

스마트 최상층 면진시스템의 진동제어 성능평가

Performance Evaluation of Vibration Control of a Smart Top-story Isolation System

강 주 원*
Kang, Joo-Won

김 태 호**
Kim, Tae-Ho

김 현 수***
Kim, Hyun-Su

요 약

본 연구에서는 스마트 최상층 면진시스템을 적용한 고층건물의 풍응답 제어성능을 검토해보았다. 이를 위하여 77층 초고층 건물을 예제구조물로 선택하였고 풍동실험을 통해서 얻은 풍하중을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 예제구조물의 최상층은 FPS 및 MR 감쇠기로 구성된 스마트 면진시스템을 이용하여 주구조물과 분리된다. 주구조물의 동적응답을 저감시키는 것이 스마트 최상층 면진시스템의 가장 중요한 목표이지만 면진된 최상층의 과도한 응답은 구조물을 불안정하게 만들 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 면진된 최상층과 주구조물을 효과적으로 제어하기 위하여 스카이크제어기를 제어알고리즘으로 사용하였다. 제안된 스마트 최상층 면진시스템의 제어성능을 검토하기 위하여 일반적인 수동 최상층 면진시스템의 제어성능과 비교하였다. 수치해석결과 제안된 스마트 최상층 면진시스템을 이용하면 일반적인 수동 최상층 면진시스템에 비해서 면진층의 변위를 효과적으로 줄이면서도 구조물의 응답을 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this study, the control performance of a smart top-story isolation system for tall buildings subjected to wind excitation was investigated. To this end, a 77-story tall building structure was employed and wind loads obtained from wind tunnel test were used for numerical simulations. The top-story of an example structure is separated from the main structure by a smart base isolation system composed of friction pendulum systems (FPS) and MR dampers. The primary purpose of the smart top-story isolation system is to mitigate the dynamic responses of the main structure, but the excessive movement of the isolated top story may cause the unstableness of the building structure. Therefore, the skyhook control algorithm was used to effectively reduce both responses of the isolated top story and the main structure. The control performance of the proposed smart top-story isolation system was investigated in comparison with that of the passive top-story isolation system. It has been shown from numerical simulation results that the smart top-story isolation system can effectively reduce wind-induced responses of the example building structure compared to the passive top-story isolation system with reduction of the top-story movement.

키워드 : 스마트 최상층 면진시스템, 진동제어, MR 감쇠기, 스카이크

Keywords : Smart top-story isolation system, Vibration control, MR damper, Skyhook

1. 서 론

기초면진시스템은 지진하중에 대하여 건축 및 토목구조물을 보호하는데 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다. 중저층 건물의 피해를 줄이기

위해서는 건물의 가속도를 감소시켜야 하는데 이를 위하여 개발된 제어장치 중의 하나가 면진장치로서 면진장치의 기본개념은 건물의 연직방향의 하중을 지지하면서 지반의 운동이 건물로 전달되는 것을 면진층에서 차단하고 면진층 변위를 허용한다는 것이다. 현재까지 널리 사용되고 있는 면진장치로는 마찰진자 베어링 (Friction Pendulum System; FPS) 이나 납-고무 베어링 (Lead Rubber Bearing; LRB) 등이 있으며 이와 같은 면진장치를 사용하여 구조

