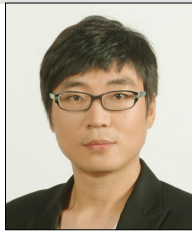


고층구조물의 연직진동 저감을 위한 하이브리드 제진장치

Vertical Vibration Control of a Tall Building Structure with Hybrid Control System



우 성 식*



이 상 현**



정 란***



황 재 승****

* 단국대학교 건축공학과 연구전담 조교수

** 단국대학교 건축공학과 부교수

*** 단국대학교 건축공학과 교수

**** 전남대학교 건축학부 교수

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

현대 건축기술의 발전은 건축물의 대형화 및 경량화를 가능하게 하였고, 전 세계적으로 단일 구조물에서 용도의 복합화가 이루어지고 있다. 이러한 추세 속에서 구조물에 진동을 발생시킬 수 있는 피트니스 센터, 극장 등의 편의시설이 주거 또는 사무 용도의 구조물에 인접하게 되면서, 사람의 활동 및 기계에 의한 진동이 건물의 사용성과 안전성에 영향을 미치게 되었다.

일례로 2009년 캐나다 토론토 38층 Black Tower 오피스 빌딩의 30층 사무실에서 진동에 따른 민원이 발생하였다. 정밀조사 결과 진동의 원인은 36~38층에 위치한 피트니스 센터에 의한 것으로 밝혀졌다. 1988년 미국 뉴욕에서는 4층에서 시작된 에어로빅운동이 10층에 바닥진동을 일으켜 민원이 발생하기도 하였다. 국내에서도 2011년 7월, 서울시 구의동에 위치한 39층 건물의 상층부에서 약 10분간 건물이 위 아래로 흔들리는 연직방향 진동이 발생하였으며 진동의 원인은 12층에서 행해진 에어로빅의 한 종류인 태보

에 의한 것으로 밝혀졌다. 이처럼 인간의 움직임은 건물에 막대한 영향을 끼칠 수 있으며 건물진동은 바로 붕괴에 대한 불안감으로 이어질 뿐 아니라 사용성에도 많은 영향을 미친다.

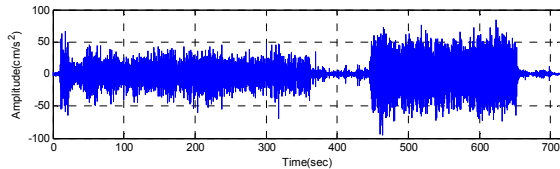
고층 및 대형 구조물이 많은 미국과 캐나다에서 진동사고가 보고되면서, 이에 대한 개선방안으로 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 일반적으로 동조질량감쇠기는 보행하중과 교통하중에 의한 교량구조물의 수직진동과 바람하중에 의한 건물의 횡방향 진동을 제어하는 목적으로 사용되는데 Mahdi Setareh (1992) 등은 인간의 움직임에 의해 야기되는 바닥진동을 제어 위한 동조질량감쇠기의 최적설계변수를 구하기 위하여 구조합성법(CMS : Component Mode Synthesis)을 제시했다. S. Pourzeynali와 S. Esteki (2009)는 지진하중을 받는 현수교에 동조질량감쇠기를 설치하여 최대 수직변위를 감소시킬 수 있음을 증명하였다. Elsa Caetano(2010) 등은 포르투갈에 있는 Pedro e Inês footbridge을 통해 실제 데이터를 측정하여 인간에 의해 유발되는 진동을 제어하는 방법 등을 연구하였다. Zhiqiang Zhang(2011)은 경기장 복도의 인간의 보행에 의한 연직방향 공진현상을 연구하였고 공진에



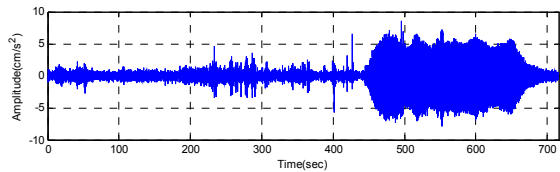
(a) P사 사옥에 설치된 TMD(횡방향 진동제어용)



(b) 밀레니엄브리지 하부에 설치된 TMD(수직진동제어용)
그림 1 국내외 동조질량감쇠기 설치 사례



(a) 12층 피트니스 센터

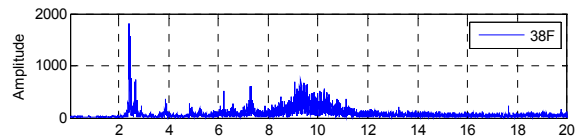


(b) 38층 바닥
그림 2 가속도 시간이력

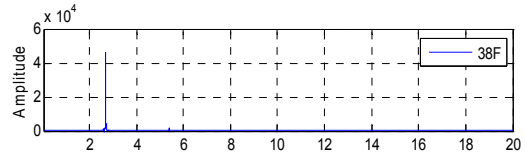
의한 진동을 감소시키기 위하여 동조질량감쇠기를 설계하였다. 또한 영국의 밀레니엄 브릿지에도 보행하중에 의한 수직진동을 제어하기 위한 동조질량감쇠기가 설치되어 있다.

