

# 최상층면진시스템을 활용한 고층건물의 진동제어

## Vibration Control of High-rise Building Structures using Top-story Isolation Systems

김 태 호\*  
Kim, Tae-Ho

김 현 수\*\*  
Kim, Hyun-Su

### 요 약

본 연구에서는 최상층면진시스템을 적용한 고층건물의 진동제어 가능성을 검토하여 보았다. 이를 위하여 20층 및 50층 건물을 예제구조물로 선택하였고 El Centro 남북방향 성분을 지진하중으로 사용하여 수치해석을 수행하였다. 그리고 인공풍하중을 사용하여 풍하중에 대한 예제구조물의 사용성을 검토하였다. 면진되는 상부층의 수를 변화시켜가면서 구조물의 응답을 평가함으로써 최적의 면진질량에 대해서 검토하였다. 또한 상부층면진시스템의 고유진동주기 변화에 따른 진동제어성능의 변화를 고정기초구조물과 비교하여 검토하였다. 해석결과 최상층면진시스템은 동조질량감쇠기로서 활용될 수 있으며 풍하중 및 지진하중에 대한 고층건물의 동적응답을 효과적으로 저감시킬 수 있었다.

### Abstract

In this study, the possibility of vibration control of high-rise building structures by applying top-story isolation has been investigated. To this end, El Centro NS (1940) earthquake load is applied to 20- and 50-story building structures for numerical analysis. Artificial wind loads are used to evaluate the serviceability of example structures against wind vibration. As the number of isolated stories of example buildings is changed, structural responses has been evaluated to investigate optimal isolated building mass. And the natural period of isolation systems for top-story isolation is varied to investigate the improvement of control performance compared with the fixed base structure. Based on the analytical results, the top-story isolation system can be used as a tuned mass damper and effectively reduce the structural responses of high-rise buildings against wind and seismic loads.

키워드 : 진동제어, 고층건물, 중간층면진, 최상층면진, 면진장치

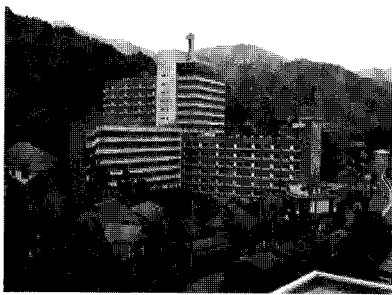
Keywords : vibration control, high-rise buildings, mid-story isolation, top-story isolation, seismic isolation system

## 1. 서 론

일반적으로 지진하중의 에너지는 풍하중에 비하여 진동주기가 짧은 영역에 집중되어 있으므로 고층건물의 피해보다 중저층 건물의 피해가 더 크게 발생할 위험이 있다. 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<sup>1)</sup>. 이러한 중저층 건물용으로 개발된 일반적인 면진시스템을 고층 구조물에 사용할 경우에는 다양한 문제가 발생할 수 있다. 고층 건물은 기본적으로 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. 따라서 최근에는 건축물을 부분적으로 분리시켜서 면진기술을 적용하는 중간층면진이 많이 시도되고 있다<sup>2)</sup>. 실제로 일본에서는 1995년 이후 구조물의 내진 보수, 보강을 위하여

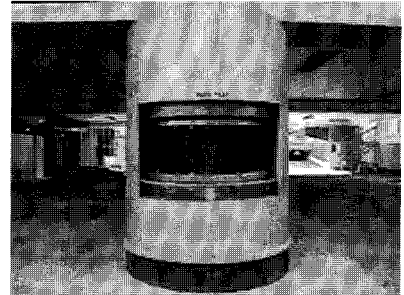
\* 정희원 · 대림산업(주) 기술연구소 주임연구원, 공학박사  
\*\* 교신저자, 정희원 · 선문대학교 건축학부 전임강사  
Tel: 031-530-2315 Fax: 031-530-2839  
E-mail : hskim72@sunmoon.ac.kr



