

하이브리드 중간층 지진 격리 시스템과 빌딩 구조물의 동시 최적화

Simultaneous Optimization of Hybrid Mid-Story Isolation System and Building Structure

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

A hybrid mid-story seismic isolation system with a smart damper has been proposed to mitigate seismic responses of tall buildings. Based on previous research, a hybrid mid-story seismic isolation system can provide effective control performance for reduction of seismic responses of tall buildings. Structural design of the hybrid mid-story seismic isolation system is generally performed after completion of structural design of a building structure. This design concept is called as an iterative design which is a general design process for structures and control devices. In the iterative design process, optimal design solution for the structure and control system is changed at each design stage. To solve this problem, the integrated optimal design method for the hybrid mid-story seismic isolation system and building structure was proposed in this study. An existing building with mid-story isolation system, i.e. Shiodome Sumitomo Building, was selected as an example structure for more realistic study. The hybrid mid-story isolation system in this study was composed of MR (magnetorheological) dampers. The stiffness and damping coefficients of the example building, maximum capacity of MR damper, and stiffness of isolation bearing were simultaneously optimized. Multi-objective genetic optimization method was employed for the simultaneous optimization of the example structure and the mid-story seismic isolation system. The optimization results show that the simultaneous optimization method can provide better control performance than the passive mid-story isolation system with reduction of structural materials.

Keywords : Hybrid mid-story isolation system, Simultaneous optimization technique, Structural design, Seismic response reduction, Smart structural control system, Multi-objective optimization

1. 서론

최근 국내에서도 포항 및 울산 지진 등에 의한 건축 구조물의 피해 발생으로 인하여 구조물의 내진 성능 향상에 대한 관심이 급격하게 증가하고 있다. 이에 따라 지진 하중을 받는 건축 구조물의 피해를 줄이기 위한 다양한 구조적 기술들이 개발되고 실제 구조물에 적용되어 왔다¹⁾. 다양한 지진 응답 저감 기술 중 면진 시스템은 지진 하중으로부터 건축 및 토목 구조물을 보호하는데 널리 사용되고 있는

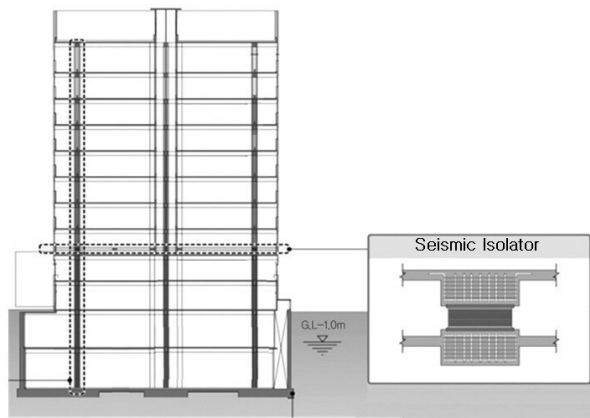
방법 중 하나이다²⁾. 면진 시스템은 일반적으로 강진 지역의 중저층 건물을 대상으로 다양한 형태의 베어링을 사용하여 구조물을 지반과 격리시킴으로써 구조물에 피해를 일으키는 지반 가속도의 전달을 차단한다. 기초에 적용되는 지진 격리 시스템은 중저층 건물을 대상으로는 매우 효과적인 지진 응답 저감 성능을 나타내지만 고층 건물에 적용할 때에는 고려해야 할 몇 가지 문제가 발생한다. 고층 건물과 지반의 사이에 지진 격리 시스템이 삽입될 경우 지탱해야 할 연직 방향 하중이 크게 증가함으로써 베어링의 용량 및 크기가 커지거나 강한 지진에 의해서 면진층의 인장 파괴 또는 건물의 전도 현상이 발생할 수 있다.

이러한 문제점을 해결하고 면진 시스템의 효과적인 지진 응답 제어 성능을 활용하여 고층 건물에 적

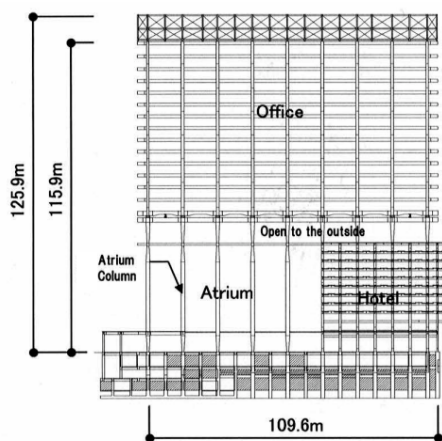
* 정희원, 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering,
Sunmoon University

