

준능동 TMD를 이용한 메가골조구조물의 진동제어

Vibration Control of Mega Frame Structures using a Semi-active Tuned Mass Damper

김현수¹⁾ · 이동근²⁾

Kim, Hyun-Su · Lee, Dong-Guen

국문 요약 >> 메가골조시스템은 사용되는 구조재료를 절약하면서도 구조물의 강성을 효과적으로 높일 수 있는 장점 때문에 고층건물의 설계에 많이 사용되고 있다. 이러한 메가골조시스템이 주로 적용되고 있는 초고층건물의 구조설계에서는 횡하중에 대한 거주자의 불안감을 최소화시키는 것이 주요한 관심사중의 하나이다. 따라서 본 연구에서는 메가골조구조물의 사용성을 향상시키기 위한 방법으로 일반적인 수동 TMD의 제어성능을 개선한 준능동 TMD(STMD)를 사용하였다. 이를 위하여 TMD에서 일반적으로 사용되고 있는 수동감쇠기 대신 준능동 MR 감쇠기를 사용하여 STMD를 구성하였다. 메가골조구조물의 일반적인 유한요소해석모델은 매우 많은 수의 자유도로 구성되어 있기 때문에 원형모델을 사용하여 STMD의 제어성능을 검토하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 메가골조구조물의 동적 거동을 정확하게 표현할 수 있는 최소한의 자유도를 가진 응축모델을 행렬응축기법을 이용하여 제안하였다. 또한 일반적인 행렬응축기법의 효율성을 향상시키기 위하여 메가골조구조물의 특성을 활용한 다단계 행렬응축기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 응축모델을 사용한 제어의 효율성과 정확성 및 메가골조구조물에 대한 STMD의 제어성능을 예제해석을 통하여 검증하였다.

주요어 준능동 동조질량감쇠기, 진동제어, MR 감쇠기, 메가골조구조물, 다단계 행렬응축기법

ABSTRACT >> The mega frame system is becoming popular for the design and construction of skyscrapers because this system exhibits structural efficiency by allowing high rigidity of the structure while minimizing the amount of structural materials to be used. Since the mega frame system is usually adopted for super high-rise buildings, the comfort of occupants may be main concerns in the practical application of this system. For the enhancement of the serviceability of mega frame structures, a semi-active tuned mass damper (STMD) is developed in this study. To this end, a Magnetorheological (MR) damper is employed replacing passive damper as a semi-active damper to improve the control effect of a conventional TMD. Since a conventional finite element model of mega frame structures has significant numbers of DOFs, numerical simulation for investigation of control performances of a STMD is impossible by using the full-order model. Therefore, a reduced-order system using minimal DOFs, which can accurately represent the dynamic behavior of a mega frame structure, is proposed in this study through the matrix condensation technique. To improve the efficiency of the matrix condensation technique, multi-level matrix condensation technique is proposed using the structural characteristics of mega frame structures. The efficiency and accuracy of the reduced-order control proposed in this study and the control performance of a STMD were verified using example structures.

Key words semi-active tuned mass damper, vibration control, MR damper, mega frame structure, multi-level matrix condensation technique

1. 서론

근래에 들어와서 사회적 및 경제적인 요구와 함께 구조공

학의 발전으로 인하여 건축구조물이 점차 고층화, 대형화되고 있다. 이러한 초고층 건축구조물의 설계에 있어서 횡하중에 의한 진동의 제어는 구조물의 안전성과 사용성 확보를 위하여 매우 중요한 설계요소가 된다. 따라서, 이를 효과적으로 제어하기 위하여 다양한 구조시스템들이 제안되었으며 지금까지 연구가 계속되고 있다^(1,2,3). 그 중에서 메가골조 시스템은 비교적 최근에 개발된 구조시스템으로 사용되는 구조재료를 절약하면서도 건물의 강성을 효과적으로 높

¹⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과, 박사후 연구원
(대표저자: digiarchi@skku.edu)

²⁾ 정회원·성균관대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 9. 26 / 심사종료일 : 2007. 1. 3)

일 수 있는 장점 때문에 관심이 증대되고 있다. 메가골조시스템은 현재 건설되고 있는 건물에도 적용되고 있지만 1000m가 넘는 미래의 초고층 건물에 효과적으로 사용될 것으로 기대되고 있다⁽⁴⁾. 최근의 초고층 건물은 고강도, 경량화에 따른 건물 자체의 감쇠의 저감으로 인하여 바람에 의한 진동이 커지고 있어서 건물의 사용성에 문제를 일으킬 가능성이 점차 증가하고 있다. 따라서 감쇠장치를 이용한 별도의 제진시스템으로 횡하중에 의한 구조물의 진동을 효과적으로 줄여서 초고층 건물의 안전성과 사용성을 증대시키고자 하는 연구가 지속적으로 증가하고 있다^(5,6).

현재까지 개발된 여러 가지 진동제어장치 중에서 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper; TMD)는 1900년대 초에 개발된 이래로 그 구조 및 원리의 단순성과 우수한 진동제어 성능 때문에 많은 구조물에 다양한 형태로 적용되어 왔다⁽⁷⁻¹⁰⁾. 특히, 초고층 건물은 매우 큰 강성으로 인하여 구조물이 전단변형보다는 주로 휨변형을 나타내기 때문에 감쇠기보다는 TMD를 사용한 제어가 효과적일 것으로 판단된다. 그러나 일반적으로 사용되는 수동 TMD는 특정한 진동수를 가지는 하중에 대해서는 매우 효과적인 반면에 다양한 진동수를 포함하는 동적하중에 대해서는 그 적응성이 좋지 않고 알려져 있다. 따라서 가력장치(actuator)를 이용하여 원하는 제어력을 도입함으로써 TMD의 적응성과 제어 성능을 향상시킨 ATMD(Active Tuned Mass Damper)가 제안되었다. 그러나 능동제어장치를 설치 및 운용하기 위해서 필요한 많은 비용과 전력과 같은 경제적인 이유뿐만 아니라 구조시스템을 불안정하게 할 가능성 때문에 실제 구조물에 적용이 매우 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 수동제어 시스템이 가지고 있는 신뢰성(reliability)과 능동제어기법의 장점인 적응성(adaptability)을 확보할 수 있는 준능동 감쇠기^{(11),(12)}를 사용하여 준능동 동조질량감쇠기(Semi-active TMD; STMD)를 구성하고 이를 이용한 메가골조구조물의 진동제어 성능을 검토해보고자 한다.

메가골조구조물은 매우 많은 수의 구조부재로 구성되기 때문에 일반적인 유한요소 해석모델은 수만 개에서 수십만 개의 자유도를 가지게 된다. 따라서 메가골조구조물의 원형(full-order)모델을 사용해서 구조물에 대한 STMD의 제어 성능을 검토하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이와 같은 초고층 건물의 진동제어 연구에는 응축(reduced-order)모델을 사용하여 제어장치 및 제어알고리즘의 성능을 검토하는 것이 일반적이다. 이를 위해서는 원형모델의 동적거동 및 특성을 정확하게 표현할 수 있는 응축모델을 생성하는 것이 필수적인데 현재까지 다양한 종류의 응축기법들이 제안되어 왔다⁽¹³⁻¹⁵⁾. 본 연구에서는 구조시스템의 응축방법으로 널

리 사용되고 있는 Guyan 응축기법⁽¹⁵⁾을 사용하여 메가골조구조물 원형모델의 구조적 거동을 효과적으로 표현할 수 있는 응축모델을 개발하였다. Guyan 응축기법에서는 원형 해석모델의 자유도가 응축되어서 없어질 자유도와 응축모델에서 남아 있을 자유도로 나누어진다. 메가골조구조물의 수치해석모델은 매우 많은 수의 자유도를 포함하고 있으므로 응축모델에서 남아있을 자유도를 수개에서 수십개로 최소화한다면 응축되어 소거는 자유도의 수가 매우 많아지게 된다. Guyan 응축기법에서는 소거되는 자유도와 연관된 강성 및 질량행렬의 역행렬을 구해야하므로 이 과정에서 상당한 계산량과 컴퓨터 메모리가 소요된다. 따라서 개인용 컴퓨터에서는 일반적인 Guyan 응축기법으로 메가골조구조물의 응축모델을 만드는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 메가골조구조물의 구조적 특징을 이용하여 다단계 행렬응축기법을 도입한 효율적인 응축모델 개발방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 생성된 응축모델의 동적특성 및 제어 응답을 원형모델과 비교함으로써 정확성을 검토하였다. 이렇게 개발된 응축모델을 사용한 수치해석을 통하여 메가골조구조물에 대한 STMD의 제어 성능을 예제구조물을 사용하여 검토하였다.