* 정회원, 영남대학교 건축학부 부교수

** 정회원, 대림산업(주) 기술연구소 주임연구원, 공학박사

*** 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수

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

E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr

물을 지반과 격리시키는 방법에 대한 연구는 근래에까지 많이 수행되고 있다. 이러한 중저층 건물용으로 개발된 일반적인 면진시스템을 고층 구조물의 기초면진에 사용할 경우에는 다양한 문제가 발생할 수 있다. 즉, 고층 건물은 중저층 건물에 비하여 기초부에서 축력이 크게 발생하고 주기는 중저층 건물에 비하여 상대적으로 길기 때문에 면진장치를 이용하여 주기를 증가시킨다면 면진장치에서 발생하는 수평변위가 매우 커지게 되고 큰 축력과 함께 횡하중에 의한 전도모멘트도 커져서 면진장치에서 인장력이 발생할 수 있다. 이렇게 고층건물의 기초면진에는 어려운 점이 있기 때문에 최근에는 고층 건물을 부분적으로 분리시켜서 면진기술을 적용하는 중간층면진이 많이 연구되고 있다. 그러나 이러한 중간층면진시스템을 초고층 구조물에 적용하기에는 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 건물의 중간층에 면진시스템을 도입하는 경우에는 면진층 이하의 하부구조물은 반드시 탄성거동을 해야 하기 때문에 반응수정계수를 1로 사용함으로써 발생하는 설계상의 문제가 유발될 수 있다¹⁾. 또한 과도한 면진층 변위는 구조물의 안정성에 문제를 일으킬 수도 있다. 따라서 고층 구조물의 경우에는 중간층면진 보다는 건물 최상부의 한 개 층만을 면진시킴으로서 최상층을 TMD (Tuned Mass Damper)와 같은 장치로서 활용하여 하부 구조물의 설계에 여유를 둘 수 있으며 상부 구조물의 질량이 상대적으로 크지 않아 면진장치의 설계도 충분한 여유를 가질 수 있는 방법이 제안되었다²⁾. 이러한 최상층 면진시스템의 경우에는 일반적인 TMD와는 달리 추가적인 질량을 요구하지 않고 구조체의 질량을 이용하여 고층 건물의 제어성능을 향상시킬 수 있으므로 더욱 효율적이다. 최상층 면진기술이 적용된 대표적인 예는 <그림 1>에 나타낸 Armenia에 시공된 9층 RC 골조 건물을 들 수 있다²⁾. 이 건물은 건물의 최상부에 면진장치를 설치한 경우로서 내진성능을 향상시키기 위한 목적으로 프로젝트가 수행되었다. 이 프로젝트는 구조물의 최상층을 지지하는 16개의 기둥에 고감쇠 적층고무받침을 설치하였다. <그림 1(b)>에서 보는 바와 같이 최상층 하부에 철골트러스를 설치하여 16

개의 면진장치에 동일한 동적 거동이 발생하도록 하였다.



(a) 최상층 면진건물 (b) 면진시스템

<그림 1> 최상층 면진시스템이 설치된 구조물

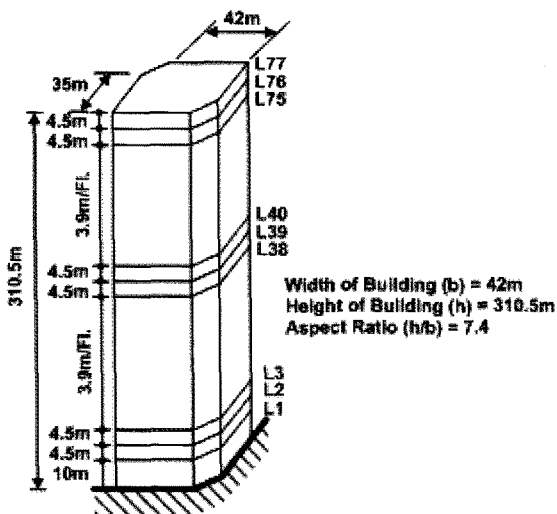
최상층 면진시스템의 첫 번째 목적은 최상층 이하의 주구조물 동적응답을 저감시키는 것이다. 이를 위해서는 최상층 면진시스템의 진동주기를 주구조물의 1차모드 진동주기와 맞추어 최상층이 TMD처럼 거동하도록 하는 것이 가장 효과적인 것이다. 즉, 면진된 최상층의 동적움직임이 클수록 주구조물의 동적응답이 줄어들게 된다. 그러나 주구조물의 진동저감만을 목적으로 최상층 면진시스템을 설계한다면 면진층에서 과도한 동적변위가 발생하게 되어 구조물의 안전성에 심각한 문제를 초래할 가능성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 면진층에 추가적인 감쇠기를 설치하여 면진층의 변위를 줄이는 방법을 생각해 볼 수 있으나 그렇게 되면 상부층과 주구조물의 격리효과가 저감되어 최상층 면진시스템에 의한 진동제어효과도 줄어들게 된다.

이러한 기존의 최상층 면진시스템이 가지는 문제점을 고려하여 본 연구에서는 최상층 면진시스템의 진동제어성능을 저감시키지 않으면서도 면진층의 변위를 저감시킬 수 있도록 스마트 감쇠기를 도입한 스마트 최상층 면진시스템을 제안하였다. 스마트 최상층 면진시스템을 구성하기 위하여 면진장치로는 FPS를 사용하였고 스마트 감쇠기로는 MR (magnetorheological) 감쇠기를 사용하였다. 제안된 스마트 최상층 면진시스템의 진동제어성능을 평가하기 위해서 77층의 초고층 건물을 예제건물로 선택하고 풍동실험을 통하여 얻은 풍하중³⁾을 가하여 수치해석을 수행하였다. MR 감쇠기를 제어하기 위

하여 TMD와 같은 질량감쇠기의 동적응답을 제어하는데 효과적인 스카이 훅(skyhook) 제어알고리즘⁴⁾을 사용하였다. 본 연구에서 제안한 스마트 최상층 면진시스템의 효율성을 검토하기 위하여 최적 수동 최상층 면진시스템의 결과와 비교하였다.

