

중약진지역 구조물과 스마트 최상층 면진시스템의 통합최적설계에 대한 연구

Study of Integrated Optimal Design of Smart Top-Story Isolation and Building Structures in Regions of Low-to-Moderate Seismicity

김 현 수¹⁾ 강 주 원^{2)*}
Hyun-Su Kim Joo-Won Kang

Abstract

In order to reduce seismic responses of a structure, additional dampers and vibration control devices are generally considered. Usually, control performance of additional devices are investigated for optimal design without variation of characteristics of a structure. In this study, multi-objective integrated optimization of structure-smart control device is conducted and possibility of reduction of structural resources of a building structure with smart top-story isolation system has been investigated. To this end, 20-story example building structure was selected and an MR damper and low damping elastomeric bearings were used to compose a smart base isolation system. Artificial earthquakes generated based on design spectrum of low-to-moderate seismicity regions are used for structural analyses. Based on numerical simulation results, it has been shown that a smart top-story isolation system can effectively reduce both structural responses and isolation story drifts of the building structure in low-to-moderate seismicity regions. The integrated optimal design method proposed in this study can provide various optimal designs that presents good control performance by appropriately reducing the amount of structural material and damping device.

Keywords : Integrated design, Regions of Low-to-Moderate Seismicity, Smart top-story isolation system, Vibration control

1. 서론

지진하중을 받는 구조물의 안전성을 증가시키기 위해서 수동 감쇠기나 다양한 형태의 진동제어장치를 구조물에 추가적으로 설치하는 과정은 구조물의 설계가 이루어진 후 구조시스템만으로는 더 이상의 구조성능개선이 불가능한 상태에서 이루어져 왔다. 근래에는 면진 및 제진시스템을 설계하는 경우에 진동제어장치의 성능 및 배치 계획 등을 고려하여 구조물을 설계하고 있다 (Chun and Hur, 2010). 대부분의 구조설계 과정에서 지진하중에 대하여 발생하는 건물의 과도한 응답을 효과적으로 제어할 수 있는 진동제어장치에 대한 최적설계를 수행할 때에는 구조물의 특성은 변화시키지 않고 추가되는 진동제어장치의 용량이나 위치 등에 대해서만 최적설계를 수행하고 있다. 구조부재의 최적설계가 수행

된 후 구조제어시스템의 설계를 수행하는 순차적인 설계방법은 설계과정이 명확하고 비교적 용이하므로 기존의 지진 응답 제어 설계과정에서 보편적으로 이루어지는 방법이다 (Park and Koh, 2004). 순차적인 방법으로 지진하중을 받는 건물의 구조설계를 수행한다면 우선 주어진 구조물이 지진하중에 대해서 효과적으로 거동할 수 있는 최적의 구조부재 설계안이 결정될 수 있을 것이다. 최적 설계된 구조물에 대하여 적절한 제어시스템을 설계할 수 있으나 이렇게 설계된 시스템이 예상되는 지진하중에 대하여 가장 효과적으로 대응할 수 있는 최적의 설계안이라고 보기는 어렵다. 왜냐하면 추가되는 진동제어장치와 구조물간의 상호작용에 의하여 경 제성 및 구조적 효율성에서 보다 최적인 해가 따로 존재할 수 있기 때문이다. 따라서 제어시스템이 추가된 구조물에 대하여 최적의 구조부재를 찾는 설계안은 최초의 구조물 설계

1) 정희원, 선문대학교 건축학부 조교수
2) 정희원, 영남대학교 건축학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : kangj@ynu.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2013년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

안과 달리 다시 최적화가 가능하게 된다. 이에 따라서 구조물의 설계안이 달라지면 제어시스템 역시 첫 번째 설계안과는 다른 최적의 설계안이 존재하게 되므로 최적설계를 위해서는 Fig. 1과 같이 반복설계과정이 필요하다. 이러한 반복설계과정을 피하기 위해서 구조물과 진동제어시스템을 하나의 시스템으로 간주하고 구조물 및 제어시스템의 설계변수를 동시에 최적화할 수 있는 Fig. 2와 같은 통합최적설계기법이 제안되었다 (Ok et al., 2008).

구조물과 제어시스템의 통합최적화에 대한 연구는 구조부재의 물량 및 제어시스템의 용량을 줄임과 동시에 이들과는 상충관계 (trade-off)에 있는 구조물의 응답도 동시에 최소화해야하므로 다목적 최적화문제로 귀결된다. 이러한 구조물-제어시스템의 다목적 통합 최적화에 대한 기존 연구에서 Park and Koh (2004)는 선호도에 기반을 둔 최적화 방법을 제안한 바 있으며, Park et al. (2004)은 생애주기비용 (Life-Cycle Cost)의 측면에서 가장 경제적인 최적설계해를 제시하는 연구를 하였다. Park et al. (2003)은 구조부재와 제어장치의 사용량 및 구조물의 응답크기에 대하여 다단계의 설

계목표를 산정하고 이를 점진적으로 만족하도록 최적화과정을 유도하는 목표갱신 유전자알고리즘 (Goal Updating Genetic Algorithm)을 제안한 바 있다. 이러한 기존의 연구들은 대부분 수동 및 능동제어시스템과 구조부재 사용량 등을 변수로 하여 최적설계안을 찾는 방법에 대한 연구들로서 근래에 구조제어분야에서 활용도 및 중요성이 높아지고 있는 스마트 진동제어시스템이 적용된 구조물에 대한 통합최적설계의 연구는 찾아보기 어렵다.

