

지진응답제어를 위한 동조질량감쇠기의 최적설계지수 (단단한 지반)

Optimal Parameter of Tuned Mass Damper for Controlling Seismic Response

이 정 우* 우 성 식** 이 상 현*** 정 란****
Lee, Jung-Woo Woo, Sung-Sik Lee, Sang-Hyun Chung, Lan

Abstract

This study performed numerical analysis for obtaining optimal frequency and damping ratio of tuned mass damper (TMD) using 20 seismic loads measured at rock site. The structures of 1~2 second natural period were considered, and optimal frequency and damping ratio were estimated for different mass ratio in terms of displacement and absolute acceleration response control. Numerical results showed that the values of the optimal parameters were different those from previous study by Hartog.

1. 서론

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)의 개념은 Frahm(1909년)에 의하여 배의 Rolling 거동을 감소시키기 위하여 최초로 적용되었으며, 그 후 Ormondroyd와 Den Hartog(1928)에 의해 처음 논문으로 발표되었다. Den Hartog는 그의 저서 「Mechanical Vibration」(1940)에 최적 동조 진동수와 감쇠비에 대하여 기술하였다.¹⁾

이 최초의 이론은 조화하중을 받는 비감쇠 단자유도 시스템에 기반한 것이며, 그 후 Waruton(1982), Ioi and Ikeda(1978) 등에 의해 다양한 하중에 대한 비감쇠/감쇠 다자유도 시스템에 대한 최적설계변수에 대한 많은 연구가 수행되었다.²⁾ 최근에는 TMD의 지진응답제어성능을 평가하기 위한 여러 연구가 수행되었으며, Rana와 Soong(1990) 등은⁴⁾ 조화하중을 받는 단자유도 및 다자유도 구조물에 Hartog의 최적설계변수를 사용해 동조질량감쇠기의 파라미터 연구를 수행하였다. Sadek(1997)등³⁾은 구조물의 감쇠가 존재하는 경우의 지진하중에 대한 최적 진동수비와 감쇠비의 값을 수치 해석을 통해 제안하였다. 하지만 이러한 연구의 대부분은 제한된 조건, 즉 특정 주기와 작은 감쇠비를 가지는 탄성 구조물에 조화하중 혹은 백색잡음 등을 가한 경우에 대한 해석결과에 근거하므로, 실제 지진하중을 받는 동조질량감쇠기에 대한 최적진동수비와 최적 감쇠비에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 10~15층의 공동주택에 대한 진동저감장치로서의 동조질량감쇠기의 지진응답제어를 위한 최적설계변수 산정을 위해서 단단한 지반에서 계측된 20개의 지진하중을 사용하여 수치해석

* 정회원, 단국대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 단국대학교 대학원 박사과정

*** 정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 전임강사

**** 정회원, 단국대학교 건축대학 건축공학과 교수

을 수행하였고, 수치해석을 통해 파악된 최대 가속도 및 변위에 대한 최적 진동수비와 감쇠비를 Hartog가 제안한 최적변수와 비교하였고, 주기에 따른 응답저감 효과를 검토하였다.

2. 동조질량감쇠기의 최적설계변수

기존 동조질량감쇠기의 설계는 Hartog가 제안한 최적변수를 사용한 설계가 대부분을 차지하고 있으나, 지진하중에 대한 응답저감을 위한 각 설계변수별 동조질량감쇠기의 성능변화를 파악하여, 기존에 제안된 최적설계지수의 고찰 및 검증이 필요하다.

이때 동조질량감쇠기의 설계변수로는 동조진동수비(f), 질량비(μ), 감쇠비(ξ) 등을 들 수 있으며, Hartog¹⁾는 조화하중형태의 하중에 대한 변위응답에 대해서 동조진동수비, 감쇠비에 대해 다음 식 1), 2)와 같은 최적지수를 제안하였다.¹⁾

$$f_{TM\mathcal{D}} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{2-\mu}{2}} \quad (1)$$

$$\xi_{TM\mathcal{D}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \sqrt{\frac{2}{2-\mu}} \quad (2)$$

여기서, $\mu(m_d/m_s)$ 이고, m_d 는 동조질량감쇠기의 질량, m_s 는 구조물의 질량이다.

그러나 Hartog가 제안한 최적 동조진동수비, 감쇠비등은 조화하중에 대한 최적지수이므로 실제지진 하중에 대한 최적지수로 사용하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 실제지진하중을 사용하여 변위제어를 위한 최적 진동수비와 감쇠비를 질량비별로 도출하였고, 5%의 감쇠비를 갖는 구조물에 설치된 동조질량감쇠기의 변위와 가속도의 최대응답(Peak Response) 감소효과를 평가하였다.

