이브릿지가 설치되지 않은 독립된 20층과 10층 건물의 운동방정식이다. <그림 1>과 같이 두 인접건물 사이에 스마트 스카이브릿지를 설치하여 두 건물을 연결한 구조시스템의 운동방정식은 아래의 식 (7)과 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$M_1 \ddot{x}_1 + C_1 \dot{x}_1 + K_1 x_1 = -M_1 E_1 \ddot{x}_g + E_1^F F_c \quad (7)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 + C_2 \dot{x}_2 + K_2 x_2 = -M_2 E_2 \ddot{x}_g - E_2^F F_c \quad (8)$$

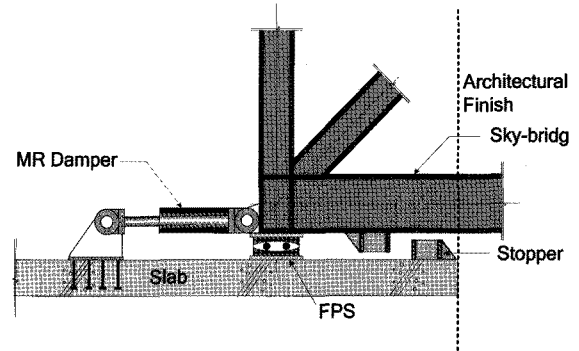
여기서, F_c 는 두 건물을 연결하는 스마트 스카이브릿지에 의해서 제공되는 감쇠력을 나타내며 실시간으로 변하게 된다. E_1^F 와 E_2^F 는 스마트 스카이브릿지가 설치된 층에 대한 위치행렬로서 스마트 스카이브릿지가 설치된 10층의 자유도 위치에서만 1의 값을 가지고 나머지 자유도에서는 0의 값을 가진다.

3. 스마트 스카이브릿지 연결시스템

3.1 연결시스템의 구성

스카이브릿지는 보통 10m 이상되는 거리를 연결하게 되므로 일반적으로 강재를 사용하여 트러스 형태로 구성된다. 스카이브릿지가 양쪽 건물에 강접합으로 연결된다면 연결부위에서 큰 응력이 발생하게 되고 전체 구조물의 비정형성이 증가하게 되므로 일반적으로 베어링을 사용하여 건물에 연결이 된다. 본 연구에서는 전술한 바와 같이 FPS 베어링을 사용하여 스카이브릿지와 구조물을 연결하였고 이를 <그림 2>에 나타내었다. FPS는 스카이브릿지의 네 모서리에 설치되어 스카이브릿지가 두 구조물과 분리되어 움직일 수 있도록 한다. 그리고 일반적으로 그림에 나타낸 바와 같이 스카이브릿지와 건물의 슬래브 사이에는 정지장치(stopper)를 두어 대규모 지진하중이나 풍하중이 가해질 경우라도 스카이브릿지가 낙교하는 것을 방지하도록 하고 있다. 스마트 스카이브릿지에 의한 전체 구조물의 진동 제어 효과를 파악할 때에 스카이브릿지의 변형에 의한 진동 제어 효과의 발생을 배제하고 검토하기 위

하여 스카이브릿지는 강체로 가정하여 모델링하였다. 스마트 스카이브릿지의 핵심 구성장치인 MR 감쇠기를 스카이브릿지 양단과 구조물의 슬래브 사이에 <그림 2>와 같이 설치하여 제어력이 발휘될 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 MR 감쇠기와 FPS의 특성은 다음 절에서 설명한다.