(a) 湯河原研修 club



(b) 鹿島테라하우스



(c) 중간층 면진시스템

<그림 1> 중간층 면진시스템이 설치된 구조물

면진구조시스템을 다수 적용하였으며 <그림 1>에 나타난 바와 같이 구조물의 중간층에 면진시스템이 설치된 사례도 다수 있다<sup>1)</sup>. 그러나 이러한 중간층면진시스템을 최고층 구조물에 적용하기에는 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다. 건물의 중간층에 면진시스템을 도입하면 경우에는 면진층 이하의 하부구조물은 반드시 탄성거동을 하여야 하기 때문에 반응수정계수를 1로 사용함으로써 발생하는 설계상의 문제가 유발될 수 있다<sup>3)</sup>. 또한 과도한 면진층 변위는 구조물의 안정성에 문제를 일으킬 수도 있다. 따라서 고층 구조물의 경우에는 중간층 면진 보다는 건물 최상부의 한 개 층만을 면진시킴으로서 최상층을 TMD (Tuned Mass Damper)와 같은 장치로서 활용하여 하부구조물의 설계에 여유를 둘 수 있으며 상부 구조물의 질량이 상대적으로 크지 않아 면진장치의 설계도 충분한 여유를 가질 수 있는 방법이 제안되었다<sup>4)</sup>. 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 2>에 나타난 Armenia에 시공된 9층 RC 골조 건물을 들 수 있다. 이 건물은 건물의 최상부에 면진장치를 설치한 경우로서 내진성능을 향상시키기 위한 목적으로 프로젝트가 수행되었다. 이 프로젝트는 구조물의 최상층을 지지하는 16개의 기둥에 고감쇠 적중고무받침을 설치하였다. <그림 2(b)>에서 보는 바와 같이 최상층 하부에 철골트러스를 설치하여 16개의 면진장치에 동일한 동적 거동이 발생하도록 하였다.



(a) 최상층 면진 건물

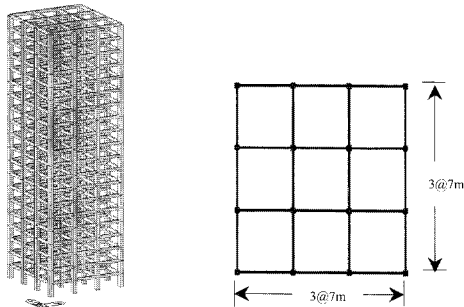
(b) 면진시스템

<그림 2> 최상층 면진시스템이 설치된 구조물

고층 건물의 최상층 면진을 활용한 진동제어에 대한 가능성 및 필요성이 근래에 대두되고 있지만 아직 충분한 연구가 수행되고 있지 못하다. 따라서 본 연구에서는 최상층에 면진시스템을 적용하여 고층 건축물의 횡진동 저감 가능성을 보다 체계적으로 검토하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 우선 20층 건물을 대상으로 중간층 면진의 효율성을 검토하고 면진되는 상부층의 수에 따른 응답을 비교분석하였다. 그리고 최상층 면진을 적용한 50층의 예제구조물을 대상으로 지진하중 및 풍하중에 대한 진동저감 가능성을 확인하여 보았다. 해석에 사용한 풍하중은 Kaimal 스펙트럼<sup>5)</sup>을 이용하여 작성하였으며 예제구조물의 사용성 검토를 위하여 사용되었다. 사용한 면진장치의 주기를 예제구조물의 1차진동주기의 0.5, 1, 2배로 조정하여 응답을 검토하였으며 이를 바탕으로 최상층 면진시스템의 TMD로서의 활용 가능성을 확인하였다.

## 2. 중간층면진의 효율성 검토

건물의 최상층을 면진시키는 것은 중간층 면진의 특별한 경우이므로 최상층 면진의 효율성을 파악하기 전에 우선 중간층 면진이 가지는 장단점을 살펴볼 필요가 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 MIDAS/Gen을 이용하여 <그림 3>에 나타낸 양방향 3경간이고 층고 3.5m이며 감쇠율은 5%인 20층 예제 구조물의 해석을 수행하였다. 이때 사용한 해석모델은 <표 1>에 나타낸 바와 같이 면진시킨 상부층의 개수에 따라서 총 8개를 사용하였고 각 모델의 면진층 높이는 50cm로 하였다. <표 2>에는 x 방향으로 발생하는 주요 모드에 대한 주기 및 질량참여율을 나타내었다. 지진해석을 위한 지반가속도로는 El Centro NS(1940)을 사용하였다.