2. 메가골조구조물의 효율적인 응축모델

본 연구에서는 메가골조구조물의 응축모델을 생성하기 위하여 Guyan 행렬응축기법을 통하여 자유도를 소거하였다. 또한 이러한 행렬응축과정의 효율성을 높이기 위하여 메가요소, 서브메가요소 및 다단계 행렬응축기법(multi-level matrix condensation technique)을 도입하였다.

2.1 메가요소를 이용한 메가골조구조물의 모형화

메가골조시스템은 다수의 보와 기둥들이 밀집된 대형 구조부재인 메가칼럼과 메가거더 등으로 구성된다. 이 시스템에서 강성이 큰 부재들로 긴밀하게 연결된 메가칼럼 및 메가거더는 일체화된 거동을 하므로 개개의 단일 부재와 유사한 거동을 하게 된다. 따라서, 메가부재가 연결되는 부분의 자유도만을 사용해서 해석을 하더라도 메가골조구조물의 전체적인 거동을 효과적으로 파악할 수 있게 된다. 이러한 방법을 사용하면 수십만 개의 자유도로 이루어진 원형모델 대신에 십여 개로 이루어진 응축모델을 얻을 수 있다. 그러나 수십만 개의 자유도를 일반적인 Guyan 응축기법을 통하여 한꺼번에 소거를 한다면 행렬응축에 막대한 시간이 소요되거나 개인용 컴퓨터에서는 이러한 작업이 거의 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기

위하여 다수의 보와 기둥 부재로 구성된 메가칼럼 및 메가 거더 그리고 접합부인 메가절점을 메가요소로 정의하고 이 메가요소 단계에서 행렬응축을 수행한다. 이렇게 생성한 메가요소를 조립하여 단위 메가골조를 구성한 후 메가골조를 쌓아 올려서 전체 구조물을 생성한다. 다수의 보, 기둥 및 슬래브 부재로 이루어지는 메가요소를 모형화할 때 그림 1과 같이 메가요소 사이의 연결을 위해서 필요한 절점의 자유도를 제외하고 나머지 자유도는 행렬응축기법을 이용하여 소거한다. 이렇게 메가요소의 구성단계에서 행렬응축기법을 통하여 자유도를 소거하게 되면 행렬응축과정에서 계산해야하는 역행렬의 크기가 전체구조물의 자유도를 한꺼번에 응축할 때에 비하여 상당히 줄어들기 때문에 행렬응축 시간을 크게 줄일 수 있다. 또한 메가골조시스템은 동일한 메가부재가 여러 위치에서 반복적으로 사용되는 특징이 있다. 따라서 한번 구성한 메가요소의 강성 및 질량행렬을 반복적으로 사용할 수 있으므로 모형화 및 해석의 효율성을 크게 향상시킬 수 있다. 전체구조물의 형상과 관계없이 메가요소만을 대상으로 모형화를 하게 되므로 모형화 작업이 보다 간편해진다.

2.2 서브메가요소를 이용한 메가요소의 모형화

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 바와 같이 메가골조구조물을 효율적으로 응축하기 위하여 메가요소를 도입하였다. 그러나, 메가골조의 규모가 매우 클 때에는 메가요소도 커져서 메가요소를 응축하는 데에도 상당한 시간이 소요될 수 있다. 한번에 응축되는 자유도의 수가 커질수록 계산해야할 역행렬의 크기가 커지게 되므로 응축과정에 소요되는 시간이 커지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 서브메가요소를 도입하여 구해야할 역행렬의 크기를 줄이고자 한다. 그림 2에서 서브메가요소를 이용하여 메가요소를 모형화하는 과정을 나타내었다.

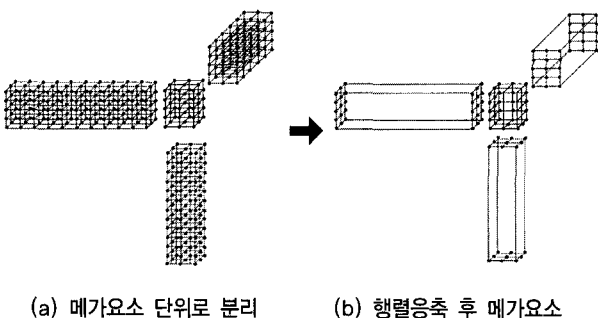
그림 2에 나타낸 간단한 메가요소 모델을 그림 1에서 소개한 방법같이 메가요소 내부에 있는 자유도를 한꺼번에 응

축한다면 응축되는 자유도는 378개가 되고 남아있는 자유도는 108개가 되므로 행렬응축과정에서 378×378 크기의 역행렬을 구해야 한다. 이런 방법으로 계산을 했을 때 약 1.5초의 시간이 소요되었다. 그러나 그림 2와 같이 모형화할 때에는 서브메가요소의 구성단계에서 응축되는 자유도는 54개이고 남아있는 자유도는 108개이다. 이렇게 서브메가요소를 구성하는데 소요되는 시간은 0.1초이다. 계속해서 서브메가요소를 조합해서 메가요소를 생성하는 단계에서는 응축되는 자유도는 162개이고 남아있는 자유도는 108개이며 이때 소요되는 시간은 0.3초이다. 따라서, 서브메가요소를 사용하여 메가요소를 구성하면 그렇지 않았을 때에 비하여 응축시간을 절반이상 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

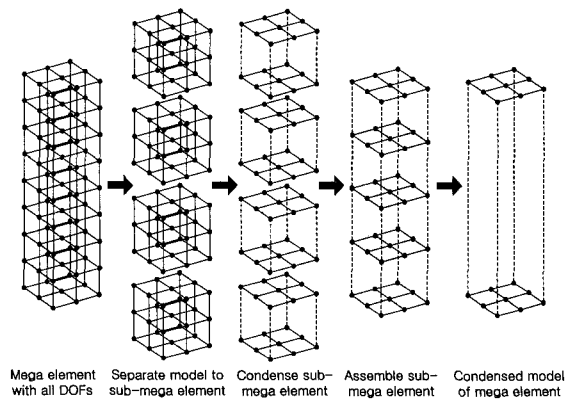
2.3 메가절점단위 행렬응축

메가골조구조물 응축모델을 생성하기 위해서 앞 절에서 생성한 메가요소들을 조합하여 그림 3(a)와 같이 한 층의 메가골조를 구성한다. 계속해서 본 연구에서는 전체구조물의 해석에 사용되는 자유도의 수를 더욱 줄이기 위해서 메가요소의 연결에 사용된 자유도를 소거한다. 이러한 방법으로 응축된 단위 메가골조에는 이것들을 다층으로 쌓아올릴 때 연결을 위해서 필요한 절점과 전체 구조물의 해석에 사용될 메가절점 가운데 존재하는 절점의 자유도만 남게 된다. 이와 같이 해석에 사용될 자유도를 줄이기 위해서 단위 메가골조를 구성한 후에 메가요소간의 연결절점의 자유도를 응축할 때 메가요소의 규모가 커지거나 메가요소의 수가 많아지게 되면 행렬응축에 소요되는 시간이 무척 커질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 메가절점단위의 행렬응축기법을 도입하여 응축과정에 소요되는 시간을 줄이고자 하였고 이 과정을 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서 보는 바와 같이 메가절점을 단위로 해서 각각의 메가절점에 존재하는 연결절점의 자유도를 순서대로 응