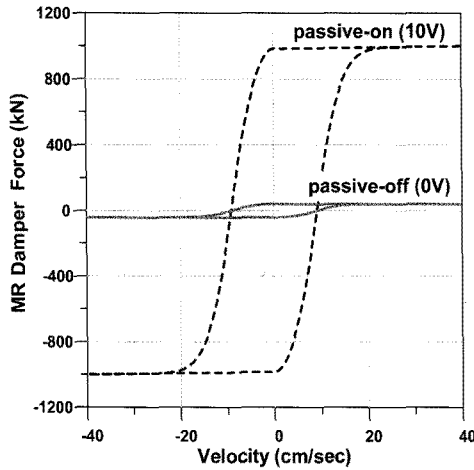


<그림 2> 스마트 스카이브릿지 연결시스템의 구성

3.2 MR 감쇠기 해석모델

본 연구에서는 대표적인 스마트 제어장치 중에 하나인 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 스카이브릿지를 구성하였다. MR 감쇠기는 작은 전력으로 변화시킬 수 있는 자기장에 반응하여 구조물에 가해지는 저항력의 크기를 실시간으로 조절할 수 있고 기계적으로 단순하면서도 빠른 반응속도를 가지고 외부온도가 변하거나 불순물이 첨가되어도 항복응력의 변화가 거의 없이 일정한 성능을 유지하는 장점 때문에 최근에 많은 연구가 진행되고 있고 건축 및 토목구조물 제어에 다양한 형태로 활용되고 있다. 이러한 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 Bouc-Wen 모델¹⁷⁾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 1000kN을 가지도록 설계된 모델로서 입력전압이 0V일 때 passive-off 상태를, 10V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. 입력전압에 따른 MR 감쇠기의 이력거동 변화 그래프를 <그림 3>에 나타내었다. <그림 3>은 감쇠기의 입력

속도를 sine 함수로 가정하여 시뮬레이션 하였을 때 속도와 감쇠력의 관계를 나타내는 이력곡선이다.



〈그림 3〉 MR 감쇠기의 힘-속도 이력곡선

3.3 FPS 해석모델

FPS는 구조물과 지반을 격리시키는 면진베어링 중의 하나로 FPS로 지지된 구조물의 진동주기는 구조물의 질량과는 관계없이 베어링의 곡률반경에 의해 쉽게 조절될 수 있고 면진된 구조물의 비틀림 거동을 최소화시킬 수 있다는 장점 때문에 널리 사용되고 있다. FPS에서는 베어링의 곡면을 따라서 상승한 구조물이 중력에 의해서 원래의 위치로 되돌아오려는 복원력이 발생하고 마찰면에서의 마찰력에 의해서 에너지가 소산된다. 이러한 FPS의 동적 거동을 모사하기 위하여 가장 널리 사용되고 있는 Constantinou와 Soong이¹⁸⁾ 제안한 식을 이용하였다. 본 연구에서는 FPS의 마찰력을 가능한한 줄임으로써 MR 감쇠기가 제어할 수 있는 범위를 늘리고 MR 감쇠기의 진동제어 능력을 극대화할 수 있도록 FPS 시스템의 마찰계수를 0.01의 값을 사용하였고 곡률반경은 1m로 하였다.

4. 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지논리제어기의 최적화

4.1 퍼지논리제어기

본 연구에서는 스마트 스카й브릿지를 구성하고

있는 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위하여 퍼지논리제어기를 사용하였다. 퍼지논리제어기의 입력변수는 <그림 4>에 나타난 바와 같이 스마트 스카й브릿지가 설치되는 10층에서 두 건물의 상대변위 및 상대속도로 하였고 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압(0-10V)을 출력변수로 하였다.



〈그림 4〉 퍼지논리제어기의 입출력관계

4.2 다목적 유전자알고리즘

본 연구에서는 스마트 스카й브릿지로 연결된 두 구조물의 지진응답을 동시에 저감시키는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 퍼지논리제어기를 최적화하였다. 다목적 최적화문제에서는 본질적으로 서로 우열을 판별할 수 없는 다수의 최적해가 존재하게 되는데 이를 파레토 최적해집합이라고 한다. 이는 다수의 목적함수가 서로 상충(trade-off)하는 특성 때문에 발생한다. 스마트 스카й브릿지로 연결된 건물은 서로 다른 동적특성을 가지고 있기 때문에 스카й브릿지를 통하여 상호 제어력을 주고받게 된다. 퍼지논리제어기는 스마트 스카й브릿지로 연결된 두 건물이 상호 주고받는 제어력을 실시간으로 조절하여 두 건물의 응답을 동시에 저감시킬 수 있도록 설계가 되어야 한다. 선형감쇠시스템을 사용하여 인접건물의 진동 제어를 시도한 선행연구¹⁹⁾의 결과를 보면 연결된 두 건물의 응답을 최소로 하는 최적감쇠용량이 단일한 값으로 정해지지 않으며 두 빌딩의 최적제어를 위한 감쇠용량에 대하여 trade-off가 존재한다고 밝히고 있다. 따라서 스마트 스카й브릿지를 제어할 퍼지논리제어기도 두 빌딩을 동시에 최적제어할 수 있는 하나의 알고리즘으로 정해지지 않고 서로 상충관계를 가지는 다수의 제어알고리즘(파레토 최적해)으로 나타날 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 퍼지논리제어기의 최적화에 있어서 10층 및