이에 본 연구에서는 지진하중을 받는 구조물과 스마트 진동제어시스템, 수동제어시스템 및 구조부재의 사용량에 대하여 통합최적설계를 수행하고 그 효용성을 검토하고자 한다. 지진하중을 받는 고층건물의 지진응답 제어를 위해서 스마트 최상층 면진시스템이 제안된 바 있다 (Kim and Kang, 2012). 최상층 면진시스템의 첫 번째 목적은 최상층 이하의 주구조물 동적응답을 저감시키는 것이다. 이를 위해서는 최상층이 TMD처럼 거동하도록 하는 것이 가장 효과적일 것이다. 그러나 최상층 이하 주구조물의 진동저감만을 목적으로 최상층 면진시스템을 설계한다면 면진층에서 과도한 동적변위가 발생하게 되어 구조물의 안전성에 심각한 문제를 초래할 가능성이 있다 (Kang et al., 2010). 이러한 기존의 최상층 면진시스템이 가지는 문제점을 고려하여 최상층 면진시스템의 진동제어성능을 저감시키지 않으면서도 면진층의 변위를 저감시켜 시스템의 안전성을 향상시킬 수 있도록 스마트 감쇠기를 도입한 제어장치가 스마트 최상층 면진시스템이다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 구조물과 제어시스템의 설계변수를 동시에 최적화할 수 있는 통합최적설계기법을 적용하기 위하여 스마트 최상층 면진시스템에 사용되는 MR 감쇠기의 제어용량과 면진층의 감쇠비를 스마트 제어시스템의 설계변수로 선택하였다. 이와 더불어 예제 구조물의 강성과 추가적인 수동감쇠기의 용량을 구조물의 설계변수로 선택하였다. 통합최적화의 목적함수로는 구조부재 사용량, 수동제어시스템 사용량, MR 감쇠기의 제어용량, 구조물 및 면진층의 최대응답으로 설정하였고 5개의 목적함수를 동시에 최적화할 수 있는 다목적 유전자알고리즘을 사용하였다.

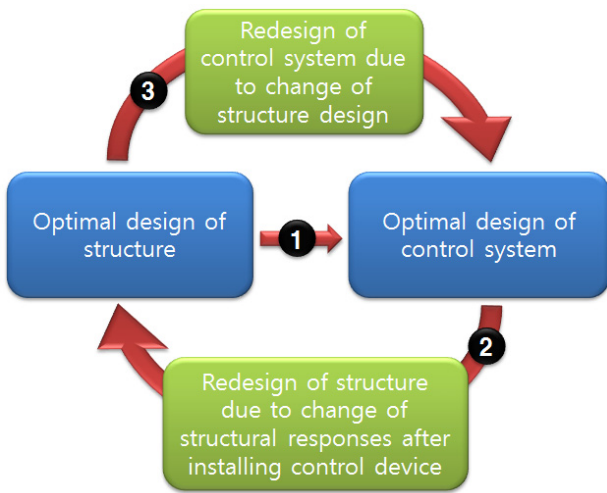


Fig. 1 Iterative design process

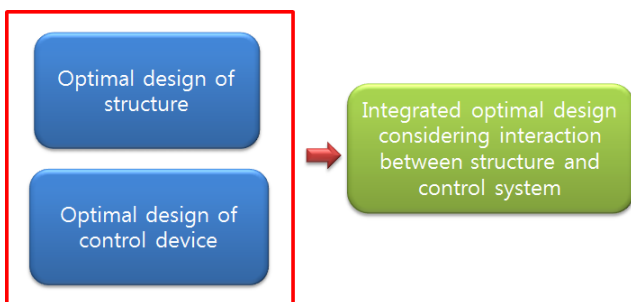


Fig. 2 Integrated optimal design process

2. 중약진지역의 특성을 가진 인공지능하중의 생성

본 논문에서는 중약진지역에 있는 구조물과 스마트 최상층 면진시스템의 통합최적설계에 대한 연구를 수행하기 위하여 중약진지역의 특성을 나타내는 인공 지반운동성분을

생성하였다. 이를 위하여 KBC2009 설계기준에 근거하여 설계응답스펙트럼을 작성하였고 이때 지역계수는 0.22, 지반종류는 S_A 를 사용하였고 S_{DS} 는 0.2933, S_{D1} 은 0.1173, T_0 는 0.08초 T_S 는 0.4초로 각각 계산되었다. 이렇게 생성한 설계응답스펙트럼의 단주기 영역의 스펙트럼 가속도는 0.293g이다.

본 논문에서는 지각내부의 특성 및 지반 종류의 특성이 반영되어 기록된 역사지진의 지진파형과 동일한 위상특성을 가지면서 설계용 가속도 응답스펙트럼에 매우 근접한 응답스펙트럼을 갖는 인공지진을 작성하는 방법을 사용한다 (Jun, 2013). 이 방법은 가정된 초기지진의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 여러 종류의 기록된 역사지진을 바탕으로 하는 인공지진을 손쉽게 작성할 수 있다.

