Journal of the Korean Association for Spatial Structures
Vol. 11, No. 4 (통권 46호), pp.79~88, December, 2011

경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물에 대한 스마트 TMD의 제진성능평가

Vibration Control Performance Evaluation of Smart TMD for a Tilted Diagrid Tall Building

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

요 약

근래에 들어와서 3T (Twisted, Tapered, Tilted)로 대별되는 비정형 초고층 건축물이 다수 계획되고 있다. 이러한 비정형 초고층 건물을 위해서 구조적인 효율성 및 조형성 때문에 다이어그리드 구조시스템이 현재까지 가장 널리 사용되고 있는 구조시스템 중의 하나이다. 건축적인 조형미 등의 이유로 경사진 비정형 초고층 건물에 대한 계획안이 다수 발표되고 있으며 다수의 구조물들이 다이어그리드 구조시스템을 활용하고 있다. 경사진 비정형 초고층 건물은 횡하중뿐만 아니라 자중에 의해서도 횡방향 변위가 발생한다. 따라서 정형적인 초고층 건물보다 횡방향 응답을 저감시키는 것이 더 중요한 문제로 대두된다. 본 연구에서는 경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물의 지진응답을 저감시키기 위하여 스마트 TMD를 적용하였고 그 제어성능을 평가하였다. 스마트 TMD를 구성하기 위하여 MR 감쇠기를 사용하였으며 스마트 TMD는 그라운드훅 제어알고리즘을 사용하여 제어하였다. 100층의 예제구조물에 대하여 제어를 하지 않은 경우와, 일반적인 TMD를 사용한 경우, 그리고 스마트 TMD를 사용하여 제어한 경우를 비교·검토하였다. 수치해석결과 스마트 TMD가 변위응답 제어에는 우수한 성능을 나타냈지만 가속도응답제어에는 효과적이지 못했다.

Abstract

Recently, complex-shaped tall buildings represented by 3T(Twisted, Tapered, Tilted) are planed largely. A diagrid structural system is one of the most widely used structural system for complex-shaped tall buildings because of its structural efficiency and formativeness. Plans for tilted tall buildings are largely presented because of beauty of a sculpture and many of buildings use diagrid structural systems. Lateral displacements of tilted tall buildings are induced by not only lateral loads but also self weight. Therefore, reduction of lateral responses of tilted tall buildings is as important as typical tall buildings. In this study, a smart TMD is introduced to reduce seismic responses of tilted diagrid tall buildings and its control performance is evaluated. MR damper is employed for the smart TMD and ground-hook controller is used as a control algorithm for the smart TMD. 100-story tall building is used as an example structure. Control performances of uncontrolled case, controlled case with TMD and controlled case with smart TMD are compared and investigated. Numerical simulation has shown that smart TMD presented good control performance for displacement response but acceleration response was not controlled well.

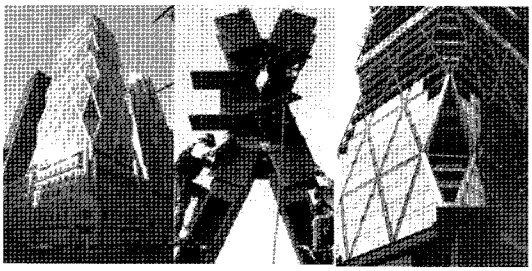
키워드 : 스마트 TMD, 다이어그리드, 진동제어, MR 감쇠기, 비정형 초고층 건물
Keywords : Smart TMD, Diagrid, Vibration control, MR damper, Complex-shaped tall building

1. 서 론

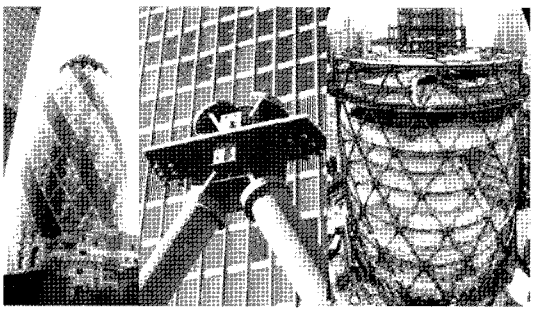
근래에 들어와서 3T (Twisted, Tapered, Tilted)로 대별되는 비정형 초고층 건축물이 많이 계획되고 있고 이를 위해 기존 초고층 건축물에 적용되던 구조시스템을 새로운 형태에 적합하도록 변형하여 적용하고 있다. 비정형 초고층 건물을 위해서 다양한 구조시스템들이 제안되고 있는데 그 중에서 다이어

* 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수
** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수
Tel : 053-810-2429 Fax : 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr

그리드 구조시스템이 구조적인 효율성 및 조형성 등의 장점 때문에 〈그림 1〉에 나타낸 바와 같이 현재까지 국내외적으로 가장 널리 사용되고 있다. 다이어그리드 구조시스템은 대각가새를 반복적으로 사용한 형태의 구조로서 경사진 수직부재(Diagrid)와 보가 삼각형 형태의 배치를 이루게 되어 수직하중을 적절하게 배분하여 기초와 지반에 안전하게 전달하고 외력에 저항하며 건물의 가장 외곽에 위치하여 바람이나 지진과 같은 수평하중에도 효과적으로 대응할 수 있는 구조시스템이다.