하지만 기존 진동사고 사례 및 이에 대한 해결방안으로 제시된 연구 및 제진장치 설치사례는 대부분 진동이 발생한 위치의 진동 크기를 줄이기 위한 방안으로 국부적인 진동이 구조물과의 공진에 의해 전체 진동으로 발전하는 등 에 대한 연구는 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 서울시 광진구에 소재한 39층 구조물에서 발생한 연직방향 진동사고의 해결 방안으로 최상



(a) 일반적인 운동에 따른 주파수 경향



(b) 메트로놈 군무에 따른 주파수 경향

그림 3 주파수 분석결과

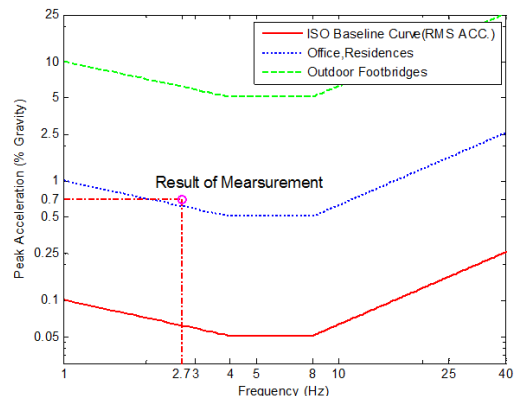


그림 4 ISO2631-2(1989) 사용성 기준 및 계측결과

층에 연직형 동조질량감쇠기 설치를 위한 설계 및 해석을 통한 진동저감 효과를 검토하였다.

1.2 국내 고층 구조물의 이상 진동 사고

지난 2011년 7월 5일 오전 10시경 서울시 광진구에 소재한 39층 높이의 고층 구조물에서 발생한 공진현상으로 비롯된 이상 진동사례로 인하여 2일간 폐쇄 조치된 후 영업이 재개되었다. 이후 사고원인 규명을 위한 진동발생 시연을 통해 그림 2, 3과 같이 12층 피트니스 센터에서 사건 당시 진행던 리듬운동에 의한 수직진동이 건물의 고유진동과 일치되어 일어난 공진현상이 원인이 밝혀졌다.

시연을 통해 계측된 최대가속도는 7cm/sec^2 로 건물을 사용함에 있어 약간의 불편감을 유발할 수 있는 수준이고, 이를 변형으로 환산하면 0.25mm 이하로 구조 안전성에는 문제가 전혀 없는 수준이다. 하지만 진동에 따른 인체의 진동 반응을 규정하고 있는 ISO 2631-2(1989)에 따라 사용성을 평가한 결과, 그림 4와 같이 사무용도 구조물의 사용성을 다소 초과하는 것으로 확인되었다.

2. 동조질량감쇠기 설계

1.2절에서 기술한 바와 같이 연직방향의 이상 진동사고가 발생한 건물의 경우, 구조적 안전성에는 문제가 전혀 없지만, 사용성에서는 대부분의 사람이 인지하는 수준으로 거주 시 불안감 등을 줄 수 있는 수준임을 확인하였다. 따라서 이에 대한 해결방안으로 진동사고를 유발한 사무동 12층 바닥에 진동저감장치를 설치하여 해당층에 대한 진동을 저감시키는 방안과, 대상 구조물의 옥탑층에 제진장치를 설계하는 방안이 있다. 이중 첫 번째 방법은 대상층에 대한 국부적인 진동을 저감하는데는 효과가 있지만, 설치층이 아닌 다른 부분에서 진동이 유발될 때에는 전혀 효과를 발휘하지 못하는 단점이 있다. 따라서 연직방향 진동수인 2.7Hz에 해당하는 진동에 대해 구조물 전체의 진동을 저감하는 두 번째 방법이 해결방안으로 타당할 것으로 판단하였고, 이를 위한 동조질량감쇠기 설계를 수행하였다.

2.1 설계 절차

동조질량감쇠기의 설계는 대상 구조물의 진동수, 감쇠비, 대상하중을 선정하고 그에 따른 성능 수준을 결정하는 것이다. 구조물의 해석이 완료되면 동조질량감쇠기를 설치할 위치를 정하고 그에 따른 1차 모드 질량을 파악한다. 1차 모드 질량은 보통 말하는 지진해석 시 말하는 유효 1차 모드 질량과 다르며, 오직 동조질량감쇠기 설계를 위한 모드 질량인 것에 유의해야 한다. 이때 구조물의 1차 모드는 동조질량감쇠기가 설치된 층에 대하여 정규화하여야 하며, 1차 모드 질량은 모드 구조물의 총질량 1차 모드 벡터의 관계에 의해 결정된다. 1차 모드 질량이 구해지면 질량비를 결정해야 하는데, 보통 동조질량감쇠기의 질량은 제어 대상 모드 질량의 1%내외로 결정하며 질량비에 따라 감쇠기의 강성과 감쇠가 결정되므로 질량비를 적절히 결정하는 것이 중요하다. 동조질량감쇠기의 질량비가 결정되면 감쇠기의 고유진동수 및 감쇠비를 구할 수 있다.

2.2 연직방향 진동모드 평가 및 참여질량 추출

동조질량감쇠기를 설치할 대상 건물은 연직방향으로 공진이 발생하였을 때 상층부로 갈수록 진동이 증폭된다. 따라서 건물의 최상층에 동조질량감쇠기를 설치하는 것이 진동을 가장 효과적으로 줄일 수 있는 방법으로 본 연구에서는 실제로 설치가 가능한 40층에 설치하는 것을 목표로 동조질량감쇠기를 설계하였다.