<그림 1> 메가요소의 모형화 과정



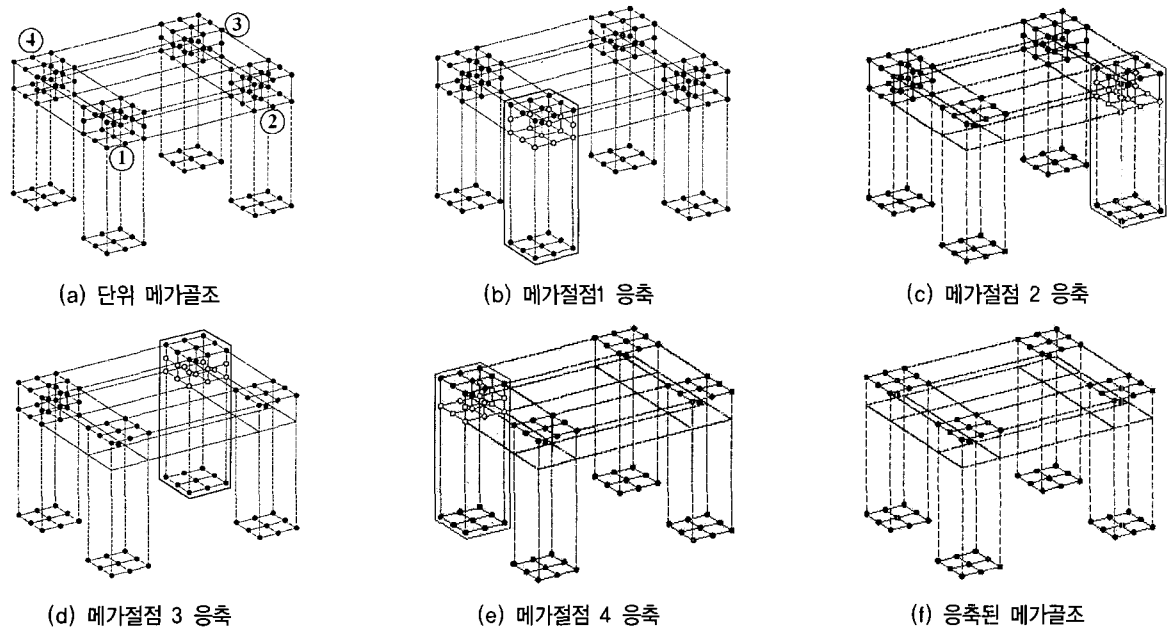
<그림 2> 서브메가요소를 이용한 메가요소의 모형화 과정

축을 한다. 그림 3의 간단한 메가골조 예제모델에 대해서 연결절점의 자유도를 한번에 응축할 경우와 메가절점단위로 응축할 경우의 자유도수를 표 1에 비교하였다. 예제모델에는 4개의 메가절점이 존재하므로 전체 응축되는 자유도의 1/4개가 각각의 메가절점을 응축할 때 소거되는 것을 알 수 있다. 각각의 메가절점단위로 응축을 할 때마나 남은 자유도 수는 누적된다.

일반적으로 행렬응축과정 중에서 가장 많은 시간이 소요되는 계산과정은 응축되는 자유도에 대한 강성행렬의 역행렬을 계산할 때이다. 역행렬을 구할 때의 계산량은 대략적으로 자유도의 3승에 비례한다고 알려져 있다. 따라서, 한 층의 메가골조를 모형화할 때 응축해야할 자유도의 개수를 N이라고 한다면 응축되는 자유도에 대한 강성행렬의 역행렬을 계산하기 위해서는 N^3 의 연산량이 소요된다. 만약 메가골조구조물이 J개의 메가절점을 가지고 있다면 표 1에 나타낸 바와 같이 각각의 응축단계마다 N/J개의 자유도가 응축된다. 따라서 단위 메가골조의 역행렬을 구하는데 소요되는 연산량은 $J \times (N/J)^3 = N^3/J^2$ 이 될 것이다. 그림 3에 나타낸 예제에서는 4개의 메가절점이 존재하므로 메가절점 단위로 행렬응축을 수행하는 경우에는 한꺼번에 응축할 경우보다 약 1/16로 연산량이 줄어드는 것을 알 수 있다.

2.4 메가층단위 행렬응축

본 논문에서는 앞 절에서 생성한 단위 메가골조를 조합하여 전체 메가골조구조물을 모형화한다. 최종적으로 메가골조구조물의 거동을 나타내는데 필요한 최소한의 자유도만을 남기고 나머지 자유도를 응축함으로써 메가골조구조물의 응축모델을 얻는다. 이렇게 전체 구조물 단계에서 행렬응축을 할 경우에 소거되는 모든 자유도를 한꺼번에 응축하고자 한다면 앞에서 설명한 바와 같이 행렬응축과정에서 상당한 양의 계산시간 및 컴퓨터 메모리가 소요되게 된다. 본 논문에서는 메가골조구조물의 응축과정에서 소요되는 행렬응축시간을 절약하기 위해서 메가층단위 행렬응축기법을 도입하였다. 전체 구조물 단계에서 응축시킬 자유도의 수를 N개라고 하고 메가층수를 S층이라고 할 때 모든 자유도를 한꺼번에 응축한다면 소거되는 자유도에 대한 강성행렬의 역행렬을 계산하기 위해서는 N^3 의 연산량이 소요된다. 하지만 메가층단위 응축기법을 사용하여 자유도를 단계별로 소거한다면 역행렬을 계산하는데 소요되는 계산량은 $S \times (N/S)^3 = N^3/S^2$ 이 되므로 한꺼번에 응축할 때보다 메가층수의 제곱에 반비례해서 줄어드는 것을 알 수 있다.



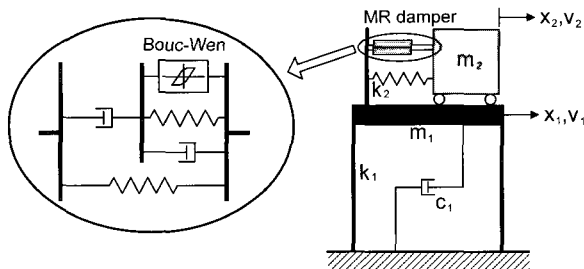
〈그림 3〉 메가절점단위 행렬응축과정

〈표 1〉 메가골조의 응축방법에 따른 자유도수

	한번에 전체응축	메가절점단위 응축			
		1번 응축	2번 응축	3번 응축	4번 응축
응축되는 자유도수	336	84	84	84	84
남은 자유도수	456	222	336	450	456

3. MR 감쇠기를 이용한 준능동 TMD

본 연구에서는 일반적인 TMD의 구성요소인 수동 감쇠기를 대신하여 준능동 MR 감쇠기를 사용함으로써 그림 4와 같이 STMD를 구성한다. 구조물의 동적응답을 최소화하기 위한 수동 TMD의 최적설계 파라미터에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되었다. 그 중에서 본 연구에서는 표 2에 나타난 것과 같이 Warbuton⁽¹⁶⁾의 연구에서 제시한 TMD 최적값을 사용하였다. 표 2에 나타난 식에서 μ 는 주구조물에 대한 TMD의 질량비(m_2/m_1)를 의미하며 본 연구에서는 0.01의 값을 이용하였다. MR 감쇠기를 모형화하기 위해서는 그림 4에 나타난 바와 같이 일반적으로 사용되는 modified Bouc-Wen 모델⁽¹⁷⁾을 사용하였다. 그림 4의 개념도에서 감쇠기가 발생하는 제어력 F는 식 (1)로 표현될 수 있다. 식에서 x 는 감쇠기 양단의 상대변위이고 y , z 는 감쇠기의 거동을 묘사하기 위한 가상의 변수로서 식 (2)와 (3)의 미분방정식으로 표현된다. 여기서 x_0 는 감쇠기의 초기변위이고, c_0 와 k_0 는 높은 속도에서의 점성감쇠와 강성, c_1 은 낮은 속도에서의 점성감쇠, k_1 은 감쇠기의 강성이다. MR 감쇠기의 감쇠력은 감쇠기로 전달되는 명령전압에 의해서 결정되는데 사용한 MR 감쇠기는 0V의 전압이 전달될 때 passive-off의 상태가 되고 1V의 전압에서 passive-on 상태가 된다. 본 연구에서 사용된 MR 감쇠기는 최대 400kN의 용량을 발휘하는 감쇠기로서 passive-on 및 passive-off 상태의 MR 감쇠기 힘-변위 관계를 그림 5에 나타내었다. 본 연구에서는 주구조물의 응답에 따른 STMD의 감쇠력을 효과적으로 조절하기 위한 제어알고리즘으로 식 (4) 및 (5)에 나타난 skyhook 제어알고리즘⁽¹⁸⁾을 사용하였다. 여기서 x_1 및 v_1 , v_2 는 그림 4에 나타난 바와 같이 각각 주구조물의 변위, 주구조물의 속도, TMD의 속도를 각각 의미하고 v_{cmd}



