ISSN 1598-4095 (Print)
ISSN 2287-7401 (Online)
http://dx.doi.org/10.9712/KASS.2018.18.3.37

Journal of Korean Association for Spatial Structures
Vol. 18, No. 3 (통권 73호), pp.37~44, September, 2018

하이브리드 중간층 지진격리시스템의 고층 건물 진동 제어 성능 평가

Vibration Control Performance Evaluation of Hybrid Mid-Story Isolation System for a Tall Building

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

A base isolation system is widely used to reduce seismic responses of low-rise buildings. This system cannot be effectively applied to high-rise buildings because the initial stiffness of the high-rise building with the base isolation system maintains almost the same as the building without the base isolation system to set the yield shear force of the base isolation system larger than the design wind load. To solve this problem, the mid-story isolation system was proposed and applied to many buildings. The mid-story isolation system has two major objectives; first to reduce peak story drift and second to reduce peak drift of the isolation story. Usually, these two objectives are in conflict. In this study, a hybrid mid-story isolation system for a tall building is proposed. A MR (magnetorheological) damper was used to develop the hybrid mid-story isolation system. An existing building with mid-story isolation system, that is "Shiodome Sumitomo Building" a high rise building having a large atrium in the lower levels, was used for control performance evaluation of the hybrid mid-story isolation system. Fuzzy logic controller and genetic algorithm were used to develop the control algorithm for the hybrid mid-story isolation system. It can be seen from analytical results that the hybrid mid-story isolation system can provide better control performance than the ordinary mid-story isolation system and the design process developed in this study is useful for preliminary design of the hybrid mid-story isolation system for a tall building.

Keywords : Hybrid mid-story isolation system, Seismic response reduction, Smart vibration control, Soft computing, Tall building

1. 서론

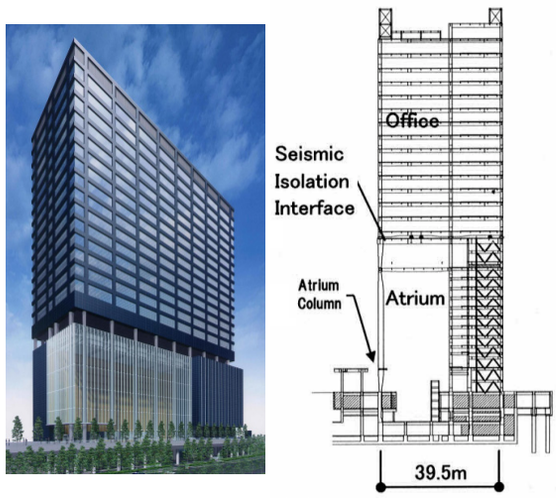
지진 하중에 대한 구조물의 동적 응답 및 피해를 저감시키기 위한 제진, 면진, 내진의 다양한 기술들이 개발되어 적용되고 있다. 그 중에서도 구조물의 기초를 지반과 격리시켜서 지반 운동이 구조물에 전달되는 경로를 차단하는 지진격리시스템은 매우 효과적인 지진 피해 저감 기술로 평가 받아 다양한 건축 및 토목 구조물에 적용되고 있다[1]. 지진격리 면진시스템은 주로 중저층 건물에 기초 면진시스템의 형태로 적용되고 있다. 근래에는 고층 건물에까지 그 적용 대상이 확대되고 있다. 지진격리시스템은 면진층의 상대적으로 낮은 강성으로 인하여 구조물의 고유 진동 주기를 길게 함으로써 지진 하중에 의한 밑면 전단력을 저감시키는 효과를 나타낸다[2]. 그러나 고층 건물은 긴 고유 진동 주기를 가지고 있으며, 고층 건물의 기초에 면진시스템을 설치한다면 지지해야 할 중량이 증가함으로써 베어링이 커지게 되고, 강한 지진에 의하여 면진층의 파괴 및 구조물의 전도 현상도 초래할 수 있는 문제점이 존재하게 된다. 또한 수직 증축을 한 건물의 내진 성능 향상을 위해서도 중간층 지진격리시스템이 제안되어 다수의 건물에 적용되고 있다[5]. Tsuneki et al.(2008)은 다양한 형태의 고층 건물에 중간층 면진시스템이 적용된 일본의 사례를 소개하였고 중간층 면진시스템이 지진 하중에 의한 최대 층전단력을 매우 효과적으로 제어할 수 있음을 보여주었다[3]. 국

* 정회원, 선문대학교 건축사회환경공학부 부교수, 공학박사
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering, Sunmoon University
** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail: kangj@ynu.ac.kr