본 논문에서는 인공지진을 생성하기 위해서 일반적으로 구조물의 지진응답 거동을 분석할 때 널리 사용되고 있는 El Centro (1940, NS) 지진하중을 사용하였다. 이 El Centro 지진하중의 개략적인 파형을 그대로 유지하면서 위상특성의 변화가 전혀 없고 설계용 가속도 스펙트럼에 대응하는 인공지진하중을 생성한다. 이러한 방법으로 작성한 인공지진의 가속도 응답스펙트럼을 생성하여 인공지진하중을 작성할 때 사용한 KBC2009에 근거한 설계응답스펙트럼과 함께 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 인공지진하중의 가속도 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼이 전반적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

작성된 인공지진하중의 시간이력곡선을 Fig. 4에 나타내었다. 생성된 지진하중의 파형이 El Centro 지진하중의 파형과 개략적으로 일치하고 기록된 El Centro 지진하중의 최대 지반가속도는 $3.07m/s^2$ 인데 반하여 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 적합하도록 조정된 중앙진지역 인공지진하중의 최대 지반가속도는 $1.14m/s^2$ 이므로 중앙진 지역특성에 맞도록 El

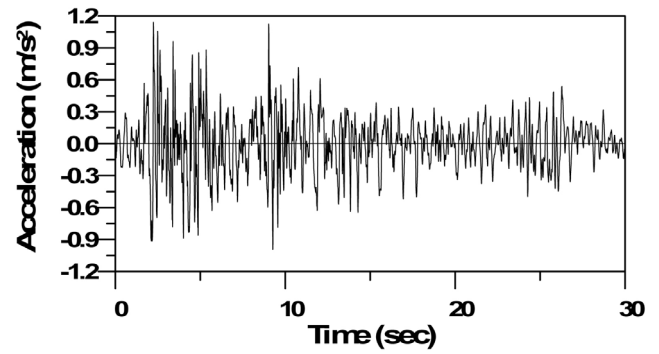


Fig. 4 Acceleration time history of artificial earthquake

Centro 지진하중이 적절하게 조정된 것으로 판단된다.

3. 스마트 최상층 면진시스템이 설치된 20층 전단빌딩 예제구조물

본 연구에서는 스마트 최상층 면진시스템이 적용된 중앙진지역에 있는 고층구조물에 대한 통합최적설계기법을 적용하기 위하여 Fig. 5에 나타난 20층 예제구조물을 사용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 20층의 전형적인 전단빌딩모델을 기본 예제구조물로 사용하였으며 이 모델의 20층과 19층 사이에 면진시스템이 설치되는 것으로 가정하였다. 스마트 면진시스템은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 탄성베어링과 MR 감쇠기로 구성되어 면진층에 설치된다. 스마트 최상층 면진시스템의 제어성능을 비교하기 위하여 수동 최상층 면진시스템의 제어성능을 검토하였다. 이를 위하여 그림에 나타난 스마트 최상층 면진시스템에서 MR 감쇠기 대신에 적절한 용량의 점성감쇠기를 사용하여 수동 최상층 면진시스템을 구성하였다.

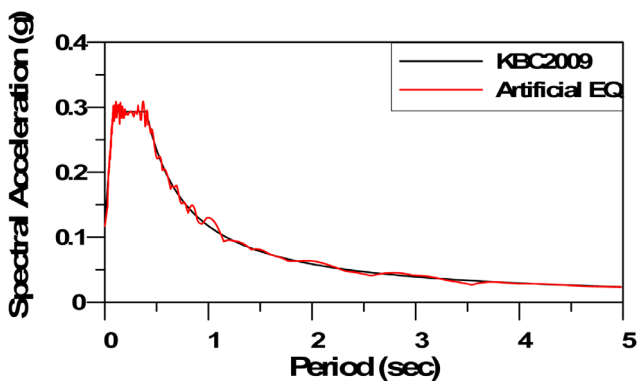


Fig. 3 Response spectrum of artificial earthquake

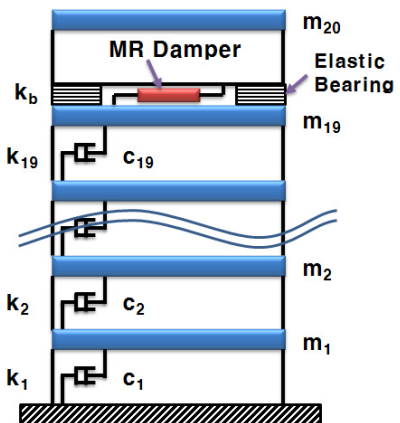


Fig. 5 Analytical model of smart top-story isolated structure

그림에서 m_i ($i = 1, 2, \dots, 20$)는 20층 건물의 i 번째 층의 질량을 나타내며 본 연구에서는 m_i 를 $8 \times 10^5 kg$ 으로 두었다. 또한, k_i ($i = 1, 2, \dots, 20$)는 각각 i 번째 층의 강성을 나타내고 본 연구에서는 k_i 를 $1.0 \times 10^9 N/m$ 로 두었다. 예제 구조물의 감쇠행렬을 구성하기 위하여 Rayleigh 댐핑을 사용하였으며 이때 1차 및 2차 모드의 감쇠비를 2%로 하였다. 본 연구에서 사용한 20층의 일반 예제구조물을 이용하여 고유치 해석 한 결과 5개 저차모드 고유진동주기는 2.00, 0.67, 0.40, 0.29, 0.23초로 나타났다.