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

용하기 위해서 중간층 면진 시스템이 개발되어 다양한 구조물에 적용되고 있다^{3),4)}. 동일 하이빌 뉴시티³⁾는 지상 7층 이하의 상업 시설, 지상 8층 이상은 주거 시설로 구성된 주상 복합 건물로 구조 시스템이 변경되는 7층과 8층 사이에 중간층 면진 시스템을 적용하여 내진 성능을 확보하였다. 중간층 지진 격리 시스템이 적용된 또 다른 건물인 경기도 의왕시 소재 NH 통합 IT센터를 <Fig. 1>에 나타내었다. 해당 건물은 규모 6.5의 강진에도 데이터 장비가 중단 없이 안전하게 가동될 수 있도록 데이터 센터의 2층과 3층 사이에 중간층 면진 시스템을 적용하여 3~10층에 위치한 서버실을 지진 하중으로부터 분리하는 역할을 하도록 설계하였다⁵⁾.



<Fig. 1> NH integrated IT center⁵⁾



<Fig. 2> Framing elevation of Shiodome Sumitomo building⁶⁾

강진 지역인 일본에 건설된 중간층 지진 격리 시스템이 설치된 고층 건물을 <Fig. 2>에 나타내었다.

이 건물은 시오도메 스미토모 건물로 저층부에 큰 아트리움을 가지고 있으며, 고무 베어링(Laminated rubber isolator)과 강재 댐퍼를 사용하여 구성된 중간층 면진 시스템이 적용되어 있다⁶⁾. 본 저자의 선행 연구에서는 <Fig. 2>에 나타낸 시오도메 스미토모 건물로 예제 구조물로 선정하여 MR 감쇠기를 사용한 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템을 적용하여 최적의 제어 시스템을 개발하였다⁷⁾. 이때 기존 시오도메 스미토모 건물의 층 질량 및 강성과 감쇠는 그대로 사용하고 실제 적용된 수동 중간층 면진 시스템 대신 개발된 하이브리드 중간층 면진 시스템을 적용하였고 최적 제어 알고리즘을 퍼지논리 제어기로 개발하였다.

이와 같이 건축 구조물의 내진 성능을 향상시키기 위한 수동 혹은 스마트 구조 제어 시스템의 설계는 대상 구조물 구조 부재의 최적 설계가 수행된 후 추가적인 구조 제어 시스템의 설계가 순차적으로 수행된다. 이러한 방법은 설계 과정이 명확하고 비교적 용이하므로 기존의 지진 응답 제어 장치의 설계 과정에서 일반적으로 수행되고 있다⁸⁾. 그러나 구조 설계가 끝난 구조물에 구조 제어 장치를 추가하여 최적의 성능을 발휘하도록 설계가 이루어지면 구조물의 동적 특성 및 응답이 변화하여 최적의 구조 부재를 찾는 구조 설계안은 최초의 안과 다른 최적 설계안이 존재하게 된다. 따라서 순차적 설계 방법은 반복 설계 과정이 필요하게 되며 이에 소요되는 노력과 시간이 적지 않다. 연계 되는 설계안도 최적의 결과라고 판단하기 어렵다. 순차적 설계 방법의 문제점을 개선하기 위하여 건물과 구조 제어 장치를 하나의 시스템으로 고려하는 통합 최적 설계 기법이 제안되었다⁹⁾. 통합 최적 설계 기법을 여러 형태의 구조물과 구조 제어 장치에 적용한 연구가 지금까지 다수 수행된 바 있다^{10),11)}.

그러나 기존의 연구는 수동 구조 제어 장치와 구조물의 통합 최적 설계에 대한 내용이 주를 이루고 있으며, 스마트 구조 제어 장치와 구조물을 동시에 최적 설계하는 방법에 대한 연구는 아직 초기 단계이다. 특히 하이브리드 스마트 중간층 지진 격리 시스템과 건축 구조물의 동시 통합 설계에 대한 연구는 국내외에서 찾아보기 어렵다. 따라서 본 연구에

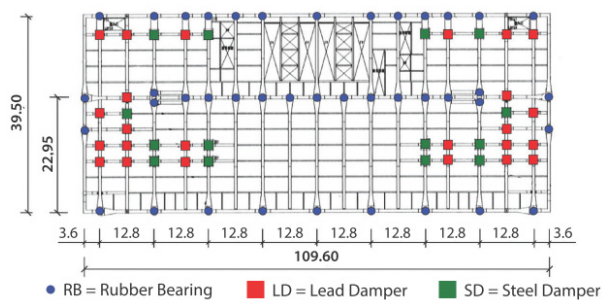
서는 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템과 구조물의 통합 최적 설계 기법을 제안하고 그 효용성을 검증하고자 한다.