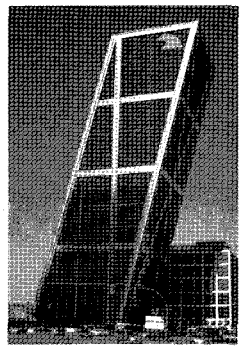
(a) Hearst Tower, New York



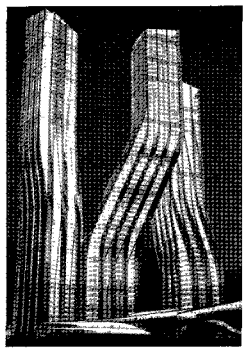
(b) 30 St. Mary Axe, London

〈그림 1〉 Diagrid 구조물의 예

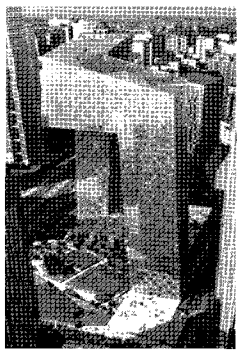
이러한 다이어그리드 구조시스템은 직사각형의 평면과 입면을 가지는 일반적인 빌딩구조물을 위한 구조시스템으로서도 많이 활용되고 있지만 디자인적인 측면에서 보다 혁신적인 결과를 얻기 위하여 비정형 구조물의 큰 특징인 3T (Twisted, Tilted, Tapered)의 효과를 조합한 형태로도 많이 활용된다. 그 중에서 구조적으로는 불리한 점이 많지만 조형적인 면에서의 극적인 효과를 고려하여 〈그림 2〉와 같이 경사진 (Tilted) 형태의 비정형 구조물이 다수 제안되고 있다. 일반적으로 초고층 건물은 지진하중이나 풍하중과 같은 횡하중에 의하여 횡변위가 크게 발생하며 이러한 횡하중에 의하여 발생하는 횡변위를 기준치보다 작게 발생하도록 하는 강성설계를 수행하면 강도설계도 어렵지 않게 만족시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같이 초고층 건물을 설계할 때에는 횡변위를 적절하게 제어하는 것이 중요한데 〈그림 2〉 나타낸 경사진 비정형 초고층 건물의 경우에는 횡하중 뿐만 아니라 구조물의 자중에 의해서도 횡변위가 발생하게 되므로 정형의 초고층 건물보다 횡변위 제어가 더욱 중요하게 된다.



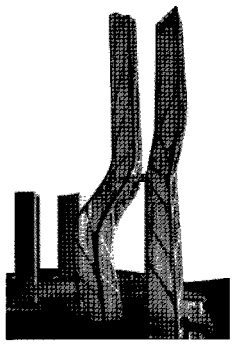
(a) 키오타워



(b) 댄싱타워



(c) CCTV 사옥



(d) The Leg 타워

〈그림 2〉 경사진 비정형 구조물의 예

초고층 건물의 횡방향 변위를 제어하기 위한 여러 가지 제어장치 중에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)는 기능의 단순성, 경제성, 제어성능의 우수성 등으로 인하여 많은 건물에 다양한 형태

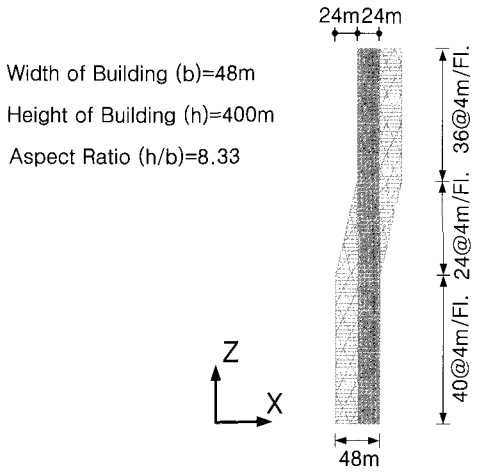
로 적용되고 있다[1-3]. 근래에는 능동제어장치의 적응성과 수동제어장치의 안정성의 장점을 가진 MR 감쇠기와 같은 스마트 제어장치를 활용한 하이브리드 스마트 제어기술이 다양한 형태로 제안되었다[4-6]. 그 중에서 준능동 스마트 동조질량감쇠기 (Smart TMD; STMD)의 가능성에 대한 연구는 Hrovat 등[7]에 의해서 최초로 연구된 이래 여러 연구자들에 의하여 다양한 방향으로 수행되었다[8]. 그동안 STMD는 다양한 구조시스템에 적용되어 제어성능을 검토하였지만 아직까지 국내외적으로 경사진 비정형 초고층건물에 적용하여 성능을 분석한 사례는 찾아볼 수 없었다.