본 논문에서는 제안된 스마트 최상층 면진시스템의 지진 응답 제어성능을 검토하기 위하여 일반적으로 사용되는 수동 면진시스템의 진동제어성능과 비교하고자 한다. 이를 위하여 MR 감쇠기 대신에 점성감쇠기를 사용하는 수동 최상층 면진시스템을 구성하였다. 수동 면진시스템 및 스마트 면진시스템에서 사용한 탄성베어링의 특성은 최상층이 TMD와 같은 역할을 하여 구조물의 지진응답을 효과적으로 저감할 수 있도록 설정하였다. 이를 위하여 최상층 면진구조물의 면진층 강성 (k_b)은 최상층 이하 주구조물의 1차 모드 진동수가 면진된 최상층의 고유진동수와 같도록 설정하였다. 수동 최상층 면진시스템에 적용할 최적의 감쇠비에 대한 연구는 지금까지 거의 수행된 바가 없기 때문에 역학적으로 최상층 면진시스템과 동일한 원리로 작동하는 수동 TMD의 최적 설계변수에 대한 연구결과를 사용하여 결정하였다. 본 연구에서는 Warburton (1982)의 논문에서 제시한 랜덤하중이 구조물에 직접 가려질 경우에 대한 TMD의 최적 감쇠비를 사용하였다. 비록 Warburton의 연구에서 제안된 식이 단자유도 구조물을 대상으로 하고 있지만 본 연구의 예제구조물이 전형적인 캔틸레버 구조물로서 1차 모드가 전체 구조물의 동적거동에 미치는 영향이 탁월하므로 본 연구에서는 제안된 식을 사용하여 수동 면진시스템의 최적 감쇠비를 계산하였고 계산된 최적감쇠비는 10.9%이다. 이값을 이용하여 수동 면진시스템의 면진층 감쇠 (c_b)를 계산하였다. 스마트 최상층 면진시스템의 경우에는 면진층의 수동 감쇠값은 '0'으로 두고 오직 MR 감쇠기에 의해서만 감쇠력이 전달되도록 하였다.

본 연구에서는 스마트 최상층 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기를 모형화하기 위해서 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델 (Sues et al., 1988)을 사용하였다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 Bani-Hani and Sheban의 연구 (2006)에서 사용된 최대용량이 50kN을 가지도록 설계된 모델로서 입력전

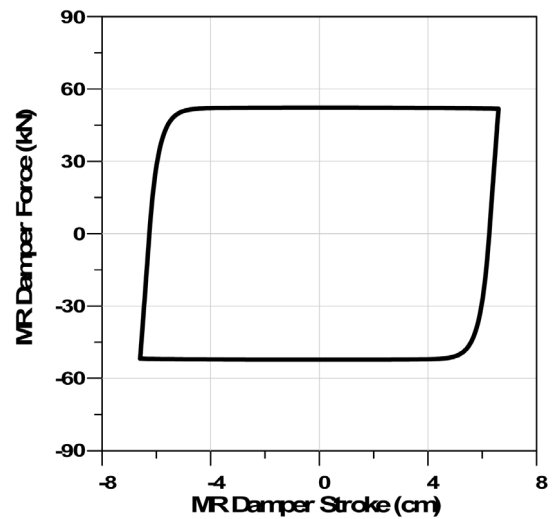


Fig. 6 Force-displacement relationship of 50 kN MR damper

압이 0V일 때 passive-off 상태를, 5V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. 이 모델을 이용하여 만든 50kN MR 감쇠기의 힘-변위 관계 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. MR 감쇠기의 여러 가지 특성 중 제어성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 passive-off 상태의 최대 제어력에 대한 passive-on 상태의 최대 제어력의 비로 나타내는 제어범위 (dynamic range)이다. Fig. 6에 나타난 50kN MR 감쇠기의 제어범위는 약 24이다. 본 연구에서 수행하는 스마트 최상층 면진시스템과 구조물의 특성의 동시 최적화작업에서 MR 감쇠기의 최대 제어용량을 변화시키게 되는데 이때 MR 감쇠기의 최대용량을 변화시켜도 제어범위는 24로 계속 유지하였다.

4. 통합최적설계 알고리즘의 개발

본 연구에서는 스마트 최상층 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어 알고리즘인 그라운드훅 (groundhook) 제어알고리즘 (Koo et al., 2004)을 사용하였다. 이 알고리즘은 빌딩 구조물의 응답을 감소시키기 위하여 감쇠기를 구조물과 땅 (그라운드) 사이에 연결한 가상의 시스템을 가정한 후 스마트 최상층 면진시스템이 이러한 가상의 그라운드훅 감쇠기의 감쇠력을 모사하도록 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절한다.