내에서는 수직 증축 시 증축되는 건물과 기존 건물 사이에 면진시스템을 도입함으로써 내진 성능을 향상시키고자 하는 연구가 있었다. 이 연구에서는 면진시스템의 주기를 기존 구조물의 2배 이상으로 설계할 것을 제안하였다[4]. 국내의 중간층 면진시스템의 적용 사례로 대표적인 건물은 동일하이빌 뉴시티를 들 수 있다[5]. 이 건물은 8층 이상의 주거 시설과 7층 이하의 상업 시설로 이루어진 주상 복합 건물로써 구조시스템이 변경되는 7층과 8층 사이에 면진시스템을 적용하여 내진 성능을 향상시켰다.

중간층 면진시스템의 기본 원리는 일반적인 동조질량감쇠기(TMD; Tuned Mass Damper)의 확장된 개념으로 이해되는데 기존 TMD에 비해서 격리된 상부 구조물의 질량이 매우 크다는 것이 다른 점이다. 상부 구조물의 질량이 기존 TMD에 비해서 매우 크기 때문에 큰 규모의 지진 하중에 대해서 상부 구조물에 과도한 변위가 발생할 수 있다. 격리된 구조물의 과도한 변위를 막기 위해서 중간 면진층에 추가적인 감쇠기가 설치되기도 한다. 그러나 과도한 감쇠 장치가 지진격리층에 설치된다면 격리된 상부 구조물이 TMD로서의 역할을 효과적으로 할 수 없다는 단점이 생기게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 지진격리층의 최대 변위와 고층 건물의 층간 변위를 동시에 효과적으로 제어할 수 있는 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 구성하여 지진 응답 제어 성능을 평가하였다.

본 연구에서는 기존에 중간층 면진시스템이 적용된 구조물을 대상으로 본 연구에서 구성한 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 적용하였고 지진 하중에 대한 제어 성능을 검토하였다. 예제 구조물은 <Fig. 1>에 나타낸 시오도메 스미토모 건물로서 저층부에 큰 아트리움을 가지고 있다. 대상 구조물에는 고무 베어링(Laminated Rubber Isolator)과 강재 댐퍼를 사용하여 구성한 중간층 면진시스템이 적용되었으며 면진층이 없는 건물과 비교하여 지진 응답을 큰 폭으로 줄일 수 있는 것을 확인하였다. 동일한 건물을 대상으로 하이브리드 중간층 지진격리시스템의 지진 응답 제어 성능을 검토하였다. 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 구성하기 위하여 스마트 감쇠 장치의 하나인 MR(Magnetorheologial) 댐퍼를 이용하였다. 지진 응답 제어 성능을 평가하기 위하여 인공 지반 운동을 IBC2012 설계 기준에 맞추어 생성하였다. 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 동적 응답에 따라 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 제어 알고리즘이 필요하다. 본 연구에서는 소프트 컴퓨팅 기법으로 널리 사용되고 있는 퍼지 논리 제어기를 사용하였다. 퍼지 논리 제어기를 최적 설계하기 위해서 유전자 알고리즘을 사용하였다. 중간층 면진시스템은 상부 구조물이 TMD로서 거동을 우수하게 수행하기 위해서는 면진층에서 과도한 변위가 발생할 수 있다. 면진층에서 과도한 변위가 발생하여 구조물의 안전성이 저하되는 것을 막기 위하여 추가적인 감쇠 장치를 설치한다면 층간 변위비와 같은 구조물에 피해를 유발시킬 수 있는 지진 응답을 저감시키는데 어려움을 겪게 된다. 따라서 최대 면진층 변위와 층간 변위비는 상치 관계(Trade-off)에 있으므로 이 두 응답을 효과적으로 제어할 수 있는 다목적 유전자 알고리즘[7]을 사용하였다.



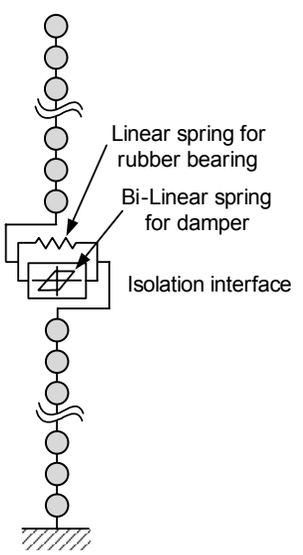
(a) Perspective (b) Framing elevation

〈Fig. 1〉 Shiodome Sumitomo building[6]