실제 동조질량감쇠기의 질량 산정을 위해서는 먼저 설치

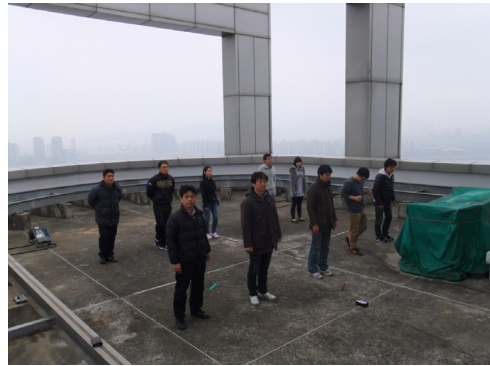


그림 5 옥상층 10인 가진 실험(2.7Hz 제자리뛰기)

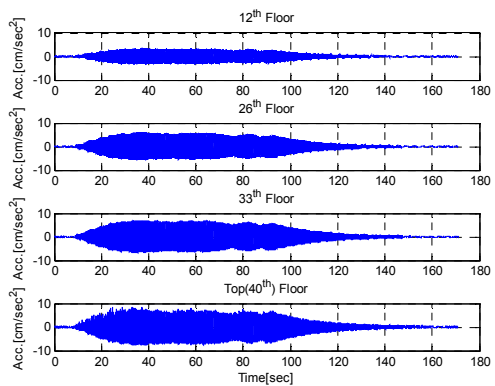


그림 6 옥상층 10인 가진 실험에 따른 층별 가속도 응답

대상 구조물의 총 질량과 제어대상 진동모드의 질량을 산정하는 것이 중요하며, 이를 위해서는 설계대상 구조물의 총 질량과 제어대상 모드의 모드벡터를 산정하여야 한다. 먼저, 구조물의 총질량은 대상 구조물의 실제 질량을 사용하는 것이 가장 확실한 방법이나, 실제 구조물의 질량을 파악하는 것은 현실적으로 불가능하므로, 구조해석 모델에 적용된 하중을 바탕으로 산정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 대상구조물에 대한 구조계산서 및 설계도면을 바탕으로 범용 구조해석 프로그램인 SAP200을 사용하여 구축한 해석모델에서 총 질량을 산정하였다. 사용한 해석모델의 경우, 각 절점에 입력된 질량을 추출할 수 있으며, 이 추출 결과를 바탕으로 대상구조물의 사무동 총 질량이 47,777ton 임을 확인하였다.

모드벡터 또한 통상적으로 구조해석모델에서 파악할 수 있는 모드응답을 사용하고 있으나, 제어 대상 모드가 횡방향이 아닌 연직방향 모드라는 특수성에 의해 해석결과와 실제 응답의 차이를 보일 수 있어 이에 대한 검증을 위한 현장 가진실험을 수행하였다.

실험은 그림 5와 같이 40층(제진장치 설치층)에서 10명의 사람이 연직방향 모드인 2.7Hz로 제자리 뛰기를 하고,

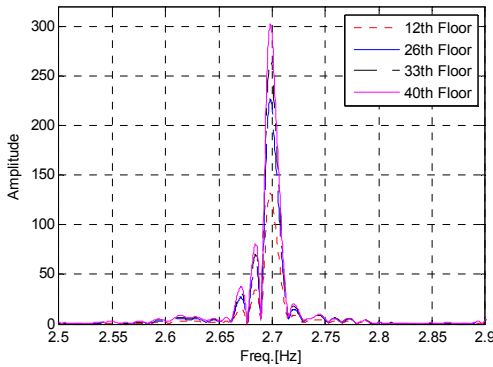


그림 7 옥상층 10인 가진 실험 주파수 분석 결과

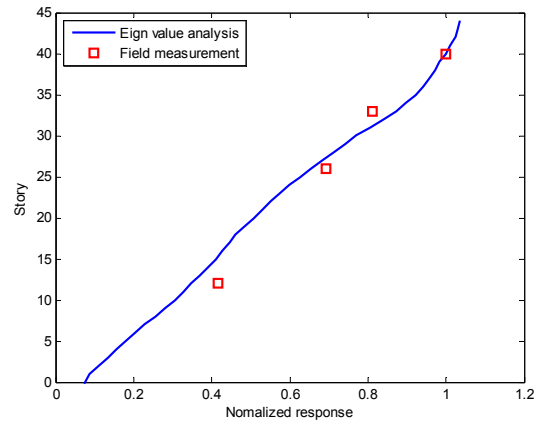


그림 8 해석 및 현장실험에 따른 연직방향 모드 형상

가속도계를 12층, 26층, 33층, 40층에 설치하여 계측한 후, 그에 따른 모드 형상을 추출하는 방법으로 수행하였다.

그림 6은 실험을 통해 계측한 12층, 26층, 33층, 40층의 가속도 시간이력으로서, 가진한 40층을 기준으로 하부층으로 진동이 전달되어 12층에서는 최대가속도가 3cm/sec²로 발생하는 것을 확인하였다.