본 연구에서는 다이어그리드 구조시스템을 적용한 경사진 초고층 건물의 구조적 거동 특성을 살펴보고 이 건물에 지진하중이 가해졌을 때 발생하는 동적응답을 저감하기 위하여 STMD를 적용한 후 그 제어성능을 검토하였다. 이를 위하여 100층의 경사진 다이어그리드 비정형 초고층건물을 예제구조물로 선택하고 지진하중을 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 본 연구에서는 MR 감쇠기를 사용하여 STMD를 구성하였고 STMD를 제어하기 위하여 그라운드훅 제어알고리즘[9,10]을 사용하였다. 수치해석결과 STMD를 적용한 예제구조물의 지진응답을 일반적인 TMD를 적용한 경우와 아무런 제어장치를 사용하지 않은 경우와 함께 비교하여 STMD의 제진성능을 검토하였다. 본 연구에서 기존에 널리 사용되고 있는 MR 감쇠기를 이용한 STMD 및 그라운드 훅 제어알고리즘을 적용하여 경사진 비정형 구조물에 대한 지진응답제어의 가능성을 검토해 본 결과 변위응답의 제어에는 효과적이지만 가속도응답의 제어에는 제어성능이 저하되는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해서 드러난 이러한 문제점은 변위기반의 제어알고리즘에 의한 것으로 판단되며 추후 연구를 통하여 해결할 계획이다.

2. 경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물의 구조적 거동 분석

2.1 예제 비정형 초고층 구조물

본 연구에서는 경사진 비정형 초고층 구조물의 구조적 거동을 분석하고 동적응답의 제어를 위한 STMD의 적용성을 검토하기 위하여 초고층 예제구조물을 선택하여 시간이력해석을 수행하였다. 이를 위하여 〈그림 3〉에 나타낸 100층의 경사진 다이어그리드 비정형 초고층건물을 예제구조물로 사용하였다. 예제구조물의 다이어그리드 및 테두리보를 위해서는 SS400의 강재를 사용하였고 콘크리트 코어는 30MPa의 강도를 가지도록 모형화 하였다. 본 연구에서는 구조물의 전체적인 거동을 살펴보는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 각 부재의 단면을 선정하기 위한 설계는 수행하지 않았고 다이어그리드는 $\phi-1000\times80$, 테두리보는 $-700\times700\times20$의 동일한 단면을 전 층에 걸쳐서 가진다.

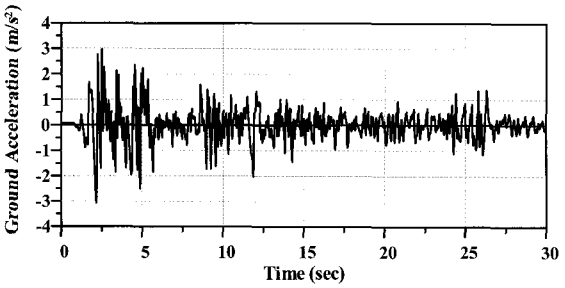


〈그림 3〉 100층 경사진 다이어그리드 비정형 예제구조물

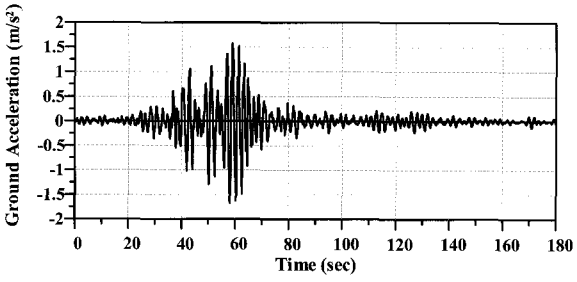
예제구조물은 한 층의 높이가 4m이므로 건물의 전체 높이는 400m이고 폭은 48m이므로 세장비가 8.33으로서 세장한 초고층 건물의 특성을 나타낼 것으로 판단된다. 예제구조물을 경사진 형태로 만들기

위하여 그림에 나타낸 바와 같이 40층에서 64층까지의 구간에서 외곽의 다이어그리드 구조시스템을 1층당 1m씩 X방향으로 이동시켜서 24층에 걸쳐서 총 24m를 이동시켰다. 그리고 65층에서 100층까지는 다시 정형구조물의 형태로 구성하였다. 이때 내부의 코어는 그림에서 보는 바와 같이 경사진 구간에서도 위치의 변화가 없다. 구조물의 전체 질량은 23,200ton이고 1차에서 3차 모드까지의 고유진동주기는 각각 11.80초, 2.38초, 1.15초이다.

본 연구에서는 지진하중을 받는 경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물에 대한 STMD의 제진성능을 평가하기 위하여 〈그림 4〉에 나타낸 바와 같이 El Centro(1940, NS)지진과 Mexico(1985, NS)지진의 지반가속도를 동적하중으로 사용하였고 수치해석은 Matlab과 SIMULINK를 이용해서 수행하였다.