2. 예제 구조물 해석 모델 및 지진 하중

본 연구에서는 <Fig. 1>에 나타낸 시오도메 스미토모 건물을 예제 구조물로 사용하여 지진 응답 제어 성능을 평가하였다. 예제 구조물은 120m 높이의 건물로서 지하 3층과 지상 25층으로 구성되어 있다. 지진격리층 위쪽의 상부 구조물은 14개 층으로 이루어진 사무용 공간이고 하부 구조물은 11개 층으

로 구성되어 있다. 이 건물의 중간층 면진시스템은 호텔과 사무용 공간의 사이인 12층에 설치되어서 상부층을 질량감쇠기처럼 거동하도록 하고 있다. 이 건물의 지진격리시스템은 1,000~1,300mm의 직경을 가진 적층 고무면진장치와 100개의 납 댐퍼 및 14개의 강재 댐퍼로 구성되어 있다. 예제 구조물은 선행연구[6]에서 <Fig. 2>에 나타낸 바와 같이 층별 집중질량을 가지는 막대 모델로 표현되었으며 수치 해석을 위한 층질량 및 강성은 <Table 1>에 나타내었다. 예제 구조물에 사용된 중간층 면진시스템의 특성은 <Table 2>에 나타내었다.



〈Fig. 2〉 Analysis model[6]

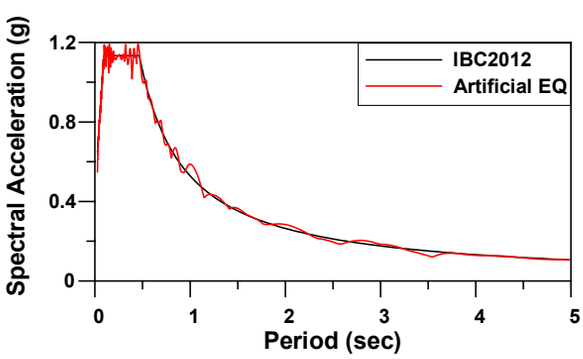
〈Table 1〉 Structural properties[6]

Story	Gravity (kN)	Stiffness (kN/mm)
R	56580	1511
25	33950	1734
24	33810	2111
23	30170	2168
22	30250	2240
21	30350	2336
20	30570	2486
19	31070	2484
18	31090	2586
17	30650	2589
16	30720	2652
15	30800	2631
14	31250	2321
13	34990	3106
12	39530	Table 2
11	30680	1083
10	30670	4452
9	16880	4791
8	16650	4953
7	16850	5204
6	16820	5361
5	16830	5707
4	17000	5923
3	16930	6344
2	25330	2675
1	30210	3178

〈Table 2〉 Properties of isolation system[6]

Element	1st-stiffness (kN/cm)	2nd-stiffness (kN/cm)	Yield shear force (kN)
Multi-rubber bearing	807	-	-
Lead damper	26500	-	22000
Steel damper	678	22	3500

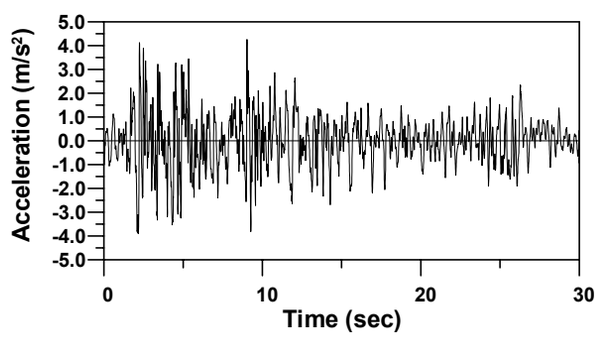
전술한 바와 같이 본 연구에서는 강진 지역의 특성을 나타내는 지진 하중을 작성하기 위하여 IBC2012 설계 기준에 근거한 설계응답스펙트럼을 사용하였다. IBC2012에 의한 설계응답스펙트럼 작성 시 건물이 건설될 위치는 미국 Los Angeles로 선택하였고 이에 따라 SS는 1.70, S1은 0.61로 결정되었다. Site class는 C로 선택하여 Fa와 Fv는 각각 1.0과 1.3으로 하였다. 이에 따라 SMS는 1.70, SM1은 0.793, SDS는 1.1333, SD1은 0.5287로 계산되고 TO는 0.0933초, TS는 0.4665초로 각각 계산되었으며 TL은 30층 이상의 건물에서만 의미가 있으므로 본 논문에서는 고려하지 않았다. 이렇게 IBC2012에 근거하여 생성한 설계응답스펙트럼을 <Fig. 3>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 IBC2012로 생성된 설계응답스펙트럼의 단주기 영역 스펙트럼 가속도는 1.13g으로서 강진 지역의 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.