2. 초고층 예제구조물

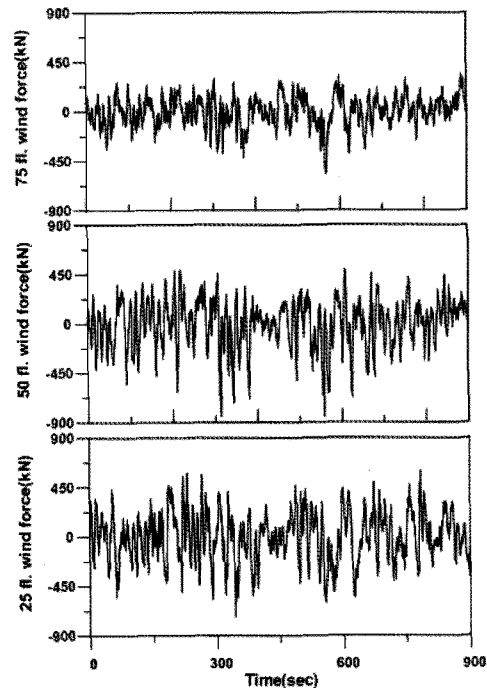
본 연구에서는 초고층 건물에 대한 스마트 최상층 면진시스템의 적용성을 검토하기 위하여 <그림 2>에 나타난 77층 건물을 예제구조물로 선택하였다. 사용한 예제구조물은 Yang 등이 제안한 풍하중을 받는 76층 벤치마크 건물에 최상층 면진시스템을 적용한 모델로서 한 층을 더 추가한 77층의 초고층 사무소 건물이다. 예제구조물은 총 높이가 310.5m이고 폭이 42m이므로 건물의 높이와 폭의 비율은 $310.5/42=7.4$ 로 세장하여 풍하중에 큰 영향을 받는다. 구조형식은 횡하중에 저항하는 철근콘크리트 코어와 수직하중에 저항하는 철근콘크리트 골조로 구성되어 있다. 건물의 총 질량은 154,300ton이고 최상층(77층)의 질량은 1,300ton으로 최상층과 하부 주구조물의 질량비는 약 0.85%이다.



<그림 2> 초고층 예제구조물

예제구조물은 수직 캔틸레버 보요소로 모형화된다. 일정한 단면을 갖는 보요소를 사용하여 건물의 각 층을 모형화하여 77개의 이동자유도와 회전자유

도를 갖는 유한요소 모델을 생성한 후 행렬응축과정을 통하여 각 층의 횡방향 변위를 나타내는 수평 자유도만 남기고 나머지 자유도는 소거하였다. 이렇게 응축된 유한요소모델은 수치해석의 효율성을 위하여 24개의 자유도를 가지는 모델로 더욱 응축되었다. 예제 구조물은 전형적인 캔틸레버의 거동을 나타내고 1, 2, 3차 모드의 고유진동수는 각각 0.157 Hz, 0.751 Hz, 1.957 Hz이다. 수치해석을 위하여 호주 시드니 대학교 토목공학과 내의 풍동실험 연구소에서 실시한 실험을 통해서 얻은 풍하중을 사용하였다. 건물의 높이에 따라서 측정된 압력계수를 풍하중으로 변환하였고 제어시스템의 성능평가를 위해서 풍 직각방향 풍하중 데이터를 사용하였다. 수치해석에서 사용한 데이터 중에서 25층, 50층 및 75층의 풍하중 시간이력 데이터를 <그림 3>에 나타내었다.



<그림 3> 풍하중 시간이력(25, 50, 75층)

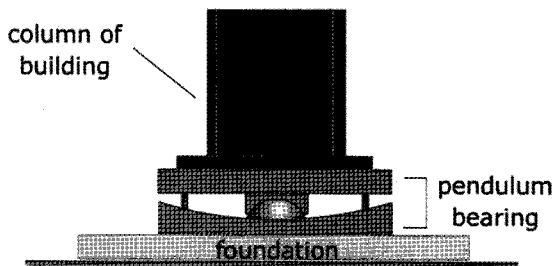
3. 스마트 최상층 면진시스템의 구성

본 연구에서는 예제구조물의 최상층을 그 이하의 주구조물과 분리시키기 위하여 FPS를 면진장치로 사용하였고 추가적으로 MR 감쇠기를 사용하여 감

쇠력을 적절히 조절할 수 있는 스마트 최상층 면진 시스템을 구성하였다. 각 구성요소에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

3.1 마찰진자 베어링시스템

마찰진자 베어링시스템(FPS)은 구조물을 지반과 격리시키는 기계장치이다. 마찰진자 시스템의 간단한 구성도를 <그림 4>에 나타내었다. FPS에서는 베어링의 곡면을 따라서 상승한 구조물이 중력에 의해서 원래의 위치로 되돌아오려는 복원력이 발생하고 마찰면에서의 마찰력에 의해서 에너지가 소산된다. 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 사용하였다.