〈그림 4〉 MR감쇠기를 이용한 STMD가 설치된 단자유도 예제구조물

〈표 2〉 직접가력 하중에 대한 TMD의 최적 변수

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

는 MR 감쇠기로 전달되는 제어전압을 나타낸다. 이와 같이 skyhook 제어 알고리즘은 평형위치에 대한 주구조물의 변위(x_1)와 주구조물과 TMD의 상대속도(v_1-v_2)의 관계를 이용하여 정의된다. 이때 두 질량(m_1 , m_2)사이의 상대속도가 음수이면 두 질량이 분리되는 방향으로 움직이는 것을 의미하며 감쇠기에는 인장력이 발생하게 되고 반대로 상대속도가 양수이면 감쇠기에는 압축력이 발생하게 된다. 또한 주구조물의 중심이 평형상태의 오른쪽에 있으면 변위(x_1)가 양수이고, 왼쪽에 있으면 음수이다. 식 (4)와 (5)의 방법으로 MR 감쇠기를 제어한다면 STMD에 의한 제어력이 주구조물을 평형상태로 돌리키려고 할 때에는 MR 감쇠기의 제어력이 최대가 되고 그 반대일 때는 제어력이 최소가 되어 STMD의 불리한 제어력이 주구조물로 전달되는 것을 막게 된다.

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}| |z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (2)$$

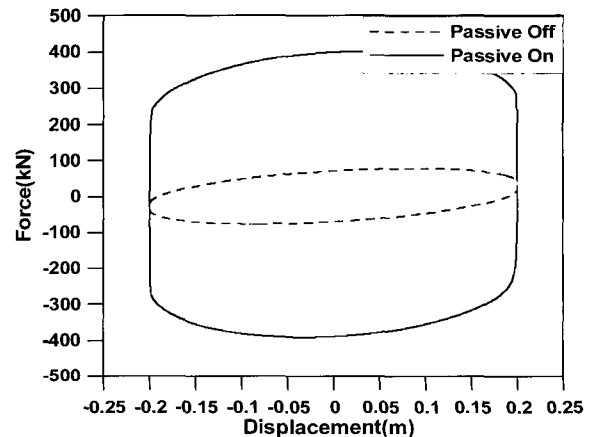
$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} [\alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y)] \quad (3)$$

$$x_1(v_1 - v_2) \geq 0 \Leftrightarrow v_{cmd} = 1V \quad (4)$$

$$x_1(v_1 - v_2) < 0 \Leftrightarrow v_{cmd} = 0V \quad (5)$$

4. 예제해석

본 절에서는 메가요소 및 다단계 행렬응축기법을 사용한 모형화방법으로 메가골조구조물의 응축모델을 생성하고 생성된 모델의 동적응답을 원형모델과 비교하여 정확성을 검토한다. 그리고 생성된 응축모델을 이용하여 메가골조구조물에 대한 STMD의 제어성능을 검토한다. 본 연구에서 수치해석은 MATLAB 7.0을 사용하여 수행하였다. 예제 해석 시 사용된 TMD 및 STMD의 질량은 주구조물의 1%로 하



〈그림 5〉 MR 감쇠기의 힘-변위 관계

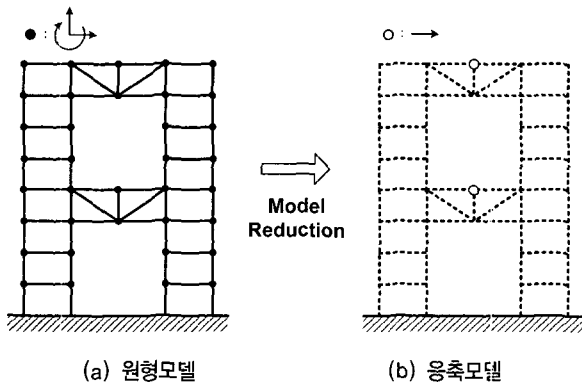
였으며 감쇠비나 진동수비, MR 감쇠기 특성 등 나머지 파라미터들은 3장에서 나타난 값을 사용하였다.

4.1 8층 메가골조구조물의 제어

본 절에서는 그림 6에 나타난 바와 같이 비교적 단순한 8층 메가골조구조물을 예제구조물로 사용하였다. 보다 복잡한 실제규모의 메가골조구조물을 사용한다면 개인용 컴퓨터에서 원형모델로 제어하는 것이 불가능하기 때문에 비교적 단순한 예제구조물을 선택하여 원형모델과 응축모델의 제어된 응답을 비교하였다. 그림 6(a)의 원형모델은 절점당 3개의 면내자유도를 가지고 있으므로 총 108개의 자유도를 가진 해석모델이다. 예제구조물은 철골조로서 사용된 강재는 SM490으로 하였고 해석을 간편하게 하기 위하여 기둥, 거터 및 브레이스에 각각 $1000 \times 1000 \times 60$, $800 \times 600 \times 30$, $H500 \times 15 \times 30$

단면의 부재를 사용하였다. 이러한 원형모델은 메가층당 하나의 횡방향 이동자유도를 가지는 응축모델로 그림 6(b)와 같이 응축될 수 있다. 본 연구에서 선택한 예제는 일반적인 2층 골조와 동일한 형상의 정형적인 메가골조건물이므로 메가층당 하나의 자유도만으로 구조물의 거동을 표현할 수 있지만 보다 복잡한 형상의 메가골조구조물일 경우에는 앞 절에서 설명한 바와 같이 메가요소와 메가요소가 만나는 메가절점에 존재하는 특정한 자유도를 선택하는 것이 더욱 효과적일 것이다.

생성된 응축모델이 원형모델의 동적특성을 제대로 표현할 수 있는지 검토해보기 위하여 고유치해석을 수행한 후 각 모델의 고유진동주기를 표 3에 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이 응축모델은 2개의 자유도만 사용하고도 원형모델의 고유진동주기를 매우 정확하게 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서 응축모델을 사용하여 원형모델의 동적응답을 정확하게 표현할 수 있을 것으로 기대된다. 이것을 검토해 보기 위하여 두 가지 수치모델에 대하여 공진조화하중을 가한 후 수치해석을 수행하여 보았다. 이 때 제어를 하지 않은 경우, TMD를 사용하여 제어를 한 경우 및 STMD를 사용하여 제어를 한 경우에 대하여 수치해석을 수행하였으며 각각의 경우에 원형 및 응축모델의 최상층 변위시간이력을 그림 7에 비교하여 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 응축모델의 제어된 응답은 원형모델의 응답과 3가지 제어조건에 대하여 거의 일치하는 것을 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 질량비(μ)를 0.01로 놓았기 때문에 표 2에 의한 TMD의 최적 진동수비는 0.9876이 된다. 따라서 TMD의 주기가 $0.8316/0.9876=0.8420$ 초가 되도