계측된 가속도 응답을 사용하여 주파수 분석 결과를 통해 그림 7과 같이 선형 조사 및 계측을 통해 확인된 대상 건물의 연직방향 1차 모드의 주파수와 동일함을 확인하였고, 공진현상에 따른 진동 전달도 확인하였다.

확인된 계측 층별 가속도 응답과 구조해석 모델의 모드 변위 응답을 40층을 기준으로 정규화하여 그림 8에 나타내었다. 그림에서와 같이 실제 계측을 통해 확인한 모드형상과 해석을 통해 확인한 모드형상이 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

추출한 대상구조물의 총질량(m)과 연직방향 모드벡터(ϕ_n)를 사용한 모드 참여질량 산정은 식 (1)을 사용할 수 있다.

$$M_n = \phi_n^T m \phi_n \quad (1)$$

여기서, M_n 은 구조물의 n 차 모드질량이며, ϕ_n 은 n 차 모드벡터, m 은 건물의 총 질량이다.

이때, 설치위치를 기준으로 모든 절점을 정규화한 모드 벡터를 사용하는 경우에는 식 (1)을 다음과 같이 변환하여 사용할 수 있다.

$$M_n = (\Phi_n^2)^T m \quad (2)$$

식 (2)를 사용하여 대상 구조물의 사무동 총 질량인 47,777ton과 정규화된 모드 형상을 사용하여 산정한 연직방향 1차 모드의 참여질량은 8,529ton으로 17.85%의 질량참

여율을 갖는 것을 확인하였다.

2.3 동조질량감쇠기 최적설계

2.2절을 통해 확인한 연직방향 모드인 2.7Hz 진동수 제어를 위한 동조질량감쇠기 설계의 중요한 설계변수는 질량비, 진동수비, 감쇠비 등이 있으며, Den Hartog(1956)는 조화하중을 받는 구조물에 설치되는 동조질량감쇠기에 대한 최적설계변수를 식 (3), 식 (4)와 같이 제안하였으며, 풍하중 또는 공진하중에 따른 횡방향 제어를 목적으로 설계시 사용되고 있다.

$$f_{TMD} = \frac{\omega_{TMD}}{\omega_1} = \frac{1}{1+\mu} \quad (3)$$

$$\xi_{TMD} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (4)$$

여기서, ω_{TMD} , ω_1 , μ 는 각각 동조질량감쇠기 고유진동수, 구조물 1차 모드 진동수, 동조질량감쇠기의 질량비를 나타낸다.

동조질량감쇠기의 질량, 강성, 감쇠는 식 (3)와 식 (4)를 통해 파악된 최적진동수비와 감쇠비를 적용하여 다음 식 (5)을 사용하여 산정할 수 있다.

$$m_{TMD} = \mu m_1 \quad (5(a))$$

$$k_{TMD} = \omega_{TMD}^2 m_{TMD} \quad (5(b))$$

$$c_{TMD} = 2\xi_{TMD} \omega_{TMD} m_{TMD} \quad (5(c))$$

식 (3)와 식 (4)를 사용하여 최적설계변수를 산정한 후, 그에 따른 응답저감성능을 확인하는 것이 일반적이나, 본

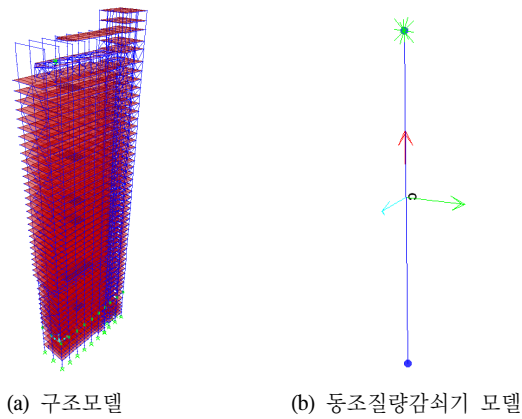


그림 9 해석모델

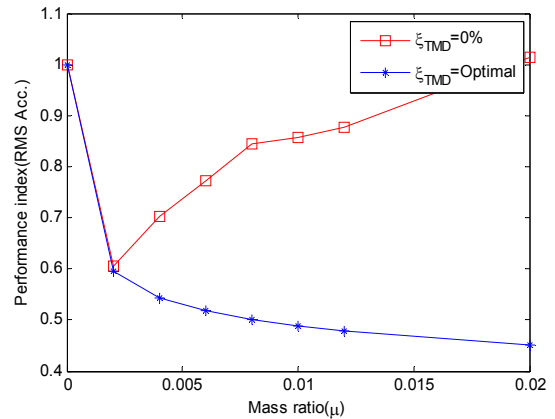


그림 10 질량비별 RMS가속도 성능지수

연구에서는 실제 구조해석모델을 사용하여 각각의 설계변수에 대한 최적값을 도출하기 위한 변수해석을 수행하였다. 변수해석은 그림 8(a)와 같이 구조해석 모델을 사용한 비선형 시간이력 해석법으로 수행하였으며, 백색잡음을 사용한 지반가진을 하였다. 일반적으로 공진하중을 가하여 나타난 최대변위응답의 진동수축에 대한 면적은 백색잡음에 대한 RMS응답으로 나타내며, 동조질량감쇠기의 최적 진동수비와 최적 감쇠비를 찾는 경우에도 많이 이용된다. RMS 지수는 일정한 시간(T)동안 파형의 제곱평균에 제곱근을 씌운 값으로, 진동을 측정할 때 많이 사용되며 파형의 시간에 대한 변화량을 고려하고, 진동의 파괴적 능력을 나타내는 에너지량(power)과 직접 관련된 진폭을 표시하므로, 진동크기의 표현에 가장 널리 사용된다(식 (6) 참조).

$$u_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (6)$$

여기서, u 는 변위응답, T 는 지속시간, u_s 는 변위응답의 RMS값을 나타낸다.