20층 건물의 최상층 변위의 저감을 최적화 목적으로 하는 다목적 최적화를 수행하였다. 본 연구에서 사용한 다목적 최적화의 목적함수를 식 (9)와 (10)에 나타내었다.

$$f_1 = \left\{ \left(\frac{\max_t |d_{10}(t)|}{\max_t |\hat{d}_{10}(t)|} \right)_{ElCentro} + \left(\frac{\max_t |d_{10}(t)|}{\max_t |\hat{d}_{10}(t)|} \right)_{Kobe} \right\} / 2 \quad (9)$$

$$f_2 = \left\{ \left(\frac{\max_t |d_{20}(t)|}{\max_t |\hat{d}_{20}(t)|} \right)_{ElCentro} + \left(\frac{\max_t |d_{20}(t)|}{\max_t |\hat{d}_{20}(t)|} \right)_{Kobe} \right\} / 2 \quad (10)$$

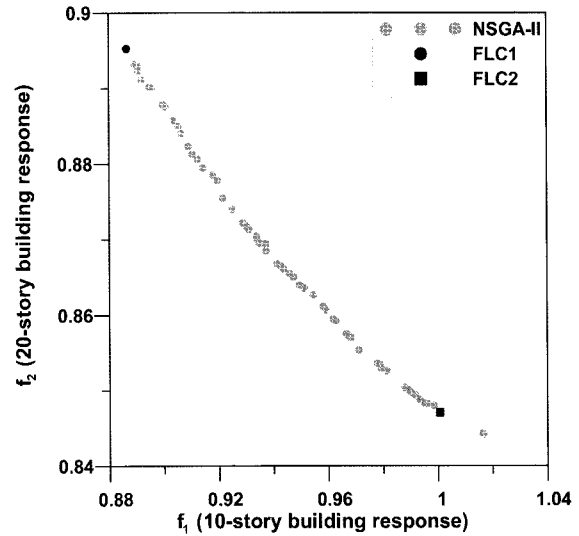
목적함수는 제어된 구조물의 응답을 제어하지 않았을 때의 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. 즉, 식 (9)와 (10)에서 분모는 모두 스마트 스카й브릿지가 사용되지 않은 상태의 구조물의 응답을 나타낸다. 식에서 d_{10} 과 d_{20} 은 각각 스마트 스카й브릿지로 제어된 상태에서의 10층 건물과 20층 건물의 최상층 변위응답을 나타내고 \hat{d}_{10} 과 \hat{d}_{20} 은 제어하지 않은 상태의 변위응답을 나타낸다. 본 연구에서는 근거리(near fault) 및 원거리(far fault) 지진의 특성을 가지는 El Centro 및 Kobe 지진하중을 사용하여 스마트 스카й브릿지의 제어성능을 평가하므로 두 지진에 의한 제어성능을 평균하여 각각의 목적함수로 사용하였다. 식에서 나타낸 바와 같이 f_1 은 10층 건물의 지진응답을 저감시키고자 하는 목적함수이고 f_2 는 20층 건물의 지진응답을 저감시키고자 하는 목적함수로서 두 목표가 서로 상충될 것으로 예상된다.

5. 수치해석 결과

5.1 최적화

스마트 스카й브릿지를 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하기 위하여 사용한 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2009b를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다.

앞 절에서 밝힌 2개의 목적함수를 이용하여 최적화를 수행하였고 최적화 수행결과 얻은 파레토 최적해 집합을 <그림 5>에 나타내었다.