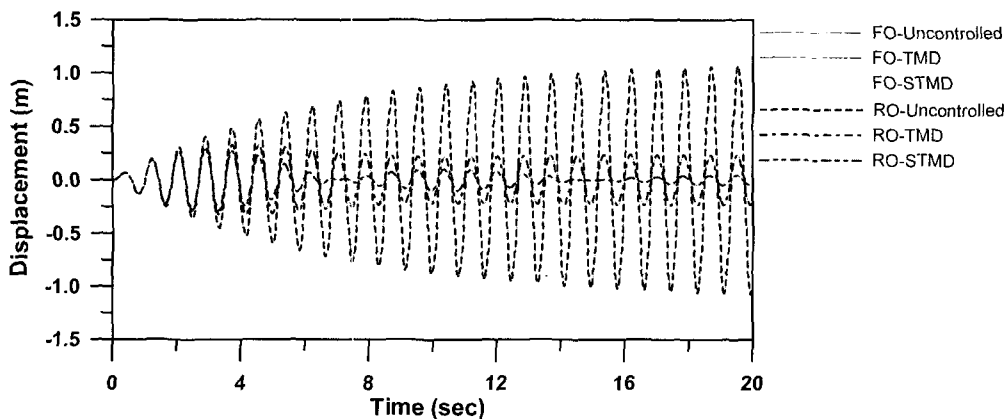


〈그림 6〉 8층 메가골조구조물

〈표 3〉 고유진동주기의 비교

(단위: 초)

Mode No.	원형모델	응축모델	Errors (%)
1	0.8316	0.8310	0.07
2	0.3186	0.3181	0.16



〈그림 7〉 최상층 변위시간이력의 비교

록 강성을 조율하였고 감쇠비는 표에 의해 계산된 최적 감쇠비인 4.98%로 두었다. STMD의 질량 및 강성은 TMD와 같게 두었으며 감쇠비는 0%로 두고 MR 감쇠기를 사용하였다.

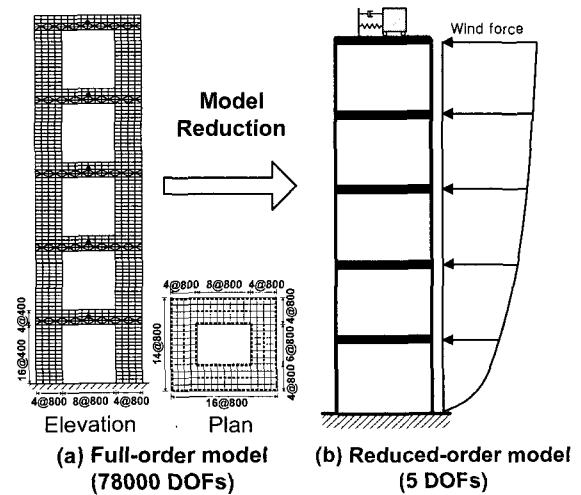
그래프를 통한 비교를 통해서도 각 모델간의 응답의 차이를 정확하게 검토하기가 어렵기 때문에 각 모델의 최상층 최대 변위 및 RMS 변위를 표 4에 비교하여 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 모든 제어조건에 대하여 응축모델은 원형모델의 응답을 1%이내의 오차범위에서 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 메가골조구조물의 응축모델을 사용하면 원형모델을 사용한 해석의 결과를 매우 효율적이면서도 정확하게 표현할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한 제어 성능에 대해서 살펴보자면 STMD가 TMD보다 매우 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 그림 7 및 표 4을 통해서 확인할 수 있다.

4.2 100층 메가골조구조물의 응축모델 생성

앞 절에서 사용한 8층 메가골조 예제구조물의 경우에는 구조물이 단순하기 때문에 일반적인 Guyan 응축방법을 사용하더라도 어렵지 않게 그림 6(b)의 응축모델을 생성할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서 제안한 메가골조구조물 모형화기법의 효율성을 검토해보기 위해서 그림 8에 나타난 바와 같이 보다 실제적인 규모인 높이 400m인 100층의 메가골조구조물을 예제 건물로 선택하였다. 예제 구조물의 모형화를 위하여 20층의 단위 메가골조 5개를 조합하여 100층의 전체 구조물을 구성하였다. 고정하중 360kgf/m²(슬래브 두께 15cm), 적재하중 250kgf/m²(오피스)의 중력하중과 노풍도 B, 기본풍속 30m/sec, 중요도계수 1.2의 풍하중에 대해 개략적인 설계를 하여 표 5와 같이 부재 단면 크기를 결정하였으며, 전체구조물의 횡변위와 메가거더의 처짐을 제어하기 위해 가새의 위치 및 단면 크기를 결정하였다. 가새는 그림 8에서 보는 바와 같이 평면의 외부 전체, 그리고 메가거더의 내부에 2개층의 X브레이스를 설치하였다. 사용된 강재는 SM490으로 설계기준강도 3.3tonf/cm², 최대인장강도 5.0tonf/cm²이다.

그림 8에 나타난 원형모델은 총 78,000개의 자유도를 가지고 있기 때문에 이러한 메가골조구조물의 원형모델을 사

용한 제어를 수행하는 것은 본 연구에서 사용한 컴퓨터 시스템(Pentium 4 CPU 3.2GHz, RAM 2GB)으로는 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 메가층당 1개의 이동자유도를 가지는 응축모델을 그림 8(b)와 같이 만들어서 각 제어장치의 제어성능을 검토한다. 이러한 응축모델을 만들 때 일반적으로 사용되고 있는 Guyan 응축방법을 사용하여 응축하게 되면 너무나 많은 컴퓨터 메모리를 필요로 하기 때문에 개인용 컴퓨터에서 이 방법을 사용하는 것은 거의 불가능하다. 이를 확인해보기 위하여 각 수치해석모델의 강성 및 질량행렬의 구성에 소요되는 컴퓨터 메모리를 표 6에 나타내었다. 원형모델은 일반적인 유한요소 해석모델로서 행렬응축은 사용하지 않는다. 본 연구에서 강성 및 질량행렬은 스카이라인 방법으로 구성하였다. 원형모델의 경우에는 강성 및 질량행렬을 구성하는데 약 1GB의 컴퓨터메모리가 소요되는데 비하여 본 연구에서 사용한 다단계 부분구조기법을 사용하면 강성 및 질량행렬 구성과 행렬응축에 소요되는 컴퓨터 메모리가 약 68MB 정도로 대폭 줄어드는 것을 알 수 있다. 이에 비하여 일반적인 Guyan 응축기법을 사용하여 모든 자유도를 한번에 응축하고자 할 때에는 소거되는 자유도가 너무 많기 때문에 이와 연관된 강성 및 질량행렬의 역행렬을 구하는 과정에서 필요한 컴퓨터 메모리의 양이 약 48GB에 달하므로 개인용 컴퓨터에서 이 방법을 적용하는 것은 불가능할 것으로 판단된다.



