

# 스마트 연결 제어 시스템과 연결 구조물의 통합 최적 설계

## Integrated Optimal Design of Smart Connective Control System and Connected Buildings

김 현 수\*  
Kim, Hyun-Su

강 주 원\*\*  
Kang, Joo-Won

### Abstract

A smart connective control system was invented recently for coupling control of adjacent buildings. Previous studies on this topic focused on development of control algorithm for the smart connective control system and design method of control device. Usually, a smart control devices are applied to building structures after structural design. However, because structural characteristics of building structure with control devices changes, a iterative design is required for optimal design. To defeat this problem, an integrated optimal design method for a smart connective control system and connected buildings was proposed. For this purpose, an artificial seismic load was generated for control performance evaluation of the smart coupling control system. 20-story and 12-story adjacent buildings were used as example structures and an MR (magnetorheological) damper was used as a smart control device to connect adjacent two buildings. NSGA-II was used for multi-objective integrated optimization of structure-smart control device. Numerical simulation results show the integrated optimal design method proposed in this study can provide various optimal designs for smart connective control system and connected buildings presenting good control performance.

**Keywords :** Smart connective control system, Integrated optimal design, Seismic response reduction, Multi-objective optimization, Adjacent buildings

### 1. 서론

근래 개발도상국 및 선진국에 관계없이 도시화가 급격히 진행됨에 따라 지가 상승 등으로 건물의 고층화가 이루어지고 있다. 고층 건물은 인구 밀도가 높고 지대가 높을수록 인접하여 건설되는 경우가 많다. 인접하여 건설된 고층 건물을 다양한 방법으로 연결하여 풍하중 및 지진 하중에 의한 구조물의 동적 응답을 저감시키기 위한 연구가 국내외에서 다수 수행되어 왔다<sup>1-3)</sup>.

인접한 고층 건물의 연결 제어에 대한 연구는 수동 감쇠기를 사용한 연구가 대다수로 수동 감쇠기의 최적 용량 및 최적 설치 위치를 결정하는 설계

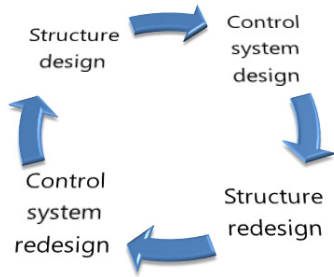
방법에 대한 내용이 주를 이루고 있다<sup>4,6)</sup>. 최근에는 준능동 및 스마트 제어 장치를 이용한 고층 건물의 동적 응답 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 실제 적용 사례도 꾸준히 증가하고 있다<sup>7,8)</sup>. 스마트 제어 장치가 보여주는 능동 제어 장치와 같은 적응성과 수동 제어 장치와 같은 안정성 때문에 인접한 건물의 연결 제어 시스템에 적용하여 그 효율성을 검증하는 연구도 국내외에서 수행되고 있다<sup>1),9),10)</sup>.

스마트 및 준능동 제어 장치를 활용한 연결 제어 시스템에 관한 연구는 주로 제어 장치의 최적 설계 및 최적 제어 알고리즘 개발에 대해 이루어지고 있다. 수동 또는 스마트 연결 제어 시스템은 지진 하중을 받는 인접한 고층 건물의 설계가 이루어진 후 추가적인 구조 성능 개선이 필요한 상황에서 사용되고 있다. 즉 대상 구조물의 구조 부재 최적 설계가 수행된 후 추가적인 구조 제어 시스템의 설계를 수행하는 순차적인 설계 방법은 설계 과정이 명확하고 비교적 용이하므로 기존 구조물의 동적 응답

\* 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수  
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering,  
Sunmoon University  
Tel: 041-530-2315 Fax: 041-530-2839  
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

\*\* 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사  
School of Architecture, Yeungnam University

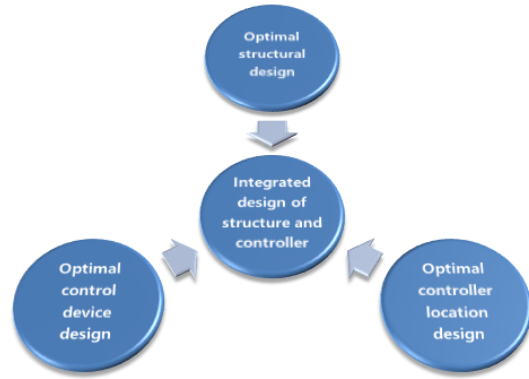
제어 장치의 설계 시 일반적으로 수행되고 있는 방법이다<sup>11)</sup>. 순차적인 방법에 의한 구조물 및 구조 제어 시스템의 설계 과정을 <Fig. 1>에 나타내었다.