<그림 5> NSGA-II를 이용한 다목적 최적화 결과

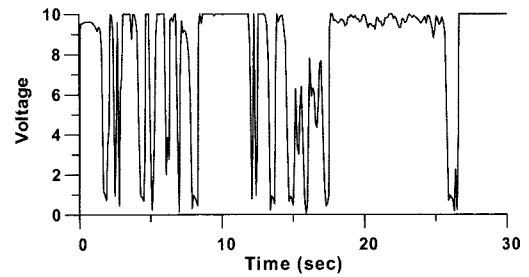
그림에서 보는 바와 같이 10층 건물의 지진응답 저감을 목표로 하는 목적함수 f_1 과 20층 건물의 지진응답 저감을 목표로 하는 목적함수 f_2 사이에는 trade-off가 존재하여 반비례관계가 성립하는 것을 알 수 있다. 그리고 10층과 20층 건물이 스마트 스카й브릿지로 연결되어 있을 경우에는 10층 건물보다는 20층 건물의 응답을 줄이는데 더욱 효과적이라는 것을 알 수 있다. 즉, f_1 은 0.9에서 1사이 존재하는 반면에 f_2 는 0.84에서 0.9사이 존재하는 것을 통해서 이것을 확인할 수 있다. 파레토 최적해 집합에는 총 66개의 개체가 존재하며 이것은 각각의 퍼지논리제어기를 의미한다. 다목적 유전자알고리즘을 사용하면 이와 같이 서로 우열을 가릴 수 없는 다수의 최적해를 얻게 되는데 엔지니어는 이러한 다수의 해중에서 설계목적에 적합한 최적의 해를 선택하게 된다. 본 연구에서는 10층 건물의 응답과 20층 건물의 응답을 동시에 적절하게 제어할 수 있는 퍼지논리제어기로 FLC1을 선택하여 <그림 5>에 검정색 동그라미로 나타내었다. 선택한 FLC1의 f_1 값과 f_2 값은 각각 0.88과 0.89로서 이것은 10층과 20층 건물의 응답을 모두 10%이상 저감할 수 있는

퍼지논리제어기라는 것을 의미한다. 목적함수로 사용한 f_1 과 f_2 는 제어하지 않은 상태의 응답에 대한 제어한 상태의 응답을 비율로서 나타내지만 실제로 스마트 스카й브릿지를 적용할 때에는 응답감소량의 절대적인 크기도 중요한 고려대상이 된다. 즉, 최상층변위를 10cm에서 5cm로 줄이는 것과 20cm에서 10cm로 줄이는 것은 똑같이 50%의 응답저감 효과가 있지만 실제로는 더 큰 응답을 줄이는 것이 중요할 것이다. 따라서, 10층 건물의 응답은 그대로 유지하면서 20층 건물의 응답을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지논리제어기를 선택하여 FLC로 표현하였다. FLC2의 f_1 값과 f_2 값은 각각 1.00과 0.84로서 20층 건물의 응답을 제어하는데 가중치를 두고 있다. 선택한 FLC1과 FLC2를 사용하여 스마트 스카й브릿지를 제어했을 때의 제어성능을 지진하중별 목적함수값으로 정리하여 <표 1>에 나타내었다. 사용한 지진하중에 대한 목적함수값들을 평균하면 각 퍼지논리제어기의 f_1 값과 f_2 값이 된다.

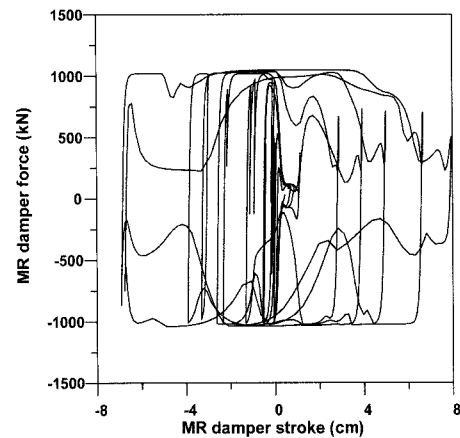
<표 1> 퍼지논리제어기에 따른 목적함수값

목적함수	지진하중	퍼지논리제어기	
		FLC1	FLC2
f_1	El Centro	0.833	1.058
	Kobe	0.939	0.942
f_2	El Centro	0.881	0.788
	Kobe	0.909	0.905

<표 1>을 보면 FLC1은 10층 건물과 20층 건물을 적절하게 제어할 수 있는 것을 알 수 있다. 특히, Kobe 지진하중보다는 El Centro 지진하중에 대해서 더 효과적이다. FLC2는 20층 건물의 지진응답 제어에 효과적인데 특히 El Centro 지진하중에 대해서는 20%이상의 응답저감 효과를 나타내는 것을 알 수 있다. El Centro 지진하중이 스마트 스카й브릿지가 설치된 예제구조물에 가해질 경우에 FLC1에 의해서 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압의 시간 이력을 <그림 6>에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 퍼지논리제어기는 구조물의 응답에 따라서 0V와 10V사이에서 적절한 값을 실시간으로 계산하여 출력하는 것을 알 수 있다.