해석을 위한 동조질량감쇠기 모델은 그림 8(b)와 같이 질량, 스프링, 감쇠로 이루어져 있으며, 질량과 강성은 절점과 임의의 부재를 사용하여 적용할 수 있으며, 감쇠는 해석프로그램에서 지원하고 있는 비선형연결요소 중 Damper 요소를 사용하여 적용하였다. 이러한 각각의 요소를 사용한 동조질량감쇠기 설계절차는 다음과 같다.

- 1) 감쇠기 설치 위치에 수직방향으로 이격된 임의의 절점을 생성한 후, 생성된 절점에 질량을 입력한다. 이때, 생성한 절점의 이동은 연직방향으로만 거동하도록 설정한다.
- 2) 구조물의 절점과 질량이 입력된 절점사이에 설계된

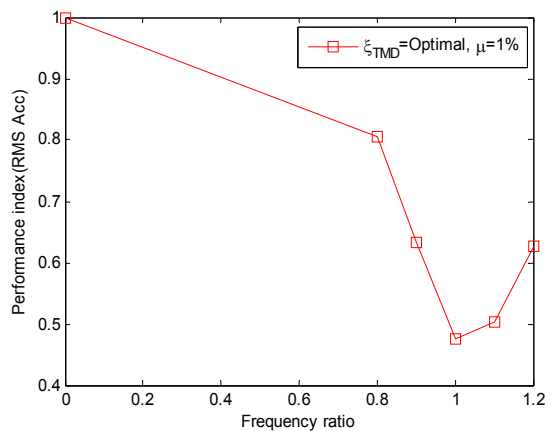


그림 11 진동수비 별 RMS가속도 성능지수

강성(k_{TMD} , 식 6(b))값을 갖는 임의의 기둥부재를 연결한다.

- 3) 비선형연결요소 중, 점탄성감쇠기 설계요소를 사용하여 설계된 감쇠(c_{TMD} , 식 6(c))를 입력한다.

그림 10은 질량비에 따른 비선형 시간이력해석을 통해 파악한 RMS가속도 응답에 대한 성능지수를 나타낸 것이다. 먼저 감쇠비가 0인 동조질량감쇠기는 질량비 0.2%까지 응답을 감소시키나 이후 질량비 증가에 따른 응답저감 성능이 저하되어 2% 질량비에서는 감쇠기 설치 전 응답을 초과하는 것으로 나타났다. 하지만 각각의 질량비별로 최적 감쇠비를 갖는 동조질량감쇠기의 경우 질량비 증가에 따라 응답을 계속 감소시키고 있음을 알 수 있다. 구조물의 감쇠가 0.3%로 매우 작은 관계로 0.2%의 질량비를 가지는 TMD로도 응답을 약 60% 수준으로 감소시킴을 알 수 있다. 0.8%의 질량비에서 50% 응답저감성능을 나타낸 후, 질량비 증가에 따른 큰 성능차는 발생하지 않음을 알 수 있다. 그림 11은 질량비가 1%이고 식 (4)에 따른 최적 감쇠비를

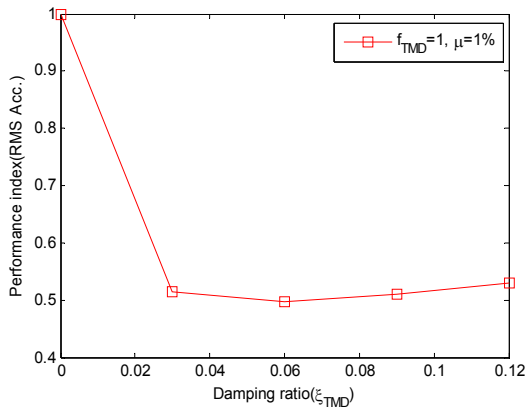


그림 12 감쇠비 별 RMS가속도 성능지수

가지는 동조질량감쇠기의 진동수비에 따른 RMS가속도의 성능지수를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 진동수비가 1에 가까울수록 큰 응답감소효과를 가져옴을 확인하였다.

그림 12는 TMD 감쇠비의 변화에 따른 RMS가속도 성능지수를 보여준다. 감쇠비가 약 3%일 때까지 RMS가속도 값이 급격하게 감소하다가 6% 정도까지 완만하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 6% 이후에는 아주 작은 변화율로 다시 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 최적감쇠비가 기존의 연구와 동일한 수준인 6%일 때 응답저감성능이 가장 크게 나타남을 보여준다.

2.4 감쇠비 및 질량비 별 성능검토

설계된 동조질량감쇠기를 대상건물의 해석모델에 반영하여 시간이력해석을 수행하였다. 먼저 건물의 공진 주파수인 2.7Hz 영역에서의 응답을 확인하고자 해석모델에 백색잡음을 입력하여 동조질량감쇠기가 설치된 구조물의 주파수 영역에서의 응답 변화를 확인하였다.