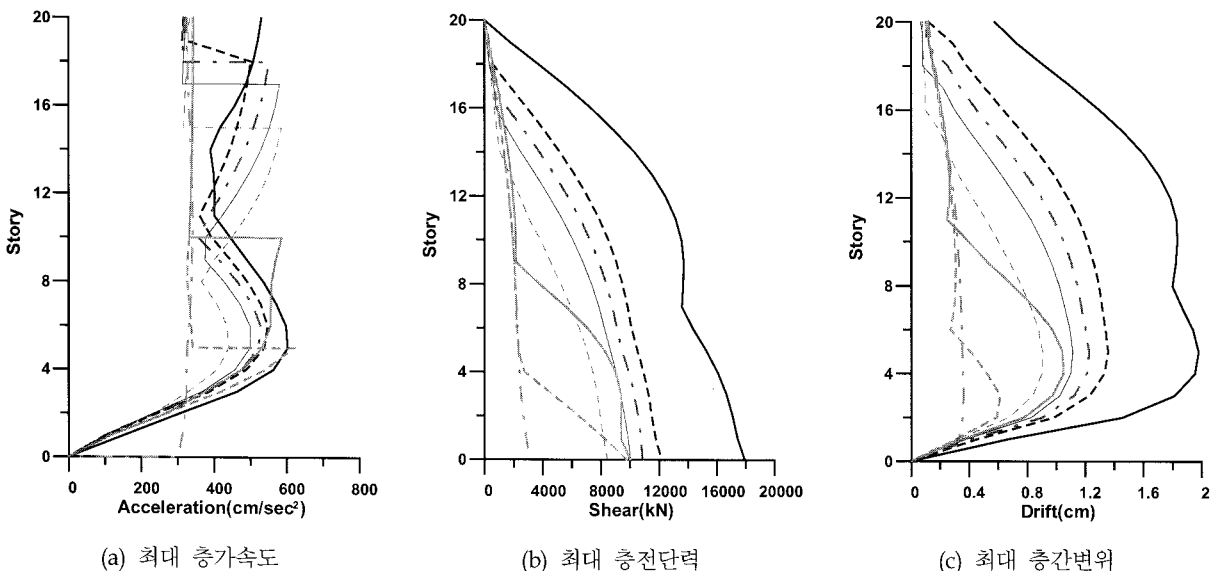
(a) 해석모델 (b) 평면형상  
<그림 3> 20층 예제 구조물

<표 1> 중간층 면진 해석모델

해석모델	특징
Fix	고정기초
MI-1	상부 1개층을 면진
MI-2	상부 2개층을 면진
MI-3	상부 3개층을 면진
MI-5	상부 5개층을 면진
MI-10	상부 10개층을 면진
MI-15	상부 15개층을 면진
BI	기초 면진

<표 2> 해석모델별 진동주기 및 질량참여율

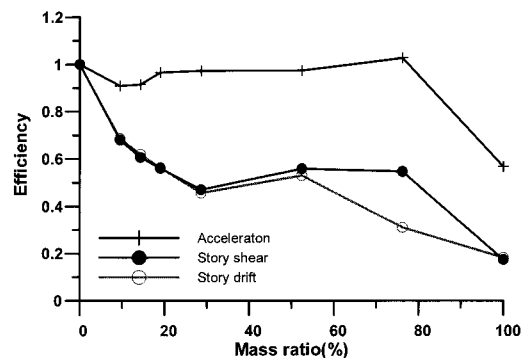
해석모델	1차모드	2차모드	3차모드
Fix	2.13초 (77.38%)	0.68초 (10.39%)	0.38초 (3.84%)
MI-1	6.09초 (11.21%)	1.93초 (68.16%)	0.62초 (9.43%)
MI-2	6.14초 (17.09%)	1.80초 (63.42%)	0.58초 (8.89%)
MI-3	6.17초 (22.62%)	1.68초 (59.01%)	0.54초 (8.53%)
MI-5	6.23초 (32.94%)	1.44초 (50.90%)	0.46초 (0.01%)
MI-10	6.32초 (56.30%)	0.89초 (32.98%)	0.61초 (0.01%)
MI-15	6.53초 (78.82%)	0.91초 (0.11%)	0.39초 (0.61%)
BI	6.38초 (99.67%)	1.17초 (0.31%)	0.52초 (0.01%)