〈Fig. 3〉 Design response spectrum based on IBC2012 and response spectrum of artificial EQ

본 연구에서는 지각 내부의 특성 및 지반 종류의 특성이 반영되어 기록된 역사 지진을 가정된 초기 지진 파형으로 사용하여 인공지진을 생성하였다. 이를 위해서 가정된 초기 지진 파형으로 사용되는 기록된 역사 지진의 지진동 파형과 동일한 위상 특성을 가지면서 설계용 가속도 응답스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진을 작성하는 방법을 사용하였다[8]. 이 방법은 기존의 SIMQKE에서 사용된 이론과는 달리 가정된 초기 지진의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상 특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 여러 종류의 기록된 역사 지진을 바탕으로 하는 인

공지진을 손쉽게 대량으로 작성할 수 있다. 인공지진 작성을 위해서 일반적으로 구조물의 지진 응답 거동을 분석할 때 널리 사용되고 있는 El Centro (1940, NS) 지진 하중을 사용하였다. El Centro 지진 하중의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상 특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 인공지진 하중을 생성한다. 이러한 방법으로 작성한 인공지진동의 가속도 시간 이력을 <Fig. 4>에 나타내었고, 응답스펙트럼을 생성하여 인공지진 하중을 작성할 때 사용한 IBC2012에 근거한 설계응답스펙트럼과 함께 <Fig. 3>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인공지진 하중의 가속도 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼이 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 <Fig. 4>에 나타낸 인공지진 하중의 가속도 파형은 El Centro 지진 하중과 비슷하게 나타났다.



〈Fig. 4〉 Artificial earthquake based on IBC2012

3. 하이브리드 중간층 지진격리시스템의 구성 및 제어 알고리즘

본 연구에서는 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 구성하기 위해서 예제 구조물인 시오도메 스미토모 건물에서 사용한 다중 고무 베어링과 강재 댐퍼를 사용하였다. 지진 응답의 비교를 위하여 다중 고무 베어링과 강재 댐퍼의 특성치는 <Table 2>에 나타낸 값으로 하였다. 하이브리드 지진격리시스템에서는 납 댐퍼 대신 MR 감쇠기를 사용하였다. MR 감쇠기의 비선형 동적 거동을 표현하기 위해서 현재 가장 널리 사용되고 있는 수치 해석 모델인 Bouc-Wen 모델[9]을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기 모델은 0 volt에서 5 volt까지 조절할 수 있다. MR 감쇠기의 최대 감쇠력은 27,500kN으로 하였다. 이 값은 예제 구조물에 사용된 납 댐퍼의 최대 항복 하중보다 25% 증가한 값이다.

전술한 바와 같이 중간층 면진시스템은 TMD의 기본 개념을 확장시킨 형태이므로 비교 대상 모델로 최적 TMD 설계 방법을 적용하여 중간층 면진시스템을 설계한 모델을 사용하였다. 기존 TMD의 강성 및 감쇠에 대한 최적 설계값에 대한 연구 중에서 Warburton(1982)의 연구를 적용하였다[10]. 즉, $\sqrt{\mu(1-\mu/4)/(4(1+\mu)(1-\mu/2))}$ 와 $\sqrt{1-\mu/2}/(1+\mu)$를 각각 TMD의 최적 감쇠비와 최적 진동수비로 사용하였다. 여기서 μ는 TMD와 주 구조물의 질량비이다. 본 연구에서 사용한 예제 구조물에서는 상부 구조물의 질량비가 68%이다.

하이브리드 중간층 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위해서는 적절한 제어기가 필요하다. 현재 제시된 준능동 제어 장치를 제어하는 기법으로는 능동 제어 이론에 기반하여 매 순간 감쇠력의 소산성을 판단하고 이에 따라 전류의 세기를 On-Off의 2단계만으로 조절하는 Clipped-optimal 제어 기법이나 절대 변위와 상대속도의 부호를 이용하여 조절하는 그라운드훅 및 스카이훅 제어기 등이 있다. 이러한 방법들은 적용하기가 간단하면서도 어느 정도 효과적이라는 장점을 가지지만, 감쇠기의 비선형성을 고려하지 못하여 감쇠기에 입력되는 전압을 최대값 또는 최소값으로만 결정한다. 이는 MR 감쇠기의 이력 거동을 모사하는 비선형 미분방정식으로부터 매 순간 원하는 감쇠력을 발휘하는 전류의 양을 정량화 할 수 없기 때문이다. 이에 반하여 퍼지 제어 기법은 구조물에 발생하는 변위 및 가속도 등의 정보를 이용하여 퍼지 추론 과정을 거쳐서 구조물의 상태를 파악함으로써 매 순간 보다 효율적인 제어 성능을 발휘하도록 MR 감쇠기에 입력되어 감쇠력을 결정하는 명령 전압을 실시간으로 조절할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 퍼지 제어기를 사용하여 MR 감쇠기에 전달되는 명령 전압을 조절하였다. 퍼지 제어기의 입력은 제어 대상이 되는 지진격리층의 최대 변위와 최대 층간 변위로 하였고 출력은 0~5 volt 사이의 명령 전압으로 하였다. 하이브리드 중간층 지진격리시