일반적으로 지진 하중을 받는 구조물과 중간층 면진 시스템을 통합하여 최적화 작업을 수행할 때에는 안전성 측면에서 구조물의 지진 응답을 줄이는 것이 설계 목적이 될 수 있다. 이때 경제적 관점에서 구조 부재와 제어 시스템의 물량을 줄이는 것도 최적 설계의 목적에 포함되어야 한다. 통합 최적 설계를 수행할 때 구조물 물량 및 제어 시스템 용량과 구조물의 지진 응답은 반비례하기 때문에 단일 목적의 최적화 알고리즘을 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 다목적 최적화 알고리즘 중에서 다수의 개체를 활용한 유전자 알고리즘을 이용하여 통합 최적 설계를 구현하였다. 예제 구조물로는 중간층 면진 시스템이 실제로 적용된 <Fig. 2>의 시오도메 스미토모 건물을 사용하였다. 통합 최적화에는 구조물의 강성 및 감쇠와 함께 하이브리드 중간층 면진 시스템의 핵심 구성 요소인 MR 감쇠기의 최대 제어 용량을 설계 변수로 선택하였다. 최적화 작업의 목적 함수로는 3가지 설계 변수와 함께 구조물의 안전성을 나타내는 핵심 요소인 최대 층간 변위 및 최대 면진층 변위를 선택하였다. 다목적 유전자 알고리즘을 적용하여 수치 해석을 수행한 후 얻은 파레토 최적해 설계안에 대하여 각 목적 함수 간 관계를 분석하였고 각 설계 변수들의 상관 관계를 평가하였다. 또한 기존의 순차적 방법을 통한 설계 결과와 통합 최적 설계의 결과를 비교하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

2 하이브리드 중간층 면진 시스템의 구성 및 적용 구조물

하이브리드 중간층 면진 시스템이 설치된 고층 건물에 통합 최적 설계 기술을 적용하기 위해 <Fig. 2>에 나타난 시오도메 스미토모 건물을 예제 구조물로 선택하였다. 예제 구조물의 전체 높이는 126.1m, 일반 층의 층고는 4.2m이다. 건물은 25층의 철골조 구조물로 지하층은 3층으로 구성되어 있다. 지진 격

리층은 11층과 12층 사이에 위치하고 있으며 지진 격리층 상부의 14개 층은 일반 오피스 용도로 사용하고 하부의 11개 층은 호텔로 사용하고 있다. 지진 격리층에 사용된 시스템은 <Fig. 3>에 나타난 바와 같이 1,000~1,300mm의 직경을 가진 41개의 적층 고무 면진 장치(Rubber Bearing; RB)와 100개의 납 댐퍼(Lead Damper; LD) 및 14개의 강재 댐퍼(Steel Damper; SD)로 구성되어 있다. 예제 구조물의 질량 및 강성 등의 구조적 특징은 선행 연구⁶⁾에서 제시한 값을 그대로 사용하였으며 층별 집중 질량을 가지는 막대 모델로 표현하였다. 면진층을 구성하는 베어링의 초기 강성은 RB 807kN/cm, LD 26,500kN/cm, SD 678kN/cm의 값을 사용하였다. LD와 SD의 항복 후 소성 거동을 표현하기 위하여 LD와 SD의 항복 전단력은 각각 22,000kN과 3,500kN으로 설정하였다.