〈그림 8〉 100층 메가골조구조물

〈표 4〉 제어 조건에 따른 모델별 최상층 변위의 비교

(단위: m)

Control Case	최대변위			RMS 변위		
	원형모델	응축모델	오차(%)	원형모델	응축모델	오차(%)
Uncontrolled	1.0713	1.0728	-0.14	0.5840	0.5854	-0.24
TMD	0.3286	0.3286	-0.00	0.1739	0.1738	0.06
STMD	0.2856	0.2857	-0.04	0.0895	0.0893	0.22

〈표 5〉 부재단면

층	기둥	거더	브레이스
81-100	□1400×1400×60	□800×600×30	H500×15×30
61-80	□1400×1400×70	□800×600×40	H500×15×30
41-60	□1400×1400×80	□800×600×40	H500×15×30
21-40	□1400×1400×90	□800×600×50	H500×15×30
1-20	□1400×1400×100	□800×600×50	H500×15×30

〈표 6〉 강성 및 질량행렬 구성에 소요되는 컴퓨터 메모리

(단위: MB)

수치해석모델	응축방법	소요 컴퓨터 메모리			
		K&M	KC&MC	합계	
원형모델	-	1,041.240	-	1,041.240	
응축모델	한번에 응축	0.002	48,665.76	48,665.762	
	다단계 응축	서브메가요소	1.374	3.090	68.368
		메가요소	17.490	16.822	
		단위 메가골조	22.266	1.524	
		전체구조물	0.002	5.790	

K&M: 강성 및 질량행렬

KC&MC: 강성 및 질량행렬의 응축과정에 소요되는 행렬

각각의 수치해석모델을 구성하는데 소요되는 컴퓨터 메모리뿐만 아니라 이 과정에서 소요되는 계산시간을 표 7에 비교하여 본 연구에서 사용한 다단계 행렬응축기법의 효율성을 검토하여 보았다. 일반적인 유한요소모델인 원형모델은 표에서 보는 것과 같이 약 306초의 시간이 소요된다. 이에 비하여 응축모델은 행렬응축에 소요되는 시간이 포함되기 때문에 일반적으로 원형모델 보다는 강성 및 질량행렬 구성에 더 많은 시간이 필요하게 된다. 본 연구에서는 앞 절에서 설명한 바와 같이 메가골조구조물의 모형화에 메가요소 개념을 도입하여 메가요소 구성, 메가골조 조립, 전체구조물 생성의 과정을 거쳐서 한번에 응축되는 자유도의 수를 줄임으로써 행렬응축을 보다 효율적으로 수행하도록 하였다. 더 나아가 이러한 각 단계의 행렬응축을 보다 효율적으로 수행하기 위하여 서브메가요소, 메가절점단위 응축, 메가층단위 응축기법을 도입하여 여러 하위단계를 거쳐서 자유도가 소거되도록 하였다. 이러한 하위단계의 행렬응축을 위하여 도입한 방법들의 효율성을 검토해보기 위하여 표 7에서와 같이 각 단계의 행렬응축을 Guyan 응축기법을 이용했을 때와 본 연구에서 제안한 방법을 이용했을 때 소요되는 계산시간을 비교하였다. 표에서 보는 바와 같이 각 하위단계에서 본 연구에서 제안한 방법을 사용하면 일반적인 Guyan 방법을 사용할 때에 비하여 절반 이하로 소요시간을 줄일 수 있는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안한 다단계 응축기법을 사용하여 메가골조구조물의 응축모델을 생성한다면 전체 약 387초의 시간이 소요되므로 원형모델의

생성시간에 비해서 많은 추가시간 없이 효율적인 응축모델을 생성할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 제안한 다단계 모델응축기법의 정확성을 검토하기 위하여 그림 8에 나타난 100층 메가골조모델의 원형모델과 응축모델을 이용하여 고유치해석을 수행한 후 각 모델의 고유진동주기를 표 8에 비교하였다. 응축모델을 통해서 5개의 진동모드만 계산할 수 있으므로 5차모드까지의 고유진동주기를 비교하였다. 표에서 볼 수 있듯이 두 모델간의 오차는 최대 2% 이내이기 때문에 본 연구에서 제안한 방법으로 생성한 응축모델을 이용하여 원형모델의 동적 거동을 충분히 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 메가골조구조물에 대한 준능동 TMD의 제어성능 검토

본 절에서는 그림 8에서 소개한 횡하중을 받는 100층의 메가골조구조물의 사용성 및 안전성을 향상시키기 위하여 진동제어를 수행하였다. 이를 위해서 다단계 행렬응축기법을 사용하여 생성한 응축모델을 이용한 제어를 수행하였고 이때 일반적인 TMD 및 STMD의 성능을 비교 검토하여 보았다. TMD 및 STMD의 질량은 예제구조물의 1차모드 유효질량의 1%인 42.31ton으로 두었고 표 2에 의한 최적 진동수비 및 감쇠비는 8층 예제와 같으므로 TMD의 주기는 8.85초, 감쇠비는 4.98%로 두었다. STMD의 강성은 TMD와 같게 두었으며 3장에 나타난 MR 감쇠기를 사용하였다. 조화하중을 응축모델의 각 층에 그림 8(b)에 나타난 것과

〈표 7〉 강성 및 질량행렬 구성에 소요되는 시간

(단위: 초)

수치해석모델	응축방법		시간	
원형모델	-		305.938	
응축모델	한번에 응축		n/a	
	다단계 응축	메가요소	Guyan 응축	411.078
			서브메가요소	105.391
	단위 메가골조	전체구조물	Guyan 응축	362.453
			메가절점단위 응축	141.891
		단위 메가골조	Guyan 응축	283.266
메가층단위 응축			141.641	

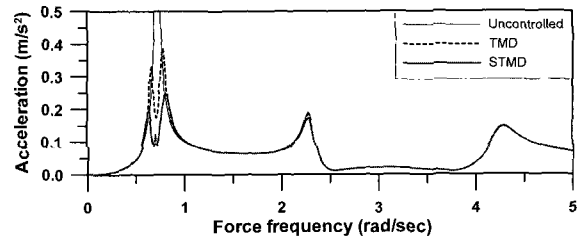
〈표 8〉 고유진동주기의 비교

(단위: 초)

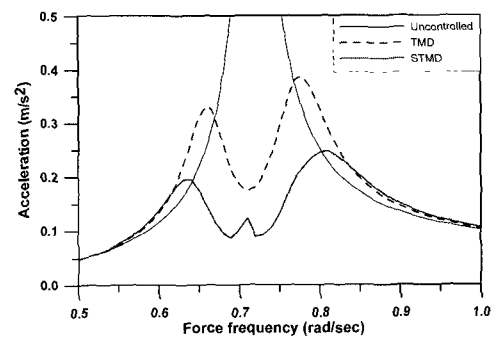
모드번호	원형모델	응축모델	오차(%)
1	8.74	8.74	0.00
2	2.76	2.75	0.36
3	1.50	1.48	1.33
4	1.05	1.03	1.90
5	0.84	0.83	1.19

같이 가하여 수치해석을 수행하였고 이 때 조화하중의 진동수를 변화 시켜서 이에 따른 메가골구조조물 최상층의 가속도 응답을 그림 9에 나타내었다. 여러 가지 구조물의 동적응답 중에서 고층건물의 사용성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 RMS 가속도를 각각의 제어조건에 대하여 비교하였다. 그림 9에서 보는 바와 같이 조화하중의 진동수를 0에서 5rad/sec까지 변화시켜서 해석을 수행하였는데 이 진동수 범위 안에 구조물의 3차모드까지 포함되므로 3개의 공진대역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. TMD나 STMD를 사용한 진동제어 효과는 1차 및 2차모드 진동수 대역에서는 제어하지 않은 경우에 비하여 탁월하고 그 이상의 모드에서는 별 차이가 없는 것을 그림 9를 통해서 확인할 수 있다. 구조물의 1차 및 2차모드 진동수 대역에서 진동 제어효과를 보다 정확하게 파악하기 위하여 이 두 대역의 가속도 응답을 확대해서 그림 10 및 11에 나타내었다. 그림 10의 1차모드 진동수 대역에서 각 제어조건에 따른 가속도 응답의 차이를 보면 구조물의 피해를 많이 유발할 수 있는 공진대역에서는 STMD가 TMD에 비하여 매우 우수한 제어성능을 발휘하고 그 이외의 대역에서는 거의 비슷한 제어성능을 나타낸다. 2차모드 진동수대역의 응답을 비교한 그림 11을 보면 1차모드 진동수대역 보다는 그 차이가 작지만 여전히 STMD가 TMD보다는 더 좋은 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다.