스템을 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지 제어기의 설계 목적은 면진층의 최대 변위 응답을 줄이는 것과 지진 하중에 의한 건물의 최대 층간 변위비를 허용치(1.5%) 이하로 줄이는 것으로 크게 나눌 수 있다. 따라서 이 문제는 다목적 최적화로 생각할 수 있다. 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 상충한다는 것이다. 본 예제의 경우에는 최대 면진층 변위와 최대 층간 변위비 사이에 상치 관계가 존재하게 되는데 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 본 연구에서는 다목적 최적화의 목적함수로써 예제 구조물의 면진층 최대 변위와 최대 층간 변위비를 선택하였다. 본 예제 구조물에서의 최대 층간 변위는 중간 면진층의 바로 아래층인 11층에서 나타났다. 이 두 목적함수는 <Table 3>에 나타낸 바와 같이 중간층 면진시스템이 적용된 실제 구조물의 값에 대하여 하이브리드 지진격리시스템이 사용된 값을 정규화 하여 사용하였다. 유전자 알고리즘은 많은 수의 개체(해)들을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 때문에 여러 개의 최적해를 동시에 찾는데 유전자 알고리즘을 이용하는 것이 매우 자연스러운 일이다. 다양한 다목적 유전자 알고리즘 중에서 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)[7]를 이용하여 퍼지 제어기를 최적화 하였다.

〈Table 3〉 Multi-objective functions

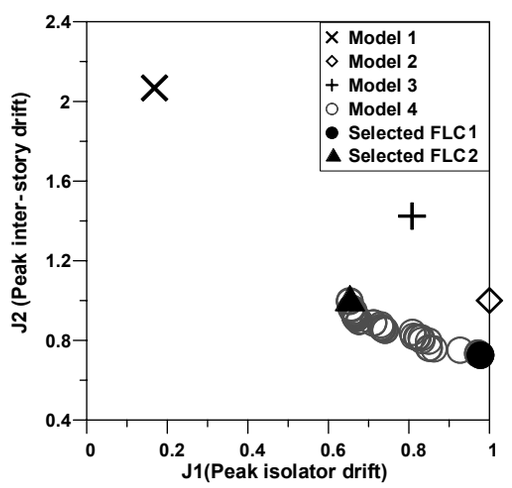
Objectives	Description
J1	$\frac{\text{Peak isolator drift of hybrid system}}{\text{Peak isolator drift of original model}}$
J2	$\frac{\text{Peak story drift of hybrid system}}{\text{Peak story drift of original model}}$

4. 지진 응답 제어 성능 평가

수치 해석은 MATLAB 2016a를 사용하여 수행하였다. NSGA-II로 퍼지 제어 알고리즘을 최적화하기 위하여 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 하였으며 최적화는 500세대까지 수행하였다. 인공지진 하중을 사용하여 수치 해석을 수행하였으며 수치 해석 시간 간격은 0.005초를 사용하였다. 하이브리드 중간층 지진격리시스템의 제어 성능을 평가하기 위해서 사용한 비교 대상 모델을 <Table 4>에 나타내었다. Model 1은 <Fig. 2>에 나타낸 예제 구조물과 동일하지만 중간층 면진이 없는 일반 골조 구조물을 나타낸다. Model 2는 실제 존재하는 예제 구조물의 특성을 그대로 사용한 모델이고 Model 3은 격리된 상부 구조물을 TMD와 같이 거동하도록 면진층의 특성을 설정한 모델이다. 마지막으로 Model 4는 본 연구에서 사용한 하이브리드 중간층 면진시스템을 적용한 모델이다. NSGA-II를 이용하여 최적화 작업을 수행한 결과인 파레토 최적해 집합을 비교 대상 모델과 함께 <Fig. 5>에 나타내었다.