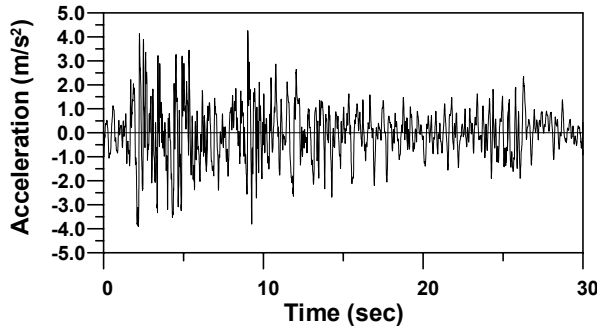


<Fig. 3> Isolation floor of Shiodome Sumitomo building¹²⁾

본 연구에서 개발하여 시오도메 스미토모 건물에 적용한 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템은 <Fig. 3>에 나타난 면진층의 구성 요소 중 고무 베어링과 강재 댐퍼는 그대로 사용하고 납 댐퍼를 대신하여 MR (Magnetorheological) 감쇠기를 사용하였다. MR 감쇠기는 스마트 감쇠기로서 안정성 및 효율성을 검증받아 토목 및 건축 구조물의 내진 성능 향상을 위해서 다수 적용된 사례가 있다. MR 감쇠기의 비선형 동적 거동을 표현하기 위해서 현재 가장 널리 사용되고 있는 수치 해석 모델인 Bouc-Wen 모델¹³⁾을 사용하였다. 지금까지 많은 연구자들에 의해서 Bouc-Wen 모델을 사용한 연구가 수행되었으며 실제 MR 감쇠기의 비선형 동적 거동

을 정확하게 모형화하기 위한 다양한 변수값들이 제시되었다. 본 연구에서는 그 중 1,000kN 용량의 MR 감쇠기를 모사하는 Ok et al.(2007)의 연구 결과를¹⁴⁾ 사용하였다. 1,000kN 용량을 기본으로 하여 최적화 과정을 통해 하이브리드 중간층 면진 시스템에 적합한 용량을 찾아내는 작업을 수행하였다.

지진 응답 평가를 위한 인공 지진 하중을 작성하기 위하여 강진 지역의 특성을 나타내는 IBC2012 설계 기준에 근거한 설계 응답 스펙트럼을 사용하였다. 이를 기반으로 한 인공 지반 가속도를 생성하기 위해서 선행 연구⁷⁾에서 사용한 역사 지진의 지진동 파형과 동일한 위상 특성을 지니고 설계용 가속도 응답 스펙트럼에 매우 근접한 응답 스펙트럼을 갖는 인공 지진을 작성하는 방법을 사용하였다. 인공 지진 작성을 위해서 구조물의 지진 응답 거동 분석 시 널리 사용되고 있는 El Centro (1940, NS) 지진 하중을 사용하였다. 이러한 방법으로 작성한 인공 지진동의 가속도 시간 이력을 <Fig. 4>에 나타내었다.



<Fig. 4> Artificial ground acceleration

3. 하이브리드 중간층 면진 시스템 및 구조물의 통합 최적 설계 알고리즘

전술한 바와 같이 본 연구에서는 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템과 구조물을 동시에 고려하는 통합 최적 설계 기술 개발을 최종 목표로 하고 있다. 목표를 달성하기 위해서는 우선 적절한 설계 변수를 선택하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 대상 예제 구조물의 층 강성 및 감쇠 물량과 함께 하이브리드 면진 시스템의 MR 감쇠기 용량을 설계 변수로 선택하였다. 통합 최적 설계에서는 이러한

경제성 측면의 구조물 및 구조 제어 시스템 물량 최적화와 구조물의 지진 응답을 동시에 최소화하는 다목적 최적화 문제가 된다. 지금까지 제안된 다양한 다목적 최적화 기법 중에서 여러 개체를 동시에 평가할 수 있는 유전자 알고리즘을 본 연구에서 사용하였다. 다양한 유전자 알고리즘 중에서 여러 공학 분야의 다목적 최적화 문제 해결에 적용되고 있는 NSGA-II¹⁵⁾를 이용하여 통합 최적 설계를 수행하였다. NSGA-II를 이용한 통합 최적 설계 과정에서는 25층 예제 구조물의 강성 및 감쇠와 더불어 MR 감쇠기의 용량을 유전자 알고리즘에 의해 적절한 값으로 설정한 후 구조물의 지진 응답을 평가한다. 이러한 방법으로 모든 개체에 대한 시간 이력 해석과 지진 응답 평가를 수행한 후 우수한 개체를 선정하여 유전자 교배를 통해 다음 세대를 구성한다. 본 연구에서 적용한 5개의 다목적 최적화 목적 함수를 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> Multi-objective functions