3. 수치해석 결과

본 연구에서는 수치해석을 위해 10~15층 높이의 구조물의 1차 모드 고유주기를 1~2초 사이로 선정하고, 그에 따른 최적 진동수비와 감쇠비 산출을 위해서 20개의 단단한 지반에서 계측된 지진데이터를 사용하여 얻은 평균하여, 질량비 1%와 2% 일 때 최적지수를 파악하였다. 동조질량감쇠기는 동조진동수비의 범위를 0.8~1.2사이로 하여 0.01씩 증가시켰으며, 감쇠비는 1~14% 범위로 0.002%씩 증가시켰다.

3.1 주기별 최적설계지수 비교

3.1.1 1% 질량비를 갖는 동조질량감쇠기

그림 1은 동조진동수비별 최적 감쇠비의 분포를 나타낸 것이다. 그림 1에서 진동수비가 1에 가까워질수록 최적 감쇠비는 작아지고, 1에서 멀어질수록 최적감쇠비는 증가하는 경향을 가지는 것을 알 수 있다.

그림 2, 3은 최대변위 및 최대가속도에 대한 최적 진동수비와 최적 감쇠비의 경향을 나타낸 것으로 식 (1), (2)의 최적지수와 비교하였다. 그림 2, 3과 같이 가속도 및 변위에 대한 응답성능지수에 대해서 최적 진동수비의 경우, 구조물의 주기에 따른 편차는 있으나 대체적으로 기존의 연구와 일치된 경향을 가진다. 감쇠비 분포는 기존연구보다 작은 값을 가지고 주기에 따른 편차가 매우 큰 것을 알 수 있다. 따라서 단단한 지반에서의 1% 질량비를 갖는 동조질량감쇠기의 최적진동수비는 기존연구의 최적값을

사용하는 것은 문제가 없으나, 감쇠비는 기존의 연구결과 보다 작은 값을 가져야 함을 알 수 있다.

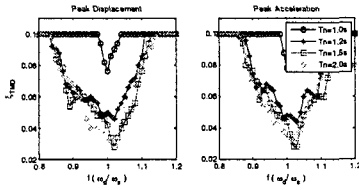


그림 1. 진동수비에 따른 최적감쇠비 분포 (질량비 1%)

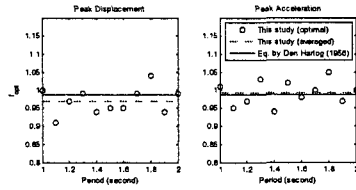


그림 2. 주기별 최적진동수비 분포 (질량비 1%)

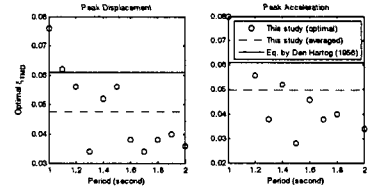


그림 3. 주기별 최적감쇠비 분포 (질량비 1%)

3.1.2 2% 질량비를 갖는 동조질량감쇠기

2% 질량비를 갖는 동조질량감쇠기는 그림 4와 같이, 1% 질량비보다 각각의 주기와 동조진동수비에 대해서 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 구조물의 주기에 따라 1에 가까운 특정 진동수비에서 최적 감쇠비는 작은값을 가지고 이 진동수비와의 차가 증가할수록 최적감쇠비는 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 5, 6에 나타난 최대 응답에 대한 최적진동수비 분포 경향은 1%질량비의 경우와 같이, 기존 연구 결과와 유사한 경향을 보이고 있으나, 감쇠비는 질량비증가에 따라 더 큰 편차를 갖는 것을 알 수 있다.

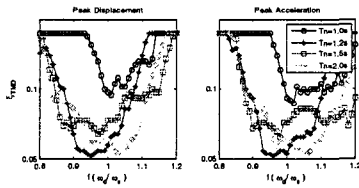


그림 1. 진동수비에 따른 최적감쇠비 분포 (질량비 2%)

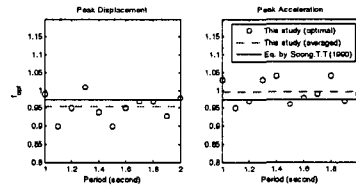


그림 2. 주기별 최적진동수비 분포 (질량비 2%)