<그림 4> 일반 마찰진자 베어링의 구성도

FPS 베어링에서의 횡저항력은 Constantinou 등의 연구⁵⁾에서 제안한 식 (1)이 가장 널리 사용되고 있다. Constantinou 등은 횡하중이 가해질 때 발생하는 베어링의 변위가 크지 않다는 가정 하에 베어링의 횡저항력과 횡변위와의 관계를 식 (1)과 같이 선형으로 가정하였다.

$$F = \frac{W}{R}u + \mu W \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (1)$$

여기서, W 는 베어링에 의해서 지지되는 구조물의 무게이고, R 은 베어링 곡면의 곡률반경이고 μ 는 마찰계수, u 는 횡방향 변위, \dot{u} 은 횡방향 속도이고 sgn 은 속도의 크기에 관계없이 부호만 얻어오는 합

수이다. 식 (1)을 보면 베어링의 횡저항력은 지지하는 구조물의 무게에 비례하고 이 힘은 면진된 구조물의 질량중심에서 가해진다고 생각한다. 식 (1)에서 W/R 은 베어링의 강성을 나타낸다. 따라서 면진 장치의 진동주기는 다음과 같이 나타낼 수 있으며 면진된 구조물의 질량에는 무관하다.

$$T = 2\pi \left(\frac{R}{g} \right)^{1/2} \quad (2)$$

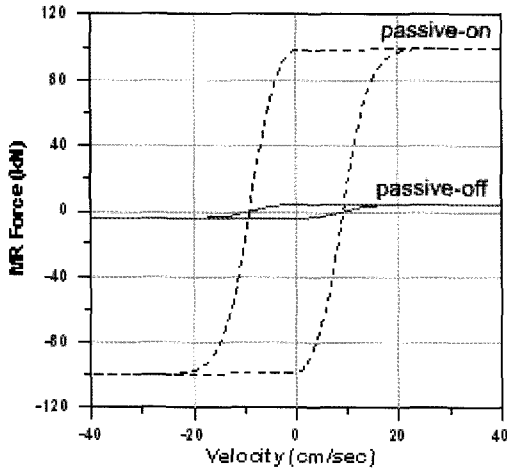
FPS로 지지된 구조물의 진동주기는 식 (2)에서 보는 바와 같이 구조물의 질량과는 관계없고 베어링의 곡률반경에 의해서만 결정되기 때문에 설계자의 목적에 따라서 면진된 구조물의 진동주기를 비교적 쉽게 조정할 수 있다. 또한 베어링의 횡저항력은 베어링이 지지하는 구조물의 무게에 비례하므로 면진장치의 강성중심은 면진된 구조물의 질량중심과 일치하게 된다. 이러한 특성으로 인하여 FPS를 이용하면 면진된 구조물에 질량이 불규칙적으로 배치되었거나 또는 비대칭 구조물일 지라도 구조물의 비틀림 거동을 최소화시킬 수 있다.

본 연구에서는 예제구조물의 최상층을 지지하는 FPS의 주기를 최상층이하 주구조물의 1차모드 진동주기와 동일하게 조율하였다. 즉, 76층 건물의 1차모드 고유진동주기가 6.25초 이므로 식(2)에 의하여 FPS의 곡률반경은 9.7 m로 하였다.

3.2 MR 감쇠기 및 수동 감쇠기

본 연구에서는 최상층 면진시스템에 점성감쇠기를 대신하여 MR 감쇠기를 추가함으로써 스마트 최상층 면진시스템을 구성한다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델⁶⁾을 사용하였다. <그림 5>에서 볼 수 있듯이 약 100 kN의 최대 감쇠력을 가지는 MR 감쇠기를 면진층에 4개를 설치하여 사용하였다. 이 최대 감쇠력은 예제구조물의 최적제어를 위한 값을 찾기 위해 반복해석을 통하여 결정하였다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용된 MR 감쇠기는 0 volt의 전압이 전달될

때 최소 감쇠력을 나타내고 5 volt의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다.