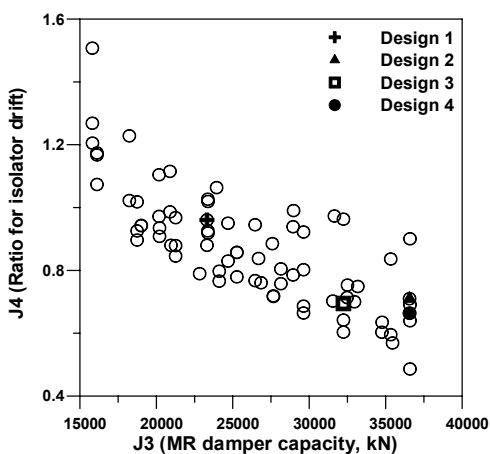
Objectives	Description
J1	Sum of stiffnesses (Ratio)
J2	Sum of damping coefficients (Ratio)
J3	Capacity of MR damper (N)
J4	Peak isolator drift (Ratio)
J5	Peak inter-story drift (Ratio)

표에서 예제 구조물의 전체 층 강성 및 감쇠값을 모두 합한 값을 첫 번째와 두 번째 목적 함수(J1, J2)로 두었다. 세 번째 목적 함수(J3)는 하이브리드 지진 격리 시스템에 사용된 MR 감쇠기의 용량으로 하였다. 네 번째 목적 함수(J4)는 11층과 12층 사이의 면진층에서 발생하는 최대 층간 변위 응답으로 하였고, 마지막으로 다섯 번째 목적 함수(J5)로는 예제 구조물에서 발생하는 최대 층간 변위 응답을 선택하였다. 25층 예제 구조물의 최대 층간 변위는 면진 시스템이 설치된 곳 바로 아래층인 11층에서 발생한다. <Table 1>에 나타낸 목적 함수 중 (Ratio)라고 표현한 J1, J2, J4, J5는 시오도메 스미토모 건물의 실제 물량 및 응답에 대한 비율로 나타낸 값이다. 즉 이 4개의 목적 함수들은 1보다 작은 값을 나

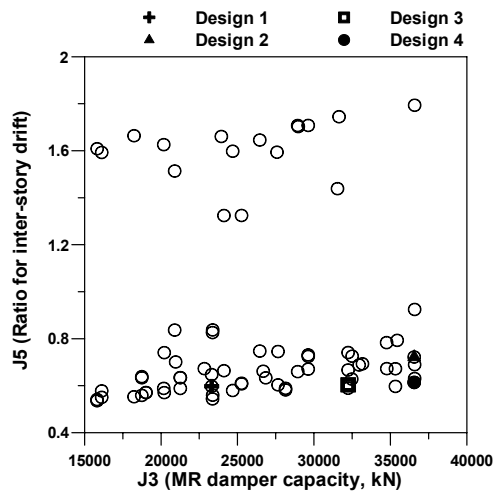
타내면 시오도메 스피토모 건물보다 더 적은 물량을 사용하거나 더 작은 응답을 나타내는 것을 의미한다. 5개의 목적 함수 중에서 J1-J3은 구조체와 하이브리드 중간층 면진 시스템을 구성하는 장치의 물량 및 용량으로서 경제성을 나타내고 J4, J5는 구조물의 최대 지진 응답으로서 구조물의 안전성을 대표한다고 볼 수 있다. 일반적으로 중간층 면진 시스템이 적용된 구조물의 전체적인 지진 응답을 저감시키기 위해서는 면진층에 의해서 분리된 상부층이 동조 질량 감쇠기와 같이 움직이는 것이 바람직하다. 그러나 상부층의 과도한 응답은 거주자의 불안감을 야기시키고 면진층의 과도한 변위에 의해서 구조물의 안전성을 저하시킬 가능성이 있다. 따라서 격리된 상부 구조물의 과도한 동적 응답을 저감시키기 위하여 전통적인 준능동 제어 알고리즘인 그라운드훅(Groundhook) 제어 알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서 제안한 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템을 이용하여 가상의 그라운드훅 시스템을 모사한다.

4. 통합 최적 설계안 성능 평가

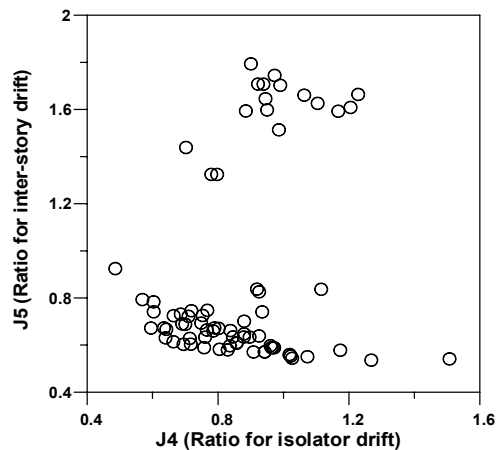
NSGA-II로 다목적 최적 설계를 수행하기 위하여 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 하였으며 최적화는 1,000세대까지 수행하였다. 다양한 목적 함수의 상대적 관계를 확인하기 위하여 통합 최적화 작업을 수행한 결과인 파레토 최적해 집합을 <Fig. 5~8>에 나타내었다.