그림 13은 동조질량감쇠기 설치 전의 응답과 설치 후의 감쇠비에 따른 응답이다. 동조질량감쇠기가 설치되지 않았을 때 공진하중인 2.7Hz에서 응답이 크게 증폭하며 감쇠가 없는 동조질량감쇠기를 설치했을 때는 2.7Hz 영역에서의 응답이 크게 감소하지만 양쪽에 피크가 발생하여 다른 주파수 영역대의 응답에 영향을 준다. 위에서 구한 최적 감쇠비인 감쇠비 6%를 적용한 동조질량감쇠기는 무감쇠 시스템인 경우에 비하여 2.7Hz에서의 응답이 약간 증가하지만 전체적으로 고르게 응답이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 질량비를 다르게 하여 백색잡음에 대한 전달함수를 보여준다. 질량비 0.47% 이상을 가지는 경우, 제어 성능을 의미하는 전달함수의 증폭비에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

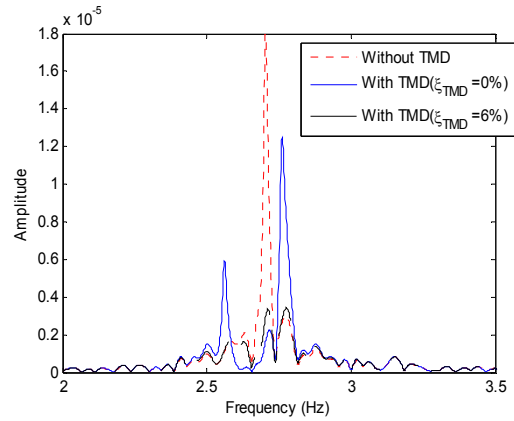


그림 13 동조질량감쇠기 감쇠비에 따른 응답특성

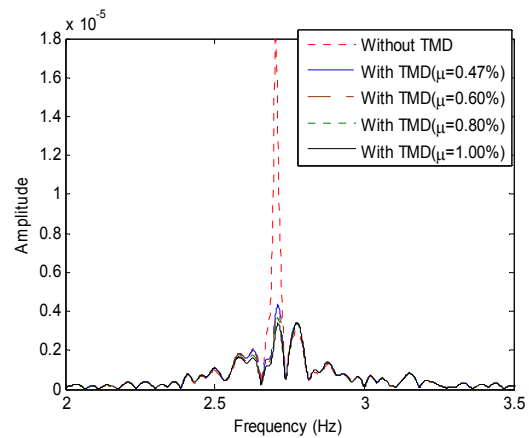
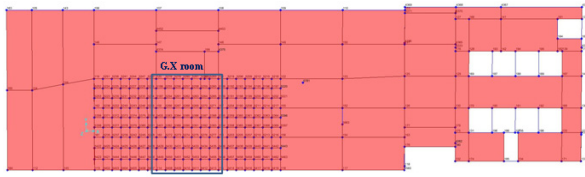


그림 14 질량비에 따른 동조질량감쇠기 설치 전 후 FFT 해석결과

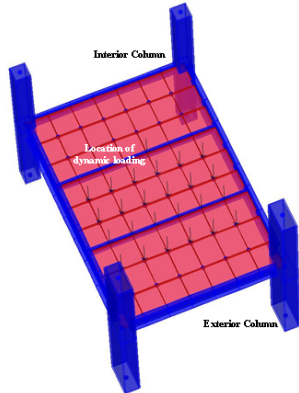
3. 동조질량감쇠기 설치에 따른 연직진동 저감 효과

2장의 동조질량감쇠기 설계 및 최적설계변수 해석은 백색잡음을 사용한 지반가진을 하여 수행하였다. 하지만 테크노마트 진동사고는 12층 피트니스 센터에서 이루어진 집단리듬운동에 따른 공진현상이 원인이었으므로, 실제 동조질량감쇠기의 진동저감 효과를 평가하기 위해서는 사고당시와 동일한 형태의 가진을 수행하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 수치해석모델 12층 피트니스 센터의 G.X.룸 슬래브 요소를 그림 15(a)와 같이 세분하여 절점을 생성한 후, 2.7Hz의 성분을 갖는 하중을 생성하여 총 25개의 절점(그림 15(b))에 입력하였다.

이러한 해석모델 및 가진방법을 통해 동조질량감쇠기 설치에 따른 응답저감성능을 검토하였다. 실제 설치하고자 하는 구조물에 대한 제진장치 설치에 따른 안전성 검토를 수행한 결과, 최대 50ton 이하의 질량에 대해서만 추가의 구조보강 없이 설치가 가능한 것으로 확인되었다. 또한 실



(a) 12층 평면 및 G.X.룸 요소분할



(b) 하중 가진 위치

그림 15 연직방향 해석모델

제 설치하는 제진장치의 경우, 연직 및 수평 진동을 동시에 제어할 수 있는 복합형 제진장치로 계획하고 있다. 수평방향 1차 모드 질량은 약 12,000ton으로 수직방향 1차모드 질량인 8,529ton보다 크고, 구조물의 감쇠비도 1%로 크고, 하중도 공진하중이 아닌 바람하중이어서 양방향 모두 제진효과를 기대하기 위해서는 수평방향의 질량이 더 큰 것이 효율적이라 판단하였다. 본 연구에서는 수평방향으로 50ton, 수직방향으로 40ton의 질량체가 움직이는 것으로 계획하였으며, 40ton질량체 설치에 따른 질량비는 0.47%이다.