<그림 5> 100kN MR 감쇠기의 힘-변위 관계

본 연구에서는 제안된 스마트 최상층 면진시스템의 풍응답 제어성능을 검토하기 위하여 일반적으로 사용되는 수동 면진시스템의 진동제어성능과 비교하고자 한다. 이를 위하여 MR 감쇠기 대신에 점성 감쇠기를 사용하는 수동 면진시스템을 구성하였다. 수동 면진시스템에서 사용한 FPS의 특성은 스마트 면진시스템에서 사용한 것과 같게 하였다. 즉, 최상층 이하 주구조물의 1차모드 진동수와 면진된 최상층의 고유진동수를 같도록 조율하였다. 최상층 수동 면진시스템에 적용할 최적의 감쇠비에 대한 연구는 지금까지 거의 수행된 바가 없기 때문에 역학적으로 최상층 면진시스템과 동일한 원리로 작동하는 수동 TMD의 최적설계변수에 대한 연구결과를 본 연구에 적용하였다.

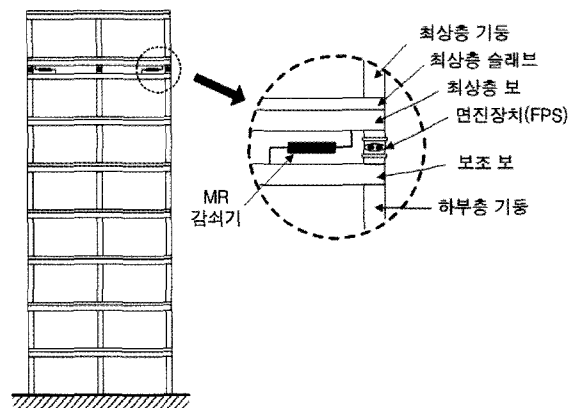
수동 TMD의 설계에 있어서 주어진 질량비에 대한 최적 감쇠비는 여러 가지 제안식이 있다. Den Hartog⁷⁾는 처음으로 TMD 파라미터의 적절한 선택을 위한 기초원리를 개발하였고 Warburton⁸⁾는 주구조물의 감쇠비와 질량비의 특정한 수치에 대한 TMD의 감쇠비와 진동수비 그리고 최대 진동증폭 계수를 각각 도표화하여 발표하였다. 본 연구에서는 Warburton의 논문에서 제시한 랜덤하중이 구조물에 직접 가력될 경우에 대한 TMD의 최적 감쇠비를 사용하였으며 이를 식(3)에 나타내었다. 비록 식 (3)

에 나타난 식이 단자유도 구조물을 대상으로 하고 있지만 본 연구의 예제구조물이 정형적인 캔틸레버 구조물로서 1차모드가 전체 구조물의 동적거동에 미치는 영향이 탁월하므로 본 연구에서는 식(3)을 사용하여 수동 면진시스템의 최적 감쇠비를 계산하였다. 식에서 μ 는 최상층과 주구조물과의 질량비로서 0.85%이고 이 식에 의해서 계산된 최적감쇠비는 4.59%이다.

$$\sqrt{\frac{\mu(1+3\mu/4)}{4(1+\mu)(1+\mu/2)}} \quad (3)$$

3.3 스카이훅 제어알고리즘

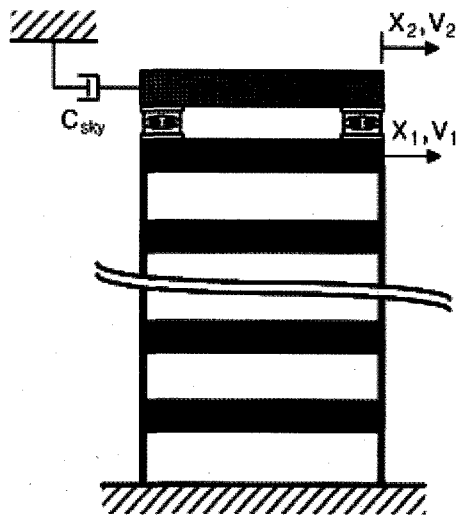
본 연구에서는 전술한 바와 같이 FPS와 MR 감쇠기를 이용하여 스마트 최상층 면진시스템을 구성한다. 이렇게 구성한 스마트 최상층 면진시스템의 개념도를 <그림 6>에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 최상층 기둥 아래에 FPS를 설치하여 하부층과 최상층을 분리하고 면진층에 MR 감쇠기를 두어 면진층의 변위 및 최상층의 동적거동을 조절할 수 있게 하였다.