<그림 6> El Centro 지진하중에 대한 FLC1의 명령전압 시간이력

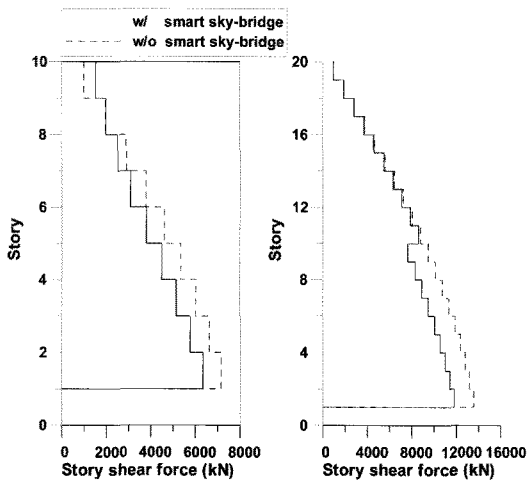


<그림 7> Kobe 지진하중에 대한 MR 감쇠기의 힘-변위곡선 (FLC1)

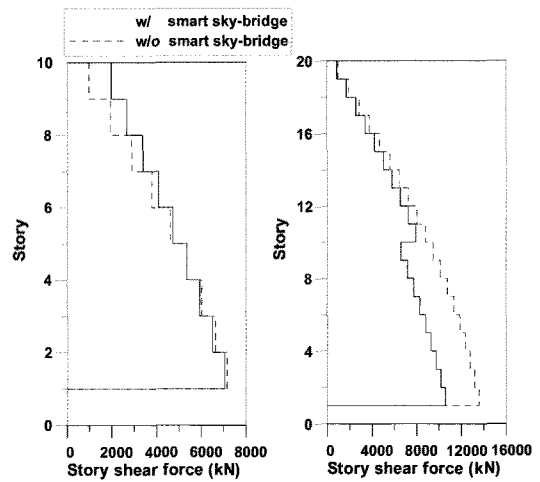
<그림 7>에는 Kobe 지진하중이 가해졌을 경우에 FLC1에 의해서 제어되는 MR 감쇠기의 힘-변위 관계를 나타내었다. 이력곡선 내부면적의 합만큼 지진 에너지가 소산되게 되는데 그림에서 보는 바와 같이 MR 감쇠기가 최대 용량 1000kN이내에서 적절하게 거동하여 입력되는 지진에너지를 소산시키는 것을 알 수 있다. Kobe 지진과 같은 큰 규모의 지진이 작용하였을 경우에도 MR 감쇠기의 양단 상대변위(stroke)는 그림에서 볼 수 있듯이 8cm 이하이다. MR 감쇠기 양단의 상대변위는 결국 스카й브릿지와 연결되는 구조물간의 상대변위와 동일한 의미를 가지게 되는데 이 값이 과도하게 크면 스카й브릿지의 안전성 및 실제 적용성에 문제가 있게 된다.

5.2 충전단력의 비교

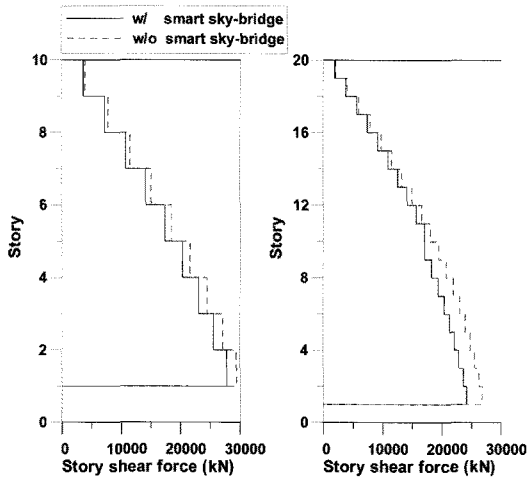
FLC1을 사용하여 스마트 스카й브릿지를 제어한 경우에 각각의 지진하중에 대한 예제구조물의 충전 단력을 <그림 8>과 <그림 9>에 나타내었다.