본 논문에는 중약진 지역에 있는 고층건물의 스마트 최상층 면진시스템을 구성하는 MR 감쇠기의 용량과 면진층 감쇠비, 구조부재와 감쇠기 사용량 뿐만 아니라 지진하중에 대한 구조물의 응답도 동시에 최소화해야 하는 다목적 최적화 문제로 구성된다. 이것은 지진하중에 대한 응답을 줄여서 구

조적 안전성을 확보해야하는 목적과 구조부재 및 스마트 제어장치 등의 사용량을 줄여서 경제적 효율성을 극대화시켜야하는 목적으로 크게 정리될 수 있다. 이러한 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 서로 상충한다는 것이다. 이러한 경우에는 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 따라서, 다목적 최적화 문제에서 하나의 최적해를 찾는 것은 거의 불가능하고 일련의 서로 우열을 가릴 수 없는 해의 집합 (파레토 최적해)이 존재하게 된다. 본 연구에서는 근래에 구조공학분야에서 널리 사용되고 있는 NSGA-II (a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) (Deb et al., 2002)를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다. NSGA-II를 이용하여 예제구조물과 스마트 최상층 면진시스템의 다목적 통합최적화를 수행하는 과정을 Fig. 7에 나타내었다.

다목적 유전자알고리즘을 이용하여 스마트 최상층 면진시스템이 설치된 20층 예제구조물의 다목적 통합최적화를 수행하기 위해서는 인코딩 (encoding) 과정을 거쳐서 구조물과 제어시스템을 유전적으로 표현해야 한다. 즉, 예제구조물과 스마트 최상층 면진시스템을 구성하는데 필요한 모든 정보를 염색체 (chromosome)라고 불리는 하나의 구조에 인코딩해야한다. 우선 예제구조물의 구조부재를 최적설계하기 위해서 기본 강성을 가지는 해석모델을 생성한 후 유전자 알고리즘에 의하여 추가되는 강성의 최적값을 결정하도록 하였다. 3장에서 설명한 기본 해석모델에 유전자 알고리즘에 의해서 결정된 추가 강성과 수동 감쇠기의 용량을 더하여 예제구조물의 최종 해석모델을 구성한다. 본 연구에서는 면진이 되는 최상층을 제외한 하위 19개 층에 추가되는 강성과 수동 감쇠기의 용량을 유전자알고리즘에 의해서 결정되게 된다. 이렇게 각 수동 감쇠기의 용량이 층별로 최적화되면 결과적으로 감쇠기의 최적 용량뿐만 아니라 감쇠기가 효과적인 제어능력을 발휘할 수 있는 최적의 위치도 동시에 파악할 수 있게

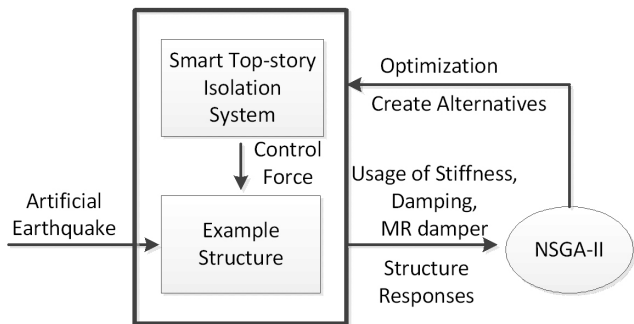


Fig. 7 Integrated optimization process using NSGA-II

된다. 스마트 최상층 면진시스템의 제어성능을 결정하는 가장 중요한 요소는 면진되는 최상층의 질량과 MR 감쇠기의 제어용량 및 면진층의 감쇠비이다. 여기서 면진되는 최상층의 질량은 19층 이하 일반층의 질량과 동일하게 두었고 MR 감쇠기의 최적용량 및 면진층의 감쇠비만 NSGA-II를 사용하여 찾는다. 이렇게 스마트 최상층 면진시스템이 설치된 예제구조물을 구성하기 위한 설계변수를 염색체에 인코딩하는 방법을 Fig. 8에 나타내었다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 예제구조물의 부재와 감쇠기 및 스마트 제어시스템의 용량뿐만 아니라 구조물의 응답도 동시에 최소화하는 다목적 최적화를 수행하였다. 이를 위하여 Table 1에 나타난 5개의 목적함수를 다목적 최적화에 사용하였다. Table 1에서 각 층별 추가되는 강성을 모두 합한 값을 첫 번째 목적함수 (obj1)로 두었다. 두 번째 목적함수 (obj2)는 사용된 수동 감쇠기의 용량을 모두 더한 값으로 하였다. 세 번째 목적함수 (obj3)는 MR 감쇠기의 용량으로 하였다. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 50 kN 용량의 MR 감쇠기 나타내는 해석모델을 사용하였으며 이 감쇠기의 제어범위를 유지한 채 가중계수 (scale factor)를 사용하여 MR 감쇠기의 용량을 결정하도록 하였다. 네 번째 목적함수 (obj4)는 면진층의 최대 변위응답으로 하였고 마지막으로 다

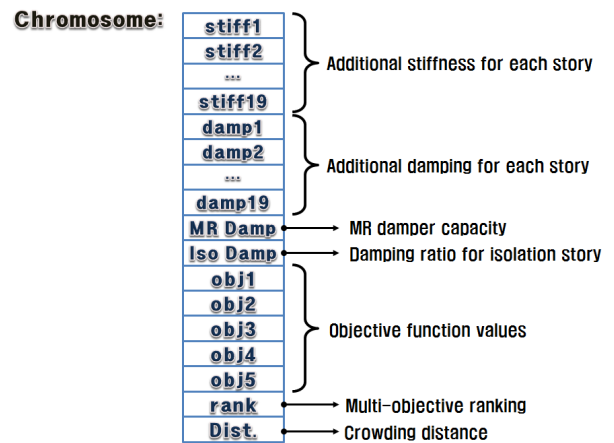


Fig. 8 Configuration of chromosome

Table 1 Multi-objective functions

Objectives	Descriptions
obj1	Sum of additional stiffness
obj2	Sum of passive dampers
obj3	Capacity of MR damper
obj4	Peak displacement of isolation story
obj5	Peak displacement of 19th story