<그림 6> 스마트 최상층 면진시스템의 구성

본 연구에서는 면진된 최상층의 동적거동을 제어하기 위해서 스카이훅(skyhook) 제어를 사용한다. 스카이훅 제어알고리즘의 개념도를 <그림 7>에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 스카이훅 제어 알고리즘은 면진된 최상층과 연결된 감쇠기를 하늘에 고정시킨 것과 같은 효과를 내도록 준능동 감쇠

기의 감쇠력을 조절함으로써 주구조물의 응답보다는 주구조물과 분리된 최상층 질량의 움직임을 최소화하는데 효과적이다. 일반적으로 이 제어알고리즘은 지반과 격리되어 움직이는 구조체의 응답을 최소화 시키는데 효과적이므로 자동차의 현가시스템이나 스마트 기초면진장치를 제어하는데 효과적으로 이용되고 있다.



〈그림 7〉 스카이하크 제어기의 개념도

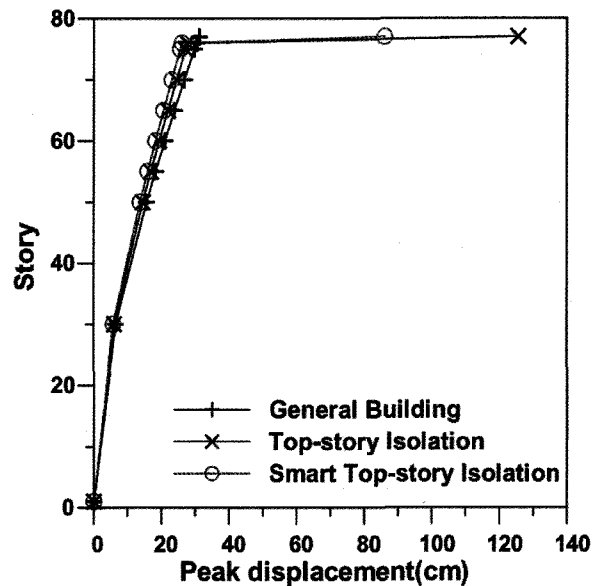
스카이하크 제어알고리즘은 평형위치에 대한 최상층(77층)의 변위(x_2) 및 주구조물 최상층(76층)의 변위(x_1)와 두 구조체의 상대속도($v_1 - v_2$)의 관계를 이용하여 식(4), (5)에 나타낸 바와 같이 간단한 수식으로 정의된다. 본 연구에서는 MR감쇠기를 사용하여 스마트 면진시스템을 구성하므로 제어알고리즘에 의해서 결정된 제어명령을 바탕으로 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 조절한다. 따라서 아래의 식에서 V_{max} 는 5 volt를 V_{min} 은 0 volt를 의미한다. 두 식을 살펴보면 주구조물과 면진된 최상층의 변위 및 속도의 단순한 계산으로 제어명령을 결정하므로 계산량이 매우 작아서 실시간 제어에 매우 유리하다.

$$V = V_{max} \quad x_2(v_1 - v_2) \leq 0 \quad (4)$$

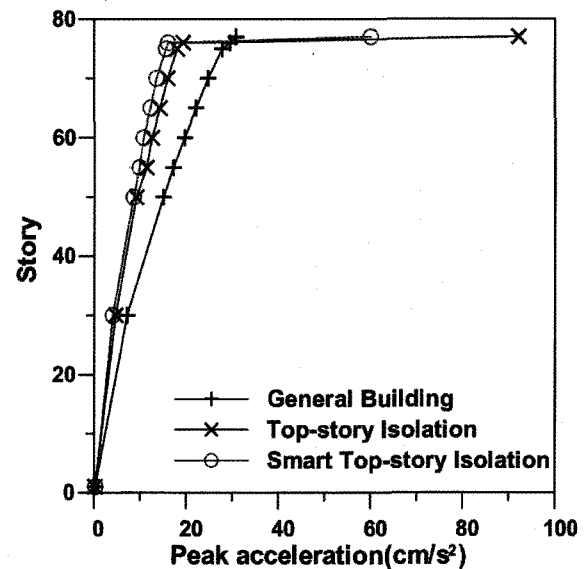
$$V = V_{min} \quad x_2(v_1 - v_2) > 0 \quad (5)$$