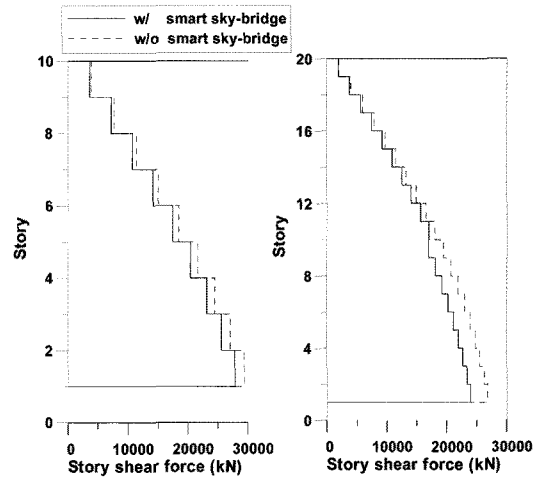
(a) 10층 건물 (b) 20층 건물
 <그림 8> FLC1을 사용한 경우의 El Centro 지진하중에 대한 건물의 최대 층전단력비교



(a) 10층 건물 (b) 20층 건물
 <그림 10> FLC2를 사용한 경우의 El Centro 지진하중에 대한 건물의 최대 층전단력비교



(a) 10층 건물 (b) 20층 건물
 <그림 9> FLC1을 사용한 경우의 Kobe 지진하중에 대한 건물의 최대 층전단력비교



(a) 10층 건물 (b) 20층 건물
 <그림 11> FLC2를 사용한 경우의 Kobe 지진하중에 대한 건물의 최대 층전단력비교

그림에서 볼 수 있듯이 FLC1은 10층 건물과 20층 건물의 응답을 동시에 적절히 저감시킬 수 있다. 특히 20층 건물의 경우에는 스마트 스카й브릿지가 연결된 10층 이하에서 응답의 저감이 두드러지는 것을 알 수 있다. <그림 10>과 <그림 11>에는 FLC2를 사용하였을 경우에 각 지진에 대한 층전단력을 나타내었다. 이 경우에는 10층 건물보다는 20층 건물의 응답저감효과가 두드러졌고 특히 El Centro 지진하중에 대한 20층 건물의 층전단력을 대폭 줄일 수 있었다. 10층 건물에 대한 응답은 스마트 스카й브릿지를 설치하기 전보다 더 증가하는 부분도 있었다.

6. 결론 및 추후연구 과제

본 연구에서는 MR 감쇠기와 FPS로 구성된 스마트 스카й브릿지를 제안하였고 이를 효율적으로 제어할 수 있는 퍼지논리제어알고리즘을 개발하였다. 퍼지논리제어기를 최적화하기 위해서 다목적 유전자알고리즘인 NSGA-II를 사용하였고 이때 10층과 20층 건물의 최상층변위응답을 목적함수로 사용하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. MR 감쇠기와 FPS로 구성된 스마트 스카й브릿지를 사용하여 인접한 10층 및 20층 예제구

조물의 응답을 효율적으로 제어할 수 있었다. 근거리 및 원거리 지진하중에 대하여 약 10%의 지진응답 저감효과를 보였다.