(a) 최대 층가속도 (b) 최대 층전단력 (c) 최대 층간변위  
<그림 4> 20층 예제 구조물의 최대응답

표에 나타난 바와 같이 고정기초 구조물의 1차모드 진동주기는 2.13초이다. 본 연구에서는 이 주기의 약 3배인 6초를 면진층의 목표주기로 하였고 감쇠율은 10%로 가정하였다. 이에 따라 상부층의 질량을 기준으로 면진장치의 강성 및 감쇠값을 조절하였다. 그러나 예제구조물은 다자유도 구조물로서 면진층의 상부층 또는 하부층의 영향으로 각 해석 모델의 1차모드 고유진동주기가 목표주기보다 조금 더 늘어난 것을 알 수 있다. 즉, 기초면진의 경우에는 1차모드의 진동주기가 상부질량의 영향으로 0.38초 정도 길게 나타났다. 이에 비하여 상부층 질량이 작을 경우는 목표주기에 상당히 접근한 반면 15개 층을 면진시킨 경우에는 0.53초 정도 길게 나타나 오히려 기초면진모델(BI)보다 더 긴 주기를 가졌다. 이것은 상부 구조물의 질량에 더불어 하부 구조물의 영향이 크게 반영된 것으로 보이며 중간층 면진을 할 경우에 목표주기 설정시 이를 반드시 고려해야함을 알 수 있다. 면진층을 기준으로 상부질량이 움직이는 모드가 1차모드이므로 면진되는 층수가 증가할수록 1차모드의 질량참여율이 증가하는 것을 알 수 있다. 20층 예제구조물의 해석모델별 최대 가속도 응답, 최대 층전단력 및 최대 층간변위 응답을 그림 4에 나타내었다. 그림에 나타난 응답들을 살펴보면 모든 응답이 면진층 상부와 하부로 구분되어 서로 다른 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 면진층 상부의 응답은 고정기초모델(Fix)에 비하여 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있으며 면진층 하부의 응답도 상부층보다는 작지만 고정기초모델에 비해서는 상당히 우수한 응답저감효과를 나타내었다. 이러한 응답저감효과는 면진되는 상부층의 질량비에 따라서 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 구조물의 최대 층가속도 응답의 경우에는 면진층에서 큰 전이가 발생하여 면진층 상부의 응답은 대폭 줄어들지만 면진층 하부의 응답은 고정기초모델과 비교하여 줄어들지 않거나 경우에 따라서는 오히려 더 큰 응답을 나타내기도 하였다. 이 경우에 면진되는 상부층이 작을수록 면진층에서 층가속도의 증가량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 면진층 하부에서의 가속도 응답 저감이 크지 않더라도 지진하중에 의하여 큰 피해를 유발할 수 있는 층전단력 및 층간변위에

서 매우 우수한 응답저감효과를 발휘한 것을 <그림 4(b)>를 통해서 알 수 있다. 중간층 면진을 한 경우에는 기초면진의 경우보다는 효율성이 떨어지지만 밀면전단력의 경우 대략 고정기초모델의 50%정도만이 나타났다. 층간변위의 경우는 면진 상부층이 많으면 많을수록 좋은 결과를 보여주는 것으로 파악되었으며 1개 층만 면진시키더라도 30%이상의 효율을 거두는 것으로 나타났다. 구조물 전체 질량에 대한 상부층 질량의 비에 따른 최대응답저감의 효율성을 <그림 5>에 나타내었다. 그림에서 0%는 고정기초모델을 의미하고 100%는 기초면진모델을 의미한다. 최대응답저감의 효율성은 면진모델의 응답을 고정기초모델의 응답으로 나누어 정규화한 값으로 나타내었다. 이 그래프를 보면 상부층의 질량이 약 30%정도면 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 전술한 바와 같이 이러한 중간층 면진시스템은 구조물의 안정성 측면 및 면진시스템 설계상의 문제점 등의 이유로 고층건물에는 적용하기가 어렵다. 따라서 최상층 면진시스템의 필요성이 제기되었다. 예제건물의 최상층면진 모델인 MI-1을 살펴보면 가속도응답의 저감에 있어서는 큰 효율은 없지만 층전단력과 층간변위에는 30%정도 효율이 있는 것으로 파악되어 경제적인 내진설계도 가능함을 알 수 있다.



<그림 5> 질량비에 따른 제어성능

### 3. 인공풍하중

본 연구에서는 고층건물에 대한 최상층 면진의 진동제어효과를 검토해보기 위하여 <그림 3(b)>에 나타난 평면과 동일한 평면을 가지는 50층 구조물

을 예제 구조물로 사용하였다. 최상층 면진시스템을 적용한 예제 구조물에 대하여 지진하중과 풍하중을 가하여 수치해석을 수행하였다. 지진하중은 2장에서 사용한 것과 동일한 El Centro NS (1940)을 사용하였고 풍하중은 식 (1)의 Kaimal spectrum을 이용하여 작성한 인공풍하중을 사용하였으며 풍방향 성분만을 고려하여 해석을 수행하였다.

$$\frac{f S_U(z, f)}{\sigma_u^2} = \frac{6.8 f_L}{(1+10.2 f_L)^{5/3}} \quad \text{where} \quad f_L = \frac{f L_H(z)}{U_H(z)} \quad (1)$$

상호상관관계를 고려한 비대각 스펙트럼을 작성하기 위해서 decay constant를 10으로 하였으며 식 (2)를 이용하여 작성하였다.

$$S_{rs} = \sqrt{S_{rr}(f)S_{ss}(f)} \cdot \exp\left[-f \frac{k_z |z_r - z_s|}{(1/2)[U_H(z_r) + U_H(z_s)]}\right] \quad (2)$$