4. 진동제어성능 평가

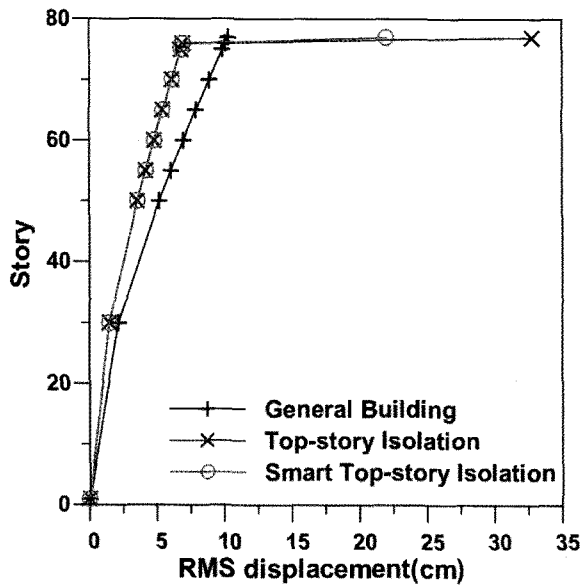
본 연구에서 제안한 스마트 최상층 면진시스템의 풍응답 제어성능을 검토하기 위하여 최상층 면진시스템을 도입하지 않은 일반적인 건물과 수동 최상층 면진시스템을 적용한 건물의 응답을 비교하여 보았다. 벤치마크 문제에서 제공하는 풍동실험을 통해서 얻은 풍하중을 적용하여 수치해석을 수행한 후 얻은 결과를 비교하여 주요 층별 RMS 및 최대치 응답을 <그림 8-11>에 나타내었다.



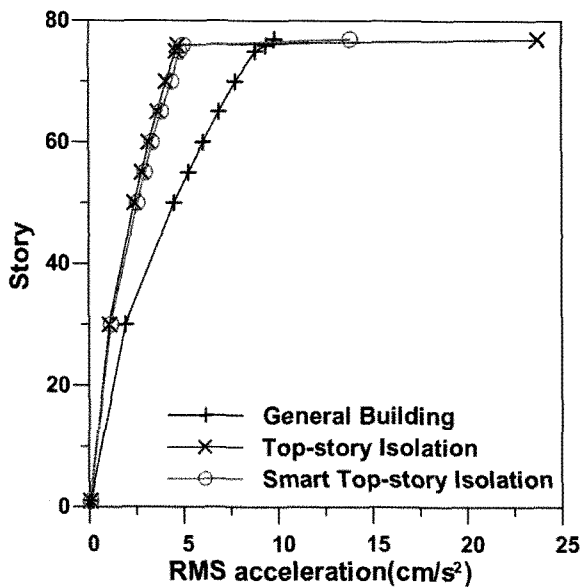
〈그림 8〉 최대 변위응답의 비교



〈그림 9〉 최대 가속도응답의 비교



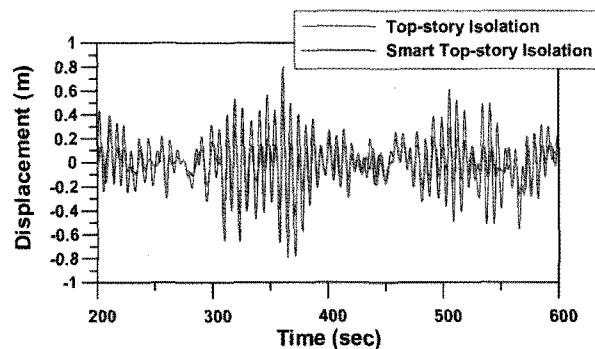
<그림 10> RMS 변위응답의 비교



<그림 11> RMS 가속도응답의 비교

그림에서 보는 바와 같이 예제구조물에 최상층 면진시스템을 도입하면 변위응답 및 가속도응답 모두 매우 효과적으로 줄일 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 특히 풍하중이 가해지는 고층건물의 사용성에 가장 큰 영향을 미치는 가속도응답 저감에 매우 효과적이라는 것을 알 수 있는데 수동 최상층 면진시스템을 도입함으로써 76층의 최대 가속도는 35%, RMS 가속도는 50%를 줄일 수 있었다. 그러나 이렇게 효과적인 풍응답 저감효과를 얻기 위해서는 면진된 최상층이 주구조물의 운동방향과는 반대방향