첫 번째 목적함수 (obj5)로는 예제구조물의 19층 최대 변위 응답을 선택하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 obj1-obj3의 3개의 목적함수는 구조물과 스마트 제어시스템의 사용량을 나타내므로 경제성과 관련이 있고 obj4와 obj5는 구조물의 지진응답을 나타내므로 안전성과 관련이 있다.

5. 통합최적화 결과 검토

다목적유전자알고리즘인 NSGA-II를 이용한 최적화 작업에서 최적화는 1000세대까지 수행하였고 한 세대는 200개의 개체로 이루어지도록 구성하였다. 본 논문에서는 5개의 목적함수에 대하여 다목적 최적화작업을 수행하기 때문에 보다 넓은 지역의 해를 검색할 수 있도록 개체의 수를 비교적 많게 설정하였다. 최적화 결과 5개의 목적함수 중에서 구조물의 물량을 대표하는 obj1과 구조물의 응답을 대표하는 obj5에 대하여 파레토 최적해집합을 Fig. 9에 나타내었다.

그림에 나타낸 바와 같이 추가적으로 사용한 구조부재의 총량과 19층의 최대치 변위응답 간에는 서로 반비례관계가 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, 추가되는 강성이 많을수록 주 구조물의 지진응답을 저감시킬 수 있는 반면에 경제적 부담은 증가하고 사용되는 구조부재의 물량을 줄이면 지진응답이 증가하게 된다. 그림을 보면 일반적인 2차원 파레토 최적해집합과는 달리 파레토 최적 경계면 안쪽에도 다수의 해가 존재하는 데 이것은 본 연구에서 최적화시 사용한 목적함수의 개수가 2개가 아니라 5개이고, 이러한 5차원의 파레토 최적해집합을 2차원 그래프에 나타내었기 때문이다. 또한 한 세대의 개체수가 200개로서 비교적 많은 개체를 사용하여 5

차원의 공간을 탐색하고 이것을 2차원 그래프에 나타내었기 때문에 다수의 개체가 밀집되어 나타난 것을 볼 수 있다. 그 그래프에서 obj1과 obj5를 동시에 적절하게 저감시킬 수 있는 개체를 선택하여 Fig. 9에 검정색 원으로 나타내었다. 선택한 개체가 나타내는 염색체를 decoding하여 구조물과 스마트 최상층 면진시스템의 수치해석모델을 생성하였다. 이때 작성된 구조물에 각 층별 추가강성과 수동 감쇠기의 사용량을 Fig. 10과 11에 나타내었다.

각 층별 추가강성을 보면 7층에서 15층 사이에 강성이 가장 많이 추가된 것을 볼 수 있다. 이에 반해서 수동감쇠기는 1층에서 6층에 걸쳐서 대부분 설치가 되었고 상층부에는 거의 추가되지 않은 것을 확인할 수 있다. 앞에서 밝힌 바와