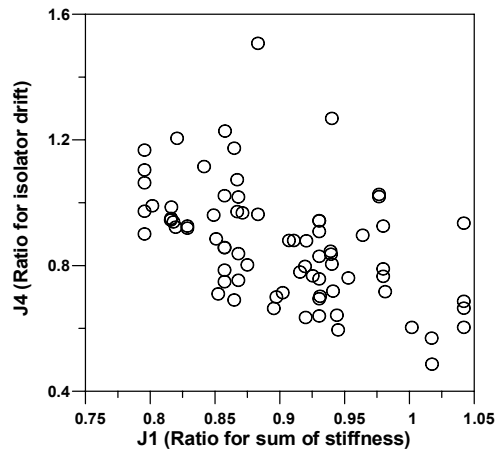
<Fig. 5> Optimal solutions for J3 vs. J4



<Fig. 6> Optimal solutions for J3 vs. J5



<Fig. 7> Optimal solutions for J4 vs. J5



<Fig. 8> Optimal solutions for J1 vs. J4

파레토 최적해 집합 중 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템의 핵심 요소인 MR 감쇠기 용량(J3)과 구조물의 응답 사이의 관계를 보면 면진층의 층간 변위가 서로 반비례하는 것을 <Fig. 5>를 통해서 확

인할 수 있다. <Fig. 6>과 같이 지진 응답 중 구조물의 피해에 가장 직접적인 관계가 있는 최대 층간 변위(J5)와 MR 감쇠기 용량간의 관계는 뚜렷하지 않고 오히려 용량의 증가에 따라 최대 층간 변위가 약간 증가하는 경향을 보인다. 이는 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템의 제어력이 증가하는 것이 최대 층간 변위의 저감에 효과적이지 못하다는 것을 나타낸다. <Fig. 7>을 살펴보면 최대 층간 변위와 최대 면진층 변위는 예상대로 반비례 관계임을 알 수 있다. 또한 <Fig. 8>에서는 예제 구조물에 사용된 강성의 총합과 최대 면진층 변위가 반비례 관계를 가지고 있어 구조물의 강성이 커질수록 면진층 변위가 줄어드는 경향을 나타냈다. 그림에 나타난 총 75개의 최적 설계안 중 각각의 목적에 따른 설계안 4개를 선택하여 <Table 2>에 나타내었다.

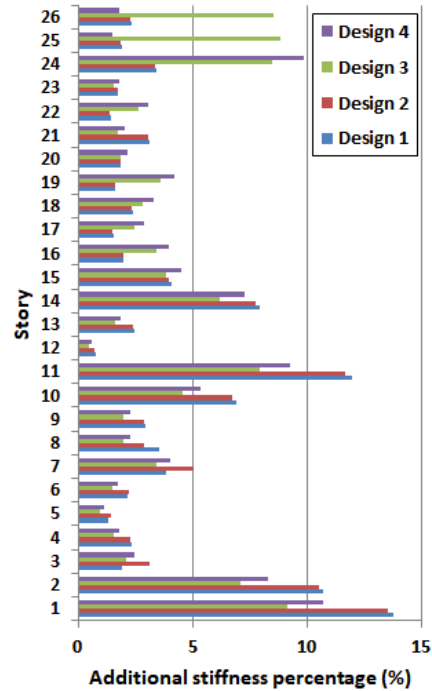
<Table 2> Selected designs

	J1	J2	J3	J4	J5
Design 1	0.85	1.01	23,312	0.96	0.60
Design 2	0.85	0.98	36,560	0.71	0.72
Design 3	0.93	1.03	32,235	0.69	0.60
Design 4	0.90	0.98	36,560	0.66	0.61