〈Table 4〉 Comparative model

Name	Description
Model 1	Without mid-story isolation
Model 2	Existing model of Shiodome Sumitomo
Model 3	With mid-story isolation as a TMD
Model 4	With hybrid mid-story isolation

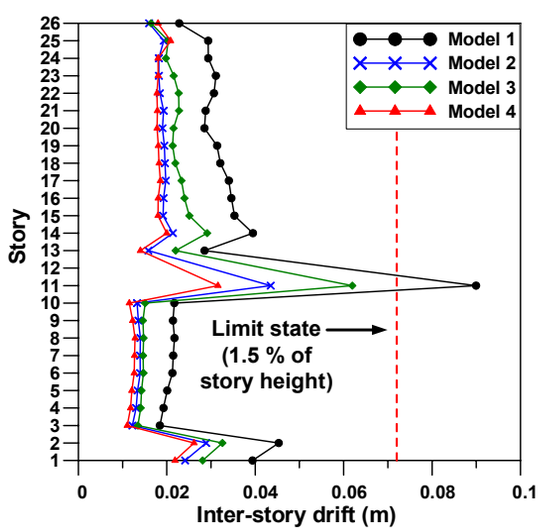


〈Fig. 5〉 Pareto optimal solution

전술한 바와 같이 <Fig. 5>에 나타낸 J1과 J2의 값은 시오도메 스미토모에 실제로 적용된 중간층 면진시스템, 즉 Model 2의 응답을 기준으로 정규화된 값이다. 따라서 Model 2는 J1과 J2 모두 1의 값을 나타내고 있다. Model 1은 중간층 면진시스템이 없으므로 해당 층의 층간 변위가 작아서 J1이 0.17

로 매우 작은 값이 나오지만 최대 층간 변위를 나타내는 J2는 2.07로 Model 2의 2배가 넘는다. Model 3의 J1과 J2 값은 각각 0.81과 1.42로 Model 2에 비하여 면진층 변위는 더 효과적으로 줄일 수 있지만 최대 층간 변위는 오히려 증가하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제안한 Model 4는 FLC (Fuzzy Logic Controller) 제어 알고리즘에 따라서 다양한 제어 성능 결과가 나타나는데 J1과 J2의 제어가 상충 관계라는 것은 분명하게 파악할 수 있다. 다수의 FLC 파레토 최적해 집합 중에서 최대 층간 변위를 가장 효과적으로 제어할 수 있는 알고리즘을 FLC1, 최대 면진층 변위를 가장 효과적으로 제어할 수 있는 알고리즘을 FLC2로 명명하였다. FLC1의 J1과 J2 값은 각각 0.97과 0.72이며 FLC2는 각각 0.65와 0.99이다.

각 모델에 따른 최대 층간 변위를 <Fig. 6>에 나타내었다. 면진층 변위는 층간 변위에 비하여 특별히 크기 때문에 그래프에서 배제하였다. 그림을 보면 중간층 면진시스템을 사용하지 않은 Model 1은 11층에서 매우 큰 층간 변위가 발생하며 이 값은 설계 기준인 1.5%의 층간 변위비를 초과하는 것을 알 수 있다. 모든 모델에서 11층의 층간 변위가 가장 크게 나타나는 이유는 실제 예제 구조물의 11층 강성이 가장 작기 때문인 것으로 판단된다.