<Fig. 1> Interactive design of structure and control system

우선 지진 하중을 받는 건물에 대하여 구조 설계를 수행하여 적절한 구조 부재의 단면과 철근 배근량 등을 결정하게 된다. 이렇게 구조 설계가 끝난 구조물에 연결 제어 시스템 등을 추가하고 최적의 성능을 발휘하도록 설계가 이루어진다. 연결 제어 시스템이 인접한 건물에 설치되면 구조물의 동적 특성 및 응답이 변하여 최적의 구조 부재를 찾는 구조 설계안은 최초의 안과 달리 다시 최적화가 가능하게 된다. 이에 따라 구조물의 재설계가 이루어지고 연결 제어 시스템 역시 최초의 설계안과는 다른 최적의 설계안이 존재하게 되므로 최적 설계를 위해서는 <Fig. 1>과 같은 반복 설계 과정이 필요하다. 그러나 반복 설계 과정에 소요되는 노력 및 시간이 적지 않고 얻게 되는 설계안도 최적의 결과라고 판단하기 어렵다. 이러한 문제점 때문에 구조물과 구조 제어 시스템을 하나의 시스템으로 간주하고 구조물 및 제어 시스템의 설계 변수를 동시에 최적화할 수 있는 <Fig. 2>와 같은 통합 최적 설계 기법이 제안되었다<sup>12)</sup>. 현재까지 다양한 형태의 진동 제어 장치와 구조물을 함께 최적 설계하는 통합 최적 설계 기법에 대한 연구가 다수 수행되고 있다<sup>13-15)</sup>.

그러나 기존의 연구는 주로 구조물 내부에 설치되는 일반적인 감쇠기, 동조 질량 감쇠기, 면진 장치



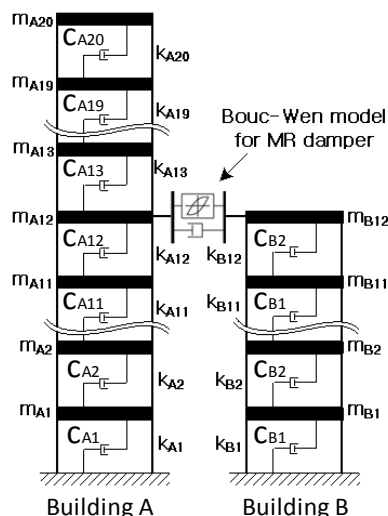
<Fig. 2> Integrated design of structure and control system

등과 구조물의 통합 설계에 대해 이루어져 왔으며, 스마트 연결 제어 시스템 및 연결된 구조물의 동시 통합 설계에 대한 연구는 국내외에서 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 스마트 연결 제어 시스템과 연결 구조물의 통합 최적 설계 기법을 제안하고 그 효용성을 검증하고자 한다.

연결된 구조물과 연결 제어 시스템을 통합하여 최적화 작업을 수행할 때에는 구조 부재의 물량 및 제어 시스템의 용량을 줄이는 것이 목적이 될 수 있다. 이때 구조물의 응답을 줄이는 것도 최적 설계의 목적에 포함되어야 한다. 구조물의 물량 및 제어 시스템 용량과 구조물의 응답 사이에는 상충 관계(Trade-off)가 있기 때문에 다목적 최적화(Multi-objective optimization) 기법이 사용되어야 한다. 본 연구에서는 NSGA-II(d (a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)<sup>16)</sup> 최적화 기법을 적용하였다. 예제 구조물로 20층과 12층의 인접한 빌딩을 선택하고 두 건물의 연결 제어를 위한 제어 장치로 MR 감쇠기를 사용하였다. 통합 최적 설계의 설계 변수로는 예제 구조물의 층 강성 및 층 감쇠, MR 감쇠기의 제어 용량과 연결된 구조물의 최상층 최대 변위를 선택하였다. 다목적 유전자 알고리즘을 사용하여 얻은 파레토 최적해 설계안들을 분석하여 각 설계 변수의 상관관계를 평가하고, 통합 최적 설계를 수행하지 않은 구조물과의 지진 응답을 비교하였다.