따라서 적용 가능한 질량에 따른 응답저감 성능 확인이 필요하여, 동조질량감쇠기 설치에 따른 주 구조물의 감쇠비 증가량을 검토할 수 있는 식 (7)과 그에 따른 가속도 응답비를 산정할 수 있는 식 (8)을 사용하여 검토하였다.

$$\xi_{eq} = \xi_0 + \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{2+\mu}} \quad (7)$$

$$R_u = \frac{\xi_0}{\xi_0 + \xi_{eff}} \quad (8)$$

여기서, ξ_0 는 설치 대상 구조물의 감쇠비로, 0.3%이다.

식 (7)을 바탕으로 동조질량감쇠기의 질량비가 1%인 경우와 0.47%인 경우의 감쇠비 증가량은 각각 3.8%, 2.7%임을 알 수 있고, 식 (8)을 통해 기존구조물의 진동에 대한 응답비는 각각 7%, 10%임을 알 수 있다. 이러한 검토를 통해

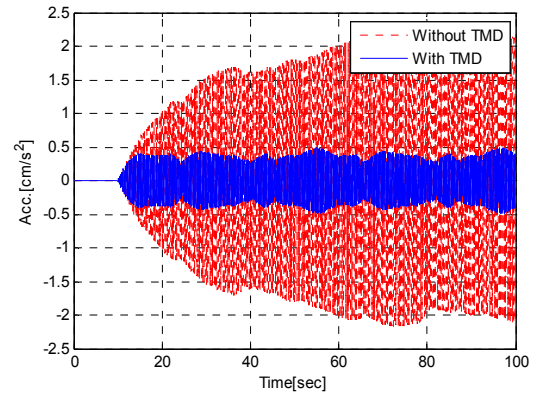


그림 16 동조질량감쇠기 설치 전·후 가속도응답 비교(12층)

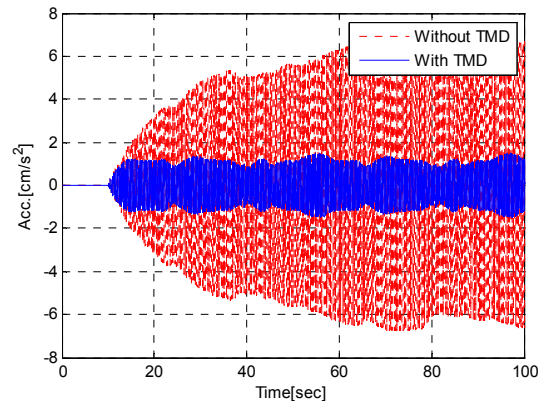


그림 17 동조질량감쇠기 설치 전·후 가속도응답 비교(38층)

40ton 용량($\mu=0.47\%$)의 동조질량감쇠기 설치를 통해서도 2.7Hz 성분의 연직방향 진동을 1/10 수준으로 감소시킬 수 있음을 확인하였고, 이에 대한 정확한 검토를 위해 해석을 수행하였다.

그림 16과 그림 17은 동조질량감쇠기 설치 전·후, 12층, 38층의 가속도 응답을 비교한 것이다. 12층 가속도 응답은 그림 16과 같이 동조질량감쇠기 설치 전의 최대 가속도 응답이 2.16cm/s^2 이고, 설치 후의 최대가속도 응답이 0.49cm/s^2 으로 약 77.3% 진동저감 효과가 나타난 것을 확인할 수 있다.

38층 가속도 응답인 그림 17과 같이 동조질량감쇠기 설치 전 최대 가속도 응답이 6.99cm/s^2 이고 동조질량감쇠기 설치 후의 최대 가속도 응답이 1.49cm/s^2 으로 12층과 거의 같은 78% 수준으로 진동이 저감되었다. 또한, 38층의 최대 가속도 응답의 크기는 12층보다 3.3배 이상 큰 것을 확인할 수 있는데 이는 연직방향 응답이 공진현상에 의해 상부층으로 갈수록 크게 증폭되었기 때문이다.

그림 18은 동조질량감쇠기 설치 전·후의 층별 가속도 응답을 비교한 것으로, 최상층에 설치한 동조질량감쇠기에 따른 구조물의 응답이 모드형상에 비례하여 모든 층에서

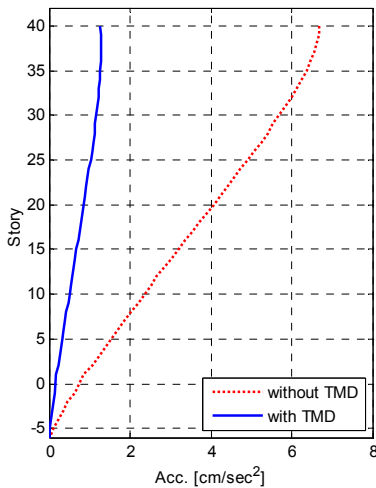


그림 18 동조질량감쇠기 설치 전·후 층별 가속도 응답

크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서 설계한 동조질량감쇠기를 설치함으로써 진동사고가 발생한 12층 외에 대상 건물의 다른 위치나 다른 층에서 발생할 수 있는 연직진동에 대해서도 모두 제어가 가능하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론