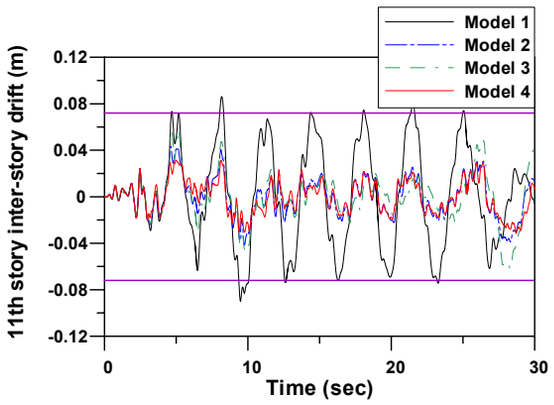
〈Fig. 6〉 Peak inter-story drift

LRB를 이용한 중간층 면진시스템이 적용된 실제 구조물의 모델인 Model 2의 경우에는 Model 1의 응답을 절반가량 줄일 수 있었다. TMD를 모사한 Model 3의 경우에는 중간층 면진시스템이 없는 경우보다는 효과적으로 층간 변위를 제어하였지만 Model 2보다는 좋지 않은 제어 성능을 나타내었다. 본 연구에서 제안한 Model 4의 경우에는 모든 모델에 비하여 우수한 층간 변위 제어 성능을 나타내었다. 이 모델에서는 FLC2를 이용하여 스마트 중간층 지진격리시스템을 제어하였다. 각 모델을 사용하였을 때의 최대 면진층 변위를 <Table 5>에 비교하였다. 최대 면진층 변위는 Model 2가 가장 컸으며, Model 4에서 FLC1을 사용하는 경우에는 Model 2와 비슷한 값을 보이면서 상충하는 최대 층간 변위를 28% 더 줄일 수 있었다. FLC2를 사용하는 경우에는 Model 4가 Model 2와 거의 비슷한 최대 층간 변위 제어 성능을 나타내면서 최대 면진층 변위는 35% 더 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

〈Table 5〉 Peak isolator drift (m)

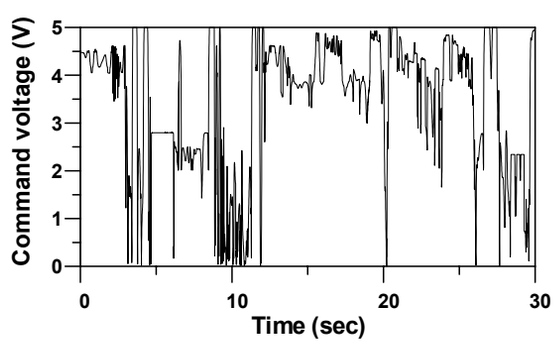
FLC	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
FLC1	0.0305	0.1817	0.1468	0.1776
FLC2	0.0305	0.1817	0.1468	0.1186

각 모델별 지진 하중에 대한 층간 변위 시간 이력을 <Fig. 7>에 나타내었다. <Fig. 6>에서 볼 수 있듯이 최대 층간 변위는 11층에서 나타나므로 11층의 층간 변위 시간 이력을 비교하였다. Model 1의 경우에는 약 8~10초 사이에 최대 층간 변위를 나타내며 그 이외에도 몇몇 구간에서 설계 기준인 1.5%의 층간 변위비를 초과하는 것을 볼 수 있다. 이에 비해서 Model 2는 층간 변위를 매우 효과적으로 줄일 수 있고 Model 4는 더 많이 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. Model 3도 Model 1에 비해서는 응답을 더 줄일 수 있지만 다른 모델에 비해서는 제어 성능이 좋지 못한 것을 볼 수 있다. <Fig. 8>에는 FLC1에 의해서 생성되는 명령 전압의 시간 이력을 나타내었다.



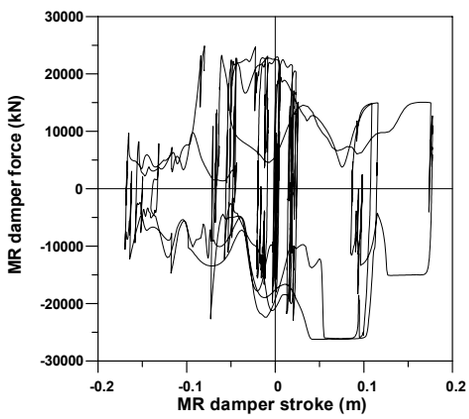
〈Fig. 7〉 Inter-story drift time history

선택된 FLC1로 면진층 변위 및 11층 층간 변위가 실시간으로 입력되면 간단한 퍼지 계산에 의해서 명령 전압이 출력된다. 그림을 보면 FLC에 의해서 0 volt에서 5 volt까지 적절하게 분포된 명령 전압이 비선형적으로 생성되는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 중간의 면진층 변위가 과도하게 되면 명령 전압을 크게 하여 지진 격리된 상부 구조물의 동적 거동을 줄이게 되고, 11층의 층간 변위 응답이 크게 되면 MR 감쇠기로 전달되는 명령 전압을 줄여서 상부 구조물이 TMD로서의 역할을 효과적으로 할 수 있도록 한다.



〈Fig. 8〉 Command voltage time history

위의 명령 전압에 의해서 제어되는 MR 감쇠기의 감쇠력과 면진층의 변위(MR 감쇠기 스트로크)의 관계를 <Fig. 9>에 나타내었다. LRB와 같은 일반적인 면진장치나 감쇠장치의 힘-변위 곡선은 직사각형이나 평행사변형의 전형적인 형태를 나타내지만 FLC로 제어된 MR 감쇠기의 힘-변위 곡선은 그림에서 보는 것과 같이 매우 불규칙적이고 비정형적이다. 이것은 지진 하중에 의해 순간적으로 발생하는 면진층 변위 및 층간 변위를 바탕으로 이를 효과적으로 제어할 수 있는 제어력이 실시간으로 계산되어 MR 댐퍼 감쇠력의 변화가 일어나기 때문이다. 그림을 보면 비선형성이 매우 강한 MR 댐퍼의 감쇠력이 효과적인 제어를 위하여 굉장히 불규칙적으로 변하는 것을 확인할 수 있다.