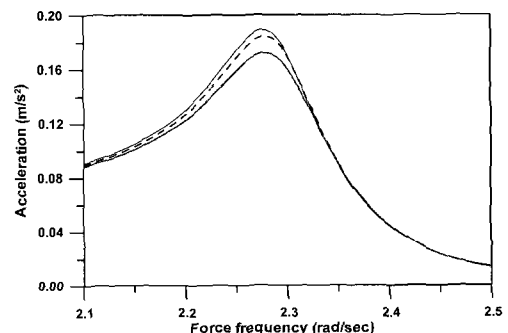
메가골구조조물과 같은 초고층건물의 사용성은 풍하중에 의해서 주로 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 풍하중을 받는 메가골구조조물에 대한 STMD의 제어성능을 검



〈그림 9〉 진동수 변화에 따른 최상층 RMS 가속도 응답



〈그림 10〉 1차모드 진동수대역의 응답



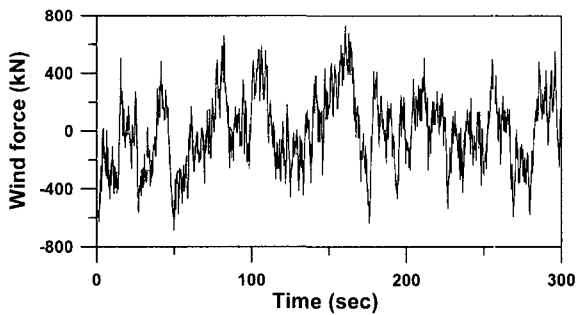
〈그림 11〉 2차모드 진동수대역의 응답

토하기 위하여 인공풍하중을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 풍하중은 일반적으로 평균풍속 성분과 변동풍속 성분으로 구성된 풍속으로부터 계산된다. 이 중에서 동적하중으로 작용하게 되는 변동풍속 성분은 일반적으로 정상적 확률과정으로 모형화할 수 있다. 풍하중은 각 층마다 작용하는 것으로 모형화하는 것이 정확하지만 계산상의 편의를 위해서 그림 8(b)에 나타난 5개의 자유도에 묶여서 작용하는 것으로 모형화하였다. 또한, 본 연구에서는 풍직각방향 하중은 고려하지 않고 풍방향 하중만을 고려하여 해석한다. 본 연구의 목적이 메가골조구조물의 실제적인 풍응답을 검토하는 것이 아니라 STMD와 TMD의 제어성능을 비교, 검토해보는 것이기 때문에 이러한 단순화과정을 거쳐서 수치해석을 수행하였다. 각 층에서의 평균풍속 및 평균풍하중은 각각 식 (6), (7)에 의하여 계산되고 여기서, u_i , z_i 및 u_r 은 각각 i 번째 층의 평균풍속, 층의 높이, 지상 10층에서의 기준 풍속(15m/sec)이고 α 는 0.4이며 ρ , A_i , C_D 는 각각 공기밀도(1.25kg/m³), i 번째 층의 풍하중에 노출된 면적, 그리고 드래그 상수로서 1.2를 사용하였다. 평균풍하중에 기초하여 변동풍하중의 교차스펙트럼 밀도를 계산할 수 있으며 교차스펙트럼밀도는 잘 알려진 Davenport⁽¹⁹⁾의 식을 사용하여 작성하였고 이 때 사용된 특성치 및 변동풍하중 스펙트럼의 시간이력변환 방법은 풍응답제어 벤치마크문제⁽²⁰⁾에서 제시된 값과 방법을 그대로 사용하였다. 생성된 풍하중의 시간이력과 파워스펙트럼을 그림 12에 나타내었다.

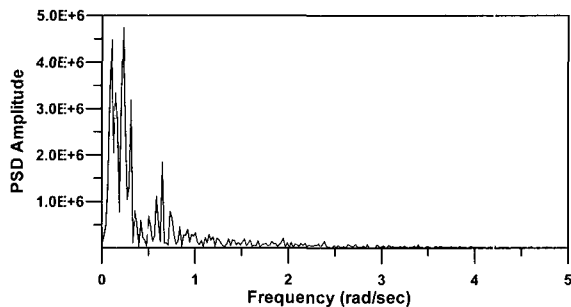
$$u_i = u_r \left(\frac{z_i}{10} \right)^\alpha \tag{6}$$

$$\overline{w_i} = \frac{1}{2} \rho A_i C_D u_i^2 \tag{7}$$

인공풍하중이 가해질 때 각 제어조건에 따른 메가골조구조물 최상층의 변위시간이력 및 가속도 시간이력을 그림 13과 14에 각각 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 TMD와 STMD를 사용할 경우에는 제어하지 않았을 때에 비하여 메가골조구조물의 응답을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 시간이력을 보면 풍하중이 가해지기 시작하는 초기보다는 어느 정도 진동이 발생한 이후에 TMD 및 STMD의 제어 성능이 효과적으로 발휘되는 것을 볼 수 있다. 이것은 동조 질량감쇠기가 제어성능을 제대로 나타내기 위해서는 충분한 동적움직임이 필요하기 때문이다. 그래프를 통해서 메가골조구조물의 풍응답 제어에 STMD가 TMD보다 더 우수한 성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있지만 이를 보다 정량적으로 검토해보기 위하여 표 8 및 9에 구조물의 변위응답과 가속도응답의 최대치 및 RMS값을 비교하여 나타내었다. 표 8의 구조물 변위응답을 보면 TMD를 사용할 경우에는 제어하지 않았을 경우에 비하여 구조물의 최대변위를 67.2%로, 그리고 RMS 변위는 66.4%로 줄일 수 있다. STMD를 사용하였을 경우에는 TMD를 사용하였을 때에 비하여 최대 변위는 8.9%, RMS 변위는 10.4%를 더욱 줄일 수 있는 것을

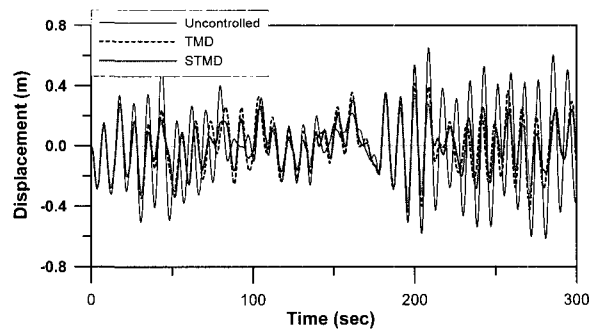


(a) 하중 시간이력

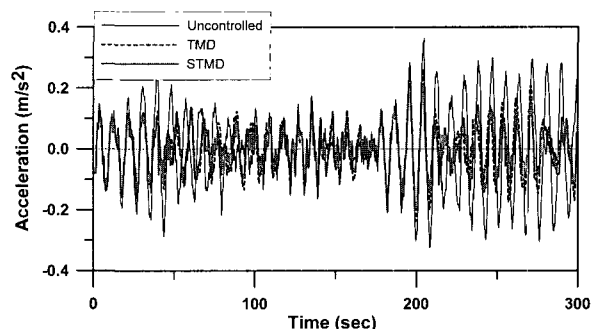


(b) 파워 스펙트럼

<그림 12> 풍하중



<그림 13> 구조물의 최상층 변위시간이력



<그림 14> 구조물의 최상층 가속도시간이력

〈표 9〉 구조물의 변위응답

	Displacement(m)	
	Max. (p^*)	RMS (p)
Uncontrolled	0.650 (1.000)	0.259 (1.000)
TMD	0.437 (0.672)	0.172 (0.664)
STMD	0.379 (0.583)	0.145 (0.560)

〈표 10〉 구조물의 가속도응답

	Acceleration(m/s^2)	
	Max. (p)	RMS (p)
Uncontrolled	0.3631 (1.000)	0.1314 (1.000)
TMD	0.2635 (0.726)	0.0807 (0.614)
STMD	0.2166 (0.597)	0.0686 (0.522)

$*p = \frac{R_C}{R_U}$ (p : Control Performance, R_C : Controlled response R_U : Uncontrolled response)