(a) El Centro 지진 (1940, NS)



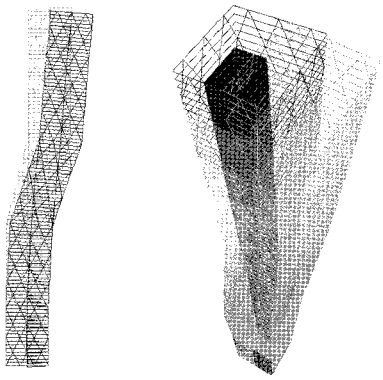
(b) Mexico 지진 (1985, NS)

〈그림 4〉 예제 지진하중의 지반가속도

2.2 예제 구조물의 구조적 거동

본 논문에서 선택한 예제구조물은 다이어그리드 구조시스템에 비정형 구조물의 3대 특징의 하나인 Tilted 효과를 적용한 구조물로서 본 절에서는 예제 구조물의 기본적인 구조적 거동의 특성을 살펴보았다. 이를 위하여 자중을 고려하여 해석하였고 추가적으로 기울어진 방향 및 기울어진 방향에 수직인 방향으로 횡하중을 가한 후 변형형상을 검토하여 보았다.

〈그림 5(a)〉에 나타낸 100층 기울어진 다이어그리드 예제구조물의 자중에 의한 형상을 보면 기울어진 형상 때문에 수직변위 뿐만 아니라 횡방향 변위도 상당량 발생하는 것을 알 수 있다. 〈그림 5(b)〉에는 구조물이 기울어진 방향에 대해 수직으로 가해지는 횡하중에 의한 변형형상을 나타내었다. 그림을 보면 횡하중에 의하여 횡변위 뿐만 아니라 비틀림 변형이 발생하는 것을 알 수 있다. 구조물이 기울어진 방향으로 가해지는 횡하중에 대해서는 〈그림 5(a)〉와 비슷하게 횡변위 뿐만 아니라 수직방향 변위도 발생한다. 따라서 경사진 다이어그리드 구조시스템이 적용된 초고층 구조물의 동적 횡방향 응답의 제어를 수행할 경우에는 횡하중에 의해 일반적으로 발생하는 수평응답 뿐만 아니라 수직방향 응답에 대한 제어도 신중히 고려해야 하는 중요한 요소임을 알 수 있다. 또한 경사진 방향과 수직한 방향으로 작용하는 횡하중에 대해서는 횡방향 응답뿐만 아니라 비틀림도 발생하므로 이에 대한 고려도 이루어 져야한다. 본 논문에서는 구조물의 경사진 방향에 대한 응답을 우선 다루고 있고 경사진 방향에 수직한 응답에 대해서는 추후 계속해서 연구를 진행할 계획이다.



(a) 자중고려 (b) 경사진 방향에 수직한 횡하중

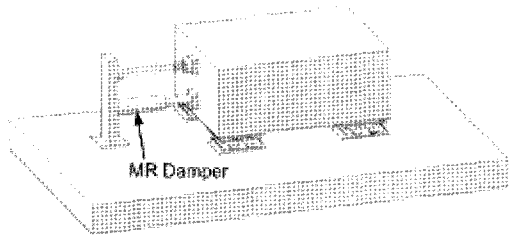
〈그림 5〉 경사진 다이어그리드 예제구조물의 변형

3. 스마트 TMD를 이용한 진동제어

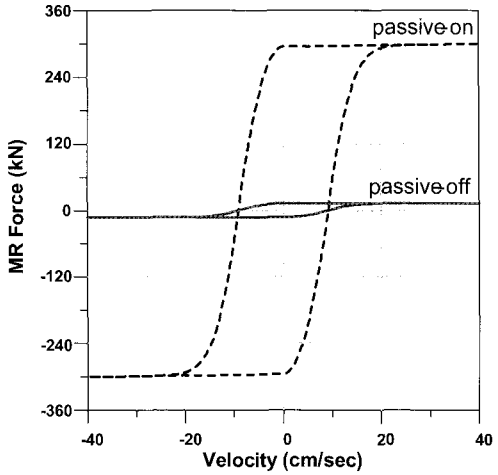
3.1 스마트 TMD의 구성

본 연구에서는 〈그림 6〉에 나타낸 바와 같이 일반적인 수동 TMD의 구성요소인 점성감쇠기를 대신하여 MR 감쇠기를 사용하여 STMD를 구성하였다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 일반적으로 사용되는 Bouc-Wen 모델을 사용하였고 이 모델을 사용하여 표현되는 MR 감쇠기의 힘-속도 관계를 〈그림 7〉에 나타내었다.