으로 매우 큰 동적 움직임을 나타냄으로써 제어력을 주구조물에 제공해야 한다. 따라서 모든 그래프에서 주구조물과 분리된 최상층의 동적응답이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그래프를 통해서도 정성적이고 상대적인 비교가 가능하지만 정확한 수치에 의한 비교는 어렵다. 따라서 구조물의 안전성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있는 최대치 변위응답에 대해서 수치해석을 통해서 얻은 결과를 바탕으로 정량적인 분석을 하고자 한다. 수치해석 결과를 살펴보면 수동 최상층 면진시스템이 설치된 구조물의 77층 최대치 변위응답이 125.61cm로서 일반구조물의 77층 최대치 변위응답인 31.23cm에 비하여 대폭 증가하였다. 수동 최상층 면진시스템을 적용한 구조물의 77층과 76층의 최대 층간변위는 97.89cm로서 면진장치에 과도한 변위가 발생하여 구조물이 불안정해질 가능성이 있다. 스마트 최상층 면진시스템의 경우에는 두 층사이의 최대 층간변위를 수동 최상층 면진시스템에 비하여 약 40% 정도 대폭 줄이면서도 구조물의 응답은 더 효과적으로 제어할 수 있었다. 특히 변위응답보다 초고층 구조물의 사용성과 직결되는 가속도응답을 보다 효과적으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 전술한 바와 같이 최상층 면진시스템의 면진층에서의 상대변위는 시스템의 안전성과 매우 밀접한 관계가 있다. 따라서 수동 최상층 면진시스템과 본 연구에서 제안한 스마트 최상층 면진시스템의 면진층 변위 시간이력을 <그림 12>에 나타내었다. 풍하중을 사용한 전체 수치해석시간은 900초이지만 전체 시간이력 그래프를 나타내면 결과의 분석이 어려우므로 가장 큰 응답을 나타내는 200초-600초 구간의 응답만을 그림에 나타내었다.



<그림 12> 최상층 면진시스템의 면진층 변위 시간이력

그림에서 볼 수 있듯이 최상층 면진시스템에 MR 감쇠기를 도입하고 적절히 제어함으로써 면진층에서 발생하는 변위를 수동 최상층 면진시스템에 비하여 전체적으로 저감시킬 수 있었다.

본 연구에서는 실제 규모의 77층 초고층 건물을 예제구조물로 선택하여 수치해석을 수행하였고 100kN의 용량을 가지는 4개의 MR 감쇠기를 사용하여 스마트 최상층 면진시스템을 구성한 후 예제구조물을 성공적으로 제어하였다. 그리 크지 않은 용량의 MR 감쇠기를 사용해서 실제 규모의 초고층 건물을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였고 이를 통해서 현재의 기술로도 본 연구에서 제안한 스마트 최상층 면진시스템이 충분히 구현 가능하리라고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 풍하중을 받는 초고층 건물의 동적응답을 저감시키기 위한 방법으로서 스마트 최상층 면진기법을 제안하였다. 본 연구에서 스마트 최상층 면진시스템은 FPS와 MR 감쇠기로 구성하였다. 제안된 기법의 효용성을 검증하기 위하여 77층의 초고층 건물을 예제건물로 선택하고 풍동실험을 통하여 얻은 풍하중을 가하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과 최상층 면진시스템을 적용하면 초고층 건물의 풍응답을 매우 효과적으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 그러나 일반적인 수동 최상층 면진시스템을 적용하면 면진된 최상층의 동적거동이 과도하여 구조물의 안전성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 이러한 문제점은 본 연구에서 제안한 스마트 최상층 면진시스템을 도입함으로써 해결이 가능하였다. 즉, 스마트 최상층 면진시스템은 면진층의 변위를 효과적으로 줄이면서도 주구조물의 응답저감에 매우 효과적인 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 전통적인 준능동 제어알고리즘인 스카이 훅 제어기를 사용하였으나 최상층 면진시스템의 특성을 고려한 개선된 제어알고리즘을 개발하면 더욱 우수한 제어성능을 발휘할 것으로 기대된다. 그리고 본 연구에서는 2차원 해석을 통한 스마트 최상층 면진시스템의 진동제어 성능을 검토하였지만 추후 양방향 풍하중을 고려한 3차원 해석을 통하여 성능검토를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 건설핵심 B03)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. ASCE (2006), Minimum Design Loads for Building and Other Structures.
2. M.G. Melkumyan (2002), Seismic isolation of civil buildings in Armenia, Prog. Struct. Engng Mater. Vol.4, No.4, pp.344-352.
3. B. Samali, K.C.S. Kwok, G.S. Wood, J.N. Yang (2004), Wind tunnel tests for wind-excited benchmark building, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp447-450.
4. D. Karnopp, M.J. Crosby and R.A. Harwood (1974), Vibration control using semi-active force generators, J. of Engineering for Industry, ASME, Vol. 96, No.2, pp.619-626.
5. M.C. Constantinou and T.T. Soong (1994), Passive and active structural vibration control in civil engineering, New York.
6. 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.
7. J.P. Den Hartog (1956), Mechanical Vibrations, 4th Edition, McGraw-Hill, N.Y.
8. G.B. Warburton (1982), Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., Vol. 10, pp. 381-401.