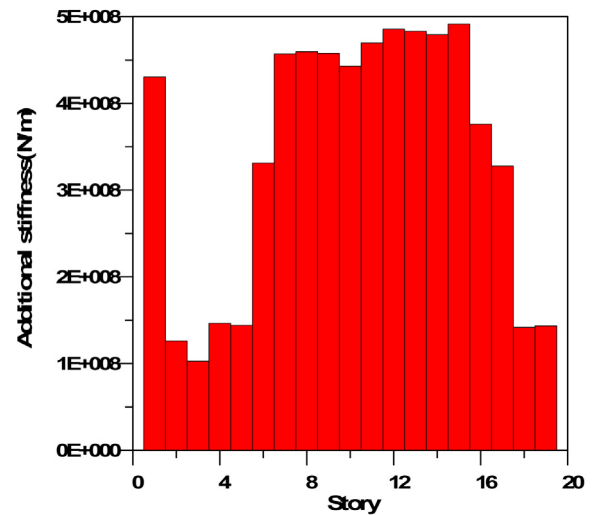


Fig. 10 Additional stiffness of each story

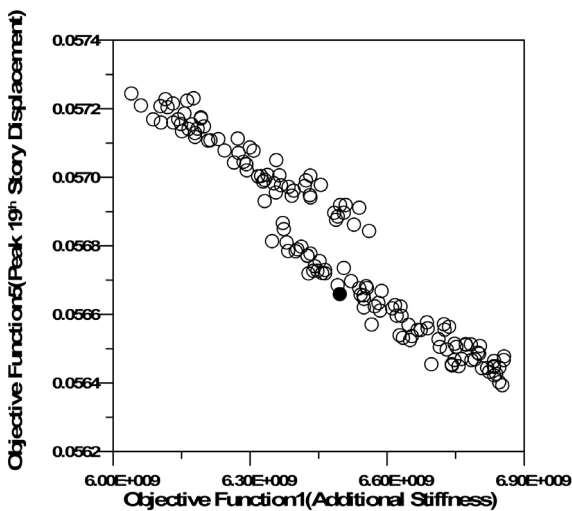


Fig. 9 Optimization results

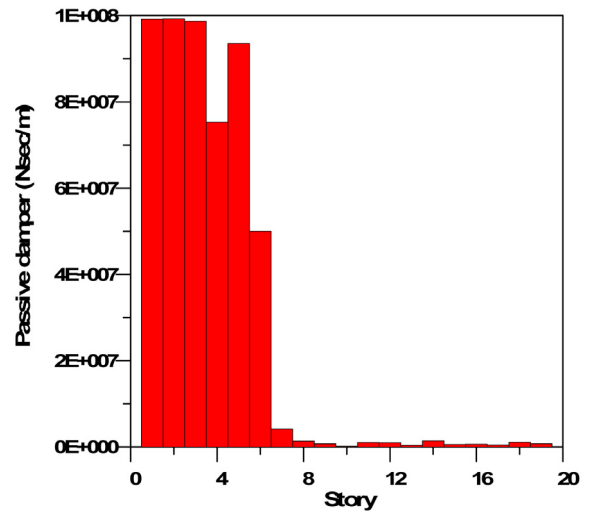


Fig. 11 Passive damper of each story

Table 2 Comparison of seismic responses

	Original building	Passive isolation	Smart isolation
Peak displacement (20 th story)	10.21	12.55	11.01
Peak displacement (19 th story)	10.13	5.73	5.65
Peak displacement (Isolation story)	0.00	12.67	9.15
RMS displacement (20 th story)	3.18	3.45	2.56
RMS displacement (19 th story)	3.16	1.60	1.41

같이 예제구조물의 기본강성을 1×10^9 N/m로 두었으므로 7층-15층 사이에서 기본강성의 약 45% 전후로 강성이 추가되는 것을 알 수 있다. 이렇게 강성이 추가된 최종 구조해석모델을 이용하여 고유치해석 한 결과 5개 저차모드 고유진동 주기는 1.93, 0.62, 0.38, 0.28, 0.22초로 나타났다. 이 값은 앞에서 밝힌 기본강성만을 가진 구조물의 고유진동주기보다 각 모드별로 조금씩 짧아진 것을 알 수 있다. 일반적으로 캔틸레버형 구조물은 1차 모드가 구조물의 응답에 가장 큰 영향을 미치지만 본 연구에서 사용한 구조물의 2차 모드 고유진동 주기는 0.62초로써 Fig. 3에 나타난 가속도스펙트럼을 보면 지진하중에 의하여 큰 영향을 받게 된다. 따라서 1차 모드뿐만 아니라 2차 모드의 영향이 크게 나타나므로 Fig. 10에서 보듯이 중상층에서 추가강성이 크게 나타난 것으로 판단된다.

선택된 개체를 통해서 얻은 MR 감쇠기의 최적 제어용량은 2,509 kN이고 면진층에서의 최적의 수동감쇠비는 11.8%로 나타났다. 따라서 이러한 성능을 가진 MR 감쇠기 및 수동감쇠기를 이용하여 스마트 최상층 면진시스템을 구성하였다. 이렇게 동시에 통합 최적화 과정을 통해서 설계된 스마트 최상층면진시스템이 설치된 예제구조물에 지진하중이 가해졌을 때 발생하는 응답들을 Table 2에 나타내었다. 최적화 작업의 결과를 비교하기 위하여 최적화 작업을 수행하지 않은 일반 예제구조물 (Original building)과 수동 최상층 면진시스템 (Passive isolation) 및 본 연구를 통해 통합 최적화 과정을 거친 스마트 최상층 면진시스템 (Smart isolation)의 결과를 함께 나타내었다. 이때 수동 최상층 면진시스템이 설치된 예제구조물의 경우에는 통합 최적화 과정을 거친 예제구조물에 추가되는 강성과 수동 감쇠기의 총량은 동일하게 사용하였지만 각 층에 균일하게 분포를 함으로써 최적화 과정을 통한 층별 분포의 효용성을 함께 검토하여 보았다. Table 2에 나타난 각 모델별 응답 중 최상층 면진시스템 아래에 있