〈Fig. 9〉 MR damper stroke and force relationship

5. 결론

본 연구에서는 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 구성하고 지진 하중에 대한 동적 응답 저감 성능을 검토하였다. 이를 위하여 실제 중간층 면진시스템이 설치되어 시공된 일본의 시오도메 스미토모 건물을 예제 구조물로 사용하여 수치 해석을 수행하였다. 하이브리드 중간층 지진격리시스템을 구성하기 위하여 실제 구조물에 사용된 적층 고무면진장치와 강재 댐퍼를 사용하였고 이와 함께 핵심 요소인 MR 댐퍼를 이용하였다. 지진 하중 및 구조물의 동적 응답에 따라서 MR 댐퍼를 효과적으로 제어하는 것이 하이브리드 중간층 지진격리시스템의 제어 성능을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 이를 위해 퍼지 논리 제어기를 사용하였고 최적 설계를 위하여 유전자 알고리즘을 사용하였다. 중간층 면진시스템은 구조물의 안전을 위하여 면진층의 최대 변위와 최대 층간 변위가 동시에 적절한 수준으로 제어되어야 하지만 이 두 응답은 상충하는 관계에 있기 때문에 최적 설계를 위하여 다목적 최적화 알고리즘을 사용하였다.

수치 해석 결과, 중간층 면진시스템이 없는 일반 구조물에 비하여 중간층 면진시스템이 있는 실제 구조물이 최대 층간 변위를 50% 가까이 저감시킬 수 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 하이브리드 중간층 지진격리시스템은 최대 층간 변위와 면진층 변위를 모두 저감시킬 수 있었다. 특히 층간 변위를 기존의 수동 중간층 면진시스템과 비슷한 수준으로 제어한다면 최대 면진층 변위를 35% 더 저감시킬 수 있었다. 반대로 최대 면진층 변위를 수동 중간층 면진시스템과 비슷한 수준으로 놓는다면 최대 층간 변위를 28% 더 제어할 수 있었다. 이렇게 구성한 하이브리드 중간층 면진시스템은 대형 지진이 발생하여 정전이 되더라도 건전지와 같은 작은 전압으로도 운용이 가능하며 최악의 경우 건전지에 의한 전압 제공도 불가능하다면 수동 감쇠기로서의 역할을 하므로 능동 제어 장치에 비하여 안정성이 매우 높다고 할 수 있다. 본 연구에서는 대상 구조물을 비교적 단순화 한 모델링을 사용하여 해석을 수행하였으며 추후 보다 상세한 모델을 통한 해석을 수행하는 것이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Kelly, J. M. (1999). The current state of base isolation in the United States. Proceedings of the Second World Conference on Structural Control, Japan, Vol.1, pp.1043~1052
2. Naeim, F., & Kelly, J. M., "Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice", Wiley, pp.1~304, 1999.
3. 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, International Association for Earthquake Engineering, China.
4. Hur, M. W. (2017). Seismic Isolation Effects by the Isolation Period of the Vertically Story-added Remodeling Building. Proceedings of Spring Annual Conference of the Korea Concrete Institute, Republic of Korea, Vol.29, No.1, pp.705~706
5. Hur, M. W., "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
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, International Association for Earthquake Engineering, Canada.
7. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A., & Meyarivan, T. (2000). A Fast Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization: NSGA-II (Report No. 200001). India: Indian Institute of Technology Kanpur.
8. Jun, D. H., Kang, P. D., & Kim, J. U., "Nonlinear Response Spectra of Artificial Earthquake Waves Compatible with Design Spectrum", Journal of Earthquake Engineering Society of Korea, Vol.10, No.5, pp.63~71, 2006
9. Sues, R. H., Mau, S. T., & Wen, Y. K., "System identification of degrading hysteretic restoring forces", Journal of Engineering Mechanics, Vol.114, No.5, pp.833~846, 1988
10. Warburton, G. B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", Journal of the International Association for Earthquake Engineering, Vol.10, No.3, pp.381~401, 1982

■ Received : March 19, 2018
■ Revised : April 26, 2018
■ Accepted : April 26, 2018