해석대상 건물의 파워스펙트럼은 1차원으로 n개의 층을 가진 경우에 대하여 산정하며 건물의 PSD의 시간이력변환을 위해서는 파워스펙트럼을 나타낼 수 있는 임의의 시간이력 작성이 필요하다. 이를 위하여 역 FFT과정이 필요하며 위상 등을 결정하기 위해서는 난수 추출이 필요하다. 시간이력변환과정<sup>6)</sup>은 Cholesky 분해기법을 통하여 하삼각행렬을 작성 후에 각 층에 대하여 정규분포를 따르는 위상각을 가지는 FFT함수(Xp)를 작성하고 역 FFT 작성을 통

하여 각 층의 풍속시간이력(xp)을 작성하였다<sup>7,8)</sup>.

$$x_p(n\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N X_p(k\Delta f) \exp(j \frac{2\pi kn}{N}) \quad (3)$$

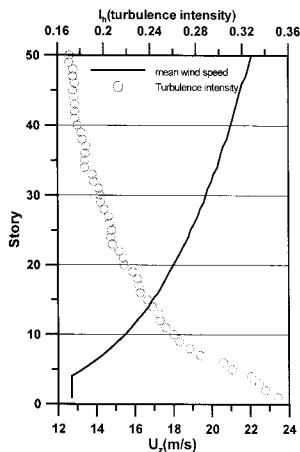
$$X_p(k\Delta f) = \sqrt{2 f_c N} \sum_{i=0}^R H_{pi}(k\Delta f) \zeta_{ik} \quad (4)$$

여기서  $H_{pi}$ 는 Cholesky 분해기법을 통하여 작성된 하삼각행렬이며  $\zeta_{ik}$ 는 평균이 "0"이고 분산이 "0.5"인 가우시안 복소난수(complex Gaussian random numbers)이며  $\Delta t = 1/2 f_c$ 로  $f_c$ 는 나이퀴스트 진동수(Nyquist frequency)이다. 이러한 방법으로 작성한 인공풍하중의 1층 및 25층 풍방향 변동 성분과 층수에 따른 평균풍속, 난류강도를 <그림 6>에 나타내었다. 예제 구조물은 강막가정을 적용하여 해석모형을 작성하였으며 각 층의 풍하중은 질량중심에 가하고 시간이력해석을 수행하였다.

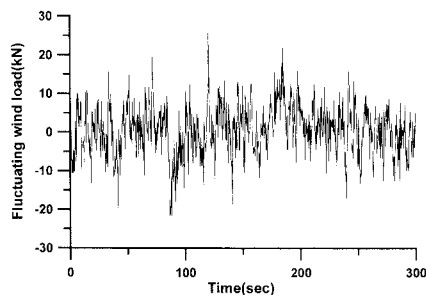
## 4. 예제해석

### 4.1 면진시스템의 주기에 따른 응답비교

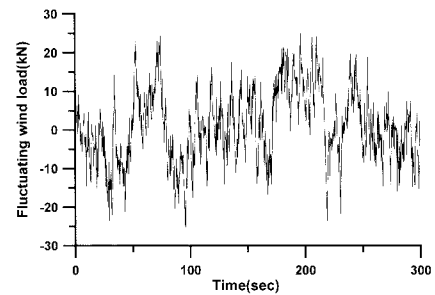
고층건축물은 지진하중에 대하여 충분히 안전하게 설계되더라도 풍하중에 의하여 사용성 문제를 일으키는 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 상부 1개층을 면진시켰을 경우에 대하여 지진하중 및 풍하중에 대한 응답을 살펴보고자 한다. 일반적으로 중저층 건