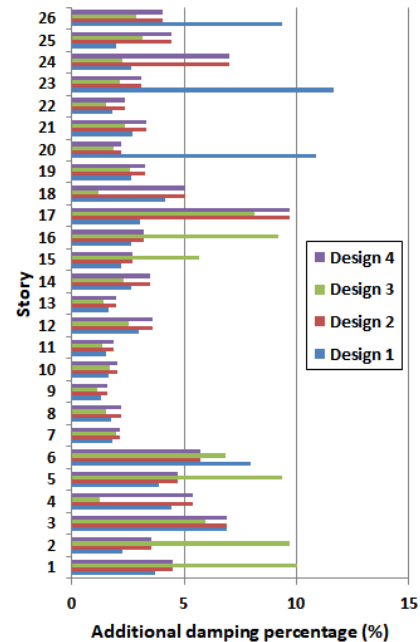
Design 1은 기존 시오도메 스미토모 건물과 비교하여 강성은 15% 줄이고 감쇠는 비슷하게 유지하면서 최대 면진층 변위는 4%, 최대 층간 변위는 40% 더 저감시킬 수 있는 설계안이다. Design 2의 경우 강성 및 감쇠는 Design 1과 비슷하지만 MR 감쇠기 용량을 증가시켜 최대 면진층 변위와 층간 변위를 모두 30% 가까이 줄일 수 있다. Design 3은 총 강성을 7% 정도 줄이는데 비하여 최대 면진층은 31%, 최대 층간 변위는 40% 가량 크게 줄일 수 있다. Design 4는 강성과 감쇠를 각각 10%와 2% 줄이면서도 최대 면진층 변위와 층간 변위를 34% 및 39% 더 줄일 수 있는 매우 우수한 설계안이다. 따라서 본 연구에서는 Design 4 설계안을 사용하여 조금 더 구체적인 분석을 수행하였다.

선택한 4가지 설계안에 대하여 층별 강성 및 감쇠 분포를 비교하여 <Fig. 9>와 <Fig. 10>에 나타내었다. 강성은 주로 1, 2층에 많이 배치되고 면진층

의 바로 아래층인 11층에 집중적으로 배치되는 것을 알 수 있다. 이는 11층에서 층간 변위가 가장 크게 발생하므로 이를 효과적으로 저감시키기 위한 것으로 판단된다. 감쇠는 6층 아래의 저층부에 주로 분포된 것을 확인할 수 있다.



<Fig. 9> Stiffness distribution for stories

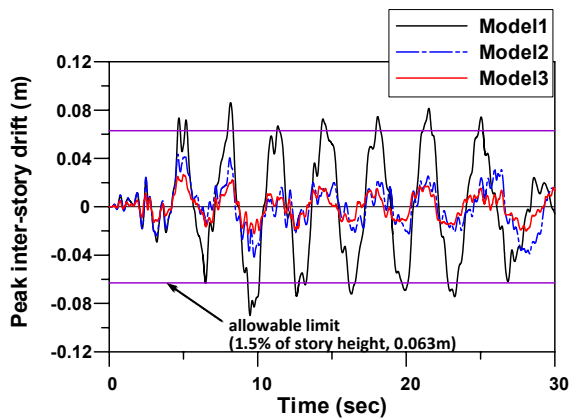


<Fig. 10> Damping distribution for stories

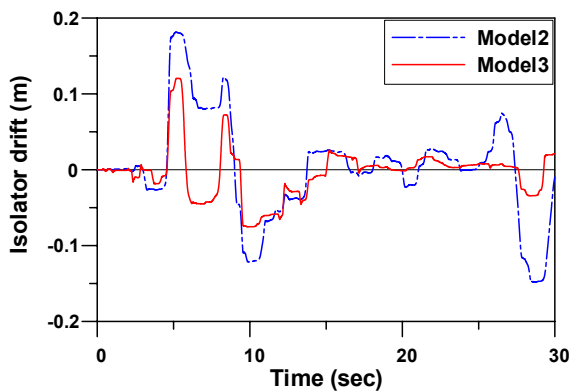
앞서 선택한 Design 4의 지진 응답(Model 3)을 기존 시오도메 스미토모 건물(Model 2)과 중간층 면진 시스템을 사용하지 않은 일반 구조물(Model 1)의 응답과 비교하기 위하여 <Table 3>에 나타난 바와 같이 3개의 모델을 사용하였다. 또한 각 모델별 지진 응답 시간 이력을 <Fig. 11>과 <Fig. 12>에 나타내었다.