## 2. 연결 제어 시스템 및 해석 모델 생성

본 연구에서는 연결 제어 시스템과 구조물의 통합 설계 기술 개발을 위한 예제 구조물로 선행 연구에서 사용한 20층 및 12층의 인접한 빌딩을 사용하였다<sup>1)</sup>. <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 예제 구조물은 전단 빌딩 모델로 표현하였고 각 층은 집중 질량( $m_i$ )과 기둥 강성( $k_i$ ) 및 점성 감쇠( $c_i$ )로 표현하였다. 선행 연구에서는 구조물의 1차모드와 2차모드 감쇠비를 2%로 가정하여 Rayleigh 감쇠로 감쇠 행렬을 구성하였으나 본 연구에서는 층별 감쇠 상수를 직접 입력하여 최적 설계 과정에서 감쇠 상수의 최적값을 찾을 수 있도록 하였다. 각 층의 특성치로는 20층인 건물 A와 12층인 건물 B의 층 질량  $m_{Ai}$ 와  $m_{Bi}$ 를 동일하게  $8.0 \times 10^5 kg$ 으로 두었고 층 강성  $k_{Ai}$ 와  $k_{Bi}$ 를  $1.35 \times 10^9 N/m$ 와  $2.02 \times 10^9 N/m$ 로 각각 두었다. 층 감쇠 상수인  $c_{Ai}$ 와  $c_{Bi}$ 는  $1.50 \times 10^7 Nsec/m$ 와  $1.00 \times 10^7 Nsec/m$ 로 각각 두었다. 이러한 특성치를 사용한 해석 모델을 이용하여 고유치 해석을 수행하였고, 그 결과 20층 및 12층 건물의 주요 5개 저차모드 고유 진동 주기는 2.00, 0.67, 0.40, 0.29, 0.23초 및 1.00, 0.33, 0.20, 0.15, 0.12초로 나타났다.

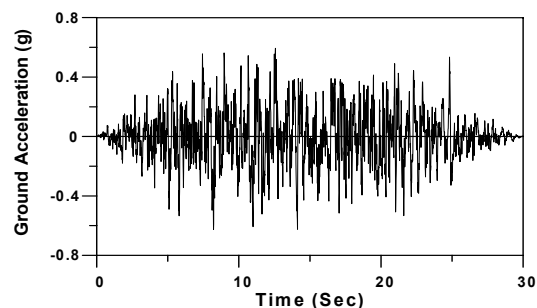


(Fig. 3) Adjacent example buildings

스마트 연결 제어 시스템을 구성하기 위해서 MR 감쇠기를 이용하였고 설치 위치는 선행 연구와 같

이 연결되는 건물 중 낮은 건물의 최상층인 12층으로 하였다. 이는 일반적인 빌딩 구조물이 캔틸레버와 같은 거동을 하여 최상층에서 가장 큰 동적 거동의 차이를 나타내기 때문이다. 스마트 연결 제어 시스템의 가장 중요한 제어 장치인 MR 감쇠기를 모형화하기 위해서 일반적으로 사용되는 수치 해석 모델인 Bouc-Wen 모델을 사용하였고 이를 <Fig. 3>의 연결 건물 사이에 표현하였다. 지금까지 다수의 연구자에 의해서 Bouc-Wen 모델을 사용한 연구가 수행되었으며, 실제 MR 감쇠기의 비선형 동적 거동을 정확하게 모형화하기 위한 다양한 변수값들이 제시되었다. 본 연구에서는 그 중 1,000kN 용량의 MR 감쇠기를 모사하는 Ok et al.(2007) 연구 결과를 사용하였다<sup>6)</sup>. 1,000kN 용량을 기본으로 최적화 과정을 거쳐서 스마트 연결 제어 시스템의 최적 설계를 수행하였다.

본 연구에서는 스마트 연결 제어 시스템과 연결 구조물의 통합 최적 설계를 위한 동적 하중으로 인공 지진 하중을 생성하여 시간 이력 해석을 수행하였다. 이때 미국의 설계 기준(ASCE 7-10)을 기반으로 인공 지진 하중을 생성하였다. 강진을 대표하는 도시는 LA 지역을 선택하였다. ASCE 7-10에 나타난 LA 지역의 유효 최대 지진 가속도(EPA; Effective Peak Ground Acceleration)는 0.626g이다. 인공 지진 하중은 LA 지역의 설계 응답 스펙트럼을 작성한 후 해당 응답 스펙트럼을 잘 나타내는 인공 지진 하중을 SIMQKE<sup>17)</sup>를 사용하여 생성하였다. 생성된 인공 지진 하중의 지반 가속도 시간 이력을 <Fig. 4>에 나타내었다. 인공 지진 하중은 0.01초의 간격으로 30초이다.