〈그림 7〉에서 볼 수 있듯이 MR 감쇠기의 최대 감쇠력은 약 300kN이고 passive-off 상태에서의 감쇠력은 약 10kN이다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 본 연구에서 사용된 MR 감쇠기는 0V의 전압이 전달될 때 최소 감쇠력을 나타내고 5V의 전압에서 최대 감쇠력을 나타낸다. 세장비가 큰 초고층 건물은 주로 1차모드에 의해서 전체 구조물의 거동이 지배적으로 결정되므로 1차모드 형상에서 가장 움직임이 큰 최상층에 질량감쇠기를 설치하는 것이 일반적이다. 따라서 본 연구에서도 경사진 비정형 다이어그리드 초고층 예제구조물의 최상층에 STMD를 설치하였고 STMD의 고유진동주기는 예제구조물의 1차모드 진동주기와 동일하게 11.80초로 조율하였다. 사용된 STMD의 질량은 500ton으로 놓고 수치해석을 수행하였다.



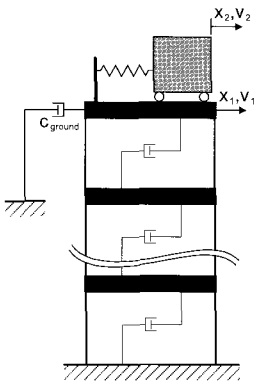
〈그림 6〉 MR 감쇠기를 사용한 STMD의 구성



〈그림 7〉 300kN MR 감쇠기의 힘-속도 관계

3.2 그라운드훅 제어알고리즘

본 연구에서는 STMD를 구성하는 MR 감쇠기의 감쇠력을 제어하기 위해서 전통적인 준능동 제어알고리즘인 그라운드훅(groundhook) 제어알고리즘을 사용하였다. 이 알고리즘을 설명하기 위하여 빌딩 구조물에 설치된 TMD의 이상적인 그라운드훅 시스템을 〈그림 8〉에 나타내었다.



〈그림 8〉 이상적인 그라운드훅 시스템

그림을 보면 빌딩 구조물의 응답을 감소시키기 위하여 감쇠기를 구조물과 땅(그라운드) 사이에 연결한 것을 볼 수 있다. 이러한 가상의 시스템이 존재한다면 그라운드훅 댐퍼는 다양한 외부의 동적하중에 대하여 빌딩 구조물의 동적응답을 저감시키는 역할

을 하게 된다. 그러나 이러한 시스템은 실제 구현이 불가능하기 때문에 본 연구에서는 〈그림 6〉에 나타낸 STMD를 이용하여 가상의 그라운드훅 시스템을 모사한다. 즉, 그라운드훅 제어알고리즘의 목적은 〈그림 8〉에 나타낸 그라운드훅 감쇠기가 발휘하는 감쇠력을 〈그림 6〉에 나타낸 STMD를 구성하는 MR 감쇠기를 이용하여 제공하는 것이다. 그라운드훅 제어알고리즘은 평형위치에 대한 빌딩 구조물의 최상층 변위(X_1)와 최상층과 STMD의 상대속도(V_1-V_2)의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 상대속도가 음수이면 STMD와 구조물이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 또한 최상층의 중심이 평형상태의 오른쪽에 있으면 변위(X_1)가 양수이고, 왼쪽에 있으면 음수이다. 이러한 정의를 이용해서 그라운드훅 알고리즘은 식 (1)과 (2)로 간단하게 정리될 수 있다. 여기서 V는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 의마하며 Vmax는 최대 전압인 5V, V_{min}은 최소 전압인 0V를 의미한다. 식의 구성을 보면 알 수 있듯이 그라운드훅 제어알고리즘은 비교적 간단한 연산으로 STMD를 제어할 수 있으므로 실시간 제어에 매우 유리하다. 본 연구에서는 이 그라운드훅 제어알고리즘을 이용하여 STMD의 구성성분인 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절한다.

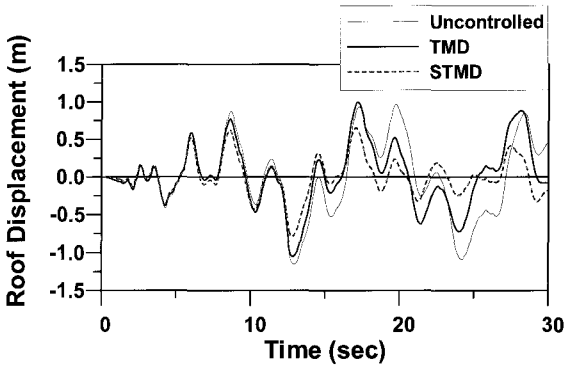
$$x_1(v_1-v_2)\geq 0 \Rightarrow V=V_{max} \quad (1)$$