본 연구는 인간의 집단운동에 의한 건물의 연직방향 공진형상에 대한 진동제어방안으로 동조질량감쇠기에 대하여 설계하고 개선효과를 확인하였다. 이를 위하여 진동제어를 위한 동조질량감쇠기를 설계하고 상용 구조해석 프로그램을 이용하여 모델링하여 진동제어 효과를 평가하였다. 본 연구에서 얻은 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 연직방향 진동제어용 동조질량감쇠기의 설계변수인 질량비, 진동수비, 감쇠비에 산정을 위한 해석을 통해 대상 모델에 대한 최적 설계값은 질량비가 1%, 진동수비는 1, 감쇠비는 6%임을 확인하였다.
- 2) 대상구조물에 실제 설치 가능한 제진장치의 질량비인 0.47%(40ton)와, 진동수비 1, 감쇠비 6%를 갖는 동조질량감쇠기를 설치한 해석모델을 구축하여 시간이력 해석을 수행하였다. 12층의 동조질량감쇠기 설치 전의 가속도 응답과 설치 후의 가속도 응답을 비교한 결과, 동조질량감쇠기 설치 전의 최대 가속도 응답은 2.16cm/s^2 이고 설치 후의 최대가속도 응답은 0.49cm/s^2 으로 약 77.3% 진동저감 효과가 나타난 것을 확인하였다.
- 3) 38층의 동조질량감쇠기 설치 전의 가속도 응답과 설

- 치 후의 가속도 응답을 비교한 결과 동조질량감쇠기 설치 전의 최대 가속도 응답은 6.99cm/s^2 이고 동조질량감쇠기 설치 후의 최대 가속도 응답은 1.49cm/s^2 으로 12층과 거의 같은 78% 수준으로 진동이 저감되었다.
- 4) 본 연구에서 설계한 동조질량감쇠기를 실제 건물에 반영할 경우, 진동사고가 발생한 12층 외에도 대상 건물의 모든 층에서 연직방향 진동 제어가 모두 가능하다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. M.I. Friswell, J.E. Mottershead(1995), Finite Element Model Updating in Structural Dynamics, KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
2. T.T. Soong, G.F. Dargush(1997) Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, JOHN WILEY&SONS.
3. Elsa Caetano, Álvaro Cunha, Carlos Moutinho, Filipe Magalhães(2010), Studies for controlling human-induced vibration of the Pedro e Inês footbridge, Portugal. Part 2: Implementation of tuned mass dampers, Engineering Structure 32(2010), pp.1082-1091.
4. C.C. Chang(1999), Mass dampers and their optimal designs for building vibration control, Engineering Structure 21(1999), pp.454-463.
5. J.R. Wu, Q.S. Li(2004), Finite element model updating for a high-rise structure based on ambient vibration measurements, Engineering Structure 26, pp.979-990.
6. Ji Young Kim, Eunjong Yu, Dae Young Kim, Sang-Dae Kim(2009), "Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level" Engineering Structure 31(2009), pp.2086-2096.
7. Lenzen. K.H.(1966), "Vibration of Steel Joist Concrete Slab Floors," Engineering Journal, Vol.3, No.3, pp.133-136.
8. Allen, D.E.(1990), "Building vibrations from human activities," ACI Concrete International: Design & Construction, Vol.12, No.6, 66-73.
9. Naeim, F.(1991), "Design Practice to Prevent Floor Vibrations", Steel Tips, Structural Steel Educational Council.
10. Architectural Institute of Japan(1991), "Guidelines for the evaluation of habitability to building vibration," pp.1-10.
11. Murray, T.M., Allen, D.E., and Ungar, E.E.(2003), "Floor Vibrations Due to Human Activity," Design Guide Series11,

- AISC, 2003.
12. Murray, T.M.(2001), "Tips for Avoiding Office Building Floor Vibrations," Modern Steel Construction.
 13. International Organization for Standard(1997), "Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole body vibration- part 1: General requirements", (ISO) 2631-1: 1997(E).
 14. International Organization for Standard(2003), "Mechanical vibration and shock -Evaluation of human exposure to whole body vibration- part 2: Vibration in buildings", (ISO) 2631-2:2003(E).
 15. 이상현, 우성식, 정란, 조승호, 최기영(2007), 상용 구조해석 프로그램을 이용한 TMD가 설치된 RC 공동주택 구조물에 대한 모델링 및 수치해석, 대한건축학회 학술발표대회논문집, pp.349-352.
 16. 김기철, 최원호, 이동근(1998), 사람의 움직임으로 야기되는 건물 바닥판의 진동제어를 위한 동조질량감쇠기의 적용, 한국지진공학회 추계학술발표회논문집, pp.266-273.
 17. 김기철, 이동근(2001), 보행하중에 의한 구조물진동의 효율적인 해석, 한국지진공학회논문집, 제5권, 제1호, pp. 21-29.
 18. 대한건축학회(2011), 서울시 광진구 테크노마트 건축물 진동원인 규명조사 및 대책수립 연구, 최종보고서. 

[담당 : 황재승 편집위원]