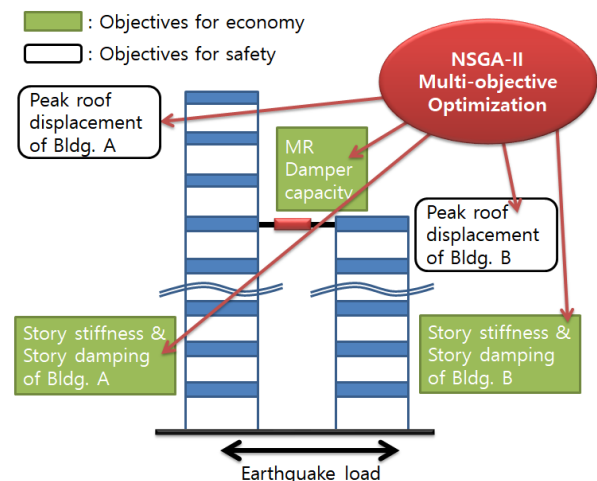


(Fig. 4) Ground acceleration of artificial EQ

### 3. 통합 최적 설계 알고리즘

본 연구에서는 스마트 연결 제어 시스템과 연결 건물의 강성 및 감쇠값을 동시에 고려하는 통합 최적 설계를 수행한다. 이를 위해서는 적절한 설계 변수를 선택하는 것이 중요하다. 본 연구에서 선택한 설계 변수는 스마트 연결 제어 시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 용량과 각 층의 강성 및 감쇠값 사용량이다. 구조 부재의 사용량 뿐만 아니라 지진 하중에 대한 구조물의 응답도 최소화해야 하기 때문에 통합 최적 설계는 다목적 최적화 문제로 귀결된다. 지진 하중에 대한 응답을 줄여서 구조적 안전성을 보장해야 하는 목적과 구조 부재 및 스마트 연결 제어 시스템 등의 사용량을 줄여서 경제성을 극대화시켜야 하는 목적으로 크게 정리될 수 있는데 이러한 다목적 최적화는 기본적으로 목적끼리 상충한다. 즉 한 목적에 대한 성능을 향상시키면 다른 목적은 성능이 저하된다. 따라서 다목적 최적화 문제에서는 모든 목적을 동시에 만족시키는 하나의 최적해를 찾는 것은 거의 불가능하고 우열을 가릴 수 없는 일련의 해의 집합(파레토 최적해)이 존재한다. 다목적 최적화 기법에는 지금까지 매우 다양한 방법이 제안되어 왔는데 여러 개체를 동시에 평가할 수 있는 유전자 알고리즘이 적합하다고 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 공학 분야의 다목적 최적화 문제 해결에 많이 적용되고 있는 NSGA-II<sup>6)</sup>를 이용하여 스마트 연결 제어 시스템과 연결 구조물의 통합 최적 설계를 수행하였다. NSGA-II를 이용하여 스마트 연결 제어 시스템, 연결된 구조물 및 지진 응답에 대한 다목적 통합 최적화를 수행하는 과정을 <Fig. 5>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 20층 및 12층 건물의 강성 및 감쇠와 더불어 MR 감쇠기의 용량을 유전자 알고리즘에 의해 적절한 값으로 설정한 후 구조물의 지진 응답을 평가한다. 이러한 방식으로 한 세대에 있는 모든 개체에 대한 시간 이력 해석과 평가를 진행한 후 우수한 개체를 선정하여 유전자 교배를 통해 다음 세대를 구성한다. 본 연구에서 적용한 5개의 다목적 최적화 목적 함수를 <Table 1>에 나타내었다. 표에서 20층 및 12층 건물의 각 층에 추가되는 강성을 모두 합한 값을 첫

번째 목적 함수(J1)로 두었다. 두 번째 목적 함수(J2)는 두 건물에 사용된 추가 감쇠값을 모두 더한 값으로 하였다. 세 번째 목적 함수(J3)는 MR 감쇠기의 용량으로 하였다. 네 번째 목적 함수(J4)는 20층 건물의 최대 변위 응답으로 하였고, 마지막 다섯 번째 목적 함수(J5)로는 12층 건물의 최대 변위 응답을 선택하였다. 표에서 보는 바와 같이 J1-J3은 구조체와 스마트 연결 제어 시스템을 구성하는 장치의 물량 및 용량으로서 경제성을 나타낸다. J4, J5는 연결된 구조물의 최상층 최대 변위로서 구조물의 안전성을 대표한다고 볼 수 있다. 다목적 함수 중 J1-J3과 J4, J5는 각각 경제성과 안전성을 나타내는 지표로 사용될 수 있으며 상충되는 특징이 있다.