는 주구조물의 대표응답인 19층 최대변위 및 RMS변위를 보면 수동 및 스마트 면진시스템 모두 일반구조물에 비하여 대폭 응답을 줄일 수 있는 것을 볼 수 있다. 최상층 면진시스템에서 20층은 동조질량감쇠기와 같은 역할을 하므로 19층 이하 주구조물에 비해서 응답이 커지게 된다. 즉, 일반 구조물의 20층 최대변위는 10.21cm인데 반하여 수동 최상층 면진시스템의 20층 변위는 12.55cm로 증가하였다. 그러나 스마트 최상층 면진시스템의 20층 최대변위는 11.01cm로 수동 면진시스템에 비하여 더 작은 값을 나타낸다. 더 나아가 스마트 최상층 면진시스템의 20층 RMS변위는 2.56cm로서 수동 스마트 면진시스템의 3.45cm뿐만 아니라 면진층이 없는 일반 구조물의 3.18cm 보다 더 작은 것을 알 수 있다. 즉, 스마트 최상층 면진시스템을 적용하면 제어를 받는 주구조물의 응답뿐만 아니라 질량감쇠기의 역할을 하는 최상층의 응답 또한 일반구조물보다 작아진다는 것을 알 수 있다. 또한, 최상층 면진시스템의 안전성을 평가하는데 가장 중요한 면진층 최대변위의 경우에도 스마트 면진시스템이 수동 면진시스템보다 더 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 스마트 최상층 면진시스템을 적용하면 수동 최상층 면진시스템에 비하여 더 우수한 제어성능을 나타낼 뿐만 아니라 안전성 측면에서도 더욱 우수한 성능을 나타내는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 지진하중을 받는 구조물의 구조설계에 있어서 예제구조물과 스마트 제어시스템의 다목적 통합최적화에 대한 가능성을 검토하였다. 최적화과정을 통하여 구조물 및 제어시스템의 물량과 구조물의 지진응답을 동시에 적절하게 줄일 수 있는 파레토 최적해집합을 얻을 수 있었다. 파레토 최적해집합에 속한 다양한 설계안들은 서로 우열을 가질 수 없는 최적해로서 엔지니어가 각각의 개체가 제공하는 설계안의 구조물량 및 제어성능을 평가하여 적절한 안을 쉽게 선택할 수 있는 장점을 제공한다.

본 논문에서 선택한 최종설계안으로 구성된 구조물과 스마트 최상층 면진시스템은 일반구조물 및 수동 최상층 면진시스템에 비하여 19층 이하의 주구조물 응답뿐만 아니라 최상층의 응답을 동시에 저감시킬 수 있었다. 본 연구에서 제안한 통합최적화 작업을 통하여 스마트 제어시스템뿐만 아니라 구조물의 강성 및 감쇠에 대한 최적화도 동시에 효과적으로 수행할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2011-0015166).

References

1. Bani-Hani, K. A. and Sheban, M. A., "Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers", *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, Vol. 35, 2006, pp.1119-1144.
2. Chun, Y. S. and Hur, M. W., "Seismic isolation effects according to set up the isolation period in the medium and low-rise frame building", *Journal of the Korean Institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 14, No. 6, 2010, pp.93-99 (in Korean).
3. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T., "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II", *Evolutionary Computation, IEEE Transactions*, Vol. 6, No. 2, 2002, pp.182-197.
4. Jun, D. H., "Seismic response of R/C structures subjected to simulated ground motions compatible with design spectrum", *Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 22, No. 1, 2013, pp.74-91.
5. Kang, J. W., Kim, T. H. and Kim, H. S., "Performance evaluation of vibration control of a smart top-story isolation system", *Journal of the Korean Association for Spacial Structures*, Vol. 10, No. 3, 2010, pp.49-56 (in Korean).
6. Kim, H. S. and Kang, J. W., "Investigation of adaptability of smart top-story isolation system to structures in regions of low-to-moderate seismicity", *Journal of the Korean Association for Spacial Structures*, Vol. 12, No. 4, 2012, pp.71-80 (in Korean).
7. Koo, J. H., Setareh, M. and Murray, T. M., "In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 10, 2004, pp.163-174.
8. Ok, S. Y., Park, K. S., Song, J. H. and 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, 2008, pp.9-22 (in Korean).
9. Park, K. S. and Koh, H. M., "Preference based optimum design of an integrated structural control system using genetic algorithms", *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, No. 2, 2004, pp.85-94.
10. Park, K. S., Koh, H. M. and Hahm, D. G., "Integrated optimum design of visco-elastically damped structural systems", *Engineering Structures*, Vol. 26, 2004, pp.581-591.
11. Park, K. S., Koh, H. M. and Ok, S. Y., "Integrated optimal design of hybrid structural control system using multi-stage goal programming technique", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 7, No. 5, 2003, pp.93-102 (in Korean).
12. 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.
13. Warburton, G. B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters", *Earthquake Engng. and Struct. Dyn.*, Vol. 10, 1982, pp.381-401.

Received : 05/31/2013

Revised : 06/26/2013

Accepted : 07/01/2013

요 지

구조물의 지진응답을 저감시키기 위하여 추가적인 감쇠기나 진동제어장치가 일반적으로 사용된다. 이때, 추가적인 감쇠장치의 제어성능은 대상구조물 특성의 변화 없이 검토된다. 본 연구에서는 구조물과 스마트 제어장치의 다목적 통합최적화를 수행하였고 스마트 최상층 면진시스템이 설치된 구조물의 구조물량 저감의 가능성을 분석하였다. 이를 위하여 20층 예제구조물이 사용되었으며 MR 감쇠기와 저감쇠탄성베어링을 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하였다. 중앙진지역의 설계스펙트럼을 바탕으로 생성된 인공지진하중을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 수치해석결과, 스마트 최상층 면진시스템이 중앙진지역에 있는 구조물의 응답과 면진층 변위를 동시에 효과적으로 줄일 수 있는 것을 확인하였다. 본 연구에서 제안된 통합최적설계기법으로 구조물량 및 감쇠기 용량을 적절하게 줄이면서도 우수한 제어성능을 발휘하는 다양한 설계 대안을 제공할 수 있었다.

핵심 용어 : 통합설계, 중앙진지역, 스마트 최상층 면진시스템, 진동제어