$$x_1(v_1-v_2)<0 \Rightarrow V=V_{min} \quad (2)$$

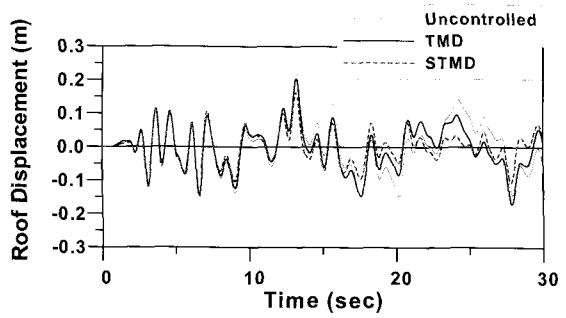
4. 수치해석을 통한 스마트 TMD의 제진성능 평가

본 절에서는 앞에서 설명한 100층의 경사진 비정형 다이어그리드 예제구조물에 X방향으로 지진하중을 가한 후 발생하는 지진응답에 대하여 STMD의 진동제어성능을 검토해보고자 한다. STMD의 제진성능을 비교하기 위하여 예제 구조물에 추가적인 진동제어장치를 설치하지 않은 경우와 일반적인 TMD를 사용하여 제어한 경우의 응답을 함께 검토하였다. 비교 대상 TMD의 경우에는 STMD와 동일하게 500ton의 질량을 사용하였고 TMD의 주기를 예제구조물의 X방향 1차모드 고유진동주기와 동일하게 조율하였다. 수치해석은 Matlab과 Simulink를 이용하여 수행하였고 모든 하중에 대해 수치해석시 0.001초의 시간간격을 사용하였다.

우선 El Centro 지진하중이 예제 초고층 구조물에 가해질 때 발생하는 지붕층의 변위응답 시간이력을 〈그림 9〉에 나타내었다. 각각의 그래프에서 제어장치가 설치되지 않은 경우의 응답(Uncontrolled)과 TMD 및 STMD가 설치된 경우의 응답을 비교하였다. 그림을 보면 수평방향(X방향) 지진하중에 대하여 수평방향 변위응답뿐만 아니라 수직방향(Z방향) 변위응답도 무시할 수 없을 정도로 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 경사진 초고층 건물에 횡방향 하중이 가해질 경우 수직방향 동적응답도 반드시 검토해야하는 것을 알 수 있다. 그림을 보면 El Centro 지진하중이 예제 초고층구조물에 가해질 때 발생하는 수평 및 수직방향 응답을 제어하지 않은 경우에 비하여 TMD를 사용한 경우 매우 효과적으로 줄일 수 있는 것을 확인할 수 있다. 특히 STMD는 일반적인 수동 TMD에 비해서 더욱 개선된 진동제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다.



(a) X방향 지붕층 변위응답



(b) Z방향 지붕층 변위응답

〈그림 9〉 El Centro 지진하중에 의한 변위응답 비교

그래프를 통한 정성적인 비교와 더불어 제어성능의 정량적인 검토를 위하여 〈표 1〉에 지붕층의 각 방향별 변위 및 가속도응답의 최대값과 RMS값을 나타내었다. 표에서 가장 관심이 가는 X방향 최대치 변위응답을 비교해보면 제어하지 않은 경우에는 1.15m의 지붕층 변위가 발생하고 TMD를 사용한 경우에는 이 응답을 1.05m로 줄일 수 있다. 본 연구에서 제안한 STMD를 적용한 경우에는 지붕층의 최대치 변위응답이 0.79m 발생하고 이는 일반적인 TMD를 사용한 경우에 비하여 구조물의 응답을 약 25% 더 줄이는 결과를 나타낸다. X방향 RMS 응답의 경우에는 TMD에 비하여 STMD의 제진성능이 40%이상 더 향상되는 것을 알 수 있고 수직방향 변위 응답도 비슷한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

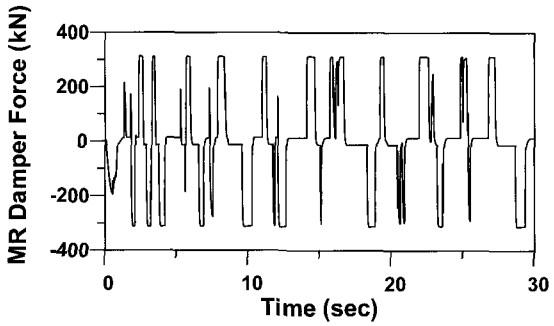
〈표 1〉을 보면 STMD의 제어성능 개선도가 변위응답에 비하여 가속도응답의 경우에는 비교적 뚜렷하지 않은 것을 알 수 있다. 즉, 가속도 응답에서 중요한 의미를 가지는 TMD와 STMD 응답의 RMS 값을 보면 X방향은 2.80과 2.75, Z방향은 1.30과 1.29로 개선효과가 크지 않다.