<Fig. 5> Multi-objective optimization process

<Table 1> Multi-objective functions

| Objectives | Description                         |
|------------|-------------------------------------|
| J1         | Sum of additional stiffness         |
| J2         | Sum of passive dampers              |
| J3         | Capacity of MR damper               |
| J4         | Peak displacement of 20-story Bldg. |
| J5         | Peak displacement of 12-story Bldg. |

다목적 유전자 알고리즘을 이용하여 스마트 연결 제어 시스템과 연결된 구조물의 다목적 통합 최적화를 수행하기 위해서는 인코딩(Encoding) 과정을 거쳐서 구조물과 제어 시스템의 물량 및 용량을 유전적으로 표현해야 한다. 즉 예제 구조물의 구조적

특성치와 MR 감쇠기의 용량에 관한 정보를 염색체 (Chromosome)로 불리는 하나의 구조에 인코딩해야 한다. 예제 구조물의 구조 부재를 최적 설계하기 위해서는 각 층의 강성을 결정하는 것이 필요한데 유전자 알고리즘의 특성상 무작위로 임의의 값을 강성값으로 설정한 후 지진 응답에 대한 평가를 수행하게 된다. 이때 강성값으로 '0' 또는 너무 작은 값이 설정되면 의미 없는 결과가 나타날 수 있기 때문에 본 연구에서는 기본 강성을 가지는 해석 모델을 생성한 후 유전자 알고리즘에 의하여 추가되는 강성의 최적값을 결정하도록 하였다. 감쇠값 역시 2장에 설명한 기본 모델보다 약간 작은 기본값을 갖도록 설정한 후 최적의 추가 감쇠값을 유전자 알고리즘을 통해서 찾도록 하였다. 질량은 2장의 기본 모델과 같게 하였고 다목적 최적화를 위한 층별 기본 특성치를 <Table 2>에 나타내었다.

<Table 2> Base story properties of structure

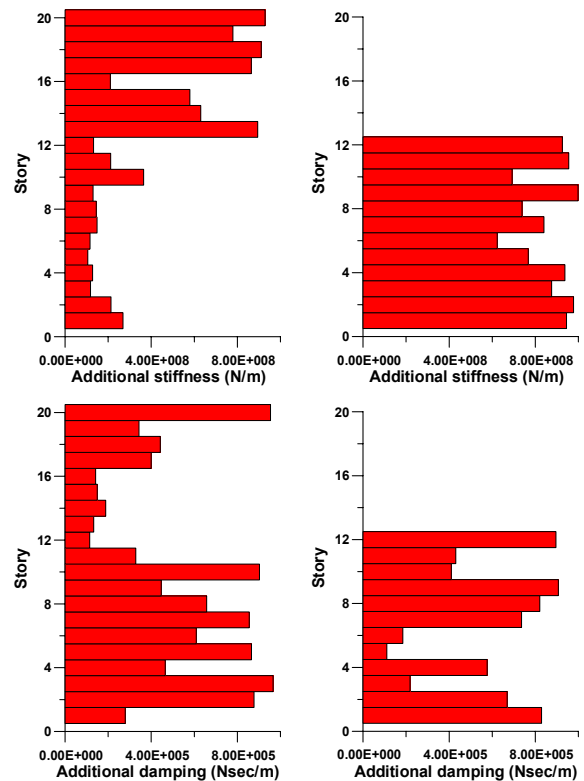
|                | 20-story Bldg.           | 12-story Bldg.           |
|----------------|--------------------------|--------------------------|
| Base stiffness | $1.0 \times 10^9 N/m$    | $1.5 \times 10^9 N/m$    |
| Base damping   | $1.0 \times 10^7 Nsec/m$ | $0.7 \times 10^7 Nsec/m$ |
| Mass           | $8.0 \times 10^5 kg$     | $8.0 \times 10^5 kg$     |

NSGA-II에 의해서 <Table 2>에 나타난 20층 및 12층 건물의 기본 해석 모델에 추가 강성과 추가 감쇠의 용량을 더하여 예제 구조물의 최종 해석 모델을 구성한다. 이렇게 강성뿐만 아니라 감쇠값도 층별로 최적화되면 결과적으로 감쇠의 최적값뿐만 아니라 감쇠기가 효과적인 제어 능력을 발휘할 수 있는 최적의 위치도 동시에 파악할 수 있다. 구조물의 강성 및 감쇠와 함께 스마트 연결 제어 시스템의 핵심 요소인 MR 감쇠기의 제어 용량도 염색체에 인코딩된다.