2. 본 연구에서는 서로 상충되는 10층 구조물과 20층 구조물의 응답저감을 목표로 하여 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지논리제어기의 최적화를 수행하였고 우수한 제어성능을 나타내는 파레토 최적해집합을 얻을 수 있었다. 이렇게 얻어진 다수의 최적 퍼지논리제어기 중에서 엔지니어가 원하는 성능을 가진 제어기를 쉽게 선택할 수 있었으며 시뮬레이션결과 기대한 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 다목적 유전자알고리즘을 이용한 퍼지논리제어기의 최적화방법을 스마트 스카й브릿지 제어기의 개발에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.
3. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기의 용량은 1000kN으로 현재의 기술로서 충분히 제작이 가능하다. 또한 Kobe 지진과 같은 큰 규모의 지진에 대해서도 예제건물과 스마트 스카й브릿지 사이의 상대변위가 8cm이하이므로 건축적으로 충분히 허용이 가능하다. 따라서, 본 연구에서 제안한 스마트 스카й브릿지의 실제 구조물에 적용 가능성이 매우 높다고 판단된다.
4. 스마트 스카й브릿지를 이용하여 지진하중에 대한 예제건물의 층전단력을 효과적으로 줄일 수 있었다. 이렇게 저감된 층전단력이 구조설계과정에서 고려될 수 있다면 더욱 효율적이고 경제성이 있는 구조설계결과를 도출할 수 있을 것이다. 이러한 작업이 가능하기 위해서는 스마트 스카й브릿지만의 최적설계가 아니라 구조설계과정까지 포함한 통합 최적설계 및 최적화에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.
5. 본 연구에서는 스카й브릿지가 설치된 방향으로 2차원 해석을 수행하였다. 그러나 보다 실제적인 검토를 위하여 3차원 해석이 추후 필요할 것이다. 특히 스카й브릿지 설치 방향에 수직으로 작용하는 지진하중에 대하여 스마트 스카й브릿지의 거동분석에 대하여 추후 연구할 계획에 있다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-D00642)을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. S.A. Mahin, V.V. Bertero, A.K. Chopra and R.G. Collins (1976), Response of the olive view hospital main building during the San Fernando earthquake, Report No. EERC 76-22, University of California Berkeley.
2. V.V. Bertero (1987), Observations on structural pounding, International Proceedings of the International Conference on the Mexico Earthquake, ASCE, pp. 264-278.
3. J.F. Hall (1995), Northridge Earthquake of January 17, 1994 - Reconnaissance Report, Vol. 1, Report No. 95-03, Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, CA.
4. R.E. Klein, C. Casano and J. Stukel (1972), Investigation of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures, Paper No. 72-WA/AUT-H, ASME, 1972 Winter Annual Meeting, New York.
5. B. Westermo (1989), The dynamics of interstructural connections to prevent pounding, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 18, pp. 687-699.
6. W.S. Zhang and Y.L. Xu (1999), Dynamic characteristics and seismic response of adjacent buildings linked by discrete dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 28, pp. 1163-1185.
7. H.P. Zhu and H. Iemura (2000), A study of

- response control on the passive coupling element between two parallel structures, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 9, pp. 383-396.
8. R.E. Klein and M.D. Healy (1985), Semi-active control of wind induced oscillations, *Proceedings of 2nd International Conference on Structural Control*, University of Waterloo, Ontario, Canada, 15-17 July, pp. 354-369.
 9. S. Mitsuta and K. Seto (1992), Active vibration control of Structures arranged in parallel, *Proceedings of the First International Conference on Motion and Vibration Control*, Japan, pp. 146-151.
 10. R.E. Christenson, B.F. Spencer Jr. and E.A. Johnson (1999), Coupled building control using active and smart damping strategies, *Proceedings of the 5th International Conference on Application of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering*, Oxford, England.
 11. Y. Yamada, N. Ikawa, H. Yokoyama and E. Tachibana (1994), Active control of structures using the joint member with negative stiffness, *Proceedings of the 1st World Conference on Structural Control*, Los Angeles, California, Vol. 2, TP2, pp. 41-49.
 12. 안상경, 오정근 (2005), Sky-bridge를 이용한 초고층 건물의 진동제어, *대학건축학회 학술발표대회 논문집*, Vol. 25, No. 1, pp.35-38.
 13. 김진구, 류진국 (2004), Sky-bridge로 연결된 건물의 진동제어, *한국전산구조공학회 논문집*, Vol. 17, No.2, 2004, pp.203-213.
 14. 김현수, 양아람, 이동근, 안상경, 오정근 (2008), 스카이라프트로 연결된 고층건물의 진동제어 성능평가, *한국공간구조학회 논문집*, Vol. 8, No. 4, pp. 91-100.
 15. 김현수, 이동근, 양아람, 고현 (2009), 스카이라프트로 연결된 벨트월이 있는 고층건물의 효율적인 동적해석, *한국전산구조공학회 논문집*, Vol. 22, No. 3, pp. 231-242.
 16. 양아람, 스카이라프트로 연결된 구조물의 효율적인 동적해석을 위한 등가모델, 석사학위논문, 성균관대학교.
 17. R.H. Sues, S.T. Mau, Y.K. Wen (1988), System identification of degrading hysteretic restoring forces, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 114, No. 5, pp. 833-846.
 18. M.C. Constantinou and T.T. Soong (1994), *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, New York.
 19. 옥승용, 박관순, 고현무 (2006), 인접구조물의 진동제어를 위한 선형감쇠시스템의 최적설계, *한국지진공학회 논문집*, Vol. 10, No. 3, pp. 85-100.

▶접수일자 : 2010년 8월 4일
 ▶심사 완료일자 : 2010년 10월 18일
 ▶게재 확정일자 : 2010년 10월 30일