〈표 1〉 El Centro 지진하중에 대한 응답 비교

응답	응답	방향	Uncon	TMD	STMD
변위 (m)	최대치	X	1.15	1.05	0.79
		Z	0.22	0.20	0.16
	RMS	X	0.50	0.42	0.25
		Z	0.07	0.06	0.04
가속도 (m/s2)	최대치	X	10.46	10.21	10.45
		Z	5.09	5.07	5.03
	RMS	X	2.89	2.80	2.75
		Z	1.31	1.30	1.29

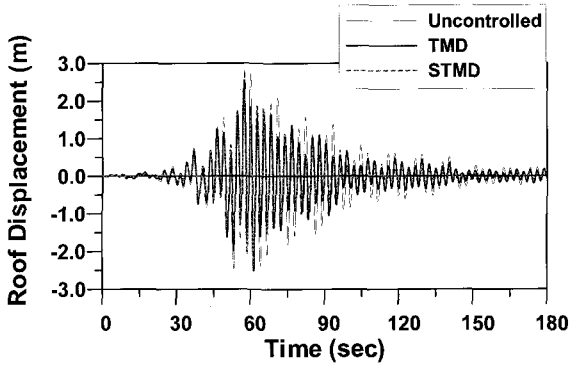
이러한 이유는 몇 가지로 정리될 수 있는데 우선 본 연구에서 사용한 그라운드훅 제어알고리즘이 변위제어에 중요성을 두고 개발되었기 때문이다. 이는 식 (1)과 (2)를 통해서 확인할 수 있는데 지붕층 변위응답의 부호에 의해서 제어명령이 결정되고 가속도응답은 이 알고리즘에서 전혀 고려되지 않고 있다. 또한 본 연구에서 사용한 변위기반 그라운드훅 제어알고리즘은 제어명령을 0V와 5V의 최소치 및 최대치만을 사용함으로써 일종의 Bang-Bang 방식의 제어, 즉 on/off 제어의 형태로 나타난다. 이것은 STMD를 제어하는 명령전압에 순간적인 변화를 주어 STMD의 거동을 극적으로 변화시켜서 구조물의 변위를 효과적으로 제어할 수 있도록 한다. El Centro 지진하중이 예제구조물에 가해졌을 때 STMD를 구성하는 MR 감쇠기의 감쇠력 변화를 〈그림 10〉에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 MR 감쇠기의 감쇠력이 가장 작은 값인 10kN에서 가장 큰 값인 300kN으로 순간적으로 변하는 것을 알 수 있다. 이러한 STMD 제어력의 극적인 변화는 구조물에 충격하중의 형태로 전달되어 가속도응답의 제어를 어렵게 하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 경사진 비정형 초고층 구조물의 변위응답 뿐만 아니라 가속도응답도 동시에 효과적으로 제어하기 위해서는 0V에서 5V사이의 명령전압을 실시간으로 적절하게 결정할 수 있는 보다 효과적인 제어알고리즘이 필요하다고 판단된다. 보다 개선된 제어알고리즘에 대한 연구는 추후 계속해서 연구를 수행할 계획이다. 추후 연구에서는 비선형성이 강한 MR 감쇠기를 효과적으로 제어하기 위해서 퍼지제어알고리즘을 사용할 계획이다. 퍼지제어알고리즘은 복잡하고 불확실하며 애매한 조건아래서 적용되어야 하는 시스템에 매우 적합하다. 특히 고유의 견실성과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력 때문에 본 연구에서 사용한 STMD의 핵심 구성요소인 MR 감쇠기를 제어하기 위하여 퍼지제어알고리즘을 사용할 것이다. 이러한 퍼지제어알고리즘은 전

문가의 지식에 기반하여 개발할 수도 있지만 최적의 성능을 발휘하는 제어기를 개발하는 일은 적합한 퍼지 소속함수(membership function)를 선택하고 퍼지제어규칙을 찾아내기 위하여 수많은 반복과 시행착오과정을 거쳐야 하므로 시간이 많이 소요되는 쉽지 않은 작업이다. 따라서 추후 연구에서는 최적화 알고리즘을 적용하여 퍼지제어알고리즘을 개발할 것이다. 이러한 방법으로 적절한 퍼지제어알고리즘이 개발된다면 본 연구에서 사용된 변위기반의 그라운드훅 제어알고리즘이 Bang-Bang 제어를 수행하기 때문에 효과적인 제어가 힘들었던 가속도응답에 대한 제어가 보다 효과적으로 가능할 것이다.