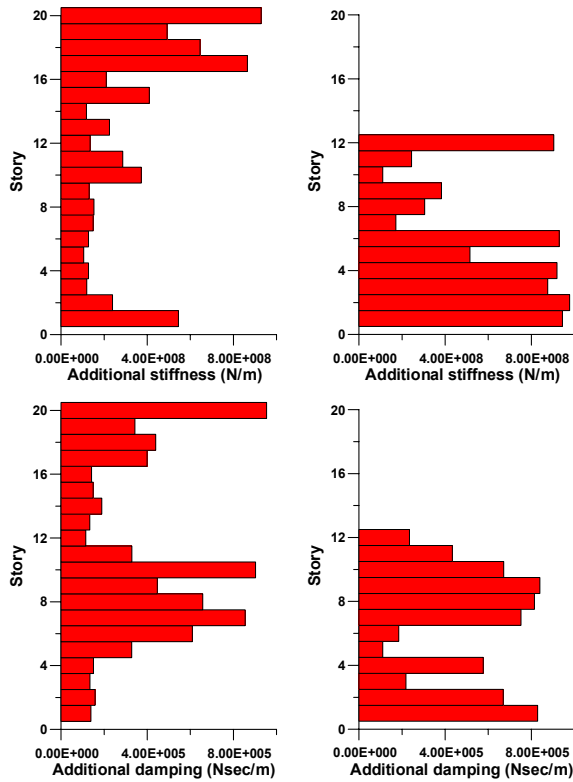
#### 4. 통합 최적 설계 결과 분석

앞서 설명한 통합 최적 설계 알고리즘을 이용하여 예제 구조물에 대한 최적화 작업을 수행하였다. 예제 구조물에 대한 시간 이력 해석을 위하여

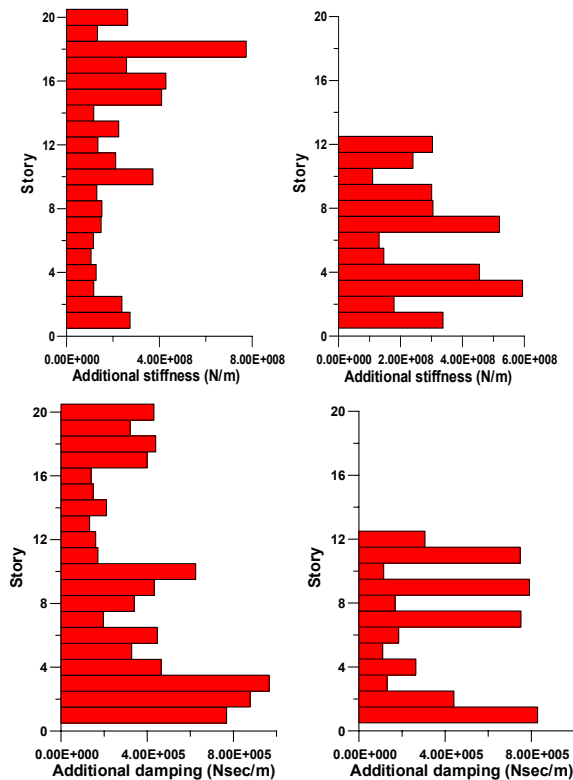
MATLAB 버전 R2016a와 SIMULINK를 사용하여 운동 방정식을 구성하였다. NSGA-II로 다목적 최적 설계를 수행하기 위하여 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 하였으며 최적화는 500세대까지 수행하였다. 본 연구에서는 5개의 목적 함수를 사용하기 때문에 최적화의 결과로 1개의 최적 설계안이 나오는 것이 아니고 서로 우열을 가릴 수 없는 파레토 최적해 집합을 얻게 된다. 본 연구에서는 다양한 최적 설계안 중 건물 A와 B의 최대 변위 응답을 효과적으로 줄일 수 있는 설계안과 변위 응답은 2장에 나타낸 기존 모델과 비슷하게 유지하면서 강성과 감쇠를 줄일 수 있는 설계안을 선택하여 <Fig. 6~8>에 나타내었다. 선택된 설계안의 목적 함수값을 <Table 3>에 정리하였다.