알 수 있다. 또한 거주자의 심리적 안전성에 영향을 미치는 가속도응답의 경우에는 표 9에 나타난 바와 같이 STMD를 사용하였을 경우에는 TMD를 사용하였을 때에 비하여 최대 가속도는 12.9%, RMS 가속도는 9.4%를 각각 더욱 줄일 수 있다. 이러한 두 제어장치의 제어성능 차이는 공진 조화하중을 가하였을 때와 비교하면 작아진 것을 알 수 있다. 이것은 그림 9-11을 통해서 알 수 있듯이 가해지는 하중이 주구조물의 공진대역과 일치하는 진동수 성분을 주로 포함하고 있다면 TMD와 STMD의 제어성능이 많은 차이를 나타내지만 공진대역을 벗어나는 진동수 성분을 주로 포함하고 있다면 TMD와 STMD의 제어성능 차이가 거의 나지 않기 때문이다. 즉, 그림 12(b)의 풍하중 파워스펙트럼을 보면 5rad/sec 이하의 진동수 성분이 주로 포함된 것을 알 수 있는데 이것은 메가골조구조물의 1차모드 진동수인 0.72rad/sec보다 작은 값으로서 예제구조물에 피해를 일으킬 수 있는 공진대역의 진동수성분이 적게 포함된 것으로 생각할 수 있다. 따라서 구조물에 큰 동적응답을 유발할 수 있는 풍하중을 사용하여 메가골조구조물에 대한 제어를 수행한다면 STMD의 제어성능은 TMD에 비하여 더욱 탁월한 효과를 나타낼 수 있을 것으로 기대된다. 즉, 구조물에 큰 피해를 주는 공진을 일으킬 수 있는 풍하중에 대해서는 TMD에 비하여 탁월한 동적응답 저감효과를 얻을 수 있기 때문에 구조물의 안전성을 고려한다면 STMD의 활용가치가 매우 클 것으로 판단된다. 또한 구조물에 피해가 발생하여 전원이 차단되어서 STMD가 제대로 작동하지 못한다고 할지라도 MR 감쇠기는 수동감쇠기 역할을 하므로 여전히 수동 TMD로서의 역할을 수행할 수 있다. 따라서 STMD를 이용하면 일반적인 수동 TMD 수준의 안정성을 확보하면서도 TMD 보다 우수

한 제어성능을 발휘할 수 있으므로 메가골조구조물 제어에 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

5. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 횡하중을 받는 메가골조구조물의 진동제어를 위하여 준능동 동조질량감쇠기를 적용하였고 그 제어성능을 검토하여 보았다. 메가골조구조물의 일반적인 유한요소 해석모델은 매우 많은 수의 자유도를 가지게 되므로 원형모델을 사용한 제어가 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 다단계 행렬응축기법을 이용하여 메가골조구조물의 응축모델을 생성한 후 STMD를 이용한 제어를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고층건물의 응축모델을 생성하기 위해서 일반적으로 Guyan 응축기법이 널리 사용되고 있다. 그러나 이 방법을 메가골조구조물과 같이 수 만개 이상의 자유도를 가지는 초대형 구조물의 응축모델을 생성하는데 적용하면 너무 많은 자유도를 한꺼번에 소거하게 되어 작업의 효율성이 저하되거나 개인용 컴퓨터에서는 응축이 불가능하게 된다. 따라서 본 연구에서는 메가골조구조물의 구조적 특징을 활용하여 메가요소 개념을 도입하였고 이를 조합하여 전체구조물을 구성하는 다단계 행렬응축기법을 도입함으로써 메가골조구조물의 응축모델을 매우 효율적으로 생성할 수 있는 응축기법을 제안하였다.
2. 본 연구에서 제안한 다단계 행렬응축기법으로 생성한 메가골조구조물의 응축모델은 원형모델의 동적특성을 매우 정확하게 나타낼 수 있는 것을 확인하였다. 생성된 응축모델은 제어하지 않은 상태의 동적응답 뿐만 아니라 TMD 및 STMD를 사용하여 제어한 메가골조구조물의 제어응답 또한 매우 정확하게 예측할 수 있었다.
3. 횡방향 하중을 받는 메가골조구조물의 진동제어에 동조질량감쇠기가 효과적인 제어성능을 발휘하는 것을 확인하였다. 인공풍하중을 사용한 예제해석 결과 STMD가 일반적인 수동 TMD보다 약 10% 내외의 제어성능 향상을 나타내었다. 이러한 제어성능의 차이는 구조물에 피해를 야기할 수 있는 공진하중이 가해질 때 더욱 커질 것으로 예상된다. 그러나 STMD를 운용하기 위해서는 수동 TMD에서는 필요 없는 각종 센서와 컴퓨터 등의 유지관리가 필요하므로 실제 건물에 적용할 때에는 이에 따르는 경제성 문제를 검토해야할 것으로 판단된다.
4. 동조질량감쇠기를 사용하여 메가골조구조물을 제어할 때 저차모드에서는 우수한 제어성능을 발휘하지만 고차모드로 갈수록 제어성능이 감소하는 것을 확인하였다. 따라서

이러한 제어성능 감소의 원인과 고차모드를 효과적으로 제어하기 위한 방법에 대한 연구가 추후에 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Ryszard, M.K., Rpbert, S. and Max, B.K., *Structural Systems for Tall Buildings*, McGraw-Hill, Inc., 1995.
- Wolfgang, S., *The Vertical Building Structure*, Van Nostrand Reinhold, New York., 1990.
- Feng, M.Q. and Mita, A., "Vibration control of tall building using mega subconfiguration," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 121, No. 10, 1995, pp. 1082-1088.
- Web page of TAKWNAKA's Engineering. http://www.takenaka.co.jp/takenaka_e/engi_e/c02/c02.html
- Keiji S., Shinji M., Yoshitaka Y. and Kazuo T., "Active/passive vibration control systems for tall buildings," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 7, 1998, pp. 588-598.
- Ahlatwat A.S. and Ramaswamy A., "Multiobjective Optimal Fuzzy Logic Control System for Response Control of Wind-Excited Tall Buildings," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 130, No. 4, 2004, pp. 524-530.
- Kareem, A. and Kijewski, T., "Mitigation of motions of tall buildings with specific examples of recent applications," *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, 1999, pp. 201-251
- Nishitani, A. and Inoue, Y., "Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan," *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, Vol. 30, 2001, pp. 1565-1574.
- Dyke, S.J., "Current directions in structural control in the US," *9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, Kobe, Japan, June 13-16, 2005, pp. 1-22.
- Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E, Soong, T.T., Spencer, B.H. and Yao, T.P., "Structural control; Past, Present, and Future," *ASCE, Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
- Symans, M.D and Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 469-487.
- Jansen, L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
- Symans, M.D and Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, 1999, pp. 469-487.
- Jansen, L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
- Moore, B.C., "Principle component analysis in linear system: controllability, observability, and model reduction," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol. 26, No. 1, 1981, pp. 17-32.
- Yang, J.N. and Liu, M.J., "Optimal critical-mode control of building under seismic load," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 108, 1982, pp. 1167-1185.
- Guyan R.J., "Reduction of stiffness and mass matrix," *AIAA Journal*, Vol. 3, No. 2, 1965, pp. 380.
- Warburton, G.B., "Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters," *Earthquake Engrg. and Struct. Dyn.*, Vol. 10, 1982, pp. 381-401.
- Spencer, B.F. Jr., Dyke, S.J., Sain, M.K. and Carlson, J.D., "Phenomenological model for magnetorheological dampers," *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.123, No.3, 1997, pp. 230-238.
- Karnopp, D., Crosby M.J. and Harwood R.A., "Vibration control using semi-active force generators," *J. of Engineering for Industry, ASME*, Vol. 96, No. 2, 1974, pp. 619-626.
- Davenport A.G., "Gust Loading Factors," *J. Struct. Div.*, ASCE, Vol. 93, No. 3, 1967, pp. 11-34.
- Yang, J.N., Wu, J.C., Samali, B. and Agrawal, A.K., "A benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings," *Proc., 2nd World Conf. on Structural Control*, Wiley, New York, 1999, pp. 1408-1416.