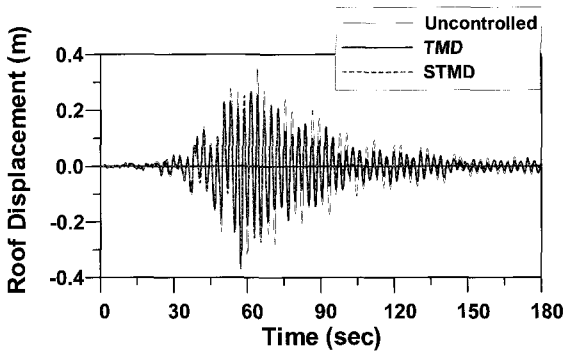


〈그림 10〉 MR감쇠기의 감쇠력 변화

Mexico 지진하중이 예제 초고층 구조물에 가해질 때의 지붕층 변위응답 시간이력을 〈그림 11〉에 나타내었다. 두 그래프에서 볼 수 있듯이 STMD와 TMD의 제어성능은 El Centro 지진하중의 경우와 비슷한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 100층의 경사진 비정형 초고층 건물의 지진응답 제어를 위해서 MR 감쇠기로 구성된 STMD를 제안하고 그 제어성능을 검토하여 보았는데 이때 사용한 MR 감쇠기의 용량은 300kN으로서 현재의 기술로 어렵지 않게 개발이 가능하다. STMD는 구조물과 질량감쇠기의 동적응답에 따라서 실시간으로 제어력을 변화시킬 수 있으므로 적응성이 일반적인 수동감쇠기에 비하여 매우 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 큰 규모의 지진 등에 의해서 구조물이 손상되어 MR 감쇠기로 전달되는 전원이 차단되는 경우에도 MR 감쇠기는 passive-off 상태의 점성감쇠기처럼 거동을 하기 때문에 본 연구에서 사용한 STMD는 일반적인 수동 TMD와 같은 안정성을 보여준다. Mexico 지진하중을 이용한 제어성능에 대한 정량적인 검토는 〈표 1〉에 나타낸 El Centro 지진하중의 경우와 매우 유사하므로 지면관계상 생략하였다.



(a) X방향 지붕층 변위응답



(b) Z방향 지붕층 변위응답

〈그림 11〉 Mexico 지진하중에 의한 변위응답 비교

5. 결론

본 연구에서는 경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물의 지진응답 제어를 위하여 MR 감쇠기로 구성된 스마트 TMD를 제안하였고 STMD를 효율적으로 제어하기 위하여 그라운드훅 제어알고리즘을 사용하였다. 본 연구에서 제안된 STMD의 지진응답 제어성능을 검토하기 위하여 제어하지 않은 상태의 구

조물 응답과 일반적인 TMD를 적용한 경우의 응답을 비교하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물은 자중에 의해서 수직변위 뿐만 아니라 횡방향 변위도 상당량 발생한다. 이러한 자중에 의한 횡방향 응답과 횡하중에 의한 횡방향 응답이 누적되면 구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 경사진 초고층 건물의 횡방향 응답제어는 신중하게 고려되어야 한다.
2. 비정형 초고층 건물이 기울어진 방향에 대해 수직으로 가해지는 횡하중에 의해서는 횡방향 응답뿐만 아니라 비틀림 응답이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 경사진 초고층 건물을 설계할 때 비틀림 응답에 대한 고려도 반드시 이루어져야한다.
3. 본 연구를 통하여 경사진 다이어그리드 비정형 초고층 건물에 대한 스마트 TMD의 제진성능을 평가해본 결과 일반적인 수동 TMD에 비하여 매우 우수한 지진응답 제어성능을 나타내는 것을 확인하였다.
4. 본 연구에서 사용한 STMD의 지진응답 제어성능이 변위응답에 비하여 가속도응답에 대해서 좋지 않은 결과를 나타내었는데 이것은 본 연구에서 사용된 제어알고리즘이 변위기반의 그라운드훅 제어알고리즘으로서 Bang-Bang 제어를 수행하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 추후에는 가속도 응답의 제어에 대해서도 효과적으로 적용할 수 있는 퍼지제어알고리즘을 사용한 연구를 수행할 계획이며 이를 개발할 때 가속도응답과 변위응답제어를 위한 동시 최적화기법을 사용할 계획이다.

감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2011-0004303).

참고문헌

1. A. Kareem and T. Kijewski (1999), Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications, Wind and Structures, 2(3), pp.201-251.
2. A. Nishitani and Y. Inoue (2001), Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan, Earthquake Engrg. and Struct. Dyn., 30, pp. 1565-1574.
3. S.J. Dyke (2005), Current directions in structural control in the US, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, pp. 1-22.
4. 강주원, 김태호, 김현수 (2010), "스마트 최상층 면진시스템의 진동제어 성능평가", 한국공간구조학회 논문집, 제10권, 3호, pp.49-56.
5. 강주원, 채승훈, 김현수 (2010), "스마트 스카이브릿지를 이용한 인접건물의 진동제어", 한국공간구조학회 논문집, 제10권, 4호, pp.93-102.
6. 김한상, 김현수 (2009), "초고층건물의 풍응답제어를 위한 스마트 TMD의 퍼지 하이브리드제어", 한국전산구조공학회 논문집, 제22권, 2호, pp.135-144.
7. D. Hrovat, P. Barak and M. Rabins (1983), Semi-active versus passive or active tuned mass damper for structural control, ASCE, Journal of Engineering Mechanics, 190(3), pp. 691-705.
8. M.D. Symans, M.C. Constantinou (1999), Semi-active control systems for seismic protection of structures: A State-of-the-art Review, Engineering Structures, 21, pp. 469-487.
9. J.H. Koo, M. Setareh and Murray T.M.

(2004), In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers. Journal of Vibration and Control, 10, pp.163-174.

10. J.H. Koo, M. Ahmadian and M. Setareh (2006), Experimental robustness analysis of magneto-rheological tuned vibration absorbers subject to mass off-tuning. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 128(1), pp.126-131.

(접 수 일 자 : 2011년07월22일)
(심사완료일자 : 2011년11월09일)
(게재확정일자 : 2011년11월30일)