<Fig. 6> Design for minimum response of building A (Design A)



〈Fig. 7〉 Design for minimum response of building B (Design B)



〈Fig. 8〉 Design for minimum stiffness and damping materials (Design C)

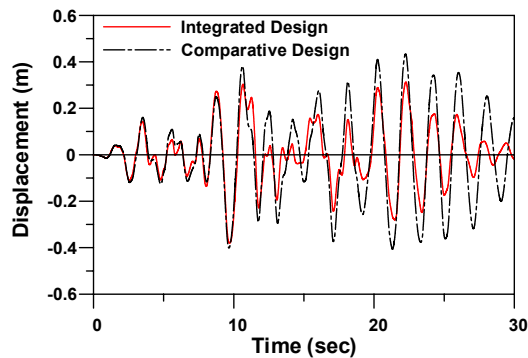
빌딩 A의 지진 응답을 효과적으로 줄일 수 있는 설계안 A를 보면 20층 건물은 12층 이상에서 강성 분포가 많이 이루어져 있고, 12층 건물은 전 층에 걸쳐서 추가 강성이 고루 분포되었다. 20층 건물의 감쇠는 10층 이하에 주로 분포되었고, 12층 건물은 상층부와 하층부에 집중적으로 분포되었다. <Table 3>의 목적 함수값을 보면 기존 건물에 비해 강성 물량의 총 합은 거의 비슷한 반면 감쇠 물량은 약 30% 저감시킬 수 있었다. 이때 빌딩 A와 B의 최상층 최대 변위는 각각 13%와 10% 저감시킬 수 있었다.

〈Table 3〉 Objective values of selected designs

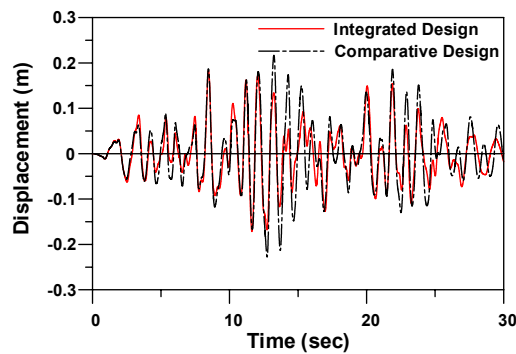
|    | Design A | Design B | Design C |
|----|----------|----------|----------|
| J1 | 1.02     | 1.00     | 0.90     |
| J2 | 0.71     | 0.70     | 0.70     |
| J3 | 15,000kN | 14,800kN | 9,800kN  |
| J4 | 0.87     | 0.92     | 1.03     |
| J5 | 0.90     | 0.80     | 1.04     |

12층 건물의 지진 응답 저감에 주안점을 둔 설계안 B를 보면 20층 건물의 추가 강성은 주로 상층부에 배치된 반면 12층 건물의 추가 강성은 주로 하층부에 배치되었다. 추가 감쇠의 경우 두 건물 모두 7~10층 구간에 주로 배치되었다. 이때 사용된 강성 물량은 기존 구조물과 거의 같았고 감쇠 물량은 설계안 B와 같이 약 70% 줄일 수 있었다. 주목적인 빌딩 B의 최대 응답은 20% 저감시킬 수 있었고, 빌딩 A의 응답도 8% 저감시킬 수 있었다.

물량 감소에 주안점을 둔 설계안 C의 경우 강성 물량은 큰 특성 없이 전 층에 배치되었고, 20층 건물의 감쇠 물량은 앞의 설계안과 다르게 저층부에 주로 배치되었다. 물량 감소가 목적인 이 설계안은 건물 A와 B의 응답을 기존과 비슷하게 유지하는 대신 강성과 감쇠 물량을 각각 10%와 30% 더 저감시킬 수 있었다. 선택한 설계안을 이용한 구조물에 대하여 20층 및 12층 건물의 최상층 변위 시간 이력을 <Fig. 9~10>에서 비교하였다. 빌딩 A를 보면 약 20초대 이후 발생하는 큰 응답을 효과적으로 줄일 수 있었고, 빌딩 B에서는 10~15초 사이의 큰 응답을 매우 효과적으로 저감시키는 것을 볼 수 있다.