<Table 3> Comparative model

Name	Description
Model 1	Without mid-story isolation
Model 2	Existing model with mid-story isolation
Model 3	With smart mid-story isolation



<Fig. 11> Peak inter-story drift time histories



<Fig. 12> Mid-story isolator drift time histories

층간 변위가 가장 큰 11층의 층간 변위 시간 이력을 비교한 <Fig. 11>을 보면 중간층 지진 격리 시스템을 사용하지 않은 일반 구조물(Model 1)은 층간 변위 허용치인 0.063m(층고의 1.5%)를 넘는 것을

알 수 있다. 실제 구조물인 Model 2는 최대 층간 변위를 대폭 저감시킬 수 있었고, 제안된 Model 3은 Model 2보다 강성 및 감쇠 물량을 조금 사용하면서 최대 응답을 40% 더 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다. <Fig. 12>에 나타난 면진층의 층간 변위를 보면 Model 2와 Model 3의 최대값은 0.182m와 0.121m로 제안된 설계안이 34% 더 저감시킬 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템과 건축 구조물 설계를 동시에 수행하는 통합 최적 설계 기술을 제안하고 그 성능을 검증하였다. 더욱 실제적인 검토를 위하여 중간층 면진 시스템이 사용된 시오도메 스미토모 건물의 구조 특성치를 그대로 사용하여 예제 구조물을 구성하였다. 면진층에 기존 납 댐퍼 대신 MR 감쇠기를 사용하여 하이브리드 중간층 지진 격리 시스템을 구성하였다. 다목적 유전자 알고리즘을 이용하여 구조물의 강성 및 감쇠 물량, MR 감쇠기 용량, 최대 면진층 변위 및 층간 변위를 목적 함수로 선정하여 최적화 작업을 수행하였다. 최적화 결과, 각각의 목적 함수에 대해서 우수한 성능을 나타내는 구조물 물량과 제어 시스템 용량의 최적 설계안을 파레토 최적해의 형태로 얻을 수 있었다. 제안된 통합 최적 설계 기법을 사용하여 얻은 설계안은 최적화 목적에 부합하는 물량 감소나 응답 감소에 효과적인 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한 기존 건물에 비하여 강성 및 감쇠를 적게 사용하면서도 최대 면진층 및 층간 변위를 대폭 저감할 수 있었다. 본 연구에서는 사용된 물량 및 구조물의 응답만으로 최적 설계안을 제시하였으나 추후 본 연구에서 제안된 하이브리드 제어 시스템의 설치 및 운영 비용을 고려한 경제적인 검토가 수행되는 것이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. NRF-2017R1A2B4006226).

References

1. Spencer, B. F. Jr., & Nagarajaiah, S., "State of the Art of Structural Control", *Journal of Structural Engineering*, Vol.129, No.7, pp.845~856, 2003
2. Martelli, A., Clemente, P., Stefano, A. D., Forni, M., & Salvatori, A., "Recent Development and Application of Seismic Isolation and Energy Dissipation and Conditions for Their Correct Use", *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology*, pp.449~488, 2014
3. Hur, M. W., Ann, T. S., Son, J. W., & Kim, C. S., "Construction of Isolation Device for DONG-IL High-Vill New City", *Review of Architecture and Building Science*, Vol.54, No.5, pp.81~86, 2010
4. Tsuneki, Y., Torii, S., Murakami, K., & Sueoka, T. (2008). Middle-Story Isolated Structural System of High-Rise Building. *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, China
5. Choi, W. S., Jung, K. B., & Roh, J. W., "Nong-Hyup Integrated IT Center, Construction Project, Uiwang-si", *Review of Architecture and Building Science*, Vol.61 No.1, pp.63~67, 2016
6. Sueoka, T., Torii, S., & Tsuneki, Y. (2004). The Application of Response Control Design using Middle-Story Isolation System to High-Rise Building. *Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada
7. Kim, H. S., & Kang, J. W., "Vibration Control Performance Evaluation of Hybrid Mid-Story Isolation System for a Tall Building", *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.18, No.3 pp.37~44, 2018
8. 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
9. 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
10. 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.13~21, 2013
11. Park, K. S., Koh, H. M., & Hahm, D., "Integrated optimum design of viscoelastically damped structural systems", *Engineering Structures*, Vol.26, No.5, pp.581~591, 2004
12. Mele, E., & Faiella, D., "Inter-Story Isolation Systems (IIS) for Tall Buildings: Design Considerations", *Structural Engineering, CTBUH Journal*, Issue 2, pp.34~41, 2018
13. Sues, R. H., Mau, S. T., & Wen, Y. -K., "Systems Identification of Degrading Hysteretic Restoring Forces", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.114, No.5, pp.833~846, 1988
14. Ok, S. Y., Kim, D. S., Koh, H. M., & Park, K. S., "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

15. 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

- Received : August 08, 2019
- Revised : August 19, 2019
- Accepted : August 19, 2019