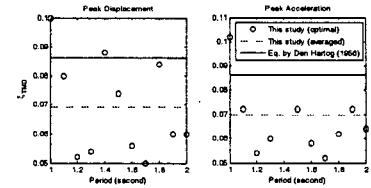


그림 3. 주기별 최적감쇠비 분포 (질량비 2%)

3.2 주기별 응답성능지수 비교

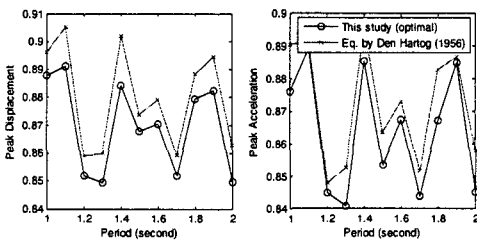


그림 7. 주기별 최대응답 저감효과 비교(질량비 1%)

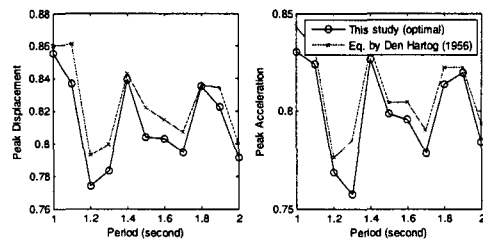


그림 8. 주기별 최대응답 저감효과 비교(질량비 1%)

수치해석을 통해 파악된 최적 진동수비 및 감쇠비와 기존 연구결과의 최적설계지수를 주기별로 최대변위와 최대가속도 응답성능에 대해서 비교하였고, 그에 따른 응답저감 효과를 그림 7과 8에 나타내

었다. 그림 7에서 나타나듯, 기존 연구결과에 의한 응답저감 효과는 주기에 따라 최소 10%에서 최대 14%를 나타내고 있으나, 수치해석을 통해 파악된 응답저감 효과는 2%이상 더 큰 성능향상을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 8은 질량비를 2%의 경우로 기존연구결과와 비교할 때, 전체적으로 응답저감효과가 향상된 것을 알 수 있다.

4. 결론

지진하중 저감을 위한 동조질량감쇠기의 최적 진동수비와 감쇠비 산정을 위해 20개의 실제 계측된 지진데이터를 사용한 수치해석 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 주기가 다른 구조물들과 동조질량감쇠기의 동조진동수비에 따른 최적감쇠비는 진동수비가 1인 부분에서 최소값을 갖고 동조진동수비가 1과 다른 값을 가지는 경우 큰 최적감쇠비가 필요한 것으로 나타났다.
- (2) 각 주기별 최대 변위와 가속도에 대한 최적 진동수비는 기존연구에 따른 최적진동수 식과 수치해석을 통해 파악된 진동수비 분포경향이 매우 유사한 것으로 나타났다. 하지만 감쇠비의 경우, 기존 연구결과에 비해 작은 값에서 최적화되는 것을 알 수 있다.
- (3) 수치해석을 통해 파악된 최적 설계변수를 최대 변위, 가속도에 대해 주기별로 응답저감효과를 비교한 결과, 기존연구의 최적설계변수보다 낮은 지수를 나타내었다. 따라서 지진하중에 대한 응답을 저감시키기 위해서는 각 주기별 최적 진동수비와 감쇠비를 개별적으로 산정하여야 하며, 그에 따른 동조질량감쇠기의 설계가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원이 위탁시행한 05 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호 : C105A 1050001-05A0505 -00110)에 의한 결과의 일부임.

참고문헌

1. Den Hartog J.P. Mechanical Vibrations, McGraw Hill: New York, 1956; 93-106.
2. T. T. Soong, and G. F. Dargush, Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, New York, John Wiley & Sons, 1997.
3. Fahim Sadek, Bijan Mohraz, Andrew W. Taylor and Riley M. Chung, "A Method of Estimating The Parameters of Tuned mass Dampers for Seismic Application", Earthquake Engng and Struct. Dyn, Vol. 26, pp. 617-635, 1997.
4. Rahul Rana, T. T. Soong, "Parametric study and simplified design of tuned mass dampers", Engineering Structures, 1998, Vol. 20, No. 3, pp. 193-204.
5. Tsai H. C., Lin G. C., "Optimum tuned mass dampers for minimizing steady-state response of support-excited and damped systems", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 22, 957-973, 1993.
6. P. Lukkunaprasit, A. Wanitkorkul, "Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes", Earthquake Engng Struct. Dyn. 2001, Vol. 30, 537-551.
7. Agrawal, A. K. and Yang J. N., "Semiactive control strategies for building subject to near-field earthquakes", Proceedings of SPIE, pp. 359-370, 2000.