(a) 평균풍속 및 난류강도

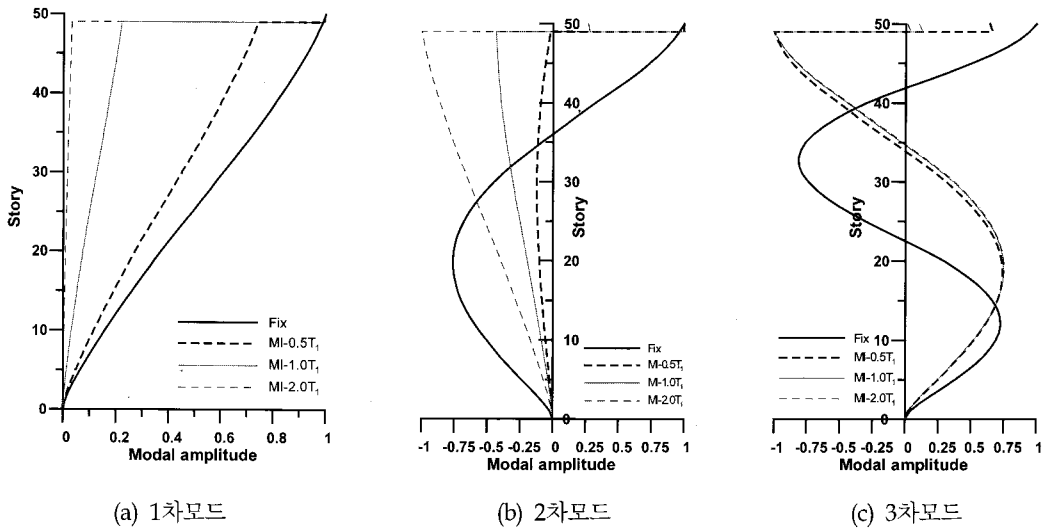


(b) 1층 풍방향 변동풍하중



(c) 25층 풍방향 변동풍하중

<그림 6> 해석에서 사용한 인공풍하중



(a) 1차모드 (b) 2차모드 (c) 3차모드  
 <그림 7> 면진주기에 따른 해석모델별 주요모드형상

물을 면진시키는 경우에는 고정기초 구조물 주기에 비하여 2~3배 정도 길게 만드는 경우 일반적이다. 그러나 고층구조물은 주기가 길기 때문에 본 연구에서는 고정기초구조물의 주기에 대하여 2배의 주기를 가지는 면진장치를 사용하였다. 그리고 TMD와 유사한 거동을 유발할 수 있도록 고정기초 구조물의 주기와 동일한 주기를 가지는 면진장치를 사용하였고 추가적으로 고정기초 구조물 주기의 0.5배로 설계하였을 경우에 대하여 응답을 비교하였다. 면진주기에 따른 해석모델별 주요모드형상을 <그림 7>에 나타내었으며 <표 3>에 3가지 방법으로 작성된 해석모델의 주요 모드 주기와 질량참여율을 나타내었다.

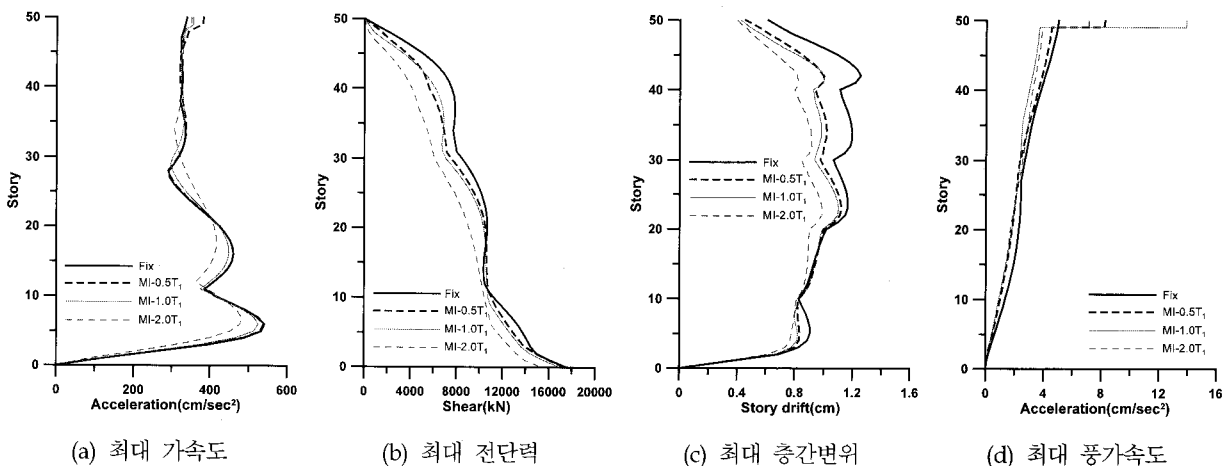
모드형상을 살펴보면 모드형상의 크기차이는 있지만 면진시스템을 적용한 세 가지 모델의 모드형상 패턴은 동일한 것을 알 수 있다. 다만 면진장치

의 강성이 작을수록 하부 주구조물과 상부구조물의 모드형상차이가 커지는 것으로 나타났다.