〈Fig. 9〉 Roof displacement time history of building A



〈Fig. 10〉 Roof displacement time history of building B

## 5. 결론

본 연구에서는 스마트 연결 제어 시스템이 설치된 인접한 구조물의 설계 과정에서 제어 시스템과 구조물을 동시에 통합 설계할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 20층과 12층으로 구성된 인접한 예제 구조물을 모델링하였고, 12층에 MR 감쇠기를 설치하여 스마트 연결 제어 시스템을 구성하였다. 지진 응답 제어 성능을 평가하기 위하여 인공 지진을 생성하여 시간 이력 해석을 수행하였다. 다목적 유전자 알고리즘을 이용하여 구조물의 강성 물량, 감쇠 물량, MR 감쇠기 용량, 두 건물의 최대 응답을 목적 함수로 선정하여 최적화 작업을 수행하였다. 최적화 결과, 각 목적 함수에 대해 우수한 성능을 나타내는 구조물 물량과 제어 시스템 용량의 최적 설계안을 파레토 최적해의 형태로 얻을 수 있었다. 제안된 방법을 통해서 얻은 설계안은 최적화 목적에 부합하는 물량 감소나 응답 감소에 효과적인 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 제한된 예제 구조물 및 하중을 사용하

였으므로 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 추후 다양한 구조물에 대한 설계 방법 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 각 층에 강성 및 감쇠를 늘릴 수 있는 현실적인 방안에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다. (NRF-2016R1D1A1A09919159)

## References

1. Kim, H. S., "Performance Evaluation of Multi-Hazard Adaptive Smart Control Technique Based on Connective Control System", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.18, No.4, pp.97~104, 2018
2. Lee, D. G., Kim, H. S., & Ko, H., "Evaluation of coupling-control effect of a sky-bridge for adjacent tall buildings", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol.21, No.5, pp.311~328, 2012
3. Christenson, R. E., Spencer, B. F., Johnson, E. A., & Seto, K., "Coupled building control considering the effects of building/connector configuration", *Journal of Structural Engineering*, Vol.132, No.6, pp.853~863, 2006
4. Ruiz Sandoval, M. E., Ugarte, L. B., & Spencer, B. F. (2012). Study of Structural Control in Coupled Buildings. *Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Portugal
5. Kim, H. S., Park, Y. K., Ko, H., Lee, U. H., & Lee, D. G., "Performance Evaluation of Vibration Control According to Installation Location of a Sky-bridge", *Journal of*

- Korean Association for Spatial Structures, Vol.10, No.3 pp.65~74, 2010
6. Ok, S. Y., Kim, D. S., Park, K. S., & Koh, H. M., "GA-Based Optimal Design for Vibration Control of Adjacent Structures with Linear Viscous Damping System", Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.11, No.1, pp.11~19, 2007
  7. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Seismic Response Control of Retractable-roof Spatial Structure Using Smart TMD", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.16, No.4, pp.91~100, 2016
  8. Koo, J. H. (2003). Using magneto-rheological dampers in semiactive tuned vibration absorbers to control structural vibrations (Doctoral dissertation). Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
  9. Christenson, R. E., Spencer, B. F., Johnson, E. A., & Seto, K. (2000). Coupled building control using smart damping strategies. Proceedings of the SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, USA, Vol.3985
  10. Shahidzadeh, M. S., Tarzi, H., & Dorfeshan, M., "Takagi-Sugeno Fuzzy Control of Adjacent Structures Using MR Dampers", Journal of Applied Sciences, Vol.11, No.15, pp.2816~2822, 2011
  11. Park, K. S., & Koh, H. M., "Preference-based optimum design of an integrated structural control system using genetic algorithms", Advances in Engineering Software, Vol.35, No.2, pp.85~94, 2004
  12. Ok, S. Y., Park, K. S., Song, J. H., & Koh, H. M., "Multi-Objective Integrated Optimal Design of Hybrid Structure-Damper System Satisfying Target Reliability", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.12, No.2, pp.9~22, 2008
  13. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Multi-objective Integrated Optimization of Diagrid Structure-smart Control Device", Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol.26, No.1, pp.69~77, 2013
  14. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Study of Integrated Optimal Design of Smart Top-Story Isolation and Building Structures in Regions of Low-to-Moderate Seismicity", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.17, No.5, pp.13~20, 2013
  15. Park, K. S., Koh, H. M., & Hahm, D., "Integrated optimum design of visco-elastically damped structural systems", Engineering Structures, Vol.26, No.5, pp.581~591, 2004
  16. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T., "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No.2, pp.182~197, 2002
  17. Gasparini, D. A., & Vanmarcke, E. H. (1976). Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra (Report No. R76-4). USA: Cambridge, Massachusetts Institute of Technology
- Received : April 15, 2019
  - Revised : April 27, 2019
  - Accepted : April 29, 2019