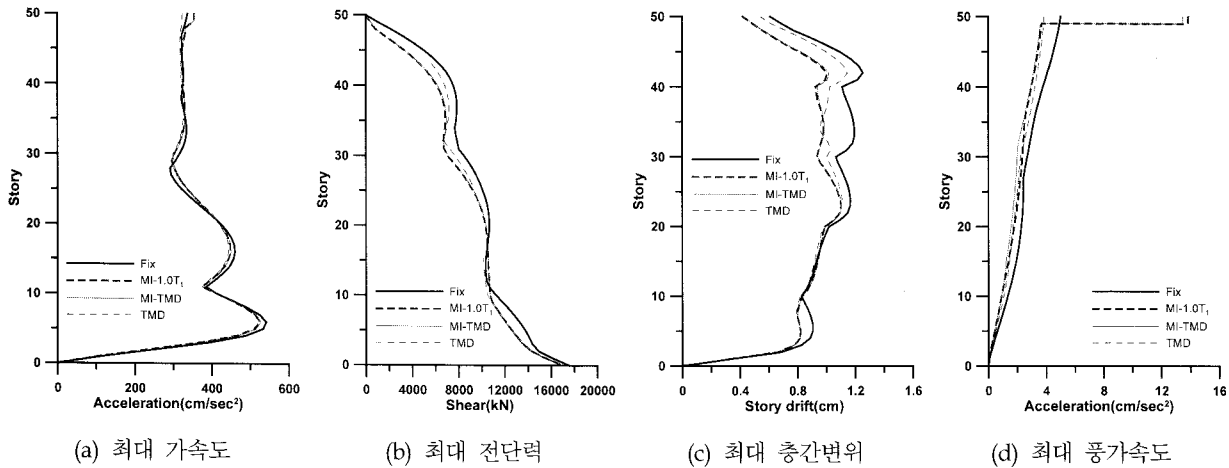
<표 3> 해석모델별 진동주기 및 질량참여율

해석모델	1차모드	2차모드	3차모드
Fix	5.58초 (69.32%)	1.93초 (16.30%)	1.08초 (4.53%)
MI-0.5T1	5.71초 (67.06%)	2.83초 (5.82%)	1.79초 (13.47%)
MI-1.0T1	6.50초 (34.95%)	4.78초 (36.05%)	1.84초 (15.25%)
MI-2.0T1	11.64초 (5.58%)	5.30초 (65.17%)	1.85초 (15.48%)

고정기초구조물과의 모드형상차이를 살펴보면 고정기초구조물의 1차 모드형상이 면진모델에서는 상



(a) 최대 가속도 (b) 최대 전단력 (c) 최대 층간변위 (d) 최대 풍가속도  
 <그림 8> 면진주기에 따른 해석모델별 최대응답



(a) 최대 가속도 (b) 최대 전단력 (c) 최대 층간변위 (d) 최대 풍가속도  
 <그림 9> 면진시스템의 TMD활용 모델의 응답비교

부구조물이 동일한 위상을 가지는 경우와 반대의 위상을 가지는 경우로 1, 2차 모드로 각각 분리되어 나타났으며 이에 따라 나머지 모드는 하나씩 밀려서 나타났다. 해석모델별 질량참여율을 살펴보면 고정기초 모델은 모드의 순서에 따라 질량참여율이 나타났지만 면진모델의 경우는 면진장치의 강성이 작아짐에 따라 1차 모드 질량참여율도 작아지는 것으로 나타났다. 고정기초구조물과 동일한 주기로 모델링한 MI-1.0T1 모델의 경우는 1차 모드와 2차모드의 질량참여율이 거의 동일한 것으로 나타났다.

예제해석결과 얻은 지진응답 및 풍응답을 <그림 8(a)-(c)> 및 <그림 8(d)>에 나타내었다. MI-2.0T1 모델이 비교대상 모델 중에서 가장 저감성능이 우수한 것으로 나타났으며 풍가속도응답의 경우는 MI-1.0T1 모델이 더 우수한 것으로 평가되었다. 이것은 풍하중의 경우에는 진동수성분이 집중되는 경향이 지진하중에 비해 덜하므로 구조물의 고유진동수 영역에서 가장 큰 응답이 발생하기 때문에 TMD와 유사한 메커니즘으로 거동하는 MI-1.0T1 모델이 가장 작은 풍가속도를 나타내는 것으로 판단된다. 지진응답에 대해서는 지진하중의 특성상 구조물이 장 주기로 갈수록 더 응답이 감소하므로 면진주기가 가장 긴 MI-2.0T1 모델이 가장 우수한 저감효과를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 이 경우에는 풍응답에 대해서도 어느 정도 저감효과를 보이는 것으로 나타나 효용성이 있는 모델로 판단된다. 반면 MI-0.5T1 모델은 고정기초모델보다는 개선된 응답을 보였으나 다른 모델보다는 성능이 떨어지는 것을

알 수 있다.

#### 4.2 TMD로서의 면진시스템 활용

본 절에서는 면진시스템 설계를 TMD의 설계방식으로 수행한 모델(MI-TMD)의 지진 및 풍응답을 검토함으로써 최상층면진시스템을 TMD로서 활용할 수 있는 가능성을 검토해 보고자한다. 이를 위하여 앞 절에서 살펴본 MI-1.0T1 모델 및 고정기초모델의 응답과 비교를 해보고 동일한 질량비를 가지는 TMD를 설치한 해석모델과도 비교해 보았다. 예제모델의 면진층 상부의 무게는 11,956kN이고 MI-1.0T1 모델의 질량비는 약 2.89%이며 상부층을 제외한 하부 주구조물의 1차모드 주기는 5.15초로 평가되었다. 이를 바탕으로 Warburton<sup>9)</sup>이 제시한 최적의 TMD 설계식을 이용하여 계산한 결과 목표 진동수는 0.19Hz로 나타났다. Fix 모델 상부에 TMD를 설치하는 경우의 목표 진동수는 0.175Hz로 계산되었으며 장치의 감쇠율은 면진의 경우와 동일하게 10%로 가정하였다. 최상부의 1개 층을 면진시켜 TMD와 같이 거동하게 하는 것의 구조적 장점은 구조물의 제어를 위하여 추가질량이 필요치 않다는 것이다. 해석모델별 지진응답 및 풍응답을 <그림 9>에 나타내었는데 모든 경우에 대해서 MI-1.0T1 모델과 MI-TMD 모델이 거의 비슷한 응답을 나타내었고 TMD를 설치한 모델에 비해서도 뒤떨어지지 않는 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 대부분의 경우에 TMD 모델보다 면진을 통하여 TMD와 같이 거동하도록 한 모델이 미세하지만 더 우수한 결과를 보이고 있는데 이것은 두 모델이 동일한 동적

메커니즘을 지나 하부 주구조물의 질량이 면진시스템의 경우가 조금 더 작기 때문에 TMD 시스템에 비하여 조금 작은 응답을 보이는 것으로 판단된다.

## 5. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 중간층 및 최상층 면진기법을 이용하여 고층 건축물의 지진응답 및 풍응답의 저감 가능성을 검토해보았으며 최상층 면진기술이 TMD와 같이 적용될 수 있는지 확인해 보았다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

기초를 면진시키는 방법이 가장 우수한 성능을 나타내지만 중간층 면진을 통해서도 지진응답을 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 이 경우 면진되는 층수가 많을수록 더욱 우수한 제어성능을 나타내었지만 전체질량의 30%정도만 면진시켜도 충분히 효과적인 응답을 얻을 수 있었다. 그리고 최상부 1개층을 면진시킬 경우 하부구조물의 주기와 동조시키거나 더 길게 하면 지진하중과 풍하중 모두에 대하여 응답을 효과적으로 줄일 수 있었다. 마지막으로 최상부 1개층을 면진시켜 TMD의 최적설계기준에 맞추어 면진시스템을 구성하면 TMD를 사용하는 것과 비슷한 구조적 성능을 나타낼 것으로 판단된다. 본 연구에서는 풍진동 성능평가를 위하여 풍방향 하중만을 사용하였지만 고층건물의 경우에 풍적각 방향의 응답이 더 크게 나타나므로 이에 대한 보완연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 면진대상이 되는 상부구조물의 용도를 고려한 연구나 최상층이 TMD와 같이 거동할 수 있도록 하는 실제적인 면진시스템의 개발 등에 관한 내용을 추가적으로 연구할 필요가 있다고 판단된다.

## 참고문헌

1. 김대곤, 이동근, 정재은, 남궁계홍(2001), "정형 및 비정형 건물에 대한 비선형 면진장치의 적용", 한국지진공학회 논문집, 제 5권, 1호, pp.37-44.
2. 김광염, 이동근 (2002), "중간층 면진시스템을 적용한 축소구조물의 동적거동", 대한건축학회 학술발표논문집, 제 22권, 1호.
3. ASCE(2006), Minimum Design Loads for Building and Other Structures.
4. M. G. Melkumyan(2002), Seismic isolation of civil buildings in Armenia, Prog. Struct. Engng Mater. Vol.4, No.4
5. E. Simiu and R. H. Scanlan(1996), Wind Effects on Structures. An Introduction to Wind Engineering.
6. L. E. Wittig, and A. K. Sinha(1975), "Simulation of multicorrelated random processes using the FFT algorithm.", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.58 No.3, pp.630-633.
7. C. Dyrbye and S. O. Hansen(1997), Wind Loads on Structures.
8. Y. Zhou, T. Kijewski and A. Kareem(2003), Aerodynamic Loads on Tall Buildings: An Interactive Database, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.129, No.3.
9. 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.

접수일자 : 2008년 8월 25일

심사완료일자 : 2008년 9월 29일

게재확정일자 : 2008년 10월 10일